

## 4. félévi beszámoló

Nagy Dániel

dnagy9605 kukac gmail.com

ELTE TTK Fizika Doktori Iskola  
Statisztikus fizika, biológiai fizika  
és kvantumrendszerek fizikája program

Témavezető: Zimborás Zoltán (Wigner FK)

Dolgozat címe: Kvantumos gépi tanulás

# 1. Bevezetés

A doktori kutatásom célja az elmúlt években hatalmas fejlődésen keresztülment kvantuminformáció-technológia és a szintén nagy népszerűségnek örvendő gépi tanulás tudományterületeinek határmezsgyéjén levő kvantumos gépi tanulási algoritmusok és módszerek kutatása. A kutatás egyrészt elméleti jellegű, ugyanakkor számos numerikus számolást, szimulációt magába foglal. A kvantumos gépi tanulás tudományterülete magába foglalja a klasszikus gépi tanulás jelenleg is ismert és alkalmazott módszereinek kvantumos adaptációit, továbbfejlesztéseit, illetve eddig nem ismert, klasszikusan nem létező kvantumos algoritmusok kutatását, tesztelését gépi tanulási feladatokra. A kutatásom során különböző kvantumos gépi tanulási algoritmus fejlesztése és ezek alkalmazásainak tesztelését tűztem ki célul.

A kutatásom során kiemelt fontosságot tulajdonítok a hibrid kvantumklasszikus módszerek tesztelésének és vizsgálatának, melyek a kvantumos és klasszikus erőforrások együttes kihasználásával célozzák meg a különböző problémák megoldását. Az előrelátható jövőben a zajos kvantumhardverek elterjedése miatt valószínűleg a hibrid módszerek alkalmazása lesz a leggyakoribb megoldás a kvantumeszközök alkalmazásaiban.

## 2. A doktori folyamatban eddig elért eredmények ismertetése

### 2.1. Első félév

A doktori képzés első félévében a mesterképzés utolsó félévében már megkezdett kutatást folytattam témavezetőmmel és kutatótársaimmal. Ennek a munkának a célja a megerősítéses tanulás (RL) kvantumos adaptációinak vizsgálata fotonikus kvantumarchitektúrán. A munka során egy Proximal Policy Optimization (PPO [1]) nevű RL algoritmus kvantumosítása és a kvantumos verzió tesztelése volt a cél. Ehhez egy speciális PPO kódot fejlesztettünk, amely egy fotonikus kvantumszimulátor (Strawberry Fields [2]) és gépi tanulási szoftvercsomagok (TensorFlow [3], OpenAI Gym [4]) összehangolásából jött létre. A módszerünk lényege, hogy a PPO algoritmusban szereplő két neurális háló közül az egyiket egy fotonikus kvantumos neurális hálóra cseréltük. A fotonikus kvantumos neurális hálókat már a mesterképzés során tanulmányoztam és a szakdolgozatomat is ebből a témakörből írtam, így a doktori munkám az eddigi tevékenységeim természetes folytatása. Legfőbb feladatomban a félév során a kódok fejlesztése és az eredmények kiértékelése volt. A kutatás legfontosabb eredménye, hogy az általunk tesztelt legegy-

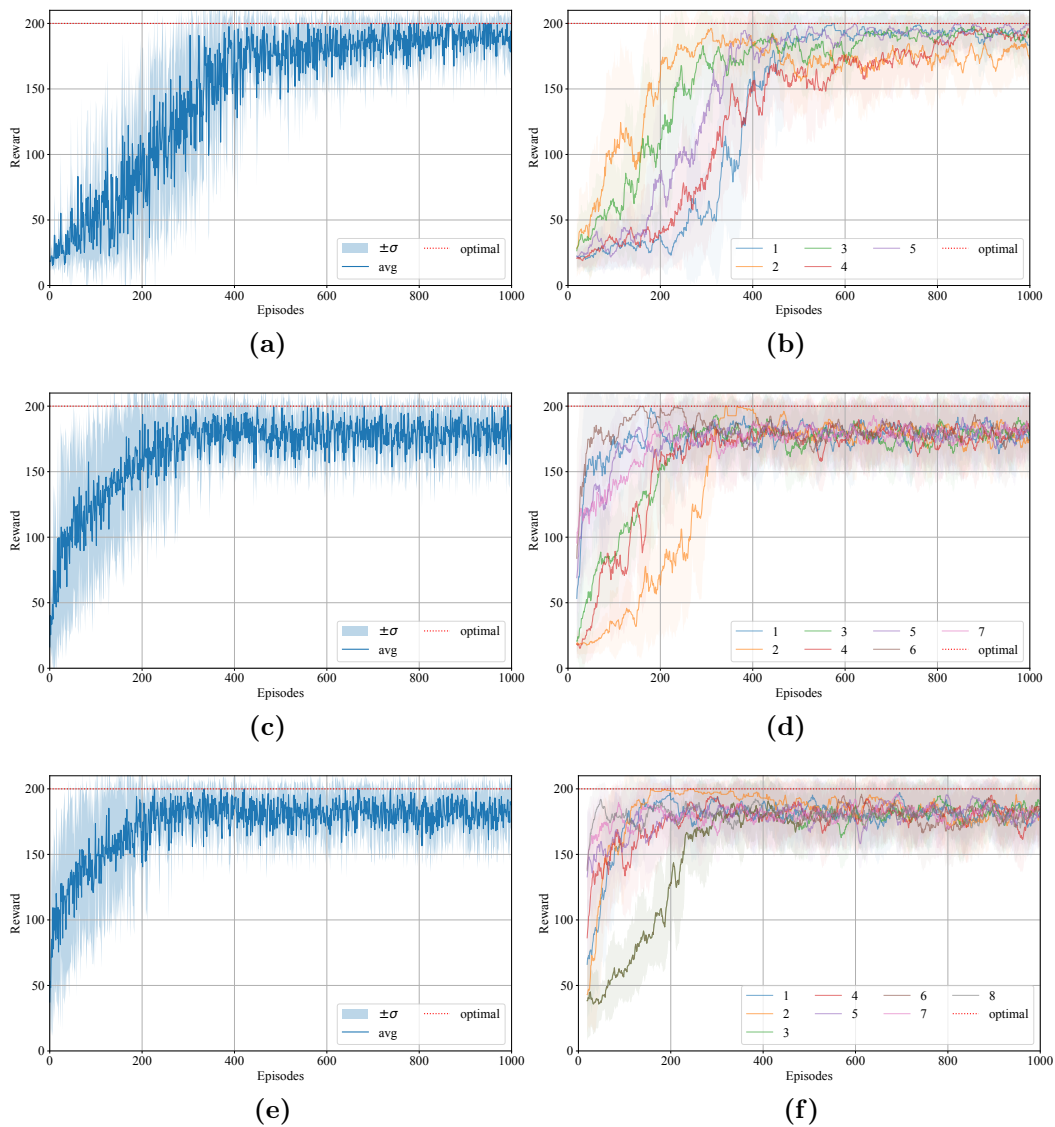
szerűbb esetben a kvantum algoritmus kevesebb iterációs lépéssel (gyorsabban) konvergál az optimális megoldáshoz, mint egy hasonló paraméterszámú klasszikus PPO algoritmus [5]. Az eredményeket az 1. ábra szemlélteti. Ebből a munkából „technical paper” kategóriájú konferenciacikket publikáltunk a 2021 IEEE Quantum Week konferencián „*Photonic quantum policy learning in openai gym*” címmel [5].

## 2.2. Második félév

A második félév során folytattam az előző félév során megkezdett kvantum megerősítési tanulás (QRL) tesztelését, bonyolultabb tesztkörnyezetben. A bonyolultabb, képi információt tartalmazó tesztkörnyezet egy ismert számítógépes játék (Super Mario Bros) kifejezetten RL tesztekhez átirított változata volt. Mivel a jelenlegi kvantumszámítógépek és szimulátorok nem tudnak ilyen mennyiségű információt feldolgozni, különböző dimenzióredukciós módszerek alkalmazására is szükség volt. Dimenzióredukciónak egy klasszikus Autoencoder architektúrát használtam, amivel a tanulandó feature-ök számát megpróbáltam a lehető legkisebbre csökkenteni. Ilyen módon hibrid kvantum-klasszikus gépi tanulási módszereket lehet tesztelni és különböző módon betanítani. Ez a kutatás jelenleg is parkoló pályán van, mert a projekt számítási igényei nagyon magasnak bizonyultak, így egyszerűbb környezetet választottunk.

További két területen is tevékenykedtem a félév során: egyrészt alkalmas volt tesztelni egy fotonikus kvantum-hardvert, amelyen méréseket végeztünk és a mérések kiértékeléséből megállapítottuk az eszköz fotonvesztési és kapuhibáit. Ehhez egy nagyon egyszerű, binomiális eloszlást feltételező fotonvesztési modellt alkalmaztunk. A másik terület, amely kutatásában részt vettem a kvantum autoencoderek vizsgálata, amelyet ipari partnerrel közösen végeztünk. Ebből a kutatásból egy elbírálás alatt levő konferenciacikk is született.

A félév során a tavaly nyáron beadott és megnyert KDP pályázatnak megfelelő ütem szerint a kutatásaimat az Ericsson Magyarország Kft-vel történő együttműködés keretében végeztem.



**1. ábra.** Numerikus kísérletek eredménye. Felső sor: klaszikus PPO algoritmus eredményei **(a)** agentekre átlagolva, **(b)** egyes agentekre. Középső sor: fotonikus PPO algoritmus eredményei data-reuploading technika alkalmazása nélkül, **(c)** agentekre átlagolva, **(d)** egyes agentekre. Alsó sor: fotonikus PPO algoritmus eredményei data-reuploading technika alkalmazásával, **(e)** agentekre átlagolva, **(f)** egyes agentekre. Az ábra az [5] cikkben szereplő ábrával azonos.

### 2.3. Harmadik félév

A doktori képzésem harmadik félévében fotonikus kvantum-szimulátor fejlesztésén dolgoztam, pontosabban folytattam a megkezdett munkát a Wigner-

függvény marginálisának hatékony kiszámítására, melyet később kvantumos gépi tanulási modellek implementálására terveztünk használni. A módszer lehetővé teszi a Fock-reprezentációban tárolt sűrűségmátrix felhasználásával a homodyne és heterodyne mérések mintavételezését.

Ezen kívül társszerzőként dolgoztam a „*Hybrid Quantum-Classical Autoencoders for End-to-End Radio Communication*” című konferenciacikk megírásán, amely a „2022 IEEE/ACM 7th Symposium on Edge Computing (SEC)” konferencián jelent meg. A cikkben olyan módszert mutattunk be, amelynek segítségével kvantumos autoencodert alkalmaztunk rádiókommunikációs rendszer fizikai rétegében a jelátvitel optimalizálására.

Mindemellett foglalkoztam más kvantumos autoencoderek implementációjával és kvantumos megerősítéses tanulással is. Itt két főbb eredményt emelnék ki, az egyik a klasszikus autoencoderek alkalmazása kvantumos megerősítéses tanulási algoritmusokra, a másik pedig egy módszer kvantumos megerősítéses tanulási modell előtanítására, illetve a kvantumáramkör validálására.

A félév során a 2022-ben elnyert KDP pályázatnak megfelelő ütem szerint a kutatásaimat az Ericsson Magyarország Kft.-vel történő együttműködés keretében végeztem. A kollaboratív munka során kiemelt hangsúlyt kapott a kutatások gyakorlati alkalmazhatóságának vizsgálata.

### 3. Negyedik (aktuális) félév

Az aktuális félév során folytattam a megkezdett munkát a klasszikus autoencoder illetve variációs autoencoder, valamint kvantumos megerősítéses tanulást együttes alkalmazásán. A teszt kódokat különböző RL környezetekre futtatjuk és az eredmények kiértékeléséhez scripteket írtam. A vizsgált algoritmusok a második félévben már említett módszert alkalmazzák, csak a Super Mario Bros környezet helyett egy egyszerűbb, nem vizuális alapú RL környezetet használunk. Előre nem látott okok miatt a kódban levő hibák megtalálása és kijavítása a vártnál több ideig tartott. Az itt születő eredményekből a következő negyedévben tervezzük egy folyóiratcikk beadását.

Emellett a félév során társszerzőként dolgoztam a korábban említett „*Hybrid Quantum-Classical Autoencoders for End-to-End Radio Communication*” című konferenciacikk [6] kibővített változatán, amelyet a tervek szerint hamarosan folyóiratban fogunk publikálni.

## 4. Publikációk

- A 2022/2023 tanév őszi félévében „Hybrid Quantum-Classical Autoencoders for End-to-End Radio Communication” címmel konferenciacikk társszerzője voltam, melyet a „2022 IEEE/ACM 7th Symposium on Edge Computing (SEC)” konferenciára küldünk be [6]
- A 2021/2022 tanév őszi félévében során résztvettem az IEEE Quantum Week konferencián, ahova első szerzős „technical paper” jellegű konferenciacikket publikáltam [5].
- 2021-ben a Wigner FK által szervezett Wigner GPU Day illetve az AI-ME konferenciákon előadást tartottam „Introduction to photonic quantum machine learning” illetve „Photonic Quantum Policy Learning in OpenAI Gym” címmel.

## 5. Elnyert díjak, pályázatok

A 2022-es tanév tavaszi félévében elnyertem az NKFIH által meghirdetett Kooperatív Doktori Program (KDP) pályázatot. A pályázat keretében az Ericsson Hungary-val kollaboratív kutatást végzünk.

## 6. Tanulmányi tevékenység

Az első három félévben a következő tárgyakat végeztem el:

- „Biológiai Rendszerek statisztikus fizikája” (FIZ/3/003E)
- „Kvantuminformáció-elmélet” (FIZ/3/060E)
- „Nytott kvantumrendszerek elméletei” (FIZ/3/066E)
- „Bevezetés a kvantumoptikába” (FIZ/3/029E)
- „Kvantum-számítástudomány” (MAT/471)

Az aktuális félév során elvégzett tárgyak:

- „Gráfok a bioinformatikában” (FIZ/3/063E)
- „Az érzékelés biofizikája II.: Bioakusztika” (FIZ/3/045E)
- „Sejtmozgás molekuláris és biofizikai mechanizmusai” (FIZ/3/071E)

Jelen beszámoló írásakor az utóbbi két tárgyból még nem szereztem érdemjegyet.

## Hivatkozások

- [1] John Schulman, Filip Wolski, Prafulla Dhariwal, Alec Radford, and Oleg Klimov. Proximal Policy Optimization Algorithms. *arXiv e-prints*, art. arXiv:1707.06347, July 2017.
- [2] Nathan Killoran, Josh Izaac, Nicolás Quesada, Ville Bergholm, Matthew Amy, and Christian Weedbrook. Strawberry Fields: A Software Platform for Photonic Quantum Computing. *Quantum*, 3:129, March 2019. ISSN 2521-327X. doi: 10.22331/q-2019-03-11-129. URL <https://doi.org/10.22331/q-2019-03-11-129>.
- [3] Martín Abadi, Paul Barham, Jianmin Chen, Zhifeng Chen, Andy Davis, Jeffrey Dean, Matthieu Devin, Sanjay Ghemawat, Geoffrey Irving, Michael Isard, et al. Tensorflow: A system for large-scale machine learning. In *12th {USENIX} Symposium on Operating Systems Design and Implementation ({OSDI} 16)*, pages 265–283, 2016.
- [4] Greg Brockman, Vicki Cheung, Ludwig Pettersson, Jonas Schneider, John Schulman, Jie Tang, and Wojciech Zaremba. OpenAI Gym. *arXiv e-prints*, art. arXiv:1606.01540, June 2016.
- [5] **Dániel Nagy**, Zsolt Tabi, Péter Hága, Zsófia Kallus, and Zoltán Zimborás. Photonic quantum policy learning in openai gym. In *2021 IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering (QCE)*, pages 123–129. IEEE, 2021.
- [6] Zsolt Tabi, Bence Bakó, **Nagy, Dániel T. R.**, Péter Vadera, Zsófia Kallus, Péter Hága, and Zoltán Zimborás. Hybrid quantum-classical autoencoders for end-to-end radio communication. In *2022 IEEE/ACM 7th Symposium on Edge Computing (SEC)*, pages 468–473, 2022. doi: 10.1109/SEC54971.2022.00071.