Válaszok Geszti Tamás opponensi véleményére

Szeretném megköszönni Geszti Tamás professzor úrnak az értekezésem bírálatával kapcsolatos gondos munkáját, értékes észrevételeit és megjegyzéseit. A bírálói véleményében feltett kérdésekre válaszaim az alábbiak.

1. kérdés: Kérem, részletezze a „lokális realizmus" kifejezésben mindkét szó értelmezését, és azt, hogy hol helyezné el ezeket a fogalmakat a fizika és filozófia határterületén.

John Bell az általa felfedezett egyenlőtlenségek révén megmutatta, hogy a mikrovilág jelenségeire nem vonatkozhatnak egyidejűleg a lokalitás és a realizmus fogalmai. A „lokális realizmus" kifejezésben a lokalitás azt fejezi ki, hogy térben egymástól távol megtörtént események nem képesek pillanatnyi hatást gyakorolni egymásra, vagyis megtiltja a hatások végtelen sebességgel történő terjedését. A realitás fogalma ugyanakkor azt fejezi ki, hogy a tapasztalt korrelációhoz egy paramétert rendelünk, amely ezt a korrelációt létrehozta. Így egy realista elméletben a részecskékben még a korrelációkat keltő mérések előtt kódolva van az az információ, hogy a mérés során milyen kimenetelt kapunk. Bell híres egyenlőtlenségének sérülése igazolja, hogy a kvantumelmélet nem tartalmazhat a részecskékbe előre kódolt információt, illetve paramétereket. Ezen paraméterek hiánya a kvantumelméletben azt bizonyítja, hogy egyetlen összefüggő egésznek kell tekintenünk olyan rendszereket is, amelyek érzékszerveink szerint egymástól tökéletesen elkülönítettek, és amelyeket térben akár több ezer kilométer választ el egymástól.

2. kérdés: A sokszor emlegetett fekete doboz belső szerkezetéről milyen megszorításokat tartalmaznak a módszerei, milyen formában jelennek meg a mérőeszközök lehetséges hibái, bővíthetők-e a formalizmus keretei pl. a detektorok sötét zajával?

A Bell-egyenlőtlenséget sértő nemlokális korrelációk nemcsak a természet alapvető megismerésében játszanak szerepet, hanem számos alkalmazást is lehetővé tesznek a kvantuminformatika eszközfüggetlen keretében. Ezen keretben az egyes informatikai eszközöket olyan fekete doboznak tekintjük, amelyek klasszikus ki- és bemenetekkel rendelkeznek a külvilág felé. Azonban ezen nemlokális korrelációk igazolásához és gyakorlatban történő alkalmazásaihoz számos technológiai nehézséget kell leküzdeni. Egyik fő nehézség az opponensem által említett mérőeszközök lehetséges hibáival kapcsolatos, mint például a nem tökéletesen működő detektorok esete, amikor részecskék vesznek el a detektálás során. Különösen érzékenyek fotonveszteségre az optikai megoldású Bell-kísérletek detektorai. Ezen veszteségek kezelésére alapvetően két különböző módszer kínálkozik.

Az egyik módszer során nagy körültekintéssel eljárva megállapítjuk és lemodellezzük, hogy miért vesztek el a részecskék. Ha részleteiben megértettük a fizikai folyamatot, és azt találjuk, hogy a nem-detektálási esemény valószínűsége független a műszer bemenetétől, akkor kihagyjuk azon eseteket a statisztikából, amikor a detektor nem szólalt meg. Egy Bell-kísérletben ez praktikusan azt jelenti, hogy utólagosan kiválogatjuk azokat az eseteket, amikor Alice és Bob detektorai egyszerre szólaltak meg, és csak ezen eseményeket használjuk fel a Bell-féle korrelációk előállítására. Azonban bármilyen nagy körültekintéssel is jártunk el, előfordulhat,

hogy nem jól modelleztük le a részecskék elvesztésének a folyamatát, aminek az lehet a következménye, hogy a teljesen lokális korrelációk is nemlokálisnak mutatkoznak. Ez főleg akkor problematikus, ha különböző eszközfüggetlen alkalmazásokban, mint például eszközfüggetlen kulcskiosztásban vagy véletlenszámok biztonságos előállításánál támaszkodunk nemlokális korrelációk meglétére.

Másik lehetőségként azokat az eseményeket, amikor nem szólal meg a detektor egy külön kimenetelnek tekintjük, és az így kibővített paramétertérben ellenőrizzük le a korrelációkra, hogy nemlokálisak-e, vagyis sértenek-e Bell-egyenlőtlenséget. Ez utóbbi módszer már teljesen biztonságos, vagyis ilyenkor nem azonosíthatunk be hibásan nemlokálisnak egy lokális korrelációt. Ez a módszer szépen illeszkedik a kvantuminformatika eszközfüggetlen keretébe is, amelynek során az egyes felhasználók berendezéseit, mérőeszközeit fekete doboznak tekintjük, és az eszközök belső működéséről semmilyen feltételezéssel nem élünk. Azonban ezen módszer hátránya, hogy a nemlokális eloszlások kísérleti detektálásához nagy hatékonyságú detektorokra van szükség. Valóban, az első technikai kiskapuktól mentes Bell-kísérletet csak nemrégiben, 2015-ben hajtották végre Hanson és munkatásai a Delfti Egyetemen. Emiatt olyan alkalmazásokban, ahol nagyobb, például 10 km feletti távokat kell áthidalni, ez az utóbbi megközelítés egyelőre nem praktikus.

Szeretném még megemlíteni, hogy a fenti két megközelítés között létezik félúton egy olyan megközelítés, az ún. félig eszközfüggetlen keret, amely ötvözi az előbbi két módszert. Ilyenkor az eszközöket működés szempontjából nem tekintjük teljesen fekete doboznak, hanem bizonyos feltételeket szabunk ki rájuk, például az eszközök kvantumrendszereinek dimenzióját vagy a kvantumkommunikáció során elküldött állapotok átlagos entrópiáját korlátozzuk. Véleményem szerint bizonyos jól megválasztott feltételezéssel élve az opponensem által említett detektorok sötét zajának mértékére, ezen eset tárgyalható lenne a félig eszközfüggetlen keretben, ezáltal csökkentve ezen keretben a nemlokális korrelációk kimutatásához szükséges detektor -hatékonysági küszöböt.

3. kérdés: A munka kevés dimenziós rendszerekre vonatkozó egzakt eredményektől nagyobb dimenziószámokra vonatkozó sejtések felé halad. Mennyire érzi informatívnak ezt a keretet egy majdani sokdimenziós kvantumszámítógép tulajdonságaira vonatkozóan?

Világszerte egyre több részecskét tartalmazó rendszereket sikerül kontrollált módon előállítani. A jövőbeli alkalmazhatóság szempontjából kulcsfontossságú, hogy a sokrészecskés rendszereknek minél több megkülönböztethető kvantumállapotát lehessen irányított módon előállítani és ezen állapotok időfejlődését jól lehessen kontrollálni. Ha ugyanis azt találjuk, hogy a megkülönböztethető kvantumállapotok száma, vagyis a rendszer dimenziója kisebb egy bizonyos D értéknél, akkor az előállított kvantumrendszer egy D-nél több állapotot használó kvantumszámítás végrehajtásában nem nyújthat számítási előnyt. Ezen észrevétel megfordítása is igaz: ha egy adott kvantumrendszer dimenziójára a megfigyelt adatokból alsó korlátot tudunk adni, az magával vonja az egyes informatikai alkalmazásokban történő potenciális hasznosíthatóságot is. Munkám során ilyen típusú dimenziótanúk előállításában vettem részt, amelyeket az értekezésem 5. fejezetében tárgyaltam. Ezen tanúkat elsősorban kétrészű rendszerek esetén ismertettem, de a módszereim sokrészű rendszerekre is kiterjeszhetők, például elosztott kvantumszámításokban hasznosíthatók (ilyenkor az egyes résztvevők által továbbított

kvantumrendszerek dimenzióját korlátozzuk), vagy nagyobb kvantumszámítások építőkockáinak tesztelésére is alkalmasak lehetnek. Ezen utóbbi esetben nem egyszerre történik az egész kvantumrendszer működésénének a tesztelése, hanem kisebb részegységekre bontjuk fel a rendszert és külön-külön hitelesítjük a rendszer egyes alkotóelemeit. Meg szeretném említeni, hogy 2018-ban hasonló elveken alapuló módszereket dolgoztak ki Sekatski és munkatársai (Phys. Rev. Lett. 121, 180505) kvantumeszközök Bell-féle nemlokalitáson alapuló hitelesítésére.

4. kérdés: A kvantumszámítógépekre vonatkozó elképzelések eléggé élesen ketté válnak hagyományosan algoritmus-alapú gépekre, és optimumkereső célszámítógépekre, amelyek már jelen vannak a piacon. Az értekezésben bemutatott eredmények hasznosíthatóságában lát-e különbséget e két irányzat között?

Az értekezésben ismertetett szemidefinit módszerek véleményem szerint az optimumkereső célszámítógépekre vonatkozóan is relevánsak lehetnek. A kvantummechanikát kiaknázó optimumkeresők döntő többsége, mint például a D-Wave vagy IBM célzott kvantumszámítógépei az adiabatikus lehűlés algoritmusát valósítják meg. A hardver maga egy jól kontrollálható kvantummechanikai soktestrendszer, amely rendszernek az alapállapoti energiájába egy konkrét matematikai problémát, pl. gráfelméleti feladatot kódolnak bele. Abban bíznak a kutatók, hogy a kvantumeffektusok kihasználása révén a klasszikus algoritmusoknál sokkal hatékonyabban és gyorsabban lehet ezen típusú matematikai problémákat megoldani. Azonban sok esetben nagyon nehéz annak eldöntése, hogy a kvantumos optimumkereső valóban az optimális megoldást találta-e meg, és nemcsak egy, az optimálisnál kedvezőtlenebb megoldást. Összevetve a kvantumos optimumkeresőt a klasszikus algoritmusokkal, amilyenek például a Monte Carlo típusú szimulátorok is, ezek mind variációs elven működnek és a keresett megoldáshoz tartozó legalacsonyabb energiát felülről közelítik. Vagyis ha a kvantumos optimumkereső a Monte Carlo szimulátorral kapottnál alacsonyabb energiájú megoldást adott vissza, még nem lehetünk biztosak benne, hogy egyúttal az optimális megoldást találta meg.

Itt jöhetnek segítségünkre az értekezésemben bemutatott szemidefinit módszerek, amelyek közös jellemzője, hogy a kísérletileg megfigyelhető kvantumkorrelációk halmazát kívülről karakterizálják, és az eredeti halmazt egyre jobban megközelítik, ahogy növeljük az alkalmazott szemidefinit hierarchia szintjét. Ezen tulajdonságuk alkalmassá teszik arra, hogy szemben a variációs elven működő módszerekkel alsó korlátot adjanak az elérhető minimális energia értékére. Ezáltal az értekezésben bemutatott szemidefinit numerikus módszereink a fenti konkrét optimalizációs problémák megoldásában is hasznosulhatnak, hiszen képesek megbecsülni, hogy a kvantumos optimumkereső által kapott megoldás milyen távol van a valódi megoldástól.

Debrecen, 2020. január 27.

Vértesi Tamás