

Bírálóí vélemény

Lévay Péter Pál

”Egyszerű összefonódott rendszerek geometriája és a fekete lyuk-qubit megfelelés”

című MTA doktori értekezéséről

A kvantumrendszerek viselkedésének egyik legkevésbé intuitív, a mindennapi tapasztalatoknak leginkább ellentmondani látszó aspektusa az összefonódottság. Bár a jelenség alapvető összefüggései ismertek, az összefonódottság részletes analízise csak csekély számú, viszonylag egyszerű kvantumrendszer esetén kezelhető jelenleg, a potenciális alkalmazások által támasztott igények ellenére. Ennek a helyzetnek egyik oka, hogy újfajta algebrai és geometriai módszerek szükségesek a kérdéskör tanulmányozásához. Ezen újfajta módszerek nemzetközi hírű szakértője az értekezés szerzője, aki művében arra vállalkozott, hogy egyszerű kvantumfizikai rendszerek vizsgálata során mutassa be a felmerülő algebrai és geometriai kérdéseket, illetve az ezek vizsgálatára kifejlesztett speciális megközelítéseket. Külön ki kell emelni ezen kérdéskör egyik izgalmas alkalmazási területét, az extrémális fekete lyukak entrópiájának a megmaradó töltésektől való függését leíró kifejezések és egyes összefonódottsági mérőszámok közötti alaki hasonlóságokat, melyek formális analógián túli elvi megalapozása mindmáig nem tisztázott.

Az összefonódottság geometriai vonatkozásainak elvi alapja visszavezethető arra a – Felix Klein híres ’Erlangeni program’-jában megfogalmazott – felismerésre, hogy a geometria nem más, mint bizonyos szimmetriacsoportokkal szemben invariáns fogalmak és azok egymás közötti összefüggéseinek vizsgálata. Mivel az összefonódott állapotok osztályozása lényegében az állapottér felbontása egy, a szakzsargon által SLOCC-nak nevezett csoport pályáira, és az azonos pályán található állapotokat összefonódottság tekintetében ekvivalensnek tekintjük, ezért az összefonódottsági mértékek szükségszerűen invariánsak kell legyenek a csoporthatásra, nyilvánvalóvá téve a kap-

csolatot a geometriával. Mivel a SLOCC csoport hatása lineáris, ezért kézenfekvő a pályák geometriáját a csoport polinomiális invariánsai segítségével jellemezni, melyek így természetes módon hozhatók kapcsolatba az összefonódottság mérőszámaival. Hogy aztán a különféle polinominvariánsok, illetve az ezekből alkotható kifejezések közül melyek a legalkalmasabbak az összefonódottság effektív mérésére, az már fizikai megfontolások alapján dönthető el.

Bár a kapcsolat a fentiek alapján elvi szinten világos, annak konkrét megvalósulása messze nem triviális, és gyakran igen bonyolult megfontolásokat igényel, nem kis részben a felmerülő invariánselméleti számítások komplex volta miatt. Szerző e témában elért, nemzetközileg is kiemelkedő eredményeit ismerteti értekezése első, három fejezetet felölelő részében, beleszőve őket a kérdéskör általános tárgyalásába. Külön kiemelendőnek tartom a Freudenthal-féle hármas rendszerekkel kapcsolatos eredményeket.

Az értekezés második, négy fejezetre tagolt része a 'fekete lyuk-qubit megfelelés' tárgyalását foglalja magában. Ennek keretében röviden ismerteti a húrelméletek és azok fekete lyuk megoldásainak alapvető tulajdonságait, majd rátér a szemiklasszikus entrópia-formulák és az összefonódottsági mértékek közötti analógiák tárgyalására, részletesen kitérve az ún. STU modell stacionárius fekete lyuk megoldásainak vizsgálatára, illetve az eredmények tetszőleges Calabi-Yau kompaktifikációkra történő általánosítására a Hitchin-funkcionálok felhasználásával. Egy, az oktonionikus Jordan-algebrán alapuló Freudenthal-rendszer és az E_7 -szimmetrikus entrópia-formula kapcsolatát ismertető fejezet zárja az értekezés ezen részét, melyet egy igen tartalmas és inspiráló kitekintés követ.

Az értekezés hatalmas, szerteágazó területet fed le, mely hemzseg az újszerű és szokatlan matematikai és fizikai elképzelésektől, jól illusztrálva a Szerző átfogó ismereteit. Témája kétségtelenül a kurrens elméleti fizika egyik izgalmas és jelentős érdeklődést kiváltó fejezete, így a témaválasztás mindenképpen időszerű, az értekezésben ismertetett eredmények pedig a folyó kutatások élvonalába emelik a Szerzőt. Az értekezés szerkezete logikus, az egyszerűtől a bonyolultabb felé haladva ismerteti meg az olvasót a témával. Viszont a részletgazdag tárgyalás során időnként nehézséget jelent, hogy – a Szerző deklarált intencióinak megfelelően – a nem általánosan használatos matematikai fogalmak és eredmények az értekezés szövegében szétszórva kerülnek ismertetésre, így csak fáradságos munkával lehet ezeket visszakeresni.

Talán érdemes lett volna rövid függelékekben összefoglalni például a Calabi-Yau sokaságokkal vagy a Freudenthal-rendszerekkel kapcsolatos azon ismereteket, melyek nem tartoznak az elméleti fizikusok mindennapi eszköztárába, de az értekezés megértéséhez nélkülözhetetlenek. Tovább nehezítik az olvasó dolgát a szövegben előforduló helyesírási hibák, melyek kiküszöbölése a modern szövegszerkesztő és helyesírás-ellenőrző szoftverek korában nem okozhatna gondot. Mindez természetesen semmit nem von le az értekezés szakmai érdemeiből.

Szerző az értekezéshez kapcsolódó eredményeit nyolc tézispontban foglalta össze, melyek mindegyike önálló, jelentős és új tudományos eredmény. Külön kiemelném közülük a negyedik, ötödik és nyolcadik tézispontot, mint a további kutatások szempontjából véleményem szerint leginkább perspektivikusakat. A tézispontokhoz kapcsolódó 19 publikáció rangos nemzetközi folyóiratokban jelent meg, további egy pedig proceedings kötetben, jól illusztrálva az eredmények nemzetközi elfogadottságát.

Kérdéseim:

1. A SLOCC csoport invariáns polinomjaiból származtatott összefonódottsági mérőszámok segítségével osztályozhatók a csoport pályái az állapot-téren. Felmerül a gondolat, hogy esetleg célszerűbb lehetne bizonyos esetekben nem-polinomiális invariánsok alkalmazása, ami természetesen más geometriai háttérrel adna a kérdéskörnek. Végeztek-e ilyen típusú vizsgálatokat, és ha igen, akkor milyen eredménnyel?
2. Mind a tézisekben, mind az értekezés bevezető részében a szerző hangsúlyozza az összefonódottság, illetve annak mérőszámai 'erőforrás' jellegét, például a kvantuminformatikában. Hogyan képzelhetjük ezt el: az összefonódottsági mérőszámok felhasználhatók a kvantum-algoritmusok analízisében, vagy valami közvetett módon kerülnek a képbe? Esetleg más típusú alkalmazásokra kell gondolnunk?
3. A 'fekete lyuk-qubit' megfeleltetéssel kapcsolatban szembetűnő, hogy az abban előforduló összefonódottsági mértékek, illetve az azok alapjául szolgáló kvantumrendszerek viszonylag egyszerű szerkezetűek. A vizsgált fekete lyuk megoldások valamilyen tulajdonsága felelős ezért, vagy talán a vizsgált húrkompatifikációk speciális volta?

A bírálatomban kifejtettek értelmében, írásos kérdéseimre adott válaszoktól függetlenül az értekezést nyilvános vitára alkalmasnak tartom, és támogatom az MTA doktora cím megadását.

Budapest, 2018 március 4.

Bántay Péter
az MTA doktora