

**PÉCSI TUDOMÁNYEGYETEM**

Fizika Doktori Iskola

Kvantumoptika és Kvantuminformatika Program

**A fény nemklasszikus állapotainak  
előállítása koherens állapot  
szuperpozíciókkal**

PhD értekezés tézisei

**Molnár Emese**

témavezető: **Dr. Ádám Péter**

habil. egyetemi docens



Pécs, 2020

# 1. Előzmények

A fény nemklasszikus állapotainak előállítása egy jelenleg is intenzíven kutatott téma a kvantumoptikában . A nemklasszikus állapotok fontos szerepet játszanak a nagy pontosságú mérés-technikában, a kvantuminformatikai eljárásokban, és az alapvető kvantummechanikai és kvantumoptikai kísérletekben.

A fény nemklasszikus állapotainak különbözői reprezentációi közül jól használhatók az egydimenziós koherens állapot reprezentációk, amelyek a fázistér origó középpontú körén, illetve azon átmenő egyenesen vett folytonos koherens állapot szuperpozíciók [1–4]. Érdekes eredmény, hogy több nemklasszikus állapot nagy pontossággal közelíthető kis számú koherens állapot szuperpozíciójával is az említett alakzatok mentén[5–7]. Dolgozatomban megmutatom, hogy a fázistéren vett ellipszis menti, illetve rácson vett diszkrét koherens állapot szuperpozíciókkal több nemklasszikus állapot az eddig ismert előállításoknál nagyobb pontossággal közelíthető.

A különböző nemklasszikus állapotok előállítására számos eljárást dolgoztak ki és több állapotot sikeresen előállítottak kísérletileg is. A gyakorlati alkalmazások szempontjából fontosak az állapotokat haladó hullámú módon előállító eljárások [8–12]. Különösen érdekesek a kvantumállapot tervezésen alapuló kísérleti elrendezések. Ezek célja, hogy egy rendszerben lehessen több

nemklasszikus állapotot, ideális esetben tetszőleges kvantumállapotú fényt előállítani. A jelenleg ismert ilyen rendszerek a fotonkivonás és fotonhozzáadás módszerére épülnek [13, 14]. Ezeknél a rendszereknél az optikai elemek és mérések száma arányos a célállapotok fotonszám kifejtésében szereplő fotonszám állapotok számával. Ennek eredményeként nagyobb fotonszám szuperpozíciók esetén csökken a sikeres előállítás valószínűsége és a vizsgálatok szerint az előállítás pontossága is. Dolgozatomban két olyan haladó hullámú elrendezést javaslok nemklasszikus állapotok előállítására, amelyek csak három, illetve kettő mérést tartalmaznak. Ezek olyan egyenes mentén és rácson vett diszkrét koherens állapot szuperpozíciókat állítanak elő, amelyek nagy pontossággal közelítik az előállítani kívánt nemklasszikus állapotokat. A berendezésekben a sikeres előállítás valószínűsége nagyobb az eddig ismert eljárásokban elérhetőnél.

## 2. Célkitűzések

A diszkrét koherens állapot szuperpozíciókkal történő állapotközelítésre vonatkozó eredményekből kiindulva felmerült, hogy olyan alakzatokon is érdemes lenne megvizsgálni a közelítést, ahol a diszkrét szuperpozíciók megtalálásához egydimenziós reprezentációk nem állnak rendelkezésre. Az irodalomban tapasztalat az is, hogy az állapotok Wigner-függvényére illeszkedő alakzatokon vett koherens állapot szuperpozíciók közelítik jól ezen állapotokat. Ezért célom, hogy numerikus módszert dolgozzak ki különböző nemklasszikus állapotokat közelítő a fázistér origó középpontú ellipszisei mentén és rácson vett diszkrét koherens állapot szuperpozíciók megtalálására. Célom, hogy az összenyomott és eltolt fotonszámállapotok esetén megvizsgáljam, hogy a fázistér origó középpontú ellipszein vett koherens állapot szuperpozíciók megfelelő pontossággal közelítik-e az adott állapotot. Célom, hogy megállapítsam, hogy a kvantált elektromágneses tér mely állapotai közelíthetőek nagy pontossággal rácson vett koherens állapot szuperpozíciókkal.

Az irodalomban ismert haladó hullámú kvantumállapot tervezési rendszerekben az optikai elemek és mérések száma arányos a célállapot fotonszám kifejtésében szereplő számállapotok számával. Ezekben rendszerekben az optikai elemek növelésével a sikeres előállítás valószínűsége csökken és a tapasztalat szerint az

előállítás pontossága is. A probléma megoldását egy olyan kísérleti berendezés jelentheti, melyben az optikai elemek és mérések száma független az előállítandó állapot fotonszámorában szereplő állapotok számától. Céлом olyan kevés optikai elemből és mérésből álló kísérleti elrendezések kifejlesztése, melyekkel különböző nemklasszikus állapotok haladó hullámú módon állíthatók elő nagy pontossággal. Cél, hogy a berendezések az állapotokat közelítő egyenes mentén és rácson vett diszkrét koherens állapot szuperpozíciókat hozzanak létre. Továbbá célom, hogy numerikus eljárást dolgozzak ki a berendezések optimalizálására. Ezen felül célom elemezni a fény nevezetes kvantumállapotainak, így például összenyomott számállapotok, amplitúdó-összenyomott, binomiális, Schrödinger-macska és összenyomott Schrödinger-macska állapotok, továbbá különböző fotonszámállapot szuperpozíciók előállíthatóságát a kifejlesztett berendezésekben.

### 3. Tézisek

1. Megmutattam, hogy az összenyomott és eltolt fotonszám-állapotok nagy pontossággal közelíthetők a fázistér origó középpontú ellipszisein vett koherens állapot szuperpozíciókkal. Numerikus módszerrel meghatároztam az adott állapotok legpontosabb közelítéséhez tartozó ellipszis paramétereit és a szuperpozícióban szereplő koherens állapotok koefficienseit. Megmutattam, hogy a vizsgált állapotokra a közelítés pontossága nagyobb, mint az irodalomból ismert egyenes mentén vett előállítás pontossága. [S1]
2. Megmutattam, hogy amplitúdó-összenyomott állapotok, összenyomott számállapotok, és számállapot szuperpozíciók nagy pontossággal közelíthetők a fázistér origó középpontú ekvidisztans  $3 \times 3$ -as rácsain vett koherens állapot szuperpozíciókkal. Numerikus módszerrel meghatároztam az adott állapotok legpontosabb közelítéséhez tartozó rács rácsállandóját és a szuperpozícióban szereplő koherens állapotok koefficienseit. Megmutattam, hogy a vizsgált állapotokra meghatározott paraméterértékeknél a közelítés pontossága nagyobb, mint az irodalomból ismert origó középpontú körön vett előállítás pontossága. [S1]
3. Két kísérleti elrendezést javasoltam a fény nemklasszikus

állapotainak haladó hullámú feltételes előállítására. Az elrendezések kettő, illetve három nyalábosztót, illetve homodin mérést tartalmaznak. Az optikai elemek száma tehát független az előállítandó állapot fotonszámsorában szereplő állapotok számától, így több különböző állapot előállítására is lehetőség van ezekben a berendezésekben. Az elrendezések bemenő állapotai kísérletileg előállítható koherens állapot szuperpozíciók, illetve az összenyomott vákuumállapot az egyik elrendezés esetén. A rendszerek kimenő állapotai a fázistér valós tengelyén vett, illetve origó középpontú rácsain vett diszkrét koherens állapot szuperpozíciók. [S2,P2, P1,P3,P4]

4. Numerikus eljárást dolgoztam ki a javasolt optikai rendszerek optimalizálására. Az optimalizáció során a bemenő állapotok és az elrendezés paramétereit úgy határoztam meg, hogy az előállítás hibája minimális legyen a kitűzött célállapot esetén. Valamennyi célállapot esetén kiszámoltam a sikeres előállítás valószínűségét is. Megmutattam, hogy a javasolt rendszerek amplitúdó-összenyomott, binomiális, Schrödinger-macska, és összenyomott Schrödinger-macska állapotok, továbbá speciális fotonszámállapot szuperpozíciók és forrásállapotok nagy pontosságú előállítására alkalmasak. Megmutattam, hogy az adott álla-

potok esetén az előállítás pontossága a két elrendezésben megegyezik, a sikeres előállítás valószínűsége viszont az egyszerűbb berendezés esetében nagyobb. Megmutattam, hogy a sikeres előállítás valószínűsége a vizsgált állapotoknál nagyobb, mint az irodalomban található több állapot előállítására alkalmas rendszerekben elérhető valószínűség. [S2,P2, P1,P3,P4]



## 4. Publikációk jegyzéke

### Az értekezéshez kapcsolódó saját publikációk

#### Referált folyóiratban megjelent publikációk

S1 P. Adam, **E. Molnar**, G. Mogyorosi, A. Varga, M. Mechler, and J. Janszky, „*Construction of quantum states by special superpositions of coherent states*”, Phys. Scr. **90**, 074021 (2015)

S2 **Emese Molnar**, Peter Adam, Gabor Mogyorosi, and Matyas Mechler, „*Quantum state engineering via coherent-state superpositions in traveling optical fields*”, Phys. Rev. A **97**, 023818 (2018)

#### Előadások

E1 **Molnár Emese**, Mogyorósi Gábor, Varga Árpád, Mechler Mátyás, és Ádám Péter: „*A fény nemklasszikus állapotainak haladó hullámú előállítás*”, IV. Interdiszciplináris Doktorandusz Konferencia. Helyszín: Pécs, Magyarország, 2015. 05. 14–15., Pécsi Tudományegyetem Állam- és Jogtudományi Kar, ISBN: 978-963-642-830-3 (2015)

E2 **Molnár Emese**: „*A fény nemklasszikus állapotainak haladó hullámú előállítás*”,

IV. Fizikus Doktoranduszok Konferenciája. Helyszín: Balatonfenyves, Magyarország, 2015. 06. 11–14.

## Poszterek

P1 **Molnar E**, Varga A, Mogyorosi G, and Adam, P, „*Quantum state engineering with linear optical tools*”, Lézer Tea 2014. Konferencia helye, ideje: Szeged, Magyarország, 2014. 04. 23.

P2 **Emese Molnar**, Arpad Varga, Gabor Mogyorosi, Peter Adam, „*Quantum state engineering with linear optical tools*”, P-63, 21th Central European Workshop on Quantum Optics. Helyszín: Bursseles, Belgium, 2014. 06. 23–27.

P3 **Molnar E**, Varga A, Mogyorosi G, and Adam P, „*Quantum state engineering with linear optical tools*”, P14, Kvantum-elektronika 2014: VII. szimpózium a hazai kvantumelektronikai kutatások eredményeiről. Helyszín: Budapest, Magyarország, 2014. 11. 28., ISBN: 978-963-642-697-2 (2014)

P4 **Emese Molnár**, Gábor Mogyorósi, Mátyás Mechler, Péter Ádám, „*Quantum state engineering via coherent-state superpositions in traveling optical fields*”, P12, Kvantum-elektronika 2018: VIII. szimpózium a hazai kvantumelekt-

ronikai kutatások eredményeiről. Helyszín: Budapest, Magyarország, 2018. 06. 15., ISBN: 978-963-429-250-0 (2018)

## Egyéb publikációk

- K1 Adam P., Mechler M., Szalay V., **Molnar E.**, Koniorczyk M., „*Intelligent states for number operator-annihilation operator uncertainty relation*” P-63, 21th Central European Workshop on Quantum Optics. Helyszín: Burssels, Belgium, 2014. 06. 23–27.
- K2 Adam P., Mechler M., Szalay V., **Molnar E.**, Koniorczyk M., „*Intelligent states for number operator-annihilation operator uncertainty relation*”, Kvantumelektronika 2014: VII. szimpózium a hazai kvantumelektronikai kutatások eredményeiről. Helyszín: Budapest, Magyarország, 2014. (2018)
- K3 Gabor Mogyorosi, Peter Adam, **Emese Molnar**, and Matyas Mechler,  
„*Single-step quantum state engineering in traveling optical fields*”, Phys. Rev. A **100**, 013851 (2019)
- K4 Gabor Mogyorosi, **Emese Molnar**, Matyas Mechler, and Peter Adam,  
„*Single-Step Traveling-Wave Quantum State Engineering*

*in the Coherent State Representation*”, J. Russ. Laser Res. **39**, 448 (2018)

- K5 Mogyorosi G, Adam P, **Molnar E**, Varga A, Mechler M, and Janszky J, „*Construction of quantum states by special superpositions of coherent states*”, P13, Kvantumelektronika 2014: VII. szimpózium a hazai kvantumelektronikai kutatások eredményeiről. Helyszín: Budapest, Magyarország, 2014. 11. 28., ISBN: 978-963-642-697-2 (2014)
- K6 Gabor Mogyorosi, Peter Adam, and **Emese Molnar**, „*Conditional generation of superpositions of photon number states of traveling fields*”, 24th Central European Workshop on Quantum Optics. Helyszín: DTU Lyngby, Dánia, 2017. 06. 26–30.
- K7 Gabor Mogyorosi, Peter Adam, and **Emese Molnar**, „*Conditional generation of nonclassical states of traveling fields*”, Quantum Optics IX. Helyszín: Gdańsk, Lengyelország, 2017. 09. 17–23.
- K8 Gabor Mogyorosi, **Emese Molnar**, Matyas Mechler, and Peter Adam, „*Quantum state engineering via optimized photon subtraction in traveling optical fields*”, 25th Central European Workshop on Quantum Optics. Helyszín: University of the Balearic Islands, Mallorca, 2018. 05. 21–25.

K9 Gábor Mogyorósi, **Emese Molnár**, Mátyás Mechler, Péter Ádám, „*Single step quantum state engineering in traveling optical fields*”, P11, Kvantumelektronika 2018: VIII. szimpózium a hazai kvantumelektronikai kutatások eredményeiről. Helyszín: Budapest, Magyarország, 2018. 06. 15., ISBN: 978-963-429-250-0 (2018)

# Irodalomjegyzék

- [1] P. Adam, J. Janszky, and A. Vinogradov, Phys. Lett. A **160**, 506 (1991).
- [2] P. Adam, J. Janszky, and A. V. Vinogradov, Opt. Commun. **80**, 155 (1990).
- [3] J. Janszky, P. Domokos, and P. Adam, Phys. Rev. A **48**, 2213 (1993).
- [4] P. Adam, I. Földesi, and J. Janszky, Phys. Rev. A **49**, (1994).
- [5] J. Janszky, P. Domokos, S. Szabo, and P. Adam, Phys. Rev. A **51**, 4191 (1995).
- [6] S. Szabo, P. Adam, J. Janszky, and P. Domokos, Phys. Rev. A **53**, 2698 (1996).

- [7] P. Adam, S. Szabo, and J. Janszky, *Physics Letters A* **215**, (1996).
- [8] A. Ourjountsev, H. Jeong, R. Tualle-Brouiri, and P. Grangier, *Nature* **448**, (2007).
- [9] J. S. Neergaard-Nielsen, B. M. Nielsen, C. Hettich, K. Mølmer, and E. S. Polzik, *Phys. Rev. Lett.* **97**, 083604 (2006).
- [10] H. Takahashi, K. Wakui, S. Suzuki, M. Takeoka, K. Haya-saka, A. Furusawa, and M. Sasaki, *Phys. Rev. Lett.* **101**, 233605 (2008).
- [11] T. Gerrits, S. Glancy, T. S. Clement, B. Calkins, A. E. Lita, A. J. Miller, A. L. Migdall, S. W. Nam, R. P. Mirin, and E. Knill, *Phys. Rev. A* **82**, 031802 (2010).
- [12] K. Huang, H. Le Jeannic, J. Ruau-del, V. B. Verma, M. D. Shaw, F. Marsili, S. W. Nam, E. Wu, H. Zeng, Y.-C. Jeong, R. Filip, O. Morin, and J. Laurat, *Phys. Rev. Lett.* **115**, 023602 (2015).
- [13] M. Dakna, J. Clausen, L. Knöll, and D.-G. Welsch, *Phys. Rev. A* **59**, 1658 (1999).
- [14] J. Fiurásek, R. Gárcia-Patrón, and N. J. Cerf, *Phys. Rev. A* **72**, 033822 (2005).