

*Erősen nemklasszikus
kvantumállapotok és a környezet által
előidézett dekoherencia*

Földi Péter

Témavezető: Dr. Benedict Mihály

Szegedi Tudományegyetem,
Elméleti Fizikai Tanszék
2002

1 Előzmények és tudományos célkitűzések

Előzmények

A kvantummechanika kapcsolata a klasszikus mechanikával olyan kérdés, amely a kvantumelmélet kialakulása óta a figyelem középpontjában áll. A dekoherencia fogalma azzal a tapasztalattal áll összefüggésben, hogy mindennapi környezetünkben — amelyet leginkább a makroszkopikus jelzővel írhatunk le — nem találjuk jelét a kvantummechanikában alapvető szuperpozíció elvének. Ez az ellentét Schrödinger híres gondolkísérlete nyomán [1,2] akkor a legszembeszökőbb, amikor klasszikusan értelmezhető és jól megkülönböztethető állapotok (mint egy élő és kimúlt macska) kvantummechanikai szuperpozícióját tekintjük. Ezek az erősen nemklasszikus, ún. Schrödinger-macska állapotok kvantummechanikailag megengedettek, míg egy klasszikus világban, éppen a kvantummechanikára jellemző szuperpozíciós elv hiánya miatt, ilyen állapotok nem fordulhatnak elő.

A környezet által előidézett dekoherencia elmélete, amely az 1970-es években fejlődött ki [3] és a következő évtizedben vett új lendületet [4], azon alapul, hogy a kvantummechanika univerzálisan érvényes, helyesen írja le nemcsak a mikro–részecskék, hanem a makroszkopikus testek viselkedését is, mindenféle korlátozás nélkül. Az alapvető kérdés, ami ebben az esetben

nyilvánvalóan felmerül, arra vonatkozik, hogyan lehetséges klasszikus tulajdonságok megjelenése egy olyan rendszerben, ahol mindent a kvantummechanika szabályai irányítanak. A ma leginkább elfogadott elmélet ezzel a problémával kapcsolatban azt hangsúlyozza, hogy a (kvantum-mechanikai) rendszerek sohasem lehetnek tökéletesen zártak, mindig csatolódnak — ha mégoly gyengén is — a környezetükhöz. A környezettel való kölcsönhatás óhatatlanul befolyásolja az általunk vizsgált rendszert, jellemzően az történik, hogy összefonódott rendszer-környezet állapotok jönnek létre, amelyekhez már csak globálisan rendelhető hozzá egy kvantummechanikai tiszta állapot. Ebből a nézőpontból a dekoherencia mint dinamikai folyamat nem más, mint a rendszer nemklasszikus kvantumállapotainak igen gyors delokalizációja, azaz összefonódása a környezettel, ami lokálisan (azaz pusztán a rendszerre koncentrálna) a nemklasszikus állapotok eltűnéseként jelentkezik.

Ismerve a környezet és az általunk vizsgált rendszer közötti kölcsönhatást, meghatározható, hogy melyek a rendszernek azok az állapotai, amelyek a leglassabban veszítik el jellemző tulajdonságaikat, legstabilabbak a környezet hatásaival szemben. Az ismert eredmények azt mutatják, hogy ezek a stabil állapotok klasszikusan jól értelmezhetőek, nem rendelkeznek olyan tulajdonságokkal, amelyek a mindennapi tapasztalattal ellentétesek. Szuperpozícióik azonban kifejezetten rövid életűek, így a dekoherencia eredménye a stabil állapotok klasszikus keveréke lesz. Ezen állapotok meghatározása tehát

alapvetően fontos; egy adott kvantumrendszerben segítségével állapíthatjuk meg a dekoherencia irányát, azaz válaszolhatunk arra a kérdésre, hogy adott kezdeti kvantumállapot esetén mely klasszikus állapotok jelenhetnek meg.

A kísérleti módszerek gyors fejlődésének köszönhetően, a dekoherencia oka és dinamikája ma már laboratóriumi körülmények között is megfigyelhető. Többek között üregrezonátor állapotai [5], összefonódott polarizációs állapotú fotonok [6], vagy akár egyetlen csapdázott ion is [7] vizsgálható ebből a szempontból.

A kvantum szuperpozíciók eltűnésének mind mélyebb megértése praktikus haszonnal is járhat. A kvantum információ technológia egy fiatal, de gyorsan fejlődő tudományterület, ahol a dekoherencia elsősorban mint akadály merül fel: a kvantum algoritmusok klasszikusan utolérhetetlen ereje pontosan az információt tároló, szállító és feldolgozó objektumok kvantum természetében rejlik [8]. Amennyiben a dekoherencia hatására ezen objektumok állapotai közötti kvantummechanikai interferencia eltűnik, akkor használhatatlanná is válnak mint egy kvantumszámítógép lényegi alkatrészei. Ezért lehet kulcsfontosságú olyan, ún. dekoherencia-mentes állapotok alkalmazása, amelyek nemcsak önmaguk stabilak a környezet hatásaival szemben, de szuperpozícióik is elegendően hosszú életűek a gyakorlati alkalmazás szempontjából.

Tudományos célkitűzések

Az eddig leírtak szolgáltatták a motivációt ahhoz, hogy konkrét kvantumrendszerek vizsgálatát tűzzük ki célul a környezet által előidézett dekoherencia elméletének a keretében. Az egyik választott fizikai rendszer egy rezgő kétatomos molekula, ahol a magok potenciális energiája távolságuk anharmonikus függvénye. Vizsgálni szeretnénk továbbá két energiaszinttel leírható atomok rendszerét [9], ami a kvantumoz információtechnológia szempontjából fontos. A dekoherencia irányának a meghatározása mindkét esetben mélyebb betekintést nyújt e nyílt rendszerek viselkedésébe a pusztán numerikus eredményeknél. A dekoherencia karakterisztikus idejének a meghatározása megmutatja, melyek azok az állapotok, amelyek a leginkább ellenállnak a környezet hatásainak, ami gyakorlati szempontból is érdekes. A kvantumoz szuperpozíciók eltűnése mellett a környezettel való energiacsere is egy olyan folyamat, amely a legtöbb nyílt kvantumrendszerben lejátszódik. A dekoherencia és az energia-disszipáció kapcsolatának a vizsgálata is a kitűzött célok között szerepel. Az ily módon nyert tapasztalatainkat felhasználva szeretnénk egy olyan eljárást javasolni, amely ma elérhető kísérleti berendezésekkel megvalósítható és képes a kvantumoz információfeldolgozás szempontjából fontos dekoherencia-mentes állapotokat előállítani.

2. Vizsgálati módszerek

A vizsgálatok alapvetően a környezettel kölcsönható kvantumrendszerek leírására használatos módszereken alapulnak. Ahhoz, hogy pusztán a minket érdeklő rendszerre tudjunk koncentrálni, szükséges egyfajta átlagolást végeznünk a környezet lehetséges állapotaira. Azzal az esettel foglalkozunk, amikor a környezeten belüli relaxáció időállandója sokkal rövidebb a vizsgált rendszer folyamatainak a karakterisztikus idejénél. Ebben az úgynevezett Markov-féle esetben levezethető egy mester egyenletnek nevezett differenciálegyenlet, amely leírja a rendszer időfejlődését anélkül, hogy a környezet állapotát részletesen figyelembe kellene vennünk [10,11]. Különböző kezdeti állapotok esetén a rövid távú időfejlődést figyelembe véve analitikus módon következtethetünk az adott állapot stabilitására. A mester egyenlet tetszőleges időpillanatig történő megoldását numerikus integrálással kapjuk. Nyomon követhetjük, hogyan fonódik össze a környezet és a rendszer állapota megfelelően választott mennyiségek, például az entrópia, időről időre történő kiértékelésével. A vizsgált rendszer Wigner függvénye [12,13] amellet, hogy jól szemlélteti a dekoherencia folyamatát, arra is alkalmas, hogy segítségével meghatározzuk azt, hogy a vizsgált rendszer állapota mennyire tekinthető klasszikusnak [14].

3. Új tudományos eredmények

1. Megmutattuk, hogy a dekoherencia és a disszipáció folyamata dinamikailag megkülönböztethető egymástól kétállapotú atomok rendszerében éppúgy, mint egy rezgő kétatomos molekula esetében. Mindkét fizikai rendszerben módszert adtunk a dekoherencia karakterisztikus idejének a meghatározására.

2. Új mester egyenletet vezetünk le egy általános, nyílt anharmonikus rendszer esetére, úgy, hogy figyelembe vettük azt a tényt, hogy ebben az esetben a környezet által előidézett kvantummechanikai átmenetek gyakorisága függ attól, hogy mely átmenetről van szó.

3. Megmutattuk, hogy az anharmonikus potenciálban mozgó molekuláris hullámcsomagok dekoherenciájára egy általános séma adható, amely szerint a dekoherencia eredményeképpen létrejövő sűrűségoperátor értelmezhető úgy, mint a megfelelő klasszikus test fázisrajektóriája mentén egyenletesen elosztott, lokalizált állapotok keveréke.

4. Molekuláris hullámcsomagokra alkalmazva az 1. pontban említett módszert, meghatároztuk a dekoherencia karakterisztikus idejét különböző állapotokból kiindulva, és azt találtuk, hogy ez az idő a rezgés amplitúdójának a növelésével egyre csökken.

5. Az 1. pontban említett módszert kétállapotú atomok rendszerére alkalmazva megmutattuk, hogy az atomi koherens állapotok ún. szimmetrikus szuperpozíciói, azaz szimmetrikus Schrödinger-macska állapotok esetén a dekoherencia folyamata kiugróan lassú.

6. Sémát adtunk kétállapotú atomok rendszerében a dekoherencia menetére, meghatározva annak irányát is. Sémánk érvényes a lassú dekoherenciát mutató szimmetrikus szuperpozíciók esetére is.

7. Javaslatot tettünk üregrezonátorban lévő kétállapotú atomok dekoherencia-mentes állapotainak a létrehozására. A javasolt módszert elemezve megmutattuk, hogy az megvalósítható az üregrezonátoros kvantum-elektrodinamikai vizsgálatok céljára kifejlesztett mai kísérleti eszközökkel.

Irodalomjegyzék

- [1] E. Schrödinger, *Naturwissenschaften* **23**, 807 (1935).
- [2] E. Schrödinger, *Naturwissenschaften* **23**, 823 (1935).
- [3] O. Kübler, H. D. Zeh, *Ann. Phys.* **76**, 405 (1973).
- [3] W. H. Zurek, *Phys. Rev. D* **24**, 1516 (1981).
- [5] S. Osnaghi, P. Bertet, A. Auffeves, P. Maioli, M. Brune, J. M. Raimond, S. Haroche, *Phys. Rev. Lett.* **87**, 037902 (2001).
- [6] P. G. Kwiat, E. Waks, A. G. White, I. Appelbaum, P. H. Eberhard *Phys. Rev. A* **60**, R773 (1999).
- [7] H. C. Nägerl, D. Leibfried, H. Rohde, G. Thalhammer, J. Eschner, F. Schmidt-Kaler, R. Blatt, *Phys. Rev. A* **60**, 145 (1999).
- [8] M. A. Nielsen, I. L. Chuang, *Quantum Computation and Quantum Information* (Cambridge Univ. Press, Cambridge, 2000).
- [9] M. G. Benedict, A. M. Ermolaev, V. A. Malyshev, I. V. Sokolov, E. D Trifonov, *Superradiance* (Institute. of Physics Publishing, Bristol 1996).
- [10] G. S. Agarwal, *Springer Tracts in Modern Physics* **70**, 1 (Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 1974).
- [11] M. Gross, S. Haroche, *Phys. Rep.* **93**, 301 (1982).
- [12] R. L. Stratonovich, *Sov. Phys. JETP* **4**, 891 (1957).
- [13] G. S. Agarwal, *Phys. Rev. A* **24**, 2889 (1981).
- [14] M. G. Benedict, A. Czirják, *Phys. Rev. A* **60**, 4034 (1999).

A tudományos közlemények jegyzéke

Közlemények, amelyek a dolgozat alapjául szolgálnak:

Péter Földi, Mihály G. Benedict, Attila Czirják:

Acta Phys. Slovaca **48** (3): 335-342, 1998.

Péter Földi, Attila Czirják, Mihály G. Benedict:

Acta Phys. Slovaca **50** (3): 285-292, 2000.

Péter Földi, Attila Czirják, Mihály G. Benedict,

Phys. Rev. A **63** (3): art. no. 033807, 2001.

Péter Földi, Mihály G. Benedict, Attila Czirják,

Fortschr. Phys. **49** (10-11): 961-966, 2001.

Péter Földi, Mihály G. Benedict, Attila Czirják,

Phys. Rev. A **65** (2): art. no. 021802, 2002.

Péter Földi, Attila Czirják, Balázs Molnár, Mihály G. Benedict,

Opt. Express **10** (8): 376-381, 2002.

Péter Földi, Mihály G. Benedict, Attila Czirják,

J. Mod. Opt. **49**: 1263-1268, 2002.

Péter Földi, Mihály G. Benedict, Attila Czirják, Balázs Molnár,

Preprint, quant-ph/0208141 2002. Elküldve a *Phys. Rev. A*-ba.

Egyéb közlemények:

Omar Hadjar, Péter Földi, Ronnie Hoekstra, Reinhard Morgenstern, Thomas

Schlathöler, *Phys. Rev. Lett.* **84** (18): 4076-4079, 2000.

Balázs Molnár, Mihály G. Benedict, Péter Földi,

Fortschr. Phys. **49** (10-11): 1053-1057, 2001.

A fenti publikációkra kapott független hivatkozások száma: 10.

