

HIBRID RENDSZEREK TRANSPORT TULAJDONSÁGAI

Doktori tézisek

Koltai János



Budapest
2004.

Koltai János
Komplex Rendszerek Fizikája Tanszék
1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/A
koltai@ector.elte.hu
Eötvös Loránd Tudományegyetem
Természettudományi Kar
Fizika Doktori Iskola
Statisztikus fizika, biológiai fizika
és kvantumrendszerek fizikája program
Iskolavezető: dr. Horváth Zsolt egyetemi tanár
Programvezető: dr. Vicsek Tamás egyetemi tanár
Témavezető: dr. Cserti József docens
2004.

1. Bevezetés

A XX. század utolsó évtizedeiben a transzport jelenségek vizsgálatának kedvelt rendszereivé a mezoszkopikus rendszerek váltak. A nanotechnológia fejlődése és a káosz kutatók érdeklődése egyaránt nagymértékben elősegítette a terület gyors előretörését. Az egész rendszerre kiterjedő fáziskoherencia egy sor új jelenséget hozott: univerzális vezetőképesség-fluktuációt, gyenge lokalizációt vagy éppen interferencia jelenségeket. A jelenségek többségét véletlen mátrix elmélettel (RMT) vagy rövid hullámhosszú, szemiklasszikus leírások segítségével sikerült megmagyarázni.

Az 1990-es években a nanotechnológia fejlődése nyomán lehetővé vált ballisztikus normál fém és szupravezető tartományok csatolása. Ezekben a rendszerekben a normál–szupravezető határfelületen egy elektron (lyuk) fáziskoherensen lyukként (elektronként) verődik vissza. Erre a lehetőségre Andrejev mutatott rá 1964-ben, az ő tiszteletére Andrejev-reflexiónak nevezzük. Az Andrejev-reflexió hatását a nanoszerkezetek vezetési jelenségeire természetesen már sokkal korábban elkezdték vizsgálni. A BTK-elmélet (*Blonder, Tinkham és Klapwijk, 1982*) jelentős gap alatti vezetést jósolt, amit a mérések igazoltak is. Emellett szükségessé vált a mezoszkopikus fizikában

használt kvantummechanikai módszerek és szemiklasszikus közelítések kiterjesztése szupravezető tartományok jelenlétében.

Az 1990-es évek derekán több szerző tanulmányozta normál fém rendszerek pályahossz-eloszlását, ami a transzmissziós vagy reflexiós amplitúdó Fourier-transzformáltja. A spektrumban csúcokat találtak egyes hosszúságoknál, amely hosszúságokat sikeresen azonosítottak klasszikus pályákkal. Általában kiváló egyezésről számolnak be a kvantummechanikai eredmény és a szemiklasszikus közelítés között. Egyes szerzők megemlítettek ún. szellempályákat is, amelyek csak a kvantummechanikai eredményben jelentek meg. Ezek szemiklasszikusan csak diffraktív pontot érintő pályák figyelembevételével magyarázhatók meg. Dolgozatomban bemutatom a pályahossz-eloszlás első, normál–szupravezető hibrid rendszerben elvégzett analízisét.

Andrejev-biliárdok energiaspektrumát már több szerző vizsgálta. 1996-ban *Beenakker és társai* az állapotsűrűséget tanulmányozták a Fermi-energia közelében és meghatározták az állapotsűrűséget Bohr–Sommerfeld közelítésben. Ebben a közelítésben egy teljesen klasszikus mennyiség jelent meg, a klasszikus visszatérési valószínűség, amely annak a valószínűségét adja meg, hogy egy részecske a rendszert pontosan s út megtétele után hagyja el újra. A visszatérési valószínűséget többnyire geometriai módszerekkel vagy szimulációkkal lehet kiszámolni. Ezenfelül a véletlen mátrix elmélet alkalmazásával arra az eredményre jutottak, hogy az állapotsűrűség a Fermi-energia közelében lineárisan illetve egy mini-gappal indul attól függően, hogy a normál tartomány klasszikusan integrálható vagy kaotikus.

1988-ban kezdődött a spintronika (spin-függő elektronika) sikertörténete, az óriás mágneses ellenállás (GMR) felfedezésével. A spin-polarizált anyagokban (ferromágnesekben) megjelenő kicserélődési felhasadás és a szupravezető gap egymással vetélkedő energiaskálák. Az ilyen anyagokból

készült hibrid rendszerekben olyan új effektusok lépnek fel, mint például a GMR lecsökkenése a szupravezető kontaktusok miatt, vagy a rendkívül erős proximity-effektus. 2001-ben *Falci és társai* egy olyan rendszert vizsgáltak elméleti úton, amelyben két ellentétesen polarizált ferromágneses drótot egy szupravezetőhöz csatoltak. Ha az egyik drótra feszültséget kapcsoltak, akkor az abban meginduló áram hatására a másik drótban egy megegyező irányú áram keletkezett. A jelenség a Cooper-párok alagutazásán múlt, és emiatt természetesen exponenciálisan csökkent az amplitúdója a drótok távolságának növelésével.

2. Tézisek

A doktori értekezésben leírt legfontosabb eredményeket a következő pontokban foglalom össze:

1. Az irodalomban elsőként tanulmányoztam normál–szupravezető hibrid rendszer pályahossz-eloszlását. Egy diffraktív szennyezőt tartalmazó rendszer pályahossz-eloszlásában negatív hosszúságoknál is találtam csúcsokat. A csúcsok helyét egy szemiklasszikus modell segítségével sikerült a klasszikus pályák hosszúságának megfeleltetnem.
2. Felírtam a tetszőleges, ismert szórási mátrixú normál tartományból, szupravezető nyakkal lezárás során létrejövő Andrejev-biliárd energiaszintjeinek meghatározására alkalmas szekuláris egyenletet. Ha a zárt csatornába szóródás elhanyagolható, akkor a szekuláris egyenlet átírható egy valós egyenletté, amely numerikus számolásokhoz jóval kedvezőbbnek bizonyult. A módszer doboz-, korong- és sarokbiliárd esetében is sikerrel alkalmazható.
3. Szeparálható Andrejev-biliárdok esetén az Andrejev-reflexióból származó energiafüggő fázistolás figyelembevételével újra levezetem az állapotsűrűség illetve állapotszám Bohr–Sommerfeld közelítését.

A kvantálási feltételben megjelenő sajátfázisok segítségével kifejezést adtam a Bohr–Sommerfeld közelítésben szereplő klasszikus visszatérési valószínűségekre. Szeparálható Andrejev-biliárdok esetén vezető rendben meghatároztam az állapotszám sima részét, a Weyl-formulát.

4. Numerikusan egzaktul meghatároztam a doboz- és korongbiliárd energiaszintjeit, Andrejev-közelítés nélkül. Az állapotsűrűségben az energia függvényében egyenlő távolságokra szingularitások sora jelent meg, amelyekről azt találtam, hogy egy, a visszatérési valószínűségbeli szinguláris pályahosszúságnak felelnek meg. A korongbiliárdban kimutattam az Andrejev-állapotok mellett jelenlévő suttogó módusok hatását. Ezek a Fermi-energián is véges (nem-zérus) járulékot adnak az állapotsűrűséghez.
5. Egy rekurzív Green-függvény módszer segítségével meghatároztam a szórási amplitúdókat egy olyan rendszerben, amelyben két ellentétesen polarizált ferromágneses drót egy normál, diffúz tartománnyal kapcsolódik a szupravezetőhöz. Azt találtam, hogy az egyik dróton befolyó áram a másik drótban azonos előjelű, ún. nem-lokális áramot kelt. A lényeges szórási folyamat a rendszerben az Andrejev-transzmisszió. Egy egyszerű rezisztor modellel megmagyaráztam az Andrejev-transzmisszió jellegzetes viselkedését, és meghatároztam a maximális transzmissziót eredményező geometriát: négyzetes alakú normál tartományt kell választani.

3. Publikációk

1. G. Vattay, J. Cserti, G. Szálka and J. Koltai:
„Periodikus mezoszkopikus struktúrák vezetési tulajdonságai”
Proceedings of the Hungarian Academy of Sciences (1999).
2. J. Cserti, G. Vattay, J. Koltai, F. Taddei and C. J. Lambert:
”Negative Length Orbits in Normal-Superconductor Billiard Systems”
Phys. Rev. Lett. **85**, 3704 (2000).
3. J. Cserti, A. Kormányos, Z. Kaufmann, J. Koltai and C. J. Lambert:
”Proximity-induced subgaps in Andreev billiards”
Phys. Rev. Lett. **89**, 057001 (2002).
4. J. Cserti, A. Bodor, J. Koltai and G. Vattay:
”Excitation spectra for Andreev billiards of box and disk geometries”
Phys. Rev. B **66**, 064528 (2002).
5. C. J. Lambert, J. Koltai and J. Cserti:
”Non-local current correlations in ferromagnet/superconductor nanojunction”
in *”Towards the Controllable Quantum States, Mesoscopic Superconductivity and Spintronics”* (eds.: H. Takayanagi and J. Nitta),
World Scientific, New Jersey, pp. 119-124 (2003).
(Proceedings of the International Symposium on Mesoscopic Superconductivity and Spintronics (MS+S2002).)
6. J. Koltai, J. Cserti and C. J. Lambert:
”Andreev bound states for superconducting-ferromagnetic box”
Phys. Rev. B **69** 092506 (2004).