

## Bírálat

**Lévay Péter Pál** *"Egyszerű összefonódott rendszerek geometriája és a fekete lyuk qubit megfeleltetés"* című MTA doktori disszertációjáról

A dolgozat témája a kvantum összefonódottság, és ennek alkalmazása húrelméleti fekete lyuk rendszerekre. Az egyszerű összefonódott rendszerek szupergravitációs fekete lyuk megoldásokkal való kapcsolatának felismerése óta mindmáig foglalkoztatja a húrelmélet közösségét, hogy pusztán szimmetria alapú megfeleltetés van-e a két terület között, vagy mélyebb, dualitási kapcsolat tárható fel. Az értekezés ezt az alapkérdést nem vizsgálja, kiindulópontja az összefonódottság geometriai módszereivel a húrelméleti eredmények átfogalmazása, újragondolása. Véleményem szerint ez önmagában is érdekes szempont, hiszen több, a húrelméletben újabban kifejlődött irányzatról elmondható, hogy váratlan matematikai összefüggések vizsgálatával indult, mint például az  $N=1$  szuperszimmetrikus térelméletek mátrix modellekkel való kapcsolata, aminek (topologikus) húrelméleti alapjait csak a későbbiekben realizálták. Ha a fekete lyuk megoldásokban szereplő és kvantuminformáció-elméleti mennyiségek közötti megfeleltetés pusztán szimmetria jellegűnek bizonyulna is, a kettő között fordító nyelv, vagy inkább szótár megalkotása még ebben az esetben is fontos új eredményeket hozhat.

A szerző nyolc tézispontban összegzi ezirányú kutatásait és eredményeit, amit aztán kilenc fejezetben fejt ki részletesen. Munkáiban egyszerű, három-négy qubit rendszerek módszereit alkalmazza olyan húrelméleti rendszerekre, mint pl. az extrémális STU fekete lyukak szupergravitációs megoldásainak szerkezete, vagy az attraktor mechanizmus kvantuminformációs nyelvre való leképezése. Ezek az elméleti eredmények első lépéseknek tekinthetők a kvantuminformációs formalizmus és fekete lyukak között kibontakozó ígéretes területen, mely kapcsolatra a szerző elsők között mutatott rá.

A dolgozat fő célkitűzéseit a szerző, mindkét területet művelők számára, érthető és olvasható módon foglalja össze a bevezetésben. A dolgozat egésze nem csekély terjedelmű, némely részletesebb leírás számomra rövidíthető vagy elhagyható lett volna. Ugyanakkor tiszteletben tartom a szerző azon törekvését, hogy disszertációját mind a kvantuminformáció-elméletet művelők, mind a húrelméletesek és a többiek számára is olvashatóvá és használhatóvá tegye.

A második fejezet az egyszerű összefonódott qubit rendszereket mutatja be részletesen (kettő, három, négy, és röviden az  $N$ -qubit rendszerek). Képet kapunk a qubit rendszerek geometriai kapcsolatáról, az alapvető invariánsokról és összefonódottsági mértékekről. A harmadik fejezet a fermionos rendszerek összefonódottságába nyújt bevezetést, míg a negyedik a Freundenthal rendszerek és összefonódott rendszerek kapcsolatát tárgyalja. E három fejezet hivatott a dolgozat kvantuminformáció-elméleti hátterét bemutatni.

Az ötödik fejezettől nézőpontot váltunk a fekete lyuk megoldásokra. A szerző leírja a húrelmélet kompaktifikációjával nyert  $N=2$ , négy dimenziós szuperszimmetrikus fekete lyukak megoldásait, és tárgyalja az ezekhez kapcsolódó attraktor mechanizmust. Külön kiemelném a BPS megoldások, attraktor mechanizmus és a qubit megfeleltetés szemléletes, szép fizikai tárgyalását.

A hatodik fejezetben áttérünk a tórusz kompaktifikációból származó STU modellre, melynek szerkezetében a négy qubit rendszerek kapcsolatos geometriai struktúrák megjelennek. A hetedik fejezet a geometriai Hitchin funkcionál leírás és az összefonódottsági mérékek kapcsolatát tárgyalja, míg a nyolcadik fejezet az  $E_7$  szimmetriával rendelkező fekete lyuk megoldások entrópiaformuláját vizsgálja a kvantuminformáció-elmélet eszköztárával. Az utóbbi fejezetekben a szerző saját eredményeit helyezi kontextusba.

A kilencedik fejezet tartalmazza a szerző vélekedését a fekete lyukak és kvantuminformáció-elmélet kapcsolatának esetleges fizikai megalapozásáról. A húrelméletesek érdeklődése a kvantuminformáció-elmélet iránt elsősorban a Ryu-Takayanagi entrópiaformula megjelenése óta datálható, és ebben a fejezetben kerül szóba az említett formula, annak bit-szálas értelmezése, és a megfeleltetés  $G_2$  geometriákkal és topologikus M-elmélettel való esetleges kapcsolata. Az itt kifejtett gondolatok inkább kitekintő, spekulatív jellegűek.

A disszertációról a következő kérdéseim, észrevételeim vannak:

1. A szerző a téziszüzetben (Előzmények) említi, hogy a nagyenergiás fizika az összefonódottság-elmélet által produkált kihívásokra viszonylag későn reagált. A húrelmélet, az AdS/CFT sejtés berobbanása óta meglátásom szerint, rendkívül gyorsan fejlődő terület, és ebben az esetben a "lassú reakcióidő" oka az, hogy a két terület közötti eredeti Duff-Linde-Kalosh által felfedett kapcsolat ad hoc jellegű, és megalapozása nem nyilvánvaló. Az igazi kihívást a Ryu-Takayanagi entrópiaformula jelenti, amire a reakció jól mérhető az erre a cikkre való hivatkozások számával. A szerző ezt disszertációja bevezető fejezetében ki is fejti, azonban az említett lassú reakció megfogalmazását a téziszüzetben kissé pontatlannak tartom.

2. Mivel a vizsgált kvantuminformációs megfeleltetés elsősorban olyan geometriai struktúrákkal van kapcsolatban, mint a komplex/Kähler struktúra, lehet-e a megfeleltetést vizsgálni kevesebb szuperszimmetriával rendelkező, pl. az  $N=2$  elméletből származtatható (Calabi-Yau kompaktifikációval nyert)  $N=1^*$  elméletekben? A topologikus B-modell ezekben az esetekben mátrix modellekkel reprezentálható, ezért érdekes lenne tudni, létezik-e itt is valamilyen kvantuminformációs megfeleltetés? Ugyanez a kérdésem a sokat tanulmányozot, speciális Calabi-Yau tereken való kompaktifikációval nyert két dimenziós Yang-Mills elméletek esetére is.

3. Általánosan, az egyes húrelméleteket összekötő dualitási szimmetriáknak van-e kvantuminformációs leképezése?

4. Van-e olyan eset, amikor a kvantuminformációs kép mondjuk az entrópia kvantum korrekcióira hatékony (a húrelmélettől különböző) számítási módszereket biztosít?

Összefoglalva, a doktori értekezést színvonalas, alapos és részletes munkának tartom egy ígéretes területen. A mű téziseit új eredménynek ismerem el, melyet a szerző a releváns, elismert folyóiratokban publikált. A közölt eredményeket és a szerző munkásságát elegendőnek tartom az MTA doktori cím elnyeréséhez, és javaslom a nyilvános védés kitűzését.

Sinkovics Annamária

Budapest, 2018. május 17.