

# Doktori disszertáció tézisei

Pécsi Tudományegyetem Természettudományi Kar

Fizika Doktori Iskola

**Kárpáti Attila**

## Konstruktív dekoherencia kvantumrendszerekben

témavezető: **Dr. Ádám Péter**

a fizika tudomány kandidátusa

MTA Szilárdtestfizikai és Optikai Kutatóintézet

Pécsi Tudományegyetem, Fizikai Intézet

konzultáns: **Dr. Kis Zsolt**, Ph.D.

MTA Szilárdtestfizikai és Optikai Kutatóintézet



Pécsi Tudományegyetem

Pécs, 2009



# Áttekintés

Az információfeldolgozás területén a kvantuminformáció-elmélet a klasszikus rendszerekkel megvalósítható eszközökhöz képest lényeges előrelépést ígér. Gyakorlati alkalmazásban a biztonságos adattovábbítás már elérhetővé vált, azonban a klasszikus algoritmusok lépésszámát jelentősen csökkentő kvantumalgoritmusok megvalósítása igazán áttörést jelentő számítási lépésszám mellett még nem készült el. Megjegyzendő, hogy az adattovábbítás ekvivalens léptékben biztonságossá tehető kvantumrendszerek használata nélkül is. A kvantum információtárolás alapvetően különbözik a klasszikustól. A tárolt információ nem másolható, csak közelítőleg, emiatt egy bizonyos fizikai rendszer teljes kvantumállapotát mérésekkel feltérképezni általában nem lehetséges, csak egy sokaságon végzett méressorozattal tehető meg. Az információ átvitele egy másik kvantumrendszerbe viszont lehetséges kvantumállapot-teleportáció segítségével. A klasszikus digitális számítógépben minden művelet után az igaz és hamis logikai értéket reprezentáló jelszinthez igazítják az eredményt, így érve el, hogy nagy számú információfeldolgozó egységen áthaladva is teljes biztonsággal kezelhetőek az adatok. Hasonló jellegű hibajavítás a kvantuminformatikában nem lehetséges, mert az a kvantuminformáció elvesztéséhez vezetne, és ilyen szempontból a kvantumszámítógép inkább az analóg számítógéppel rokon, mint a klasszikus digitális számítógéppel.

A kvantumalgoritmusok nagy bitszámú megvalósítása elé elsősorban a

dekoherencia jelensége gördít akadályt. A dekoherencia a kvantumrendszer és a környezete közötti kölcsönhatás által kijelöl egy állapotrendszer, és a hatása abban nyilvánul meg, hogy a kvantumállapotot ezen állapotok keverékébe juttatja. A kvantumalgoritmusok helyes működéséhez azonban szuperpozíció állapotokra van szükség. A dekoherencia hatásának csökkentésére számos módszert dolgoztak ki. Egyik a klasszikus bitátfordulási hibákra kidolgozott hibajavító kóddal rokon eljárás alkalmazása. E módszerben egy kiválasztott lineáris altérből való kilépést méréssel detektáljuk, és a mérés eredményétől függően egy unitér transzformációval az állapotot visszatranszformáljuk a jó altérbe. Az altér megválasztása akkor jó, ha a dekoherencia folyamatok mind kivezetnek belőle, így hatásuk mérhetővé és javíthatóvá válik. Egy másik módszer a dekoherencia-mentes alterek használata a számítások elvégzéséhez. Ez olyan alteret jelent, amely a rendszer leírására alkalmazott modell keretein belül további dekoherencia-folyamatban nem vesz részt, azaz amennyiben a kvantumrendszer állapota itt található, egyik környezeti kölcsönhatás sem változtatja azt meg. Nem elhanyagolható a műveletvégzés pontatlanságának járuléka sem. Az ilyen jellegű hibák, amennyiben a végállapotot a számításhoz használt altéren belül állítják elő pontatlanul, nehezen detektálhatók és javíthatók, és a számítások során a hatásuk kumulálódik. Emiatt igen lényeges a nagy pontosságú, külső körülményektől független műveletvégző egységek kifejlesztése. A probléma egy lehetséges megkerülése a kvantumkapu-mentes adiabatikus kvantumszámítógép-modell használata, mely műveletvégző egységeket nem

tartalmaz. Hasonlóképpen, adiabatikus folyamatokkal, például az adiabatikus populáció transzferrel rokon eljárásokkal nagy pontosságú, robusztus műveletvégzés érhető el. Általánosságban elmondható, hogy a kvantuminformatica gyakorlati alkalmazásához kapcsolódó problémák megoldása nem egyszerű feladat. A kutatások egyik tárgya találni olyan fizikai rendszereket, amelyekben a dekoherencia hatása elegendően kicsivé tehető, és egyúttal a realizált kvantumbitek száma is nagy. Emellett a dekoherencia hatásainak kivédéséhez, a kvantumbitek stabilitásának megőrzéséhez vezető új eljárások kifejlesztése is aktív kutatás tárgyát képezi.

## Célkitűzések

A dolgozatban dokumentált kutatómunka célkitűzése olyan alkalmazások felkutatása, amelyekben a dekoherencia jelenségét okozó relaxációs folyamatok nem csupán destruktív hatásúak, hanem valamilyen pozitív hozadékuk is van, vagy káros hatásaik nagyon jól elkerülhetőek. Célunk bemutatni, hogy az inkoherens folyamatok kombinálása koherens kölcsönhatásokkal lehetővé teszi, hogy

- az inkoherens folyamatok káros hatása kiküszöbölhető legyen,
- meglepő módon rendezettséget, időbeli koherenciát, kvantuminterferenciát hozzanak létre az inkoherens folyamatok,
- valamint hasznos célokat is szolgáljanak az állapotok kvantumos tulajdonságainak megőrzése mellett.

## Vizsgálati módszerek

A disszertációban a dekoherencia jelenségének leírása a nyílt kvantumrendszer fogalmának bevezetésével kezdődik. Egy direktszorzat alakú Hilbert térrel modellezhető, két részre bontható kvantumrendszer egyik részrendszerét vizsgáljuk, és a másik részt a vizsgált rendszer környezetének tekintjük. A környezetről feltételezzük, hogy jóval nagyobb, mint a vizsgált rendszer. Ez a közelítés lehetővé teszi, hogy egyszerűbb egyenletekkel írassuk le a számunkra érdekes részrendszer időfejlődését. További közelítésként feltételezhető, hogy a környezet nem rendelkezik memóriával, ez a Markov-közelítés, és ekkor az időfejlődést leírhatjuk Lindblad alakra hozott mászter-egyenlettel. Ez az alak megmutatja, melyek azok a kölcsönhatási csatornák, amelyek relaxációt okoznak. Az időfejlődés relaxáció-mentes részét egy Hamilton-operátor határozza meg, relaxáció-mentes esetben a mászter-egyenlet a Schrödinger-egyenletté egyszerűsödik. A relaxációs folyamat általában dekoherenciát okoz, azaz ha a rendszer kezdetben két energia-sajátállapot szuperpozíciójában volt, a relaxáció során ezek keverékébe kerül, és a szuperpozíciós állapothoz rendelhető, csak kvantumrendszerekben megfigyelhető korrelációk megszűnnek. A környezettel való kölcsönhatástól függően a relaxáció végeredménye lehet olyan állapot is, amely a megfigyelt rendszer természetes bázisában szuperponált, így a relaxáció hatása akár a szokásostól ellentétes is lehet.

A nyílt rendszerek leírásának a mászter-egyenlettel ekvivalens módja a kvantumtrajektóriák módszere, melyek közül a Markov-közelítésben érvé-

nyes kvantumugrások módszerét használtuk. Ez a leírásmód szemléletes értelmezését teszi lehetővé a környezettel való kölcsönhatásnak: a kvantumugrás akkor következik be, amikor a környezet mérést hajt végre a vizsgált rendszeren, és ennek során például foton emisszió vagy abszorpció történik. A nyílt rendszerek leírásához használt egyenletek, hasonlóan az időfüggő Schrödinger-egyenletekhez, a kölcsönhatások explicit időfüggése esetén a legtöbb esetben analitikusan nem oldhatók meg, és numerikus módszerek használata válik szükségessé. A mászter-egyenletet egy rögzített bázisban reprezentáltuk, és lineáris differenciálegyenletként írtuk fel, majd negyedrendű Runge-Kutta módszerrel numerikusan integráltuk. Ez a módszer a vizsgált kis dimenziós kvantumrendszerek esetén jól alkalmazható, emiatt a kvantumugrások módszerére ez esetben nem lett volna szükség. Alkalmazását azért választottuk, mert betekintést nyújt egy-egy kiszemelt atom időfejlődésébe. Lehetőséget nyújt egy-egy trajektória fáziskorrelációinak megfigyelésére, és ennek időbeli átlagával jellemeztük a kvantuminterferenciát.

Először a dekoherencia és kvantuminterferencia kérdéskörét vizsgáltuk, egymással ütközéseken keresztül kölcsönható rubídiumatomok rendszerében. A kapcsolódó kísérletben az atomok egy kisnyomású atomfelhőt alkotnak, ahol a felhő sűrűségével és a vákuum mértékével szabályozható az ütközési ráta. Az atomok belső állapotáról rezonancia-fluoreszcencia spektrum mérésével kaptak információt a kísérlet végzői. A megfigyelt spektrumban egy éles bemélyedést tapasztaltak, amint az ütközési ráta megha-

ladta a Rabi-frekvenciát. A jelenség mélyebb megértése céljából először egy egyszerű modellt használva meghatároztuk a spektrumot analitikusan a kvantum regressziós tétel segítségével. Az ütközéseket az atomi átmeneti frekvenciában megjelenő zajjal modelleztük. A rendszer leírása a felöltözött atomi állapotok segítségével történt, mivel ezzel az elhangolás és a koherens gerjesztés hatása egy forgó koordinátarendszerbeli leírásra redukálódik. Ezután a kvantumugrások módszerét használva kvantumtrajektóriákat szimulálva numerikusan vizsgáltuk egy-egy trajektória időfejlődését. Ez a mászter-egyenlethez képest, mely statisztikus átlagokra vonatkozik, más jellegű, mikroszkópikus értelmezést tesz lehetővé – egy-egy kvantumugrás megfelel az ütközéseknek, míg közöttük az atom a Rabi-oszcillációnak megfelelően fejlődik. Az időfejlődésben az ütközési ráta növelésével időbeli korrelációkat lehetett megfigyelni. E korrelációk mértékét párhuzamba állítottuk a spektrumban megfigyelhető bemélyedés mértékével, és közöttük egyértelmű összefüggést találtunk. Ennek alapján az időbeli fázisstabilizáció létrejöttével, és a miatta megjelenő kvantuminterferenciával magyaráztuk a spektrumban megfigyelt keskeny bemélyedést.

A továbbiakban stimulált Raman-átmenettel történő adiabatikus populáció-átvitel (STIRAP) technikáját alkalmaztuk egy hat szintű atomi rendszerre. A dekoherencia jelensége a sötét altér fogalmán keresztül kapcsolódik a témakörhöz. Ez az az állapothalmaz, amelyből a koherens és az inkoherens folyamatok együttés hatására további átmenetek nem történnek. Elnevezése abból származik, hogy az atomi rendszer fotont nem emittál,



ha állapota a sötét altérben található. Természetesen a sötét altérbeli állapotok élettartama is véges, mivel a mászter-egyenletben figyelembe vett folyamatok nem írják le teljes mértékben a fizikai rendszert, más átmenetek is előfordulhatnak a valóságban, azonban ezek elhagyhatók amennyiben a sötét altér koherenciaideje jóval meghaladja a STIRAP folyamat végrehajtásának idejét. A sötét altér a koherens gerjesztés paramétereinek változtatásával más és más lehet. A paraméterek változtathatóak olyan módon, hogy a sötét altérbeli állapot adiabatikus átmeneten menjen keresztül, azaz a rendszer a folyamat során végig közelítőleg ebben az altérben maradjon. Ez azonban nem lehetséges teljes mértékben, így lényeges azt vizsgálni, hogy a populáció-átvitel végrehajtása során a dekoherencia milyen mértékben szól bele az állapot időfejlődésébe. A STIRAP technika lényeges ismert tulajdonsága, hogy a dekoherencia káros hatásai nagyrészt elkerülhetőek. A Schrödinger-egyenlet numerikus szimulációjával határoztuk meg a sötét altérből a nem adiabatikus csatolás miatt kikerült populáció nagyságát. Ha ez a folyamat során végig nagyon alacsony marad, akkor gyakorlatilag nem található populáció abban az altérben, ahonnan a relaxáció kivezethetne. A végállapotot az adiabatikusság feltétele mellett analitikusan is meghatároztuk, és megmutattuk, hogy az elérhető állapotok halmaza lefedi az összes lehetséges szuperpozíciót, amely a populáció-átvitel céljaul szolgáló atomi nívókból összeállítható.

Végül egy atomi rendszer degenerált alapállapotában végeztünk állapottervezést. Az alapállapotok különböző polarizációjú koherens lézimpul-

zusokkal hatottak kölcsön, és egy gerjesztett állapoton keresztül Raman-átmenetekben vettek részt. Az időfejlődést mászter-egyenlettel írtuk le. Vizsgáltuk azt az esetet is, amikor a gerjesztett állapotból kiszóródás történik, és a kiszóródott populációt egy pumpálási folyamat pótolja. Mindkét esetben meghatároztuk a rendszer aszimptotikus állapotait a mászter-egyenlet időfüggetlen analitikus megoldásaiként, és megadtuk, hogy adott kezdeti állapot esetén mi a végállapot. Az aszimptotikus állapotok szükségszerűen a sötét alterekben találhatóak, amelyek a vizsgált rendszerben két dimenziósak. Más és más amplitúdó-arányú és relatív fázisú lézeringimpulzusokat használva elérhető, hogy a relaxációs folyamatok után egy széles körből megválasztható előírt állapotba kerüljön a rendszer. Az optimális lézeringimpulzus paramétereket numerikusan, konjugált gradiens módszer segítségével kerestük meg az aszimptotikus állapotok alakját felhasználva, majd a kapott lézeringimpulzusok hatását a mászter-egyenlet numerikus Runge-Kutta integrálásával ellenőriztük.

## Tézisek

1. Koherensen gerjesztett rubídium atomokból álló gázfelhő spektrumában megfigyelt anomális Mollow-spektrum okait elemezve megmutattam, hogy az atomok közötti ütközéseket sztochasztikus kölcsönhatással modellezve, a kölcsönhatás erősségét növelve a megfigyelésekkel egybevágó fluoreszcencia spektrum kapható. A folyamat hátterét rész-

letesebben vizsgálva magyarázatot adtam arra, hogy miként alakíthat ki az atomok közötti gyakori inkoherens ütközési folyamat hosszabb időbeli koherenciát a rendszerben. Bebizonyítottam, hogy ez utóbbi tehető felelőssé a spektrumban megfigyelhető keskeny bemélyedésért. Kifejtettem, hogy a jelenség oka a koherens kölcsönhatás által felöltözött állapotrendszerben megjelenő azonos útvonalú kölcsönhatások között fellépő kvantuminterferencia. [1, 2].

2. Hatékony eljárást javasoltam numerikus, kvantumtrajektóriákon alapuló rezonancia-fluoreszcencia, abszorpciós és emissziós spektrumok számítására. A kifejlesztett módszer a nagy sztochasztikus zajjal, hosszú karakterisztikus idővel jellemezhető kisdimenziós kvantumrendszerek esetén előnyösen alkalmazható [1, 5].
3. Inkoherens és koherens folyamatokat kombinálva, az adiabatikus populáció-átvitel technikáját alkalmazva megmutattam, hogy egy hat szintű atom kezdeti alapállapota az atomi rendszerrel kölcsönható koherens gerjesztés paramétereinek változtatásával a három gerjesztett atomi állapot tetszőleges szuperpozíciójába átvihető, a gerjesztés amplitúdójától és időbeli lefolyásától kevésbé függő módon. A gerjesztő lézerek relatív amplitúdója és fázisa is jelentősen befolyásolja a végső állapot populáció eloszlását [3].
4. Megvizsgáltam, hogy az előző tézispontban vázolt állapottervezési eljárásban az inkoherens folyamatok, melyek az adiabatikus populáció-

átvitel során elkerülhetetlenül szerepet kapnak, milyen feltételek mellett okoznak csupán kis mértékű eltérést a kívánt célállapottól. Megadtam egy, a gerjesztő lézerek amplitúdójára és azok időbeli lefolyására vonatkozó feltételt, mely biztosítja, hogy ez az eltérés kicsi, és a teljes folyamat közel adiabatikusan zajlik [3].

5. Egy 4 szintű, lambda elrendezésű állapotrendszerű, koherens lézerrésszel kölcsönható atomi rendszerben, figyelembe véve a dekoherencia jelenségét is, meghatároztam az aszimptotikus időfejlődést, valamint a kezdeti és végállapotok közötti összefüggést. Megmutattam, hogy az állapottér egy kétdimenziós alterébe relaxál az állapot, és ez az alter a koherens lézerek relatív amplitúdójának és fázisának változtatásával tetszőlegesen beállítható [4].
6. Többdimenziós, változtatható sötét alterrel rendelkező kvantumrendszerben az alteret ugrásszerűen többször változtatva állapottervezést lehet végezni. Az előző tézispontban említett rendszert példaként vizsgáltam. Mind abban az esetben, amikor külső állapotokba nem történik kiszórás, mind akkor, amikor a kiszóródott populációt pumpálással pótoljuk, megmutattam, hogy kevés számú lépésből nagy pontossággal a kevert és tiszta állapotok széles köre preparálható [4].

## Következtetések

Egy konkrét kísérletet elemezve megmutattuk, hogy koherens és inkohereus folyamatok együttes jelenléte atomi rendszerekben hozzájárulhat kvantuminterferencia létrejöttéhez, és hogy az inkohereus folyamatok nem csupán arra képesek, hogy a kvantumállapot dekoherenciája folytán a kvantumtulajdonságok elvesztését okozzák. Együttesen alkalmazva koherens folyamatokkal nem akadályozzák az adiabatikus populáció-átvitelt, valamint robusztus állapottervezésben jutnak szerephez. Az értekezésben vázolt állapottervezési módszerek általánosak, nem csupán atomi rendszerekben, optikai kölcsönhatások mellett alkalmazhatóak, hanem hasonló Hamilton-operátorral és inkohereus csatornákkal modellezhető más rendszerekben is.

A kvantuminformatika témakörén belül, bármilyen megvalósítását is tekintjük egy kvantumszámítógépnek, a dekoherencia jelensége az állapotpreparálás, tárolás és műveletvégzés területén megjelenik. Hatása a kvantumalgoritmusok szempontjából káros, és kiküszöbölésére számos sémát fejlesztettek ki, ilyenek például a dekoherencia-mentes (sötét) alterekbeli állapottárolás és az előre meghatározott alterekből való kilépést detektáló és javító kvantum hibajavítás. Ezen sémák gyakorlati megvalósításához az inkohereus folyamatok jobb megismerése és esetenként konstruktív felhasználása hasznos segítséget nyújthat.

## Kapcsolódó közlemények

- [1] A. Karpati, P. Adam, W. Gawlik, B. Łobodziński, and J. Janszky, *Quantum-trajectory approach to stochastically induced quantum-interference effects in coherently driven two-level atoms*, Phys. Rev. A **66**, 023821 (2002).
- [2] A. Karpati, P. Adam, W. Gawlik, B. Łobodziński, and J. Janszky, *Quantum-trajectory approach to stochastically induced quantum-interference*, Prog. Phys. **51**, 179 (2003).
- [3] A. Karpati and Z. Kis, *Adiabatic creation of coherent superposition states via multiple intermediate states*, J. Phys. B **36**, 905 (2003).
- [4] A. Karpati, Z. Kis, and P. Adam, *Engineering mixed states in a degenerate four-state system*, Phys. Rev. Lett. **93**, 193003 (2004).
- [5] A. Karpati, P. Adam, and J. Janszky, *A method for calculating two-time correlation functions in the quantum trajectory approach*, J. Opt. B **6**, S79 (2004).

## További közlemények

- [6] P. Adam, A. Karpati, J. Janszky, S. Szabo, and E. Lugosi, *Relations between input and output states of integrated optical systems*, Laser Phys. **1**, 127 (2000).
- [7] A. Karpati, P. Adam, J. Janszky, M. Bertolotti, and C. Sibia, *Nonclassical light in complex optical systems*, J. Opt. B **2**, 133 (2000).
- [8] S. Szabo, P. Adam, and A. Karpati, *Phase optimized light in complex optical systems*, Prog. Phys. **49**, 1109 (2001).
- [9] P. Adam, A. Karpati, W. Gawlik, and J. Janszky, *Competitive stochastic noises in coherently driven two-level atoms and quantum interference*, J. Opt. B **5**, S221 (2003).
- [10] Z. Kis, A. Karpati, B.W. Shore, and N.V. Vitanov, *Stimulated raman adiabatic passage among degenerate-level manifolds*, Phys. Rev. A **70**, 053405 (2004).
- [11] Z. Kis, N.V. Vitanov, A. Karpati, C. Barthel, and K. Bergman, *Creation of arbitrary coherent superposition states by stimulated raman adiabatic passage*, Phys. Rev. A **72**, 033403 (2005).
- [12] A. Karpati, P. Adam, Z. Kis, and J. Janszky, *Stochastic unraveling of the time-evolution operator of open quantum systems*, Eur. Phys. Lett. **75**, 209 (2006).