

BÍRÁLÓI VÉLEMÉNY

TÓTH GÉZA

Entanglement Detection and Quantum Metrology in Quantum Optical Systems c. MTA doktori értekezéséről

“Bár a kvantummechanika legfontosabb elveit Schrödinger, Neumann János és kortársaik az 1930-^{as} években lefektették, újult fejlődés indult meg az 1980-as években információelméleti fogalmak bevezetésével” – így kezdi Tóth Géza egyébként angol nyelvű doktori munkáját. A konzervatív és modern korszakot összevetendő, magamat idézném: “A kvantáltság következményeit jól értjük és hasznát (lásd félvezetők, szupravezetés, szuperfolyékonyság) is értékelni tudjuk a klasszikus fizikához képest. Az 1900-as évek végére a kvantumkorrelációk kerültek előtérbe. Ezek hasznát fokozatosan derítjük fel. A klasszikus információkezelés lehetőségeit nagymértékben kitágítják, ideértve az információ tárolását, kódolását, továbbítását, titkosítását, védelmét, feldolgozását.”

1985-ben Werner publikálta a kvantumkorrelációk – tulajdonképp az összefonódottság – matematikai definícióját. Az absztrakt feltétel teljesülésének sem elméleti, sem kísérleti vizsgálatára tíz évig még a legalacsonyabb, 2×2 dimenziós kvantumrendszereken sem állt rendelkezésre általános módszer. Keveseket zavart vagy érdekelt, hogy egy ilyen egyszerű, ma két-qubitesnek mondott rendszer 4×4 dimenziós sűrűségmátrixa mennyire bonyolult korrelációs struktúrát tartalmaz. Évtizeddel később ezernyi kutatás született csak erről a rendszerről. Mára az összefonódottság vizsgálata kiterjed a sokrészesce rendszerek összefonódottságára. A probléma nem lett egyszerűbb.

Tóth munkássága tehát ezt a nehéz kérdést, a sokszorosan összetett rendszerek összefonódottságát tárgyalja. A tárgyalhatóság általános esetben kilátástalan lenne. Viszont speciális esetek szépen bővülő osztályaira lehetséges. Ezt Tóth kitartó és sikeres kutatásai bebizonyítják. Bizonyos szimmetriák teljesülése mellett az összefonódottsági szerkezet jellegzetességeit matematikailag fel tudja tárni, és a kísérleti beazonosítás mennyiségi szempontjait is figyelembe tudja venni. Utóbbi azt jelenti, hogy a kísérleti adatok felvételéhez szükséges mérési lépések száma nem nő exponenciálisan az összetevők számával. Bár ez könnyen belátható módon a feltételezett szimmetria következménye, a szükséges mérési lépések elméleti megszerkesztése eminens és különös felkészültség nélkül nem menne.

Tóth Géza ilyen felkészültséggel rendelkezik. A sokrészesek összefonódások egyik vezető kutatója lett, kiterjedt nemzetközi ismertséggel és elismertséggel, rangos szerzőtársakkal, nagyon magas idézettséggel. Tóth kezdeményező szerepére utal, hogy a nem-egyszerűs tézis-publikációkban mindig ő az első szerző. Bár tartósan külföldön dolgozik, van affiliációja a Wigner Fizikai Kutatóközponttal, együttműködése magyar kvantuminformatica kutatókkal. Ismereteim szerint a közeljövőben elsősorban az itthoni kutatást fogja erősíteni.

A doktori mű angol nyelven, gazdaságosan, jól megírt. A szerző épít arra, hogy olvasója előzetes ismerettel bír kvantuminformaticában. A doktori értekezés nem kíván kismonográfia szerű kidolgozottsággal önálló műként adni ismereteket. Az aktív, elfoglalt és sikeres szerző a célra fókuszál. Kiemelkedő saját eredményeit a szükséges mértékben kontextusba helyezve ismerteti. Mind a Bevezetés, mind az egyes fejezetek terjedelme arányos, tartalmuk jól követhető, hivatkozásokkal jól ellátott. A T1-T2 tézisek termális állapotok, a T4-T6, T9-T11 tézisek több jól és kevésbé jól ismert sokrészesek speciális állapotosztály és határaikhoz közeli állapotok összefonódásának matematikai kritériumait fedezi fel. Kiemelendő, hogy T9-T11 tézisek ilyen - végső soron egyszerű - kritériumok teljességét is bizonyítják. Érdekes a szimmetrikus és permutációs szimmetrikus állapotterek megkülönböztetése. Figyelemre méltó, hogyan teszik lehetővé kezelhető összefonódottsági kritériumok felfedezését és kötött összefonódott sokrészesek állapotok felfedezését (T7), továbbá tetszőleges sokrészesek állapotok szimmetrikus projekciójának kevés (exponenciálisnál lassabban sokasodó) lépésben történő tomográfiáját (T8). Ezen tézisek elméleti konstrukcióit esetenként kísérletekkel is demonstrálták. Számomra a T12 tézis eredményei különösen ígéretesek, hiszen a többszörösen összefonódott rendszerek kvantumos előnyét bizonyítják metrológiában. Tehát azt, hogy fizikai mennyiségek, terek, erők s.t.b. mérési pontossága megugrik, ha a szenzor egy többszörösen összefonódott rendszer. Ennek metrológiai gyakorlati hasznát a jelen kvantumtechnológiai erőfeszítések elérhető közelségbe hozzák. A T13 tézis némileg kákktojás. A szerző a gráf-állapotoknak azúttal nem az összefonódással, hanem a Bell nemlokalitással értelmezett kvantumos korrelációit taglalja. Olyan új Bell egyenlőtlenségeket talál, melyeket a gráf állapotok megsértenek.

Megjegyzéseim:

1.2 paragrafus eleve többségében nem optikai rendszert sorol. Talán helyesebb és egyben informatívabb is lett volna, ha a mű címe nem optikai rendszerekre, hanem sokrészecskés, vagy sokszorosan összetett rendszerekre utal.

1.5 paragrafus szerint Werner 1989-ben összefonódott állapotokat mutatott, melyek semmilyen Bell egyenlőtlenséget nem sértenek. Ez azonban nem maradt így, mert 1995-ben Popescu talált ilyen Bell egyenlőtlenségeket [PRL74,2619(1995)].

2.1.3 paragrafus valódi kvantum kölcsönhatás nélküli műveleteket említ, célszerű lett volna itt konkrétan kimondani, hogy az LOCC műveletekről van szó (melyeket 1.3 paragrafus már definiált).

2.1.5 paragrafus fehér zajként említi a (2.1.7) állapot maximálisan kevert komponensét. Meglehet, hogy a kvantuminformaticai irodalom is a fehér zaj kifejezést használja, ez azonban a fizika, matematika és mérnöki tudomány tágabb kereteiben félreérhető túlbonyolítás. A fehér zaj időbeli jelek maximális véletlenszerűségét jelenti, nem pedig egy statikus állapotét.

(2.2.16) képletben szereplő s-vektorok definícióját ($s = \langle \sigma \rangle$) nem találtam.

(5.2.6)-ban bevezett flip operátor a kvantuminformaticán belül swap operátorként is neveztetik [Nielsen and Chuang, Quantum Computation and Quantum Information (Cambridge University Press, Cambridge, U. K., 2000)]. A flip kifejezés számomra is inkább a bit-flip művelethez kötődik, ami a bit vagy qubit átfordítását jelenti.

Kérdéseim:

1) 5.2 paragrafus bevezeti az F flip operátort és a bozon-szimmetrikus altérre vetítő P_s projektort. Nem említetik, de F sajátértéke +1 vagy -1. A permutáció-invariáns állapotok (5.2.7) szerint tehát olyan állapotok, amikben nincs interferencia a fenti +1 és -1 sajátértékekhez tartozó alterek között, de ezek keverékei jelen lehetnek. A P_s projektor viszont csak a +1-es altérhez tartozó állapotokat engedi meg, akár szuperponálva, akár keverékként is. Ezen a szimmetrikusnak nevezett altéren kiváló összefonódási analízis végezhető. Nem lehetne-e hasonló haladást elérni, ha az F operátor -1-es sajátértékű alterét tartanánk meg a $P_a = (1-F)/2$ vetítéssel?

2) Maradva az 5.2 paragrafus bozon-szimmetrikus állapotainál, megjegyzendő, hogy az elnevezéssel csínján kell bánni, mert a több-bozonos állapotokkal való analógia nem teljes. Míg a vizsgált bozon-szimmetrikus állapotok egy N-részecskés, tehát N-szeresen faktorizálható állapotter szimmetrikus alterét feszítik ki, addig a valódi bozonok állapottere a részecskeszám szerint nem, csak a módusok szerint faktorizálható, ezzel egy időben más a megfigyelhető mennyiségek tere, mint az N-részecske rendszeré. Tehát az N-bozon terében eltérő értelmezése kell legyen az összefonódásnak, mint a bozon-szimmetrikus térben, mely utóbbit a szerző sikeresen vizsgált. Lehet-e arról fogalmunk, hogy a megszerzett tudás és technika valamilyen formában az igazi N-bozon rendszerekre is szolgáltat valamilyen új tudást?

3) A kimagasló angol statisztikus (és genetikus, és eugenikus) Ronald A. Fisher 1925-ben bizonyította [Proc.Camb.Soc.22,700 (1925)], hogy a mérési pontosság Cramer-Rao határa aszimptotikus nagy statisztikán el is érhető. 70 évvel később a Tóth által is idézett Braunstein és Caves [139] ezt a kvantum Cramer-Rao határra is megmutatták, megadva az optimális kvantummérést. A 8. Fejezet eredményein túl elképzelhető-e, hogy a vizsgált összefonódott sokrészecske állapotokon az optimális mérések is egyszerű alakban megtalálhatók?

4) A parciális transzpozíció alapuló PPT összefonódottsági kritérium [Peres,PRL77,1413(1996)] óta nem szűnnek arra biztatni fizikus (tehát nem-matematikus, nem-mérnök) kutatókat, oktatókat, hogy az absztrakt transzpozíció helyett az ekvivalens és fizikai jelentéssel bíró időtükrözést használják. Adjunk esélyt, hogy ha van mélyebb háttere ennek az interpretációnak, akkor azt valaha megtalálhassuk! Találkozik-e, találkozott-e a szerző ezzel a fizikai értelmezéssel, legalább említés szintjén? Mennyire van ez jelen szerinte?

Összefoglalva, Tóth Géza kiemelkedő eredményességgel, rangot jelentő nemzetközi elismertséggel kutatja a leginkább a kvantum-informatikához sorolható elméleti területet. A doktori mű hiteles adatokat tartalmaz, a T1-T13 tézis mind új tudományos eredmény, a doktori mű nyilvános vitára alkalmas. Támogatni fogom az MTA doktora cím odaítélését.



Diósi Lajos
MTA Doktora

egyetemi magántanár

Budapest, 2020. október 15.