

Beszámoló a T48888 sz. OTKA pályázat eredményeiről

Bevezetés

A kvantumfizikával kapcsolatos elméleti és gyakorlati kutatások köre az utóbbi egy-két évtizedben már jóval túlmutat a jelenségek pusztá leírásán, a vizsgálatok az egyedi kvantumos objektumok szintjén történő alkalmazások irányába tesznek lépéseket. Ezek egyike a kvantumos információfeldolgozás lehetséges megvalósítása, amelynek mind az informatikai oldala, mind pedig a tényleges fizikai megvalósítást illető kérdései kiemelkedően intenzív kutatási iránnyá léptek elő az utóbbi években. Ezzel összefüggésben alapvető, csak a kvantumrendszerekre jellemző igen erős korrelációk, azaz a kvantumos összefonódottság létrejötte és alkalmazhatósága különösen izgalmas terület. A kvantumos tulajdonságok kihasználásához az atomi mérettartományokban jelentkező tulajdonságok, azaz atomi, molekuláris vagy elektronok által megjelenített állapotok dinamikájának ismeretére van szükségünk.

Azok a fizikai rendszerek, amelyekben a kvantumos információfeldolgozás gyakorlati megvalósíthatósága reális eséllyel merül fel, leginkább a mindennapokból ismerős makroszkopikus és az atomi mikroszkopikus skála közé eső mérettartományba tartoznak. Ezeknek a *mezoszkopikus* rendszereknek a leírása a klasszikus fizika és a kvantummechanika közötti átmenetet képviseli, a kvantumos koherenciaképesség dinamikai eltűnéséről számot adó dekoherencia elmélet szolgáltatja a leginkább hatékony módszert a problémák elméleti kezelésére.

Az ilyen mérettartományba eső rendszerek közül nem egy ma már tervezhetően hozható létre, így az elméleti eredmények direkt mérésekkel ellenőrizhetők. Az atomok, a molekulák vagy az elektronok spinje által képviselt szabadsági fokkal rendelkező fizikai rendszerek emellett még technológiai szempontból is ígéretesek, mert a töltés mellett, azt kiegészítve, a spin iránya olyan a klasszikus elektronikából hiányzó lehetőségeket hordoz, ami egy új típusú – a spin szabadsági fokot információhordozóként használó — elektronika, a spintronika alapjait jelenti.

A beszámolóban részletezett kutatási eredmények jellemzően ilyen mezoszkopikus rendszerekkel kapcsolatosak. A vizsgálatok fő szempontja az volt, hogy miként lehetséges a fundamentális fizikai tulajdonságokat konkrét célokra felhasználni, milyen módon tudjuk ellenőrzés alatt tartani és céljainknak megfelelően manipulálni a kvantumrendszerek állapotát, lehetőség szerint a kísérletileg már jól kidolgozott, elektromágneses terek alkalmazásán alapuló módszerek felhasználásával.

Eredmények

1. Mágneses molekulák állapotainak manipulációja elektromágneses mezővel

Korábbi, a kvantumoptika tárgykörébe tartozó kutatásaink jó alapot, fontos analógiákat szolgáltatottak a spinnel kapcsolatos kérdések tanulmányozásához. E témában elsőként nagy ($s=10$) eredő spinnel rendelkező, molekuláris mágnesnek vagy nanomágnesnek nevezett komplex molekulák kristályait vizsgáltuk, amelyek kvantuminformatikai alkalmazásával kapcsolatban már több komoly javaslat is napvilágot látott. Kutatásaink arra a kérdésre koncentráltak, hogyan hat kölcsön egy ilyen molekulakristály egy rezonátormóddal, miközben a spin szabadsági fok elkerülhetetlen dekoherenciát szenved el a rácsrezgésekkel való kölcsönhatás következtében [1]. Ezután rámutattunk, hogy a kísérleti úton tapasztalt THz frekvenciájú elektromágneses sugárzás a legvalószínűbb esetben a mézerekhez hasonló módon

keletkezik [2-4]. Kidolgoztunk egy jól használható eljárást a spin szabadsági fok dinamikájának egzakt követésére gyorsan változó külső mágneses térben [5]. Számításaink megmagyarázták, hogy realiztikusan felfutó mágneses terek esetén a mágnesezettség időfüggésében a kísérletekben tapasztalt lépcsőszerű ugrások hogyan jelentkeznek. Modellünk a spin szabadsági fokhoz tartozó teljes 21 dimenziós teret figyelembe vette, és a korábban használatos módszerekkel összevetve eredményeinket, azt megmutattuk, hogy bizonyos esetekben nem használható a szokásos kétnívós közelítés.

Periodikusan változó külső mágneses tér esetén a Floquet elmélet felhasználásával dolgoztunk ki módszert a spinnel kölcsönható egyéb szabadsági fokok (pl. fononok) hatásának leírására. A rendszert befolyásoló külső tényezőket harmonikus oszcillátorokból álló hőtartályként vettük figyelembe és megmutattuk, hogy a spinek dinamikája hogyan közelít az egyensúlyhoz ezzel a környezettel. A mágnesezettségi grafikonokat felvéve rámutattunk, hogy a dinamika, ami egyensúlyban a gerjesztő tér frekvenciájának megfelelő oszcillációkat mutat, jól észrevehetően tükröződik a mérésekkel is meghatározható hiszterézisgörbéken. Végezetül realiztikus paraméterekkel és a fáziskoherenca elvesztéséhez vezető folyamatok figyelembe vételével a kísérleti eredményekkel kvalitatív egyezést mutató mágnesezettségi görbét kaptunk [6], ami azt a következtetést erősíti meg, hogy a hiszterézisgörbék létrejöttének hátterében nagy valószínűséggel az egyes molekulaspinek kissé eltérő környezete és a fononok okozta dekoherencia együttes hatása áll. A rendszer kontrollálásának a lehetőségeit vizsgálva megmutattunk, hogy két különböző frekvenciával oszcilláló külső mágneses tér alkalmazásával tiszta kvantummechanikai spinállapotok preparálása is lehetségessé válik [7].

2. Elektronspin manipulációja félvezető gyűrűkben

A spin, mint alapvető kvantummechanikai rendszer kvantumos kapuként való alkalmazása szempontjából megvizsgáltuk vezetési elektronok spinjének a lehetséges transzformációit mikrométeres átmérőjű félvezető gyűrűkben [8, 9]. Ez irányú kutatásaink első, indító eredménye annak a megmutatása volt, hogy a spin-pálya kölcsönhatás következményeként az elektronspin iránya tervezhető módon elforgatható. A spintranszformációk (kvantumos logikai kapuk [9]) milyenségét ebben az esetben külső elektromos tér határozta meg, ami a vezetési tulajdonságok szempontjából alapvető spin-pálya kölcsönhatás erősségét képes megváltoztatni. Ezek a gyűrűk tehát egyqubites kvantumos kapuként működnek, amelynek paramétereit egy külső elektromos mezővel, továbbá a gyűrű méretével illetve a be- és kimenő drótok helyzetével hangolni lehet.

A későbbiekben foglalkoztunk azzal a kérdéssel, hogy milyen effektusok lépnek fel abban az esetben, ha az elektronok két vezetéken át is távozhatnak a gyűrűből. Megmutattuk, hogy ekkor a rendszer a Stern-Gerlach berendezéshez nagyon hasonló funkciót is elláthat, azaz polarizálatlan bemenő elektronok a kimeneteken már spinpolarizáltak lesznek, méghozzá a két vezetékben más-más irányban [10]. Ezt az eredményt analitikus módszerrel kaptuk, ahol a gyűrű különböző kimeneteihez tartozó, spinfüggő transzmissziójának a meghatározása volt a cél, és ezeknek a transzmissziós összefüggéseknek a vizsgálata vezetett fizikai szempontból érdekes eredményekre. A polarizáló tulajdonság mélyebb, ezeken az egyenleteken túlmutató fizikai okainak a feltárása részletesebb vizsgálatot igényelt, aminek az eredményeit a [11] számú publikáció tartalmazza. Itt arra a következtetésre jutottunk, hogy a jelenség alapvető oka az azonos spinű elektronok térbeli interferenciája, ami adott esetben konstruktív lehet egy meghatározott spinirányra az egyik kimeneten, míg destruktív a másik kimenet estében. Létezik olyan spinirány is, ahol a két kimenet szerepet cserél, így adódik az, hogy polarizálatlan bemenet esetén a kimenő vezetéseken át teljesen polarizált, de más-más irányú spinnel rendelkező elektronok távoznak a gyűrűből. Ez ugyanakkor azt is jelenti, hogy felépülhet a két különböző (térbeli és spin) szabadsági fok között a klasszikusan lehetségesnél

erősebb kvantumozott korreláció, azaz összefonódottság. Részletesen megvizsgáltuk ezt a kérdést is, és arra jutottunk, hogy bár abban az esetben, amikor a gyűrű polarizál, nincs ilyen jellegű összefonódottság, de tiszta bemenő spinállapot esetén lényegében maximális összefonódottság is felléphet a kimeneteken a két szabadsági fok között [12]. A kutatási időszak végén kvantumgyűrűvel kapcsolatos időfüggő problémák vizsgálatát kezdtük meg, ami a spinállapot kontrollálásának, kvantumozott kapuk létrehozásának egy újabb, ígéretes lehetőségét jelenti. Megmutattuk, hogy ha az interferenciatulajdonságokat meghatározó spin-pálya kölcsönhatás erőssége periodikusan változik, akkor a gyűrűben a fényel manipulált atomok Rabi oszcillációjával rokon jelenség lép fel, ami véges hőmérsékleten és véletlen szórás folyamatok jelenlétében is megmarad. A vezetési tulajdonságokat tanulmányozva rámutattunk, hogy az optikai Raman szóráshoz hasonlóan az oszcilláló spin-pálya kölcsönhatás stokesi és anti-stokesi jellegű csúcsokat hoz létre a vezetőképességben. A kvantumgyűrű érdekes tulajdonsága, hogy a paraméterek változtatásával könnyen ellenőrzés alatt tartható a transzmisszió különböző energiájú csúcsainak az intenzitása [13].

Több gyűrűből álló hálózatok esetén első lépésként meghatároztuk a rendszer vezetőképességét, ami erős spinfüggést mutat. Ezeket a számításokat a különálló gyűrűk kapcsán nyert tapasztalatok tették lehetővé, és az motiválta, hogy már léteznek olyan kísérleti eredmények, amelyek négyzettrácsba rendezett, egymással érintkező gyűrűvel kapcsolatosak. Vizsgáltuk a hálózat viselkedését külső mágneses tér jelenlétében is, továbbá figyelembe vettük a hullámfüggvény koherenciaképességét negatívan befolyásoló, a fázist véletlenszerűen megváltoztató szórócentrumok szerepét is. Ez utóbbi eredmény különösen érdekes, hiszen a vezetőképesség mágneses tér függvényében tapasztalható oszcillációinak jellemző frekvenciáját megduplázza, azaz kvalitatívan befolyásolja a rendszer viselkedését [14].

Abban az esetben, ha olyan mintáról beszélhetünk, amelyben ezek az effektusok elhanyagolhatóak, eredményeink szerint a spin-pálya erősség gyűrűnkénti modulációja igen rugalmas eszközökhöz vezet. Ugyanaz a geometria (mondjuk egy 5×5 gyűrűből álló hálózat) más-más spin-pálya kölcsönhatás erősségeket választva teljesen különböző spintranszformációs tulajdonságokra vezet. Elérhető többek között az, hogy a bejövő áram egy tetszőlegesen kiválasztott kimeneten át távozzon a rendszerből, de az is, hogy két ellentétes spinirány térben szeparálva (azaz különböző kimeneten át) távozzon [15].

Kvantumgyűrű hálózatának egy újabb alkalmazásaként megmutattuk, hogy korábbi, egyetlen gyűrűvel kapcsolatban elért eredményeink kombinálhatók oly módon, hogy a létrejövő hálózat alkalmas az úgynevezett kvantumozott bolyongás megvalósítására [16]. Az általunk javasolt sémában az elektron spinje játssza a klasszikus pénzérmének megfelelő szerepet, azaz a spinállapot határozza meg a továbblépés irányát. A javasolt geometria kétdimenziós, az egyik irány a vonalmenti bolyongásnak megfelelő fizikai irány, a másik pedig az egyes lépéseknek felel meg. A hálózat négy gyűrűből álló azonos elemi egységekből áll, és mérete a realizálni kívánt lépések számától függ.

A fent említett esetekben lényegében mindenütt föltettük, hogy a transzport – a szilárdtest- fizikában szokásos terminológiát használva – ballisztikus, azaz az elektronhoz rendelhető hullámfüggvény őrzi a kvantummechanikai fázist. A valóságban ez nem biztos, hogy teljesül, aminek elsősorban az az oka, hogy a szennyezőkön való szórás véletlenszerűen megváltoztatja a fázist. Ezt először a spinfüggetlen esetben vizsgáltuk egy mágneses fluxust bezáró Aharonov-Bohm effektust mutató gyűrűben [17].

Egy ennél bonyolultabb esetben, amikor a spin szabadsági fokot is figyelembe vettük az ütközések mellett a termikus fluktuáció hatását is tekintetbe vettük. A kvantumozott bolyongás megvalósítására alkalmas, elvben skálázható méretű hálózat ideális rendszernek látszik annak vizsgálatára, hogy a kvantumozott tulajdonságoknak a fent említett két ok miatt (termikus fluktuáció vagy véletlen szórócentrumok jelenléte) bekövetkező fokozatos eltűnése hogyan befolyásolja a tervezett eszköz funkcionalitását. A működőképesség megfelelő – a

problémához jól illeszkedő – mértékét definiálva azt találtuk [18], hogy a méret növekedésével a rendszer egyre távolabb kerül az ideális viselkedéstől, ugyanakkor az eszköz hatékonysága mégis reménykeltően skálázódik a mérettel: Nem az alkotóelemek számával arányosan, hanem annál jóval lassabban tűnnek el a kiaknázható kvantumtulajdonságok.

3. Ultrahideg atomi gázok viselkedésének optikai kontrollja

Megadtuk az egzakt időfüggő sűrűségprofilját egy olyan egydimenziós harmonikus csapdába zárt Bose-Einstein kondenzátumnak, amely erősen kölcsönható láncba rendeződve az un. Tonks-Girardeau modellel írható le. Ilyen kondenzátumot 2004-ben sikerült először Rb atomokkal kísérletileg létrehozni, és alapvetően különös tulajdonságai miatt (a kölcsönhatás miatt a mintát alkotó bozonok a fermionokhoz hasonló viselkedést mutatnak) nagy érdeklődésre tart számot. Javasoltunk továbbá egy optikai módszert, ahol az atomi állapotokat kihasználva egy nemrezonáns fénynyalábbal vizsgálva a rendszer transzmissziós együtthatóját, az abban mutatkozó moduláció mérésével az atomok számát és a kvantumállapotban jelenlévő szuperpozíciós amplitúdókat meg lehet határozni [23]. A kutatásnak ebben az irányában a kezdeti lépéseket tettük meg.

4. Kvantumos kapuk, összefonódás és a koherens állapotok matematikai kapcsolata.

A fentiekben taglalt eredmények a kvantumfizikai „hardver” fejlődésének irányába mutatnak, azaz tényleges fizikai rendszerek tulajdonságaira és dinamikájára vonatkoznak. Ezen kívül sikerült néhány érdekes eredményt elérnünk a „szoftver” oldalán is. Az elemi egy és két qubites, összefonódott állapotokat is létrehozó, kvantumkapuk egy kevésbé szokványos, a kvantummechanikai Wigner-függvény segítségével történő leírását adtuk a [19] munkában.

A kvantumfizikában a koherens állapotokat eredetileg a harmonikus oszcillátor kapcsán vezette be E. Schrödinger, majd a kvantumoptikában a mező oszcillátormódusaira vonatkozóan R. Glauber vizsgálta ezen állapotok specifikus tulajdonságait. A későbbiek során más rendszerekre is általánosították a koherens állapotok fogalmát, amelyek közül szempontunkból azok az esetek érdekesek ahol egy többrészes rendszer kollektív állapotaira történt meg az általánosítás. Az egyik ilyen többrészes rendszer a kvantuminformatikában alapvetőnek tekintett N db kétállapotú rendszer (qubit) tenzorszorzatának terében lévő elemekkel leírható kétnívós atomok vagy spinek együttese. Itt alapvető szerepet játszik az összefonódott állapotok lehetősége, ami a kvantuminformatikának az a specifikus erőforrása, ami a klasszikus informatikából hiányzik. Munkánkban N db qubitből álló kvantumrendszer tiszta állapotainak összefonódottságával foglalkoztunk, és megmutattuk, hogy a szimmetrikus altérben a nem összefonódott állapotok osztálya pontosan megegyezik a koherens állapotok osztályával [20], továbbá, hogy a szimmetrikus altér ortogonális komplementerében minden tiszta állapot összefonódott.

Ezután megmutattuk, hogy a qubitekre megállapított eredmények általánosíthatóak arra az esetre is, amikor az N azonos részrendszer mindegyike valamilyen véges K -dimenziós térbeli állapotban lehet. Ezekben az általunk *quKit*-nek nevezett állapotok által kifeszített Hilbert terek N -szeres tenzori szorzataiban is tekinthetjük az összefonódott állapotokat illetve ettől függetlenül definiálhatók a koherens állapotok [21]. Itt is bebizonyítottuk a következő két tételt: A szimmetrikus altérben egy állapot akkor és csak akkor nem összefonódott, ha koherens, és a szimmetrikus altérre merőleges altér minden tiszta állapota összefonódott [22].

A kutatás során született és alább felsorolt közleményekre a beszámoló időpontjáig érkezett független hivatkozások száma 92.

Hivatkozások

- [1] M.G. Benedict, P. Földi , F. M. Peeters, *Phys. Rev. B* **72**, 214430 (2005).
- [2] M.G. Benedict, P. Földi , F. M. Peeters, *J. Phys. Conf. Ser.* **36**: 12 (2006).
- [3] P. Földi, M. G. Benedict, F. M. Peeters, *Acta Phys. Hung.* **26**: 47-54 (2006).
- [4] Benedict Mihály, Földi Péter: Mikrohullámú sugárzás molekuláris mágnesekből In: Heiner Zsuzsanna, Osvey Károly (szerk.) A kvantumoptika és -elektronika legújabb eredményei, Szeged, -:Szegedi Tudományegyetem, 2006. pp. 119-131.
- [5] P. Földi, M. G. Benedict, J. M. Pererira, F. M. Peeters, *Phys. Rev. B* **75**, 104430 (2007).
- [6] P. Földi, M. G. Benedict, F. M. Peeters, *Phys. Rev. A* **77**, 013406 (2008).
- [7] P. Földi, M. G. Benedict, *Eur. Phys J-Spec. Top.* **160**, 175-181 (2008).
- [8]. O. Kálmán, P. Földi, M. G. Benedict, Quantum rings in spintronics In: MTA-JSPS joint seminar on Physics in modern science and technology (Debrecen-Szeged-Budapest). Szeged, Magyarország, 2007. pp. 117-121.
- [9] P. Földi, B. Molnár, M.G. Benedict, F. M. Peeters, *Phys. Rev. B* **71**, 033309 (2005).
- [10] P. Földi, O. Kálmán, M.G. Benedict, F. M. Peeters, *Phys. Rev. B* **73**, 155325 (2006).
- [11] O. Kálmán, P. Földi, M. G. Benedict, F. M. Peeters, *Physica E.* **40**, 567 (2008).
- [12] O. Kálmán, P. Földi, M. G. Benedict, *Open syst. & Inf. Dyn.* **13**, 455 (2006).
- [13] P. Földi, M. G. Benedict, O. Kálmán, F. M. Peeters, arXiv:0907.0766 (beküldve a *Phys. Rev. B*-hez) (2009).
- [14] O. Kálmán, P. Földi, M.G. Benedict M G, Peeters F M, *Phys. Rev. B* **78**, 125306 (2008).
- [15] P. Földi, O. Kálmán, M. G. Benedict, F. M. Peeters, *Nano Lett.* **8**, 2556 (2008).
- [16] O. Kálmán, T. Kiss, P. Földi, arXiv:0904.4588, *Phys. Rev. B*, közlésre elfogadva (2009).
- [17] P. Vasilopoulos, O. Kálmán, F. M. Peeters, M. G. Benedict, *Phys Rev B* **75**, 035304 (2007)
- [18] P. Földi, O. Kálmán, F. M. Peeters, arXiv:0906.5540 (beküldve a *Phys. Rev. B*-hez) (2009)
- [19] O Kálmán, M.G: Benedict *Int. J. Quant. Inf.* **3**, 501, (2005)
- [20] P. Dömötör, M. G. Benedict, *Phys. Lett. A* **372**, 3792 (2008)
- [21] P. Dömötör, M. G. Benedict, *Physica Scripta* **T 135** (közlésre elfogadva)
- [22] P. Dömötör, M. G. Benedict, *Eur. Phys. J. D* **53**, 237 (2009)
- [23] M. G. Benedict, Cs. Benedek, A. Czirják, arXiv:0907.2217