

ELTE Fizika Doktori Iskola II. féléves beszámoló

MI a fizikában és a természettudományokban

Holló Áron (XTDMT4)

Témavezetők: Csabai István, Kiss Tamás

Kutatási téma bemutatása

Bevezetés

A doktori kutatásom központi témája a mesterséges intelligencia, a kvantuminformatika és a komplex fizikai rendszerek kapcsolata. Ezen belül különösen a *reservoir computing* és annak kvantumos kiterjesztése, a *Quantum Reservoir Computing* (QRC) áll a munkám fókuszában. A reservoir computing alapgondolata, hogy egy rögzített, komplex dinamikájú rendszer magas dimenziós reprezentációt állít elő a bemeneti információról, miközben a tanítás csak egy egyszerű, jellemzően lineáris readout rétegre korlátozódik. Ez a megközelítés különösen alkalmas időfüggő, nemlineáris és nagy dimenziószámú rendszerek feldolgozására.

A quantum reservoir computing esetén a reservoir szerepét egy kvantumdinamikai rendszer tölti be. A kvantumrendszerek nagy Hilbert-tere, az összefonódás, a soktest-korrelációk és a nemtriviális időfejlődés természetes módon biztosítanak gazdag reprezentációs teret. A doktori kutatásom egyik fő célja annak vizsgálata, hogy ezek a tulajdonságok miként használhatók fel *quantum sensing* feladatokban, vagyis olyan mérési protokollokban, ahol egy ismeretlen fizikai rendszer paramétereit kvantumdinamikai válaszok alapján rekonstruáljuk.

A kutatás szorosan kapcsolódik a QUEST Twinning projekt keretében végzett munkához, amelynek célja a kvantuminformatikai, kvantumtechnológiai és gépi tanulási módszerek összekapcsolása. A hosszabb távú cél egy olyan quantum reservoir sensing protokoll kidolgozása, amely nemcsak numerikus szimulációkban működik, hanem később Rydberg-atom alapú kvantumhardveren, különösen az Amazon Braket platformon elérhető Aquila eszközön is tesztelhető.

Az aktuális félévben elvégzett kutatások ismertetése

A II. félévben a kutatási munka fő iránya a korábban kidolgozott quantum reservoir sensing elképzelés numerikus tesztelése és validálása volt. A vizsgált modellben a reservoir egy Rydberg-atomokból álló, kölcsönható kvantumrendszer, amelynek időfejlődése érzékenyen függ egy külső célrendszer geometriai paramétereitől. A cél az volt, hogy a reservoir mérhető kvantumjellemzőiből klasszikus gépi tanulási readout segítségével rekonstruálható legyen a célrendszer valamely paramétere, például távolsága vagy geometriai elrendezése.

A félév során a hangsúly a szimulációs protokoll felépítésén, a megfelelő feature-vektorok definiálásán és a tanulási eljárás tesztelésén volt. A modellben többatomos Rydberg-reservoirt vizsgáltam, ahol a rendszer időfejlődéséből különböző egy- és többtest-korrelációs mennyiségeket nyertünk ki. A

szimulációkban különböző célgeometriákhoz és távolságparaméterekhez generáltam tanítóadatokat. A reservoir válaszából előállított feature-vektorokra egyszerű, felügyelt tanulási eljárást illesztettem, amelynek célja az ismeretlen fizikai paraméter rekonstrukciója volt. A félév egyik fő eredménye, hogy a quantum reservoir sensing protokoll numerikus környezetben működőképesnek bizonyult: a reservoir dinamikája elegendő információt hordozott a célrendszer paramétereiről, és a readout réteg képes volt ezekből értelmezhető becslést adni.

Ez az eredmény fontos bizonyítéka annak, hogy a quantum reservoir computing nemcsak általános idősor-feldolgozási vagy klasszifikációs feladatokra alkalmazható, hanem fizikai paraméterek érzékelésére és rekonstrukciójára is. A módszer előnye, hogy a kvantumrendszer komplex dinamikája természetes módon végez nemlineáris feature-transzformációt, miközben a tanítási feladat viszonylag egyszerű marad. A megközelítés különösen ígéretes olyan esetekben, ahol a vizsgált rendszer közvetlen mérése nehéz, de a vele kölcsönható kvantumreservoir válasza hozzáférhető.

A következő kutatási lépés a kidolgozott protokoll Aquila hardveren történő implementálása lesz. Ehhez a numerikus modell paramétereit és a mérési eljárást olyan formára kell hozni, amely kompatibilis a tényleges Rydberg-atom alapú kvantumhardver korlátaival.

Tanulmányi tevékenység az aktuális félévben

Az aktuális félévben az alábbi tanulmányi tevékenységet teljesítettem:

- **Haladó gépi tanulás labor (FIZ/3/093)** – 6 kredit
- **Irányított kutatómunka 1., 2., 3., 4. szemeszter (FIZ/S1-S4/K18)** – 18 kredit
- **Kvantuminformáció-elmélet (FIZ/1.3/060E)** – 6 kredit
- **Mesterséges intelligencia technikák a robotikában (FIZ/3/101)** – 6 kredit

Oktatási tevékenység

Az aktuális félévben önálló oktatási tevékenységet nem végeztem. A félév során a hangsúly elsősorban a doktori kutatási feladatok teljesítésén, a quantum reservoir sensing szimulációs vizsgálatán, valamint a kapcsolódó szakmai és publikációs tevékenységeken volt.

Szakmai közéleti tevékenység

Konferenciárésztétel

A félév során részt vettem az alábbi konferencián:

- **DPG Spring Meeting of the Condensed Matter Section (SKM)**
2026. március 8–13., Dresden University of Technology, Drezda.
A konferencián poszttert mutattam be a *Non-unitary time evolution via the Chebyshev expansion method* című munkából. A bemutatott eredmények egy korábbi kutatási témám lezárásához

kapcsolódnak, amelyben nemunitér kvantumdinamikai rendszerek hatékony numerikus időfejlődését vizsgáltuk Chebyshev-sorfejtéses módszerrel.

Nyári iskola

A félév során részt vettem az alábbi szakmai programon:

- **Summer School on New Directions in Quantum Computing**

Measurement-Based Computing, Quantum Machine Learning and Quantum Reservoir Computing.

Helyszín: Eötvös Loránd Tudományegyetem, Pázmány Péter sétány 1/A, 1117 Budapest.

A nyári iskola témái közvetlenül kapcsolódtak a doktori kutatásomhoz, különösen a quantum machine learning és a quantum reservoir computing aktuális irányaihoz.

Publikációs tevékenység

A félév során megjelent az alábbi publikáció:

- **Non-unitary time evolution via the Chebyshev expansion method**

Áron Holló, Dániel Varjas, Cosma Fulga, László Oroszlány és Viktor Könye.

Physical Review E

DOI: <https://doi.org/10.1103/nbxh-j277>

A publikáció egy korábban megkezdett kutatási irány lezárása. A munka célja nemunitér kvantumdinamikai problémák hatékony numerikus kezelése volt Chebyshev-polinomokon alapuló időfejléssel. Bár ez a téma nem a jelenlegi doktori kutatásom fő iránya, módszertani szempontból kapcsolódik a kvantumrendszerek numerikus szimulációjához, amely a quantum reservoir sensing vizsgálatában is fontos szerepet játszik.

Szabadalmi tevékenység

A félév során két, quantum reservoir computinghez kapcsolódó ELTE szolgálati találmányt fogadott be az Egyetemi Innovációs Testület a 2026. június 3-i online ülésén:

- **Method and apparatus for sensing with quantum reservoir in condensed matter**

Saját részesedés: **25%**.

- **Method and apparatus for room temperature quantum reservoir computing with optically addressable paramagnetic defects in semiconductors**

Saját részesedés: **2%**.

Összefoglalás

A II. félévben a doktori kutatásom fő eredménye a quantum reservoir sensing protokoll numerikus validálása volt. A szimulációk alapján a Rydberg-atom alapú quantum reservoir képes volt információt hordozni egy külső célrendszer geometriai paramétereiről, és a kvantumdinamikából származtatott korrelációs feature-vektorok segítségével ezek a paraméterek klasszikus readout módszerrel rekonstruálhatók voltak. Ez megerősíti, hogy a quantum reservoir computing ígéretes eszköz lehet fizikai érzékelési és paraméterbecslési feladatokban.

A következő félév egyik fő célja a szimulációs protokoll közelítése a valós kvantumhardveres megvalósításhoz, különösen az Aquila Rydberg-atom alapú kvantumszámítógépen történő implementáció előkészítése. Emellett folytatni kívánom a quantum reservoir sensing módszer robusztusságának, skálázhatóságának és fizikai interpretálhatóságának vizsgálatát.