

Bírálat

*Tóth Géza: Entanglement detection and quantum metrology in quantum optical systems
(Összefonódás észlelése és kvantummetrológia kvantumoptikai rendszerekben)*

című MTA doktori értekezéséről

A kvantumelmélet egyidős a 20. századdal, a Schrödinger, Heisenberg és mások nevével fémjelzett kvantummechanika is már csaknem egy évszázada ismert. A kvantummechanika egyenleteinek alkalmazásával számos problémát sikerült megoldani, többek között az atomok, molekulák és a makroszkopikus szilárdtestek világában is. Ezek a Bohr-hoz és a Koppenhágai iskolához kapcsolódó kutatások jelenleg is teljes erővel folynak és fontos és értékes eredményeket szolgáltatnak.

Mindezen számolási sikerek ellenére számos alapvető, koncepcionális kérdés tisztázatlan maradt a kvantumelmélet alapjait illetően. Az első ilyen kérdést az un. EPRN (Einstein-Podolsky-Rosen) paradoxon jelenti, mely szerint a kvantumelméletet lokálisan értelmezett és rejtett paramétereket tartalmazó elméletből lehet származtatni. Az EPRN paradoxon által felvetett lehetőséget John Bell vizsgálatai cáfolták meg. Lokális változókat tartalmazó elméletek esetén a mérésekkel meghatározható valószínűségek bizonyos egyenlőtlenségeket kell hogy teljesítsenek, melyeket a kvantumos rendszerek általában sértenek. Ezen állítást kísérletekkel egyre nagyobb pontossággal sikerült igazolni, fotonok, elektronspínok és atomok rendszere esetén is. A Bell-egyenlőtlenségeket teljesítő kvantummechanikai állapotok a szorzatállapotok és az azok általánosításával nyerhető un. szeparálható állapotok. Ugyanakkor a Bell-egyenlőtlenséget sértő állapotok összefonódtak.

Az utóbbi évtizedek elméleti munkáinak eredményeként sikerült igazolni, hogy összefonódott kvantumállapotok használatával bizonyos informatikai problémákat sokkal hatékonyabban lehet kezelni, mint a hagyományos klasszikus eszközökkel. Az így létrejött kvantuminformatika tudománya magában foglalja a kvantumalgoritmusokat, a kvantumkommunikációt és a kvantumtitkosítást is. Első átütő eredményeiként meg lehet említeni a lehallgatás mentes kvantumprotokoll megalkotását, valamint a nagy számok primfelbontására szolgáló Shor-féle kvantumalgoritmust.

Az előzőekben leírtak szerint a kvantumos állapotok összefonódottsága erőforrásként használható informatikai problémák megoldásánál, ezért az állapotok összefonódásának keresése, azoknak fizikai rendszerekben történő kimutatása és mérése központi fontosságú. Tóth Géza MTA doktori disszertációja ezen kérdéskör vizsgálatával foglalkozik. Célul tűzi ki olyan eljárások keresését, melyek felismerik az összefonódottságot a különböző fizikai rendszerekben. Ehhez olyan módszereket fejleszt ki, melyek viszonylag kevés mérés alkalmazásával képesek összefonódottságot detektálni. A dolgozatban néhány részecskére vonatkozó módszerek és soktest-rendszerekre alkalmazható eredmények is találhatók. A dolgozat alapvetően elméleti munka, a benne található eredmények általában szigorú matematikai módszerekkel lettek elérve. Bizonyos problémáknál numerikus számolások eredményei is szerepelnek, melyek 10-14 részecskét tartalmazó véges mintákra vonatkoznak. Az egyes fejezetek végén olvashatunk a munkák további alkalmazásairól is, melyek a módszerek kísérletekben történő felhasználásáról szólnak, vagy az eljárás későbbi továbbfejlesztéséről. A fentiek alapján megállapítható, hogy a dolgozat témaválasztása minden szempontból modern és aktuális.

A dolgozat 95 számozott oldalt foglal el, kilenc fejezetre tagolódik és egy részletes irodalomjegyzéket tartalmaz. Ezek közül az első bevezető fejezet ismerteti az alapvető fogalmakat: az érdekes kvantumállapotokat, az azokat megvalósító fizikai rendszereket, az összefonódás észlelését, a kvantummetrológia alapjait valamint a Bell-féle egyenlőtlenégeket. A következő nyolc fejezet a pályázó elért eredményeit mutatja be. Ezen fejezetek mindegyike a téziszüzetben szereplő egy-egy tézispont-hoz kapcsolódik. Az eredményeket bemutató fejezetek egységes felépítést követnek. A releváns publikációk felsorolása után a fejezet megértéséhez szükséges háttéranyag ismertetése következik, majd a saját eredmények tárgyalása. Részletesebb számolások esetén az eredeti publikációkra történik hivatkozás. Az egyes fejezetek végén az elért eredményekhez kapcsolódó vizsgálatokról, azok alkalmazásáról és esetleges továbbfejlesztéséről esik szó.

A 2. fejezetben az állapotok összefonódását két-test korrelációk viselkedésére vezeti vissza a jelölt, ezzel jól ismert spinmodellek állapotait osztályozza véges hőmérsékletek esetén is. A 3. fejezetben összefonódottság detektálását GHZ-állapotok, klaszterállapotok és gráfállapotok közelében végzi el a jelölt, míg a 4. fejezetben ezt Dicke-állapotok esetén hajtja végre. Az 5. fejezetben az összefonódás és a permutációs szimmetria kapcsolatát vizsgálja, míg a 6. fejezetben a rendszer permutációs szimmetriára invariáns alterében végrehajtható tomográfiát tárgyalja. A 7. fejezetben sok-részecske rendszerek teljes impulzusmomentumával kifejezhető összefonódási kritériumok szerepelnek. A 8. fejezet a kvantummetrológiának és a kvantumos Fisher információnak a viszonyát tárgyalja és megmutatja, hogy lineáris interferométereknél csak teljes többtest-összefonódottság esetén érhető el maximális érzékenység. Végül a 9. fejezetben olyan Bell-féle egyenlőtlenések szerepelnek, melyek segítségével gráfállapotokat lehet detektálni.

A disszertációban szereplő eredményeit a szerző 13 cikkéhez kapcsolja, melyek 2004 és 2012 között lettek publikálva. Ezek között több egyszemélyes munka is van és mindegyik cikken első szerzőként szerepel a jelölt. Ez a tény világosan mutatja, hogy a jelölt a disszertációban ismertetett eredmények elérésében meghatározó szerepet játszott. Az eredmények nemzetközi visszhangját jelzi a nagyszámú hivatkozás, a felsorolt cikkek csaknem felének százat meghaladó független hivatkozása van. Ezek alapján is megállapítható, hogy a disszertációban szereplő eredmények többsége beépült az összefonódással kapcsolatos kvantumoptikai irodalomba.

A disszertáció angol nyelven íródott olvasmányos stílusban és igényes külső kiállítással rendelkezik. Az angol szövegben elírást csak egy-két esetben találtam, ugyanez igaz a matematikai formulákra is. A tézisek magyar nyelven lettek megfogalmazva, itt a szerző egyes magyarul ritkán használt fogalomra is megfelelő elnevezést javasolt és használt.

A disszertációval kapcsolatban a szerzőnek a következő kérdéseket teszem fel, amelyek inkább a bíráló kíváncsiságának kielégítésére szolgálnak és nem a disszertáció érdemi bírálatára vonatkoznak.

1. A 2.3 fejezetben a kvantumos Ising lánc esetében is vizsgálja az összefonódott állapotok felléptét a transzverz tér erősségének (B) és a hőmérsékletnek (T) függvényében. Közismert, hogy $T = 0$ és $B = 1$ esetén a fenti rendszerben kvantumos fázisátalakulás megy végbe, ha $N \rightarrow \infty$. Ezzel összefüggésben látszik-e valamilyen szinguláris viselkedés a $T_E(B, N)$ függvényben?

2. Kiterjedt rendszerek összefonódásának jellemzésére a Neumann- és a Rényi-féle entrópiákat is szokás használni. Milyen kapcsolata van ezeknek a disszertációban szereplő összefonódás jellemzőkkel?

3. *Rendezetlen kvantumoz rendszerek gyakran végtelenül rendezetlen kritikus ponttal rendelkeznek, ahol a rendszer alapállapotát összekapcsolt klaszterek összességével lehet leírni. Példát adhat a rendezetlen kvantumoz Ising lánc, vagy a rendezetlen antiferromágneses Heisenberg spin lánc. Lát-e lehetőséget ilyen problémák esetén alkalmazni a klaszterállapotokra kifejlesztett módszerét?*

Összességében megállapítom, hogy mind a disszertáció, mind az ahhoz kapcsolódó tézisek a jelölt saját, nemzetközi mércével mérten is kiváló tudományos eredményeit tartalmazzák. A tézisekben szereplő eredmények mindegyikét a jelölt új tudományos eredményének ismerem el. Ezen eredmények minden szempontból elegendőek az MTA doktora cím eléréséhez. A feltett kérdésekre adott válaszoktól függetlenül javaslom a disszertáció nyilvános vitára történő kitűzését és - sikeres védeés esetén - az MTA doktora cím odaítélését.

Budapest, 2020. augusztus 27.



Iglói Ferenc
az MTA doktora