



PhD Tézisfüzet

Spin-pálya kölcsönhatás és szupravezetés  
InAs nanopálya-alapú kvantum pötty  
rendszerekben

Scherübl Zoltán

Supervisor: Dr. Csonka Szabolcs  
Egyetemi Docens  
Fizika Tanszék  
BME

Budapesti Műszaki és Gazdasági Egyetem

2019

# Bevezetés

A kísérleti technikák fejlődésének és az új elméleti koncepcióknak – mint pl. a topologikusan védett architektúrák – köszönhetően robbanásszerűen növekedett a kvantumszámítás területe az elmúlt évtizedben. Az egzotikus kvantumstatistikával rendelkező részecskék, mint pl. Majorana- és parafermionok ígéretes építőelemekként szolgálhatnak a topologikus eszközökhöz. Ezek megvalósításához szükséges a szupravezetés és a spin-pálya kölcsönhatás jelenléte, a kémiai potenciál hangolhatósága és egyes rendszerekben a mágneses tér jelenléte is.

Az InAs nanopálcák ígéretes platformot nyújtanak az egzotikus részecskék megvalósításához, köszönhetően a bennük található erős spin-pálya kölcsönhatásnak, a képességüknek, hogy szupravezetőkhez csatolva jó elektromos kontaktust adnak és hogy bennük az elektronsűrűség kapufeszültségekkel hangolható.

## Célkitűzések

A tézisemben InAs nanopálca alapú eszközökben vizsgáltam a spin-pálya kölcsönhatáshoz, a szupravezetéshez és a topológiához kapcsolódó jelenségeket. A topologikus állapotok megvalósításához fontos a spin-pálya kölcsönhatás karakterizálása, a szupravezető által létrehozott nem-lokális csatolások (mint pl. a kereszt Andreev reflexió) szerepe, ezek relatív erőssége és hangolhatósága. A tézisben bemutatott kísérleti és elméleti munkák ezen kérdéseket vizsgálják.

## Tézis pontok

1. Topologikus eszközök segítségével megmutattam, hogy a csatolt spin rendszerek mágneses spektrumában majdnem mindig találhatóak degenerációs pontok. A szükséges feltétel az, hogy a rendszer teljes topologikus töltése véges legyen. Általános paraméterek esetén a degenerációk diszkrét pontokként jelennek meg, amiket a Weyl-félfémek sávdegenerációjával való analógiájuk miatt mágneses Weyl pontoknak neveztem. A csatolt két-spin rendszert meg is valósítottam egy InAs nanopálcában létrehozott spin-pálya csatolt dupla kvantum pötty segítségével. Alacsony hőmérsékleti transzport mérésekkel demonstráltam a mágneses Weyl-pontok létezését. A kísérleti eredményeket összevetettem a dupla kvantum pötty két-rács helyű Hubbard modelljével és jó egyezést találtam. Továbbá a véletlenszerűen sorsolt paraméterű Hubbard modell numerikus elemzésével megmutattam, hogy a speciális, finom-hangolt eseteken túl két tipikus degenerációs pont konfiguráció van, melyekben rendre 2 illetve 6 mágneses Weyl pont található. Ezen felül diszkutáltam, hogy a 6 Weyl pontos konfiguráció inkompatibilis a spin-pálya kölcsönhatás egyszerű Rashba modelljével, amit viszont gyakran használnak a nanopálcák leírásához a szakirodalomban. [1]

2. Több-kapuelektródás InAs nanopálca eszközöket készítettem, melyekben az elektronsűrűség és a nanopálcán keresztüli elektromos tér egymástól függetlenül hangolható a kapufeszültségek segítségével. Alacsony hőmérsékleti transzport mérésekkel vizsgáltam a gyenge antilokalizációs effektust, ami egy gyakran használt eszköz a spin relaxációs mechanizmusok vizsgálatához. A mérést különböző kapufeszültség konfigurációknál elvégezve megmutattam, hogy a spin relaxációs hossz jelentősen csökkenthető a nanopálcában külső elektromos tér alkalmazásával. Feltéve, hogy a spin relaxáció dominánsan a spin-pálya kölcsönhatásból származik, a kísérleti eredmények a spin-pálya kölcsönhatás megerősödését mutatják, összhangban a külső elektromos tér indukálta Rashba képpel. Egy elektrosztatikus modellt készítettem a kísérletek szimulációjára. Az egyetlen illesztési paraméter, a külső tértől független, beépített spin-pálya erősség meghatározása után a modell jó egyezést adott a kísérletekkel, alátámasztva, hogy a külső elektromos tér hangolja spin-pálya kölcsönhatás erősségét. [2]
3. Egy InAs nanopálcában létrehozott kvantum pötty–szupravezető hibrid rendszerben vizsgáltam a kialakuló Shiba állapot térbeli kiterjedését nem-lokális transzport mérésekkel. A Shiba állapotot nulla energiára hangolva a kvantum pöttytől 50 – 250 nm-re elhelyezkedő alagút elektródában mért áram megnövekedett. Ez arra utal, hogy a Shiba állapot ilyen nagy távolságokra is kiterjed a szupravezető belsejében, ami egy nagyságrenddel nagyobb mint STM kísérletekben. A jóval nagyobb kiterjedést a minta geometriai tulajdonságaival magyaráztam: a nanopálca átmérője összemérhető az alagút elektróda és a kvantum pötty távolságával, így az eszköz effektíven egy dimenziósként viselkedik. Továbbá megvizsgáltam a mágneses tér hatását a nem-lokális jelre. Az áramnövekmény egy nagyságrenddel megnőtt véges mágneses térben, ami arra utal, hogy a Shiba állapot kiterjedése tovább nőtt, összhangban azzal, hogy a kiterjedést a mágneses tér-függő szupravezető koherencia hossz határozza meg. A kísérleti eredményeket numerikus renormálási csoport szimulációkkal is összevettem és jó egyezést találtam. [3]
4. Javasoltam egy mérési utasítást a feltört Cooper párok spin szinglet karakterének az igazolására egy kvantum pötty – szupravezető – kvantum pötty rendszerben. A kvantum pöttyökbe csapdázott párosítatlan elektronok szolgálnak detektorként. Ezek spin állapotát elektromosan hajtott spin rezonanciával (EDSR) preparáljuk véges mágneses térben. Ezek után egy kapufeszültség hangolással megpróbálunk egy Cooper párt kivonni a szupravezetőből és szétválasztani a pöttyökre. A szétválasztás határfoka függ a detektorok preparált spin állapotától és a szétválasztott Cooper pár spinjétől is. A határfokot a pöttyökön végzett töltés méréssel állapíthatjuk meg. Megvizsgáltam különböző nem-idealitások – mint pl. a hiperfinom tér, a  $g$ -tenzorok anizotrópiája, a mikrohullámú pulzusok időzítése és a kapu fe-

szültség hangolásának sebessége – hatását a mérés hatékonyságára. Analitikus és numerikus eredményekkel megmutattam, hogy a mérés megfelelő tervezésével az utóbbi három nem-idealitás nem okoz jelentős csökkenést a mérés hatékonyságában, viszont gyenge hiperfinom kölcsönhatással rendelkező anyagokra van szükség a mérés elvégzéséhez. [4]

5. Megvizsgáltam a lehetséges nem-lokális csatolási mechanizmusokat – mint pl. a kereszt Andrejev csatolás, az elasztikus cotunneling és a direkt alagutazás – az Andrejev molekula rendszerben (kvantum pötty – szupravezető – kvantum pötty) a nagy gapú határesetben, illetve ezek hatását a mérhető mennyiségekre. Megmutattam, hogy az elasztikus cotunneling, amit az irodalomban gyakran elhanyagolnak vagy beleolvasztanak a direkt pöttyök közötti alagutazásba, erősen függhet a kvantum pöttyök energiaszintjeitől, ezért figyelembe kell venni és meg kell különböztetni a többi csatolási mechanizmustól. Kiszámítottam az Andrejev-molekula fázisdiagramját és a kvantum pöttyök alapállapotú betöltési térképét és demonstráltam, hogy ezek elégséges információt szolgáltatnak a direkt alagutazás elkülönítésére a szupravezetés-indukálta csatolásoktól. További, a kvantum pöttyökhöz csatolt normál elektródákat is bevezettem, ami lehetővé tette a rendszer transzport tulajdonságainak a vizsgálatát is. A véges előfeszítésű transzport kiszámításával a következő eredményeket találtam. Megmutattam, hogy a nem-lokális csatolások hogyan hibridizálják a lokális Andrejev kötött állapotokat a kiterjedt Andrejev-molekuláris állapottá. A véges előfeszítésű transport mérések lehetővé teszik a domináns csatolási mechanizmus meghatározását. Továbbá megmutattam, hogy a triplet-blokád effektus, amit általában a triplet elektronok és a szinglet Cooper párok spin összeférhetlenségének és a kereszt Andrejev csatolás összjátékának tulajdonítanak, nem csupán a kereszt Andrejev csatoláshoz kapcsolható. A blokád effektus jelen van akár a nem-lokális csatolások hiányában is, azok jelenléte csupán megfigyelhetővé teszi a negatív differenciális vezetőképesség vonalak megjelenésén keresztül. [5]

## Hivatkozások

[1] **Z. Scherübl**, A. Pályi, Gy. Frank, I. Lukács, G. Fülöp, B. Fülöp, J. Nygård, K. Watanabe, T. Taniguchi, G. Zaránd, Sz. Csonka: *Observation of spin-orbit coupling induced Weyl points and topologically protected Kondo effect in a two-electron double quantum dot*, Nat. Comms. Phys. **2**, 108 (2019)

[2] **Z. Scherübl**, G. Fülöp, M. H. Madsen, J. Nygård, Sz. Csonka: *Electrical tuning of Rashba spin-orbit interaction in multigated InAs nanowires*, Phys. Rev. B **94**, 035444 (2016)

[3] **Z. Scherübl**, G. Fülöp, C. P. Moca, J. Gramich, A. Baumgartner, P. Makk, T. Elalaily, C. Schönenberger, J. Nygård, G. Zaránd, Sz. Csonka: *Lar-*

*ge spatial extension of the zero-energy Yu-Shiba-Rusinov state in magnetic field*, ArXiv:1910.02831, submitted Nature Communications (with referees)

[4] **Z. Scherübl**, A. Pályi, Sz. Csonka: *Probing individual split Cooper-pairs using the spin qubit toolkit*, Phys. Rev. B **89**, 205439 (2014)

[5] **Z. Scherübl**, A. Pályi, Sz. Csonka: *Transport signatures of an Andreev molecule in a quantum dot – superconductor – quantum dot setup*, Beilstein J. Nanotechnol. 2019, **10**, 363-378 (2019)