

Kvantum-irreverzibilitás és dekoherencia  
nanoeszközökben

Írta: Bernád József Zsolt

Fizika doktori iskola:

Horváth Zalán egyetemi tanár

Statisztikus Fizika, Biológiai Fizika és

Kvantumrendszerek Fizikája program:

Vicsek Tamás egyetemi tanár

Témavezetők:

Diósi Lajos egyetemi magántanár,

Gesztli Tamás egyetemi tanár

ELTE, Komplex Rendszerek Fizikája Tanszék

2005-2008

## A munka előzményei

A kvantummechanika eredetileg az atomok elméletének indult, manapság egyre nagyobb alkalmazási területet nyer. Az elmélet sikerei ellenére nincs még megegyezés az interpretációját tekintve. A fő problémák a megfigyelés és a mérés körül gyűrűznek. Gyakori, hogy a klasszikus mechanikát egyszerűen a kvantummechanika speciális esetének tekintik, mint a nemrelativisztikus mechanikát kis sebességek esetén a relativitáselmélet határesetének. A  $\hbar \rightarrow 0$  határeset közelében azonban az interferencia megmarad. A szemiklasszikus közelítés eredményei csak hasonlítanak a klasszikus fizikára, de koherens kvantummechanikai mozgásokat írnak le. Tehát koncepcióváltásra van szükség éspedig arra, hogy a kvantummechanikában makroszkopikus rendszerek kölcsönhatnak a környezetükkel annyira, hogy nem tekinthetők izoláltaknak, semmilyen extrém esetben sem. Nagy molekulák ilyen szempontból "makroszkopikusak". Ezeket hívjuk nyílt kvantum-rendszereknek, és a részrendszer sűrűségmátrixának dinamikáját kell követni. Itt már könnyen megmutatható, hogy ezek az érdekes "makroszkopikus" szuperpozíciók nagyon rövid idő alatt tűnnek el. Ezt a folyamatot hívjuk dekoherenciának. A kvantum-dekoherencia modellek kutatása nagyon aktív területé vált az elmúlt 20 évben. Ez a mechanizmus akkor jön létre amikor egy kvantum-rendszer kölcsönhat a környezettel, ami akár egy mérőeszköz is lehet, és a környezet dinamikájára kiátlagolunk.

Ezzel a módszerrel vizsgálni lehet például a kvantum-bit (qubit) fizikai hordozóit, azaz a kvantum-számítógép jövőbeli elemeit. A modellek koherens qubitekkel írják le a rendszert, így a dekoherencia vizsgálata komoly határokat szab ezeknek az elképzeléseknek. Számos munka született, amelyek a kvantum-dotokat vizsgálják dekoherenciát okozó környezetben, mivel ez az egyik lehetséges szerkezet ami a kvantum-számítógép alapegysége lehetne. A kvantumdot egy olyan elrendezés, amelybe egyszerre csak egy elektron léphet be vagy ki, alagút-effektussal. Az egyenkénti belépés a Coulomb-blokád következménye. Ez azt jelenti, hogy az elektronok közti Coulomb-taszítást kihasználva, és a rendszert kis kapacitásra, kis méretre beállítva, addig nem léphet be elektron a dotba, amíg egy másik ott tartózkodik. A rendszer kapacitása és mérete fogja szabályozni azt, hogy milyen energiaszintek lehetnek, és ha már nem létezik olyan energiaszint, amit az adott alacsony hőmérsékleten egy második elektron betölthet a Coulomb-taszítás ellenére, akkor beszélhetünk kvantum-dotról. A rendszer kis kapacitását és méretét nanotechnológiai eszközök biztosítják. Ilyen rendszerek már elkészíthetők, köszönhetően a félvezető-fizika fejlődésének. A *GaAs/AlGaAs* típusú anyagokkal megvalósítható a 2DEG, azaz a két dimenziós elektron gáz. A dot szerkezetében, a kontaktusokkal (elektron-tartályokkal) kapcsolatban annyit kell elmondani, hogy fémes vezetőből kell készülniük. A tartályokban egy adott energiaszintig minden szint betöltött, ezért alacsony hőmérsékleten valósítható meg a rendszer.

Egyik alapvető kérdés a qubitek kiolvasása. Vizsgáltak már pontkontaktust csatolva kvantum-dothoz, vagy két-dot kölcsönhatást, ahol az egyik a csapda szerepét töltötte be. Ilyen rendszerekből kontaktusokkal készítenek kvantum-dotot. A mezoszkopikus rendszerekben az elektronok tipikus koherencia-hossza összemérhető a rendszer méretével. Ezért teljes kvantummechanikai leírás szükséges, így a fent említett modellek eredményei összehasonlíthatóak a kísérlettel.

A mérés visszahatását a mért objektumra más oldalról is meg lehet közelíteni. A matematikai konstrukció alapján meghatározott folytonos kvantum mérés elméletét szintén tesztelni lehet ezeken a nano-eszközökön. Az eddigi módszerek a rendszeren áthaladó töltést,  $N$ -t, tekintették mérendő mennyiségnek. A folytonos mérést használó elméletek esetében az  $I$  áramot a  $\langle dN/dt \rangle$  sztochasztikus átlag határozta meg. Továbbá ez az elmélet lehetővé teszi, hogy leírjuk a kvantum Zénón-effektust, ami azt jelenti, hogy a mérés visszahatása gátolja a belső koherens mozgást.

A nano-technológia egyik fontos terméke a rezgő nano-tükrök. Ezeket szilíciumból készítik és  $SiO_2/Ta_2O_5$  típusú anyagokból borítják be. Ezekről remélik a makroszkopikus kvantummechanika kimutatását. Jelenleg a  $C_{60}$ -nal történt interferencia kísérlet pozitív eredményt adott, de ennél nagyobb molekulákra nem sikerült forrást előállítani. Így maradtak a nano-tükrök amik segítségével lépéseket tehetünk a makro-mikro világ határának megértése fele. Az első konkrét javaslat ilyen típusú kísérletre egy Michelson-interferométer, melynek egyik karjában ott van ez a rezgő nano-tükör, és a rendszerben levő foton interferencia láthatóságának kimérése adna számot arról, hogy a makroszkopikus test tömegközépponti hullámfüggvénye szuperpozíciós állapotba került-e vagy sem. A kísérletek egyik fontos célja a „spontán kollapszus” dinamika modelljeinek tesztelése, de ennek elméleti analizise nem történt meg ebben a rendszerben.

## Alkalmazott módszerek

A dolgozatban vizsgált rendszereket a sűrűségmátrixaikon keresztül elemeztem. A rendszerek dekoherenciáját a teljesen pozitív leképzések Lindblad alakjával írtam le. A kvantum-dotok vizsgálatánál a Born-Markov közelítéssel kapott master-egyenletet használtam, amely Lindblad alakra vezet. Továbbá használtam a folytonos kvantum mérés elméletét a nem-szelektív esetben. Szelektív eset az, amikor rendszer beugrik egy sajátállapotába amit sztochasztikus folyamattal írunk le. A nem-szelektív eset pedig az, amikor ezeket a sajátállapotokat felösszegezzük a valószínűségi súlyokkal, ebben az esetben pedig a Lindblad alak egy speciális esetét kapjuk. Alkalmaztam a Markovi áram kiszámolásának módszerét, ami a már a környezetre kiátlagolt részrendszer áram operátora. A nano-tükör vizsgálatánál használtam a Caldeira-Leggett modellt, és annak kiterjesztését Lindblad alakra. Ebben a részben használtam a koherens állapot leírásának módszereit. A tevékenységem eredményeit az alábbi tézispontokban foglalom össze.

## Tézisek és következtetések

1. Egy új töltés-detektort vizsgáltam, mégpedig amikor a kettős kvantum-dot egy darab kvantum-dothoz van csatolva. A csapda szerepét betöltő kvantum-dot a kettős dot első dotjához van Coulomb-csatolva. Kiszámoltam a rendszer sűrűségmátrixának mozgásegyenletét a master-egyenlettel. Kiterjesztettem az egyenleteket úgy, hogy egy

mozgásegyenlet sorozatot kaptam ( $N$ -felbontott technika). Ellenőriztem ezt a kiterjesztést olyan más rendszerekre amit már vizsgáltak, és igazoltam a módszer helyességét. Meghatároztam a rendszeren átfolyó áram időbeli változását, illetve a stacionárius áram analitikus kifejezését. Az áramot a Ramo-Shockley-tétel alapján határoztam meg. Kiszámoltam a rendszer zajspektrumát, és annak analitikus alakját a MacDonald formulával. Az analitikus eredmény érdekében egy új, saját módszert használtam, ami a Laplace-transzformáción és végtelen mátrix-sorozatok felösszegzésén alapult. A kiszámolt mennyiségek alapján igazolódott, hogy a kettős kvantum-dot mint mérő eszköz sokkal érzékenyebb, mint a már vizsgált kvantum-dot és a pont kontaktus. Ezt egyértelműen a kettős kvantum-dot belső koherens dinamikája tette lehetővé. Megemlíteném, hogy ennek a töltés-detektornak a tanulmányozása azért volt motiváló, mert témavezetőm, Geszti Tamás, lehetőséget látott abban, hogy így kimérhető lenne a hullámfüggvény kollapszusa. Ehhez két ilyen detektorra lenne szükség, amelyek korrelációját mérnék, különböző módon időkapuzva őket. A rendszer előnye a foton-detektoréhoz mérhető, mivel ezek a töltés-detektorok sokkal lassabban működnek, ezért ez a hátrányuk előnnyé változik a jel időfelbontásában [1].

2. Alkalmaztam a folytonos kvantumérés elméletét a kvantum-doton és a kettős kvantum-doton. A Born-Markov közelítés után kapott master-egyenletekhez hozzáadtam a folytonos mérés dekoherencia tagját. Ennek a konstrukciónak megvizsgáltam a feltételeit. Kiszámoltam a Markovi áram operátorát, mind az egy dot, mind a kettős dot esetében, amit alkalmaztam a mérés dekoherenciáját leíró duplakommutátorban. A kvantum-doton kiszámoltam a rendszeren átfolyó stacionárius áramot, és a zajspektrumot. Az eredmények alapján nem találtam kvantum Zénón-effektust (QZE). A kettős kvantum-dot esetében szintén kiszámoltam a stacionárius áramot és zajspektrumot. Itt megjelent a QZE, ami a kettős dot belső koherens alagutazásának a következménye. Továbbá a különbözően előfeszített dot-részek esetén pedig egy "anti" Zénón-effektust találtam. A spektrumban a koherens mozgásnak megfelelő csúcsok lecsökkentek vagy megszűntek a mérés erősségének növelésével. A zajspektrumban a mérés következtében pedig ott van egy konstans háttérzaj, ami a mérés erősségének függvénye. Az így megjelent zaj olyan, hogy jól mérő detektorok esetén hatalmas háttérzajt ad. Az elméletnek van egy alkalmazhatósági határa, mivel a zajspektrumban nem jelent meg a sörétzaj. Ennek a problémának megvan a megoldása, de ezzel nem foglalkoztam a dolgozatban [2].
3. A Marshall és többiek által javasolt rezgőtükrös kísérletet és modellt, valamint Adler és társai által elkezdett dekoherencia vizsgálatokat kiterjesztettem a súrlódást is leíró dekoherencia modellé. Továbbá, ezt a környezeti dekoherenciából kapott modellt kiegészítettem matematikai okokból, hogy a sűrűségmátrix leképzés pozitív legyen. Ezt a kiegészítést Diósi Lajos javasolta a Caldeira-Leggett modellben közepesen alacsony hőmérséklet esetére. Kiszámoltam a foton interferencia láthatóságát analitikus formában. Vizsgáltam, hogy a láthatóság első visszatérésének milyen hőmérsékleti és súrlódási értékek mellett lesz egyhez közeli értéke. Megadtam azt a paraméter tartományt, ahol az

univerzális dekoherencia modellek már láthatónak kellene lenniük. Azt találtam, hogy a magas hőmérséklet esetén a kvantumkorrelációkat elnyomják a klasszikus korrelációk. Meghatároztam azokat a paraméter tartományokat is, ahol egyáltalán értelmes ez a kísérlet, itt gondolok arra, hogy a fotonnak elég nagy impulzusa kell legyen ahhoz, hogy a tükröt meg tudja lökni. A konklúzió az, hogy ezen a közepesen alacsony hőmérsékleti skálán talán újabb, teljesebb modellt kellene megvizsgálni. A módszer megmutatja, hogy a javasolt kísérlet még nem elég jó ahhoz, hogy végső céljaként gravitációs vagy más univerzális dekoherenciát kimérjen, sőt a kvantumosság kimutatása is könnyen probléma lehet, a jelenlegi hőmérsékleti skálán. Továbbá, a koordináta diffúzióját leíró dekoherencia tag kimérése is érdekes eredmény lenne, mivel ezt a tagot matematikai megfontolásokból tettük hozzá a rendszerhez, és nem egy Hamiltoni rendszerből vezettük le [3].

## Publikációs lista

A tézispontok alapjául szolgáló közlemények:

1. T. Geszti and J.Zs. Bernád  
*"Theory of a double-dot charge detector"*  
Phys. Rev. B **73** 235343 (2006)
2. J.Zs. Bernád, A. Bodor, L. Diósi, T. Geszti  
*"Application of continuous measurement theory to the current through quantum dots"*  
Phys. Rev. B. **77** 073311 (2008)
3. J.Zs. Bernád, L. Diósi, T. Geszti  
*Quest for quantum superpositions of a mirror: high and moderately low temperatures*  
Phys. Rev. Lett. **97** 250404 (2006)