

## **Kvantumeffektusok elmélete nanorendszerekben**

OTKA-azon.: 75129

Szakmai zárójelentés

Az elmúlt nyolcvan év egyik nagy tudományos kihívása a mikroszkopikus kvantummechanika és a makroszkopikus klasszikus mechanika közötti határ feltérképezése. Ez hosszú évtizedekig pusztán elméleti kihívás volt. A kvantumos és klasszikus méretek közötti határon nano-méretű testekkel, izolált, ellenőrzött kísérleteket csak nemrégiben végeznek. A példák évről évre szaporodnak, millikelvin körüli hőmérsékletekre hűtött nanomechanikus oszcillátoroktól dielektromosan lebegtetett majd leejtett nano-mikro próbatestekig. A kvantumos felbontású monitorozás kísérleti megvalósítása szükséges és lehetséges is immár. A kísérleti munka a világ sok laboratóriumában rohamléptekkel halad. Kutatásainknak régóta nemzetközileg elismert része a standard kvantumelméletet a nano-világtól felfele módosító spontán hullámfüggvény-kollapszusok DP-elmélete. Ha van bármi esély, hogy a standard kvantummechanikától való eltéréseket kísérletekben megfigyeljünk, a nanomechanikai rendszerek ebben a tekintetben a legígéretesebb jelöltek.

N. Wolchower: Physicists Eye Quantum-Gravity Interface (Scientific American Nov 5, 2013)

<http://www.scientificamerican.com/article.cfm?id=physicists-eye-quantum-gravity-interface>

Kutatási eredményeinket egymással vagy direkt kötődő, vagy a kvantumelméletre jellemző rejtettebb, de jól ismert módon kapcsolódó csoportokban foglaljuk össze.

### **1. Kvantumos viselkedés keresése nanomechanikai rendszerekben**

A Michelson interferométeres opto-nanomechanikai kísérlethez [Marshall et al.: PRL 91, 130401 (2003)], mely a DP-modellt célzó számos teszt prototípusa, megmutattuk, hogy az egyik karban végzett fázismodulációval javulna a nano-kvantumos viselkedés és az attól való spontán kollapszusos eltérés kimutathatósága [12].

### **2. Nem-markovi effektusok nyitott kvantumrendszerekben**

Mindmáig megoldatlan a nem-markovi monitorozás kérdése. Ezért a nem-markovi spontán kollapszus teóriák realitása, elvi ellenőrzhetősége is nyitott kérdés. A kvantum-optikában régóta ismert, de csak markovi közelítésben kidolgozott befutó-kifutó terek modelljét kidolgoztuk a nem-markovi esetre, megmutatva a monitorozhatóság lehetőségét és korlátait [13]. Mélyebb megértéshez az egyszerűbb, nem-markovi kvantumlánccokat vizsgáltuk. Megmutattuk, hogy markovi kvantumlánccá alakíthatóak, ha memória qubiteket rendelünk szatellitként a nyitott kvantumrendszerhez [16].

A markovi közelítésben a monitorozás kvantumelmélete jól kezelhető. Valós idejű módszert írtunk le a teljes hullámfüggvény monitorozására, ahol az ismeretlen kezdőállapotú kvantált részecske egy ismert potenciálban mozog. Levezettük a modell csatolt Ito-stochasztikus Schrödinger egyenleteit. Numerikus szimulációval

megmutattuk, hogy még kaotikus potenciálban is lehetséges a részecske hullámfüggvényének követése [7].

Az egyenletek alkalmazhatóságát azóta részletesen vizsgálták Bose-Einstein kondenzátumra [Hiller et al. PRA86, 033624, 2012].

### **3. A kvantum-információ irreverzibilitással és nyitottsággal kapcsolatos tulajdonságai**

Új entropikus relációt vezettünk le a termodinamikai és a kvantum entrópia-keltés kvantitatív egyezéséből kiindulva [15].

### **4. Newton-Schrödinger elmélet alkalmazása nanorendszerekre**

1987-ben a témavezető fenomenologikus mászter egyenletet javasolt [PLA 120, 377 (1987)], ez az alapja a “gravitációs” (G-related) spontán hullámfüggvény-kollapszus elméletnek. Ezt DP-modellnek is hívják Penrose független, de egyenértékű elmélete nyomán. Megmutattuk, hogy a modell mászter egyenlete a gravitáció és kvantált anyag hybrid dinamikájából is levezethető [10]. A hybrid dinamikák mászter egyenleteire általános alakot is konstruáltunk, a Lindblad típusú és Pauli típusú mászter egyenletek egyesítéseként [24]. (Minket a fundamentális alkalmazások érdekeltek. A hybrid, vagyis kvantum-klasszikus kinetikus egyenletek egyébként fontos eszközei gyakorlatibb területeknek, pl. kvantum kémiában.)

A Kivonatban is kiemelten értékeli [10] eredményünk: “... by treating the gravitational interaction between two mechanical resonators as a classical measurement channel, a gravitational decoherence model results that is equivalent to a model first proposed by Diosi.” [Kafri, Taylor, Milburn: arXiv:1401.0946 (2014)]

Kiemelt erőfeszítéseket tettünk a spontán kollapszus DP-modellje kutatásában. Megfordítottuk az eredeti koncepciót a gravitáció szerepéről a kollapszusban. Azt vizsgáltuk, miért ne lehetne a spontán kollapszus az elsődleges, és okozhatná a gravitáció jelenségét? Cikksorozatban (és előadássorozatban) jutottunk el az új hipotézis megfogalmazásától [2] az érvek finomításához [3,18,20], végül egy módosított Newton-Poisson egyenlethez [17], mely kísérletileg ellenőrizhető markáns effektusokra vezet [23]. A spontán kollapszus modellek történetében először határoztuk meg a kollapszus mechanizmust nano- vagy makrotestek belső, akusztikus rezgési módusaira [25].

### **5. Kvantum Brown mozgás**

Boltzmann ütközési modelljét eredetileg a témavezető tette alkalmassá akár nanotömegű test kvantumos súrlódásos mozgásának leírására gázban [EPL 30, 63 (1995)]. Az időközben továbbfejlesztett lineáris kvantum Boltzmann egyenletben inkonzisztenciákat találtunk. Megmutattuk, hogy impulzus szuperpozíciók fennmaradása az ütközések közötti idő végességéből következhet. Új kvantum lineáris Boltzmann egyenletet javasoltunk [1], kritikára válaszul megerősítettük álláspontunkat a gáztartály okozta végső impulzus dekoherencia létezéséről [5].

### **6. Kvantumelmélet alapjai**

Egy "szabad akarat" típusú elvet alkalmaztunk a hullámfüggvényből származtatott hasznos adatokra, melyek “szabad akarattal” visszacsatolhatók a dinamikába, míg a

haszontalanok nem. Az elvről megmutattuk, hogy alkalmas a kvantum-klasszikus határ különböző elméletei közötti szelekcióra [14]. Zárt kifejezést vezettünk le elő- és utószelektált gaussi részecskenyláb kvantum mérési statisztikáira, kapcsolatba hozva a jól ismert Aharonov-Albert-Vaidman gyenge méréseket [PRL 60, 1351 (1988)] a fázis-kontraszt mikroszkópiával, jelentősen kitágítva az utószelektált mérések érvényességi tartományát [6]. Az Aharonov-Vaidman protektív mérésről.[PLA 178, 38 (1988)] megmutattuk, hogy elsődleges szerepe abban lehet, hogy egy ismeretlen dinamikájú kvantumrendszer stacioner állapotait egyetlen méréssel meg tudjuk határozni [22]. Alapkérdéssé lett mára, hogy milyen struktúrájú stochasztikus Schrödinger egyenletek írhatnak le spontán hullámfüggvény kollapszust. Megmutattuk, hogy egy frissen közölt tétel [Bassi,Dürr,Ulbricht: PRL 111, 210401 (2013)] a kötelező Lindblad szerkezetű mászter egyenletről inkorrekt, elsőként konstruáltunk stochasztikus Schrödinger egyenletet nem-Lindblad nyitott kvantumrendszerre [21].

### **Könyvek, szerkesztések, egyéb aktivitás**

A Springer kiadó felkérése nyomán megjelent 2007-es kvantum-információ elméleti monográfiánk bővített második kiadása [9]. Kvantummechanika tankönyvünknek megjelent harmadik bővített kiadása [26]. Társszerkesztésünkben megjelentek a DICE nemzetközi workshop sorozat 2008-10-12-es előadásainak kötetei [4,11,19]. Kvantum-nanomechanika címmel nyilvános internet-oktatási anyag készítettünk: [fizipedia.bme.hu/images/9/93/KvantumNanomechanika.pdf](http://fizipedia.bme.hu/images/9/93/KvantumNanomechanika.pdf).

A vezető kutatók 20 meghívott előadást tartottak nemzetközi konferencián/műhelyen, 7 szemináriumot bel- és külföldön, 1-1 hazai és külföldi kollokviumot, 5 előadást hazai nyári/téli iskolán. A témavezető 2 nemzetközi konferencia társszervezője, 3-nak tanácsadó testületi tagja volt. 2012-ben Akadémiai Díjat vett át, az MTA XI. Osztály közgyűlésén előadást tartott. A kutatás témájával kapcsolatosan 3 sikeres MSc szakdolgozat készült (mindhárom hallgató jelenleg kutatói pályán van, Kallus Zs. résztvevő kutatónk), 1 MSc szakdolgozat készül:

Kallus Zsófia: Ütközési termalizáció mászter egyenletei (MSc ELTE 2010); Bencédi Gyula: Qubitek összefonódása véletlen állapotokban (MSc ELTE 2010); Házi András: Stochasztikus Schrödinger egyenlet vizsgálata fehér zajban (MSc SzTE 2013); Német Nikolett: Kvantumos viselkedés keresése az optomechanikában (MSc ELTE 2014-ben várható)