

ELTE Fizika Doktori Iskola I. féléves beszámoló

MI a fizikában és a természettudományokban

Holló Áron (XTDMT4)

Témavezetők: Csabai István, Kiss Tamás

Kutatási téma bemutatása

Bevezetés

A doktori kutatásom tágabb kontextusát a mesterséges intelligencia (MI) és a komplex fizikai rendszerek kapcsolata adja. Az MI-alapú módszerek napjainkban számos területen megjelennek a természettudományos kutatásokban, beleértve a fizikai rendszerek vizsgálatát is. Ezen alkalmazások egyik fontos példája a nagy dimenziószámú, nemlineáris és időfüggő rendszerek elemzése, ahol különösen előnyösnek bizonyul a mesterséges intelligencia és a fizikai dinamikai rendszerek dinamikájának összekapcsolása.

Ezen a területen belül kiemelt szerepet kap a *reservoir computing* (RC) paradigma, amely egy speciális neurális számítási keretrendszer. A reservoir computing alapötlete, hogy egy rögzített, komplex dinamikájú rendszer (a reservoir) időfejlődése során gazdag, magas dimenziós reprezentációt hoz létre a bemeneti információról, miközben a tanulás kizárólag egy egyszerű, lineáris readout rétegben történik. Ez a megközelítés hatékony tanítást, jó generalizációs képességet és alacsony számítási költséget tesz lehetővé.

A klasszikus reservoir computing természetes kiterjesztése a *Quantum Reservoir Computing* (QRC), ahol a reservoir szerepét egy kvantumdinamikai rendszer tölti be. A kvantumrendszerek inherens nemlinearitása, nagy Hilbert-terük és gazdag időfejlődése különösen alkalmassá teszi őket információfeldolgozási és érzékelési feladatokra. A doktori kutatásom ezen a területen helyezkedik el, és szorosan kapcsolódik a **QUEST Twinning projekt** keretében végzett kutatásokhoz, amelynek célja a kvantuminformatikai és gépi tanulási módszerek összekapcsolása.

Az aktuális félévben elvégzett kutatások ismertetése

Az aktuális félév első szakaszában a munkám elsősorban *szakirodalmi feltérképezésre és benchmarkingra* fókuszált a quantum reservoir computing területén. Ennek során részletesen tanulmányoztam a QRC különböző fizikai megvalósításait, a tanulási protokollokat, valamint az eddig publikált numerikus és kísérleti eredményeket. A benchmarking célja az volt, hogy feltárjam a módszer korlátait, tipikus alkalmazási területeit, valamint azokat a nyitott kérdéseket, ahol új hozzájárulás lehetséges.

Ezt követően, a félév második felében egy konkrét alkalmazási irány kidolgozására került sor, nevezetesen egy *quantum sensing* protokoll fejlesztésére quantum reservoir computing keretben. A vizsgált modell Rydberg-atomokon alapuló kvantumrendszer, ahol a kvantumreservoir szerepét egy

többatomos, kölcsönható kvantumdinamikai rendszer tölti be. Ebben a rendszerben a reservoir időfejlődése érzékenyen reagál egy külső célrendszer geometriai paramétereire, például annak térbeli elhelyezkedésére, orientációjára vagy távolságára. A kvantumrendszer időfejlődése során különböző kvantummegfigyelhető mennyiségek – mint például populációk várhatóértékei és a redukált sűrűségmátrix elemei – válnak hozzáférhetővé, amelyek klasszikus tanulási algoritmus segítségével feldolgozva lehetővé teszik a keresett fizikai paraméterek rekonstrukcióját.

A választott modell szoros kapcsolatban áll a jelenleg elérhető Rydberg-alapú kvantumhardverekkel, különösen az Amazon Braket platformon hozzáférhető Aquila kvantumszámítógéppel. A kutatás hosszabb távú célja, hogy a numerikus szimulációkban kidolgozott quantum reservoir computing alapú quantum sensing protokollok később valós, kísérleti környezetben is megvalósíthatók legyenek az Aquila eszközön, kihasználva annak programozható Rydberg-interakcióit és flexibilis geometriai elrendezését. Ez lehetőséget teremt a módszer gyakorlati tesztelésére és validálására, valamint a szimulációs és kísérleti eredmények közvetlen összehasonlítására.

Összességében az aktuális félév során a kutatás a quantum reservoir computing elméleti hátterének megismerésétől egy konkrét, alkalmazásorientált quantum sensing eljárás kidolgozásáig jutott el, amely a további doktori munka egyik alapját képezi.

Tanulmányi tevékenység az aktuális félévben

Az aktuális félévben az alábbi tanulmányi tevékenységet teljesítettem:

- **A gépi tanulás új eredményei szeminárium (FIZ/3/092)** – 6 kredit
- **Irányított kutatómunka (FIZ/S1-S4/K18)** – 18 kredit

Oktatási tevékenység

Az oktatási tevékenységem keretében részt vettem az alábbi tantárgy oktatásában:

- **Számítógépes alapismeretek (szamalapf19la-1)**

Szakmai közéleti tevékenység

A QUEST pályázat támogatásával az alábbi nemzetközi kutatóutakon vettem részt:

- **Loughborough University** (2025. november 10–13.): A kutatóút célja a Loughborough University kvantuminformatikai és komplex rendszerekkel foglalkozó kutatóival való személyes szakmai kapcsolatfelvétel, valamint egy hosszabb távú közös kutatási együttműködés megalapozása volt.
- **Linköping University** (2025. december 1–6.): A linköpingi kutatóút célja a Linköping University kutatóival való személyes szakmai kapcsolatfelvétel és a nemzetközi együttműködések megalapozása volt. A látogatás során laborlátogatásokon vettem részt, amelyek lehetőséget biztosítottak az ott alkalmazott kísérleti és alkalmazásorientált kvantumkutatási módszerek közvetlen megismerésére.