

PÉCSI TUDOMÁNYEGYETEM

Fizika Doktori Iskola

Kvantumoptika és Kvantuminformatika Program

Periodikus egyfotonforrások optimalizációja

PhD értekezés tézisei

Bódog Ferenc

témavezető: **Dr. Ádám Péter**

habil. egyetemi docens



Pécs, 2020

1. Előzmények

A periodikus egyfotonforrások fejlesztése egy jelenleg is intenzíven kutatott témaköre a kvantumoptikának. Ez az említett források számos lehetséges gyakorlati felhasználásának köszönhető, amelyek közül fontos kiemelni az optikai kvantumszámítást [1, 2], a kvantumkulcsszétosztást [3, 4], a kvantumrendszereken alapuló kommunikációt [5, 6], a kvantumteleportációt [7, 8], a nemlokalitást ellenőrző tesztek [9, 10], a bozonmintavételezést [11–13], valamint a koherens állapot szuperpozíciók előállítását [14–18].

A kísérletekben több különböző fizikai rendszerre alapozva valósítottak már meg egyfotonforrásokat, ezek közül a leggyakrabban vizsgált rendszerek a spontán parametrikus lekonverzió (SPL) folyamatára épülő, korrelált fotonpárokat adó valószínűségi források. Ezekben az egyik foton (jelző foton) detektálásával időbeli és térbeli információt szerzünk a társfotonról, amelyet így felhasználhatunk.

Az adott berendezésekben térbeli vagy időbeli multiplexeléssel érhető el az ideálishoz közeli működés. A multiplexelő rendszerekkel ideális esetben tökéletes periodikus egyfotonforrást kaphatnánk, azonban a multiplexelő rendszer méretével, az alkalmazott optikai elemek számával arányos veszteségek mindkét multiplexelő rendszerben lerontják a várt eredményt. Az irodalomból eddig ismert térben vagy időben multiplexelt forrásoknak

létezik már egységes elméleti leírása, amely valamennyi releváns veszteségi mechanizmust figyelembe vesz. A részletes statisztikai elemzésből kiderül, hogy mindkét multiplexelés esetében létezik optimális rendszerméret, amely mellett a berendezés a maximális egyfoton-valószínűséget adja. Dolgozatomban két eljárást tárgyalok, amelyek segítségével a multiplexelt egyfotonforrások továbbfejleszthetők. Elsőként javasolok egy térbeli és időbeli multiplexelést egyaránt alkalmazó kombinált multiplexelésen alapuló egyfotonforrást, majd ennek teljes statisztikai elemzését végzem el. Ezt követően a fotonszámfeloldó detektorokkal működtetett multiplexelt egyfotonforrások optimalizálását végzem el. Megmutatom, hogy a fotonszámfeloldó detektorral működtetett bináris időbeli multiplexelésen alapuló egyfotonforrással érhető el a legmagasabb egyfoton-valószínűséget a kísérletileg elérhető paramétertartományon.

2. Célkitűzések

A multiplexelésen alapuló fotonforrásokkal kapcsolatos kutatások egy igen fiatal területe a kvantumoptikának, az első publikált ötletek óta még 20 év sem telt el. Ádám és munkatársai 2014-ben közzétették a multiplexereket leíró általános matematikai modelljüket, amelynek segítségével megmutatták, hogy a berendezések optimalizálhatók annak érdekében, hogy az egyfoton-kibocsátás valószínűsége maximális legyen [19]. Ez az eredmény alapozza meg a kutatómunkámat.

A kutatásom célja olyan új eljárások kidolgozása, amelyekkel közel ideális egyfotonforrások hozhatók létre. A javasolt új eljárásokra minden esetben teljes statisztikai modellt fogalmazok meg, amely segítségével a berendezések optimalizálását széles veszteségi paramétertartományon elvégzem. A teljes statisztikai vizsgálat során meghatározhatók a multiplexelt rendszerek optimális működéséhez szükséges paraméterek, az elérhető maximális egyfoton-valószínűség. Ugyanakkor a teljes statisztikai vizsgálat rávilágít a multiplexelt egyfotonforrások legfontosabb karakterisztikáira, az analízis során mélyebben megérthető ezeknek a komplex rendszereknek a működése.

A kutatásom első célja egy elrendezés kidolgozása, amely egy rendszeren belül egyesíti a térbeli és időbeli multiplexelést. Céлом továbbá a javasolt elrendezés matematikai modelljének meg-

alkotása, majd a modell segítségével kísérletileg elérhető paramé-
tertartományokon a berendezés optimalizálása.

Az eddigi kísérletek túlnyomó többségében küszöbdetektoro-
kat alkalmaztak a jelzőfotonok detektálására, melyek nem ké-
pesek meghatározni a detektált fotonok számát. Tekintettel a
fotonszámfeloldó detektorok fejlesztésével kapcsolatos kutatások
legújabb eredményeire, célom megvizsgálni ezen modernebb esz-
közők alkalmazásának hatását a multiplexelt egyfotonforrások
által elérhető egyfoton-valószínűségekre. Célom kifejleszteni egy
általános matematikai modellt, amely a fotonszámfeloldó detek-
torokkal felszerelt multiplexelt egyfotonforrások kimeneti foton-
statisztikáját írja le. Célom optimalizálni a fotonszámfeloldó
detektorokkal működtetett szimmetrikus térbeli multiplexelésen
alapuló egyfotonforrásokat széles paramétertartományon. Cé-
lom meghatározni, hogy mely paramétertartományon javasolt a
fotonszámfeloldó detektorok alkalmazása a küszöbdetektorokkal
szemben. A fejlettebb detektortípus lehetővé teszi különböző de-
tektálási stratégiák megvalósítását. Célom az optimális detektá-
lási stratégia meghatározása a teljes vizsgált paramétertartomá-
nyon. Végül célom, hogy a különböző időben multiplexelt for-
rások által elérhető egyfoton-valószínűségeket is meghatározzam
abban az esetben, ha fotonszámfeloldó detektorral működtetjük
őket.

3. Tézisek

1. Kombinált multiplexelésen alapuló periodikus egyfotonforrást javasoltam, amelyben az időbeli multiplexerek kimenetei a térbeli multiplexer bemeneteire kerülnek. Kidolgoztam a javasolt rendszer teljes statisztikai leírását, amelyben minden lényeges veszteséget figyelembe vettem. A statisztikai modell segítségével a kombinált multiplexelésen alapuló egyfotonforrások optimalizálhatók úgy, hogy az egyfotonállapotok kibocsátásának valószínűsége maximális legyen. [S1,E1]
2. Kísérletileg megvalósítható paraméterek mellett optimalizáltam az általam javasolt kombinált multiplexelésen alapuló periodikus egyfotonforrást. Meghatároztam azt a rendszerméretet és átlagos bemenő fotonszámot, amely mellett az egyfoton-valószínűség maximális. Megmutattam, hogy a maximális egyfoton-valószínűség csak bizonyos speciális esetekben növelhető a különböző multiplexelő rendszerek kombinálásával. Megmutattam, hogy a kombinált multiplexerekkel a maximális egyfoton-valószínűség értékének megtartása mellett csökkenthető az alkalmazott nemlineáris források száma, és növelhető a forrás ismétlési frekvenciája. [S1,E1]

3. Általános statisztikai modellt dolgoztam ki a fotonszám-feloldó detektorokkal felszerelt, térbeli és időbeli multiplexelésen alapuló periodikus egyfotonforrások leírására. A modell a rendszerek minden lényeges veszteségét figyelembe veszi, és lehetővé teszi a fotonszámfeloldó detektorokkal megvalósítható detektálási stratégiák elemzését is. A statisztikai modell segítségével a fotonszámfeloldó detektorokkal felszerelt periodikus egyfotonforrások optimalizálhatók úgy, hogy az egyfotonállapotok kibocsátásának valószínűsége maximális legyen. [S2,P1,P2,P3]
4. Optimalizáltam a fotonszámfeloldó detektorokat tartalmazó szimmetrikus térbeli multiplexelésen alapuló egyfotonforrásokat széles paramétertartományon termikus és Poisson bemenő fotonstatisztikát feltételezve. Meghatároztam a veszteségi paraméterek azon tartományát, amelyen a fotonszámfeloldó detektorok alkalmazása szignifikánsan javítja az elérhető egyfoton-valószínűséget. Megmutattam, hogy fotonszámfeloldó detektorokat használva általában kevesebb multiplexelt egységgel érhető el az optimális működés, mint küszöbdetektorok használata esetén. A teljes vizsgált veszteségi paramétertartományon meghatároztam a fotonszámfeloldó detektorokkal megvalósítható optimális detektálási stratégiát. [S2,P1,P2,P3]

5. Kísérletileg megvalósítható paraméterek mellett optimalizáltam a tárolóhurok alapú, illetve a bináris időbeli multiplexelésen alapuló periodikus egyfotonforrásokat. Meghatároztam a multiplexelt időablakok és a bemenő átlagos fotonszám azon értékét, amellyel a rendszerrel elérhető egyfoton-valószínűség maximális lesz. Megmutattam, hogy a fotonszámfeloldó detektorokkal felszerelt bináris időbeli multiplexelésen alapuló optimalizált periodikus egyfotonforrással érhető el a legmagasabb egyfoton-valószínűség. [S2,P1,P2,P3]

4. Publikációk listája

A disszertációhoz kapcsolódó saját publikációk

Referált folyóiratban megjelent publikációk

S1 **Ferenc Bodog**, Peter Adam, Matyas Mechler, Imre Santa, Mátyás Koniorczyk, *Optimization of periodic single-photon sources based on combined multiplexing*, Phys. Rev. A, **94**, 033853, (2016)

S2 **Ferenc Bodog**, Matyas Mechler, Mátyás Koniorczyk, Peter Adam, *Optimization of multiplexed single-photon sources operated with photon-number-resolving detectors*, Phys. Rev. A, **102**, 013513, (2020)

Előadások

E1 **Ferenc Bodog**, Peter Adam, Matyas Mechler, Imre Santa, and Matyas Koniorczyk *Optimization of periodic single-photon sources based on combined multiplexing*, 5th Work Meeting on Quantum Optics & Information 28-29. April 2017, Pécs, Hungary (2017)

Poszterek

P1 **Ferenc Bodog**, Peter Adam, Matyas Mechler, *Analysis of multiplexed single-photon sources operated with photon-number-resolving detectors*, 24th Central European Workshop on Quantum Optics 26-30 June 2017, Kongens, Lyngby, Denmark (2017)

P2 **Ferenc Bodog**, Matyas Mechler, Peter Adam, *Enhancing the performance of multiplexed single-photon sources with photon-number-resolving detectors*, Quantum Optics IX 17 - 23.09.2017, Gdańsk, Poland (2017)

P3 **Ferenc Bodog**, Matyas Mechler, Peter Adam, *Enhancing the expected single-photon probability of multiplexed single-photon sources via optimized detection strategy*, „Kvantum-elektronika 2018: VIII. Szimpózium a hazai kvantumelektronikai kutatások eredményeiről”, 2018. június 15., Budapest (2018)

Egyéb publikációk

K1 **Ferenc Bodog**, Matyas Mechler, Peter Adam, *Enhancing the performance of spatially multiplexed single-photon sources with optimized heralding strategy*, 25th Central Euro-

pean Workshop on Quantum Optics, 21-25 May, University
of the Balearic Islands, Spain (2018)

Irodalomjegyzék

- [1] E. Knill, R. Laflamme és G. J. Milburn, *Nature* **409**, 46 (2001).
- [2] P. Kok, W. J. Munro, K. Nemoto, T. C. Ralph, J. P. Dowling és G. J. Milburn, *Rev. Mod. Phys.* **79**, 135 (2007).
- [3] N. Gisin, G. Ribordy, W. Tittel és H. Zbinden, *Rev. Mod. Phys.* **74**, 145 (2002).
- [4] V. Scarani, H. Bechmann-Pasquinucci, N. J. Cerf, M. Dušek, N. Lütkenhaus és M. Peev, *Rev. Mod. Phys.* **81**, 1301 (2009).
- [5] L.-M. Duan, M. D. Lukin, J. I. Cirac és P. Zoller, *Nature* **414**, 413 (2001).
- [6] N. Sangouard, C. Simon, H. de Riedmatten és N. Gisin, *Rev. Mod. Phys.* **83**, 33 (2011).

- [7] C. H. Bennett, G. Brassard, C. Crépeau, R. Jozsa, A. Peres és W. K. Wootters, *Phys. Rev. Lett.* **70**, 1895 (1993).
- [8] D. Bouwmeester, J.-W. Pan, K. Mattle, M. Eibl, H. Weinfurter és A. Zeilinger, *Nature* **390**, 575 (1997).
- [9] Z. Merali, *Science* **331**, 1380 (2011).
- [10] M. Koniarczyk, L. Szabó és P. Adam, *Phys. Rev. A* **84**, 044102 (2011).
- [11] J. B. Spring, B. J. Metcalf, P. C. Humphreys, W. S. Kolthammer, X.-M. Jin, M. Barbieri, A. Datta, N. Thomas-Peter, N. K. Langford, D. Kundys, J. C. Gates, B. J. Smith, P. G. R. Smith és I. A. Walmsley, *Science* **339**, 798 (2013).
- [12] M. A. Broome, A. Fedrizzi, S. Rahimi-Keshari, J. Dove, S. Aaronson, T. C. Ralph és A. G. White, *Science* **339**, 794 (2013).
- [13] M. Tillmann, B. Dakić, R. Heilmann, S. Nolte, A. Szameit és P. Walther, *Nat. Photonics* **7**, 540 (2013).
- [14] C. C. Gerry, *Phys. Rev. A* **59**, 4095 (1999).
- [15] A. P. Lund, H. Jeong, T. C. Ralph és M. S. Kim, *Phys. Rev. A* **70**, 020101 (2004).
- [16] B. He, M. Nadeem és J. A. Bergou, *Phys. Rev. A* **79**, 035802 (2009).

- [17] P. Adam, T. Kiss, Z. Darázs és I. Jex, Phys. Scr. **T140**, 014011 (2010).
- [18] C.-W. Lee, J. Lee, H. Nha és H. Jeong, Phys. Rev. A **85**, 063815 (2012).
- [19] P. Adam, M. Mechler, I. Santa és M. Koniorczyk, Phys. Rev. A **90**, 053834 (2014).