

# PÉCSI TUDOMÁNYEGYETEM

Fizika Doktori Iskola

Kvantumoptika és Kvantuminformatika Program

## A fény nemklasszikus állapotainak haladóhullámú előállítása

PhD értekezés tézisei

**Mogyorósi Gábor**

témavezető:

**Dr. Ádám Péter**

habil. egyetemi docens



Pécs, 2020

# 1. Előzmények

A fény nemklasszikus állapotainak előállítása és alkalmazása a kvantumoptikai kutatások egyik fontos témája. A nemklasszikus állapotok fontos szerepet játszanak a kvantuminformaticai rendszerekben, a nagy pontosságú mérés technikában, a gravitációs hullámok detektálásában és az alapvető kvantummechanikai problémák vizsgálatában. A nemklasszikus állapotok előállításának kutatásában két fő irány különböztethető meg. Az egyik az optikai rezonátorokban, üregekben történő előállítás, a másik az állapotok haladóhullámú előállítása. A kidolgozott eljárások jelentős részét egy-egy speciális fényállapot előállítására dolgozták ki. A gyakorlati felhasználás szempontjából különösen érdekesek a fény nemklasszikus állapotainak haladóhullámú előállításával foglalkozó kutatások [1–6].

A nemklasszikus állapotok haladóhullámú előállításának két fajtáját különböztethetjük meg. Az egyik valamely nemlineáris optikai folyamaton alapuló közvetlen előállítás, amely rendszer esetenként visszacsatolást is tartalmazhat. A másik módszer a feltételes módon történő állapot-előállítás, amely-

nek lényege, hogy egy kétmódusú állapot egyik módusán történő mérés meghatározott eredménye esetén a másik módus a kívánt állapotba kerül.

Fontos eredményre vezettek a kvantumállapot-tervezéssel foglalkozó kutatások („quantum state engineering”), melyeknek célja, hogy egyetlen kísérleti elrendezésben lehessen több, tetszőleges nemklasszikus állapotot nagy pontossággal előállítani [7–14]. A többféle nemklasszikus állapot előállítására alkalmas berendezésekben az optikai elemek száma általában arányos a célállapot fotonszám kifejtésében szereplő fotonszámállapotok számával. Ezeknél a rendszereknél a vizsgált állapotoknál a fotonszám növelésével csökken az előállítás valószínűsége és többnyire az előállítás hűsége is. Az előállítás hűsége és a magas előállítási valószínűség is fontos a gyakorlati alkalmazásra nézve.

## **2. Célkitűzés, módszerek**

A kvantumállapot-tervezéssel kapcsolatos korábbi eredmények motiváltak abban, hogy olyan haladóhullámú feltételes elrendezést dolgozzak ki, amellyel a fény sok nemklasszi-

kus állapota előállítható legyen nagy pontossággal és magas előállítási valószínűséggel. Célom, hogy a javasolt kísérleti elrendezés kevés optikai elemet és kísérletileg létrehozható bemenő állapotokat tartalmazzon. A javasolt kísérleti elrendezés esetén a rendszer bemenő állapotai változtatható paraméterű, függetlenül előállított összenyomott koherens állapotban vannak. További célom, hogy meghatározzam a rendszer kimenő állapotát fotonszámállapot- és koherens állapot reprezentációban.

A disszertációban numerikus eljárást dolgozok ki a javasolt optikai rendszer optimalizálására, amely során a genetikus algoritmus segítségével az optikai rendszer paramétereinek optimális értékeit keresem úgy, hogy a rendszer kimenő állapota nagy pontossággal a választott célállapot legyen.

Végül elemzem a nevezetes nemklasszikus állapotok, mint például a binomiális, negatív binomiális, fotonszám-, összenyomott fotonszám-, amplitúdó-összenyomott, Schrödinger-macska és összenyomott Schrödinger-macska állapotok, valamint speciális fotonszámállapot-szuperpozíciók előállíthatóságát ebben az elrendezésben. Továbbá elemzem a javasolt optikai rendszer hatékonyságát a bemenő állapotok pontosságának, illetve a nemideális detektorok hatásfokának függvényében hogyan módosulnak az eredmények.

### 3. Új tudományos eredmények

1. Haladóhullámú kísérleti elrendezést javasoltam a fény nemklasszikus állapotainak nagy pontosságú előállításához, amely egy nyalábosztót és egy mérést tartalmaz, a bemenő állapotok pedig függetlenül előállított, változtatható paraméterű összenyomott koherens állapotban vannak. A mérés lehet homodin mérés, vagy egy-, illetve  $N$ -foton detektálása. A javasolt optikai rendszer kimenő állapotát meghatároztam fotonszámállapot és koherens állapot reprezentációban [S1, S2].
2. Numerikus eljárást dolgoztam ki a javasolt optikai rendszer optimalizálásához. Az optimalizáció során a javasolt optikai elrendezés és a bemenő állapotok paramétereit úgy határoztam meg, hogy az előállítás hibája minimális legyen a kitűzött célállapot esetén. Valamennyi célállapot esetén meghatároztam az előállítás valószínűségét is. Elemeztem egy olyan optimalizációs eljárást is, amelynél egyidejűleg optimalizáltam az előállítás hibáját és valószínűségét [S1, S2].

3. Bizonyítottam, hogy a javasolt, az egy-, illetve  $N$ -foton detektálást tartalmazó kísérleti elrendezéssel binomiális és negatív binomiális állapotok, speciális fotonszám-állapot-szuperpozíciók, fotonszám-, összenyomott foton-szám- és eltolt összenyomott fotonszám-, amplitúdó-összenyomott és összenyomott Schrödinger-macska állapotok nagy pontossággal és magas előállítási valószínűséggel állíthatók elő. Valamennyi állapot esetén elemeztem, hogy az állapotok paramétereinek függvényében hogyan változik az előállítás pontossága és valószínűsége [S1,P1,P2].
4. Bizonyítottam, hogy homodin méréssel olyan binomiális és negatív binomiális állapotok, fotonszámállapot-szuperpozíciók, valamint amplitúdó-összenyomott állapotok állíthatók elő nagy pontossággal és magas előállítási valószínűséggel, melyek az adott paraméterek mellett egy Gauss-állapothoz közelítenek [S1,P3,P4].

5. Megállapítottam, hogy a nemklasszikus állapotok előállítása során meghatározott előállítási hiba esetén több megoldás kapható különböző optimális paraméterekre vonatkozólag. Arra a következtetésre jutottam, hogy az optikai elrendezés bemenő állapotainak bizonyos paraméterei adott tartományokban szabadon választhatók úgy, hogy az előállítási hiba ne növekedjen jelentősen. Így a kísérleti megvalósítás során több különböző nemklasszikus állapot állítható elő a javasolt elrendezéssel a bemenő állapotok, illetve az azokat előállító parametrikus berendezés jelentős módosítása nélkül [S1, S2].
6. Megvizsgáltam a javasolt optikai rendszer hatékonyságát a bemenő állapotok pontosságának, illetve a nem-ideális detektorok hatásfokának függvényében. Megmutattam, hogy a javasolt elrendezéssel a kísérletileg megvalósítható hibaértékek mellett a nemklasszikus állapotok továbbra is nagy pontossággal állíthatók elő [S1, S2].



## 4. Disszertációhoz kapcsolódó publikációk

- [S1] **Gabor Mogyorosi**, Peter Adam, Emese Molnar, and Matyas Mechler, „*Single-step quantum state engineering in traveling optical fields*”, *Phys. Rev. A* **100**, 013851 (2019)
- [S2] **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)
- [E1] **Mogyorósi Gábor**, Molnár Emese, Varga Árpád, Mechler Mátyás, és Ádám Péter: „*Fotonszám-állapot szuperpozíciók haladóhullámú 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] **Mogyorósi Gábor**: „*Fotonszám-állapot szuperpozíciók haladóhullámú előállítására*”,  
IV. Fizikus Doktoranduszok Konferenciája. Helyszín:  
Balatonfenyves, Magyarország, 2015. 06. 11–14.
- [P1] **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.
- [P2] **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.
- [P3] **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.

- [P4] **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)

## 5. Egyéb publikációk

- [K1] 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)
- [K2] Emese Molnár, **Gábor Mogyorósi**, Mátyás Mechler, Péter Ádám, „*Quantum state engineering via coherent-state superpositions in traveling optical fields*”, P12, Kvantumelektronika 2018: VIII. szimpózium a hazai kvantumelektronikai kutatások eredményeiről. Helyszín: Budapest, Magyarország, 2018. 06. 15., ISBN: 978-963-429-250-0 (2018)

- [K3] 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)
- [K4] **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)
- [K5] Molnar E, Varga A, **Mogyorosi G**, and Adam P, „*Quantum state engineering with linear optical tools*”, P14, Kvantumelektronika 2014: VII. szimpózium a hazai kvantumelektronikai kutatások eredményeiről. Helyszín: Budapest, Magyarország, 2014. 11. 28., ISBN: 978-963-642-697-2 (2014)
- [K6] 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.

## Hivatkozások

- [1] J. S. Neergaard-Nielsen, B. M. Nielsen, K. Hettich, C. Mølmer, and E. S. Polzik, *Phys. Rev. Lett.* **97**, 083604 (2006).
- [2] A. Ourjoumtsev, H. Jeong, R. Tualle-Brouri, and P. Grangier, *Nature* **448**, 78 (2007).
- [3] H. Takahashi, K. Wakui, S. Suzuki, M. Takeoka, K. Hayasaka, A. Furusawa, and M. Sasaki, *Phys. Rev. Lett.* **101**, 233605 (2008).
- [4] 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).
- [5] J. Etesse, M. Bouillard, B. Kanseri, and R. Tualle-Brouri, *Phys. Rev. Lett.* **114**, 193602 (2015).
- [6] K. Huang, H. Le Jeannic, J. Ruaudel, 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).

- [7] S. Szabo, P. Adam, J. Janszky, and P. Domokos, *Phys. Rev. A* **53**, 2698 (1996).
- [8] M. Dakna, L. Knöll, and D.-G. Welsch, *Opt. Commun.* **145**, 309 (1998).
- [9] M. Dakna, J. Clausen, L. Knöll, and D.-G. Welsch, *Phys. Rev. A* **59**, 1658 (1999).
- [10] J. Fiurášek, R. García-Patrón, and N. J. Cerf, *Phys. Rev. A* **72**, 033822 (2005).
- [11] C. C. Gerry and A. Benmoussa, *Phys. Rev. A* **73**, 063817 (2006).
- [12] E. Bimbard, N. Jain, A. MacRae, and A. I. Lvovsky, *Nat. Photonics* **4**, 243 (2010).
- [13] J. Sperling, W. Vogel, and G. S. Agarwal, *Phys. Rev. A* **89**, 043829 (2014).
- [14] K. Huang, H. Le Jeannic, V. B. Verma, M. D. Shaw, F. Marsili, S. W. Nam, E. Wu, H. Zeng, O. Morin, and J. Laurat, *Phys. Rev. A* **93**, 013838 (2016).