

# **Projeto de Pesquisa**

**Estudo, geração e propriedades de estados não clássicos em sistemas  
híbridos**

*Basílio Baseia*

*Projeto de Pesquisa*  
Goiânia  
10 fevereiro de 2016

# 1 Introdução

Nos últimos anos houve grande interesse na produção de novos estados não-clássicos do campo eletromagnético, bem como estados atômicos, especialmente os entrelaçados e superpostos. A Ótica Quântica estuda efeitos no campo eletromagnético sem análogo clássico. Esses estudos se iniciaram fortemente na literatura após a descoberta experimental do efeito anti-aglomeramento de fótons (antibunching) em 1977 pelo grupo de Kimble [1], seguindo proposta teórica anterior de Carmichael, entre outros [2], [3]. Antes, outras propostas foram apresentadas desde 1970, quando foi introduzido o conceito de estado comprimido (“squeezing”) por Stoler [4], apenas produzido experimentalmente a partir de 1985, por Slusher e colaboradores [5]. O “antibunching” consistiu na primeira observação de efeito não-clássico no campo eletromagnético, embora a quantização desse campo tenha sido realizada 50 anos antes, em 1926, por M. Born e W. Heisenberg e sua aplicação ter sido feita pela primeira vez por Paul A.M. Dirac, no estudo da interação campo-matéria em 1927. Oscilações na distribuição estatística de fótons foram também observadas em 1987, por Rempe et al [6]; na mesma experiência verificaram o efeito colapso-revival na inversão atômica, quando átomo de dois níveis interage com único modo de campo eletromagnético quantizado, confirmando previsão teórica em 1963, de E.T. Jaynes e F.W. Cummings. Depois, a geração de estado tipo “gato de Schrödinger” foi estudada por B. Yurke e D. Stoler [7]; L. Davidovich et al [8], S. Haroche et al [9], etc. A descoberta do laser em 1960 e sua luz diferenciada teria inspirado Glauber propor uma nova base de estados ópticos, os estados coerentes, uma base extraordinária, supercompleta! O uso de estados dessa nova base permitiu testar e observar, pela primeira vez no campo luminoso, efeitos de decoerência em estados superpostos, tipo “gato de Schrödinger” [10], um resultado experimental marcante, permitindo acompanhar a passagem de um sistema pela fronteira entre a física clássica e a física quântica. Mais recentemente ainda, foi investigado o efeito de teletransporte, antes proposto por Bennett et al [11], baseado na correlação quântica não-local, envolvendo estados quanticamente entrelaçados (“entangled states”). Assim, o 1º. efeito de teletransporte, do estado de 1 fóton, foi observado no final de 97, na Áustria, pelo grupo de Zeilinger[12], resultado que foi em seguida melhorado em experiência que tele-transportava enorme quantidade de fótons[13]. Diversos trabalhos posteriores nessa linha podem ser citados[14]–[17]

Além dos efeitos não clássicos estudados nos vários estados do campo eletromagnético, interessa também a investigação da geração dos mesmos, linha de pesquisa que é denominada “engenharia de estados quânticos”. Nessa linha, dois casos básicos se distinguem: ( i ) campo eletromagnético estacionário em um único modo (‘single-mode’), gerado numa (boa) cavidade, interagindo com átomos comuns na banda óptica, ou interagindo com átomos de Rydberg na banda de micro-ondas e (ii) campo viajante, atravessando divisores de feixes, defasadores, polarizadores, meios não-lineares (meio Kerr), prismas, detectores, etc. Propostas diversas para esses dois casos aparecem na literatura [18], [19]. A extensão dessas investigações para o caso de preparação de estados atômicos tem sido também realizada recentemente. Nesse caso, a pesquisa mais recente tem abandonado o campo eletromagnético na banda óptica ou de micro-ondas, situações onde as cavidades devem ser excepcionais, de alta qualidade, especialmente na banda óptica que exige polimentos ultra especial; em vez disso, o sistema físico agora refere-se ao sistema Cooper pair box – Nano ressoador mecânico (**CPB-NR**), onde o primeiro passa a ocupar o lugar do átomo (comum ou de Rydberg), enquanto o segundo passa a ocupar o lugar do campo eletromagnético [20]–[31].

Conforme o título deste Plano de Trabalho, estudaremos entre outros (ver Sec.4) o sistema interagente **CPB-NR**: Os ressonadores nano-mecânicos (NRs) têm sido utilizados no estudo de medidas quânticas não-demolidoras e medidas de coerência de fenômenos quânticos macroscópicos, entre vários outros objetivos. Com o rápido desenvolvimento de técnicas de fabricação, o NR passou a ter grande importância em aplicações modernas, em uso como sensores, amplamente utilizado em diversos domínios: astronomia, computação quântica e biologia; recentemente tem sido utilizado como processamento de informação quântica em estado sólido, para implementação do qubit quântico e também na geração de estados não clássicos de luz: estados de Fock, “gato de Schrödinger”, estados comprimidos, estados emaranhados (entangled states), etc. Em particular, NR juntamente com “qubits” supercondutores de carga têm sido usados para gerar estados emaranhados: Zhou et al. [32] propôs um esquema para criar estados comprimidos usando NR acoplado a um CPB-qubit. Essa proposta incluiu um acoplamento controlável entre o NR e um CPB, desempenhando papel importante na computação quântica: ao controlar alguns parâmetros externos, pode-se ligar e desligar controladamente a interação entre os sub-sistemas.

Nesse cenário, o armazenamento de dados e as comunicações ópticas utilizadas nos processos básicos estão relacionados ao domínio da física quântica, que tem se

tornado um tema de interesse crescente. Nesse cenário de interesses, apresentamos proposta experimental para criar buracos na distribuição estatística de excitação de um estado coerente previamente preparado no NR, este último acoplado a CPB. A motivação é inspirada em investigações sobre a produção de novos materiais que possuam buracos em sua banda espectral [33], e inspirado também em trabalhos anteriores que usam esquemas alternativos para alcançar similar objetivo. Na presente proposta, o acoplamento entre o NR e o CPB será controlado continuamente por sintonia com dois fluxos externos [33]–[39].

## 2 Objetivo

O objetivo da proposta é dar continuidade a nossas anteriores investigações, estendendo para novas situações com vista ao estudo de engenharia de estados do campo luminoso e aplicações em comunicação quântica, armazenamento de dados, etc., sempre com a preocupação de encontrar resultados merecedores de publicação em revistas de circulação internacional. Além do sistema CPB-NR exploraremos também um sistema usando “Quantum Dot” (QD) associado a supercondutores ou outros hospedeiros. Nesse caso tentaremos tirar vantagem da leitura da tese [Sartori] e artigos ali mencionados [VER LÁ EMBAIXO: Tese/doutorado] e também Refs. [X, Y, Z]. Nesse caso exploraremos outras variações ali exibidas, com as quais já tratamos em recentes publicações. O caso em tela refere-se à geração de estados do campo de luz e estados atômicos, em que adicionaremos no cenário complicações provenientes do mundo real, ganhos e perdas, incluindo o estudo de influências de variações temporais na frequência de campo externo ou variações no próprio acoplamento campo-quantum dot, controlado exteriormente.

## 3 Justificativa

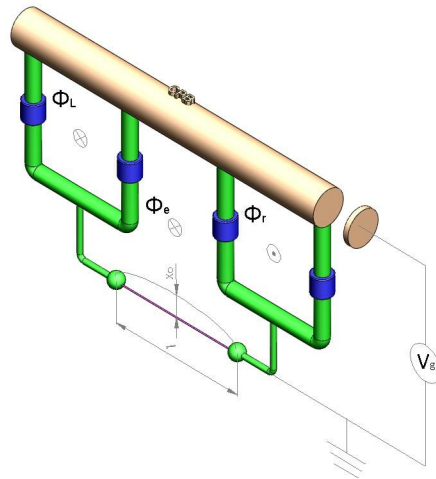
A exploração na fronteira entre as descrições clássica e quântica da natureza motiva a investigação da geração de estados de superposição de sistemas mesoscópicos, conhecidos como estados "gato de Schrödinger". O meio ambiente desempenha um papel importante no estabelecimento de uma correspondência direta entre as dinâmicas clássica e quântica. Situações onde intervêm os estados entrelaçados (entangled states) serão também objetos de nossa investigação.

Tanto quanto nos sistemas mencionados no início desse projeto, a decoerência é o principal obstáculo a ser superado para a implementação prática de um sistema CPB-NR. Dessa forma, um dos maiores obstáculos para a comunicação e computação

quânticas é que estas esbarram nos processos e mecanismos de decoerência, sejam causados por intervenção de medidores, mas também pela inevitável ação do meio ambiente cercado o sistema. Por esta razão, as investigações das fontes de ruído em sistemas quânticos promissores é um passo essencialmente necessário. Em busca da solução para este problema, esforços têm sido direcionados para descobrir mecanismos de controle da decoerência, tais como: engenharia de processos de amplificação e engenharia de reservatórios, entre outros. Esse cenário abre novas fronteiras para o estudo de propriedades dinâmicas, tais como: entropia dos sub-sistemas e possibilidade de seu controle [33]–[40]; controle da inversão de excitação no CPB; estudo da função de Wigner [41] e do fator Q-Mandel do NR; etc. O estudo se estende ainda para os cenários onde não linearidades são incluídas no sistema via anexação de meios tipo Kerr [38], [42]–[44]. Como já mencionado no item 2, também estudaremos o caso em que o quantum dot é um dos sub-sistemas participando da operação, em substituição ao CPB [45]–[50].

#### **4 Metodologia:**

Existe na literatura uma gama de esquemas usando o SQUID (Superconducting Quantum Interference Device), onde o qubit de carga é uma caixa pares de Cooper (Cooper Pair Box (CPB) ), consistindo de duas junções de Josephson supercondutoras formando um loop. O modelo apresentado deve alcançar um efeito de tunelamento eficaz da energia de Josephson. Neste modelo fazemos um acoplamento entre um CPB e um Ressonador Nano-mecânico (NR; Nanomechanical Resonator), cf. Figura 1. Quando o NR oscila, a área central efetiva do arranjo sofre mudanças, associando-se a esta área um fluxo externo  $\Phi(t)$ . Isto confere ao sistema um acoplamento entre o CPB e o NR. Consideraremos as junções Josephson em nosso sistema sendo idênticas, com mesma energia Josephson  $E_J^0$  e tendo fluxos externos  $\Phi(L)$  e  $\Phi(r)$  de mesma magnitude, mas sinais opostos:  $\Phi(L) = -\Phi(r) = \Phi(x)$ .



**Figura 1-** Par de Cooper (CPB) acoplado a um ressoador nanomecânico (NR).

Assim, podemos escrever o hamiltoniano do total do sistema na forma,

$$H = \hat{a}^\dagger \hat{a} + 4E_c \left( N_g + \frac{1}{2} \right) \frac{\Phi}{\Phi_0} + 4E_J^0 \cos\left(\frac{\Phi}{\Phi_0} x\right) \cos\left(\frac{\Phi}{\Phi_0} t\right)$$

onde  $\hat{a}^\dagger$  ( $\hat{a}$ ) é o operador de criação (aniquilação) para excitação de frequência  $\omega$  no NR e massa  $m$ .  $E_J^0$  e  $E_c$  são respectivamente as energias de cada junção de Josephson;  $\Phi_0 = h/2e$  é o fluxo quântico;  $N_g = C_g V_g / 2e$  é o número de carga na entrada do arranjo. Para incluir o acoplamento usaremos as matrizes de Pauli:  $\sigma_z = |0\rangle\langle 0| - |1\rangle\langle 1|$  e  $\sigma_x = |0\rangle\langle 1| - |1\rangle\langle 0|$ , para descrever operadores atuantes no sistema; os estados  $|0\rangle$  e  $|1\rangle$  serão usados para descrever o número extra de pares de Cooper na ilha supercondutora.

## 5 Resultados Esperados:

No presente Projeto esperamos, como resultado, encontrar novas propriedades de estados ao estudar sua evolução temporal sob influência de uma variedade de forças externas e da dissipação ou decoerência produzidas pelo meio ambiente. Esperamos também resultados que propiciem sua publicação em revistas de circulação internacional e que o conhecimento e aprendizado adquiridos na implementação do

Projeto sejam continuamente repassados aos estudantes agregados à tarefa, em atenção ao item denominado “Preparação de Recursos Humanos”, necessário a qualquer país que tenha por objetivo acumular conhecimentos para desenvolver novas tecnologias.

<b>PREVISÃO DE CUSTOS DE MATERIAIS PARA A PESQUISA</b>	
Quantidade Descrição	Valor total
01 CPU i7 com 64 Gb de RAM	R\$ 10.000,00
01 Monitor	R\$ 1.400,00
30 Diárias	R\$ 9.600,00
01 Notebook i7	R\$
10.000,00	
08 Passagens áreas	
R\$ 8.000,00	
Total	
R\$ 32.400,00	

Se no caso de nível 1B eles exigem o mínimo de 50 mil, ficamos nesse mínimo.

Carregar em diárias me parece que facilita o gasto... Caso contrario, pode se fixar nesse valor mesmo, uma vez que você vai provavelmente viajar em dezembro por 1 ano ou mais.

## **6 Referências bibliográficas:**

- [1] H. J. Kimble, M. Dagenais, and L. Mandel, “Photon Antibunching in Resonance Fluorescence,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 39, no. 11, pp. 691–695, Sep. 1977.
- [2] D. Carmichael, H. J. and Walls, “No Title,” *J. Phys. B At. Mol. Phys.*, vol. 9, p. L43, 1976.
- [3] D. F. Carmichael, H. J. and Walls, “No Title,” *J. Phys. B At. Mol. Phys.*, vol. 9, p. 1119, 1976.
- [4] D. Stoler, “Equivalence Classes of Minimum Uncertainty Packets,” *Phys. Rev. D*, vol. 1, no. 12, pp. 3217–3219, Jun. 1970.
- [5] R. Slusher, L. Hollberg, B. Yurke, J. Mertz, and J. Valley, “Observation of squeezed states generated by four-wave mixing in an optical cavity,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 55, no. 22, pp. 2409–2412, Nov. 1985.
- [6] G. Rempe, H. Walther, and N. Klein, “Observation of quantum collapse and revival in a one-atom maser,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 58, no. 4, pp. 353–356, Jan. 1987.
- [7] B. Yurke and D. Stoler, “Generating quantum mechanical superpositions of macroscopically distinguishable states via amplitude dispersion,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 57, no. 1, pp. 13–16, Jul. 1986.
- [8] L. Davidovich, N. Zagury, M. Brune, J. M. Raimond, and S. Haroche,

“Teleportation of an atomic state between two cavities using nonlocal microwave fields,” *Phys. Rev. A*, vol. 50, no. 2, pp. R895–R898, Aug. 1994.

- [9] S. Haroche, *Les Houches summer school proceedings LIII: Fundamental systems in Quantum Optics*. NY (Elsevier ), 1992.
- [10] C. C. Gerry, “Quantum superpositions and Schrödinger cat states in quantum optics,” *Am. J. Phys.*, vol. 65, no. 10, p. 964, 1997.
- [11] C. H. Bennett, G. Brassard, C. Crépeau, R. Jozsa, A. Peres, and W. K. Wootters, “Teleporting an unknown quantum state via dual classical and Einstein-Podolsky-Rosen channels,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 70, no. 13, pp. 1895–1899, Mar. 1993.
- [12] D. B. P. K. M. M. E. H. W. A. Zeilinger, “Experimental quantum teleportation,” *Nature*, vol. 390, no. 6660, pp. 575–579, 1997.
- [13] B. Julsgaard, A. Kozhekin, and E. S. Polzik, “Experimental long-lived entanglement of two macroscopic objects,” *Nature*, vol. 413, no. 6854, pp. 400–403, Sep. 2001.
- [14] J. I. Cirac and A. S. Parkins, “Schemes for atomic-state teleportation,” *Phys. Rev. A*, vol. 50, no. 6, pp. R4441–R4444, Dec. 1994.
- [15] M. H. Y. Moussa, “Teleportation with identity interchange of quantum states,” *Phys. Rev. A*, vol. 55, no. 5, pp. R3287–R3290, May 1997.
- [16] M. H. Y. Moussa and B. Baseia, “Teleporting the Schrödinger Cat State,” *Mod. Phys. Lett. B*, vol. 12, no. 29n30, pp. 1209–1216, Dec. 1998.
- [17] D. Boschi, S. Branca, F. De Martini, L. Hardy, and S. Popescu, “Experimental Realization of Teleporting an Unknown Pure Quantum State via Dual Classical and Einstein-Podolsky-Rosen Channels,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 80, no. 6, pp. 1121–1125, Feb. 1998.
- [18] Y. Guimarães, B. Baseia, C. J. Villas-Boas, and M. H. Y. Moussa, “On the generation of the phase state,” *Phys. Lett. A*, vol. 268, no. 4–6, pp. 260–267, Apr. 2000.
- [19] C. J. Villas-Boas, Y. Guimarães, M. H. Y. Moussa, and B. Baseia, “Recurrence formula for generalized optical state truncation by projection synthesis,” *Phys. Rev. A*, vol. 63, no. 5, p. 055801, Apr. 2001.
- [20] Y. Makhlin, G. Schön, and A. Shnirman, “Quantum-state engineering with Josephson-junction devices,” *Rev. Mod. Phys.*, vol. 73, no. 2, pp. 357–400, May 2001.
- [21] I. Buluta, S. Ashhab, and F. Nori, “Natural and artificial atoms for quantum computation,” *Reports Prog. Phys.*, vol. 74, no. 10, p. 104401, Oct. 2011.
- [22] I. M. Georgescu, S. Ashhab, and F. Nori, “Quantum simulation,” *Rev. Mod. Phys.*, vol. 86, no. 1, pp. 153–185, Mar. 2014.
- [23] M. Grajcar, S. Ashhab, J. R. Johansson, and F. Nori, “Lower limit on the



achievable temperature in resonator-based sideband cooling," *Phys. Rev. B*, vol. 78, no. 3, p. 035406, Jul. 2008.

- [24] J. R. Johansson, N. Lambert, I. Mahboob, H. Yamaguchi, and F. Nori, "Entangled-state generation and Bell inequality violations in nanomechanical resonators," *Phys. Rev. B*, vol. 90, no. 17, p. 174307, Nov. 2014.
- [25] P. D. Nation, J. R. Johansson, M. P. Blencowe, and F. Nori, "Colloquium: Stimulating uncertainty: Amplifying the quantum vacuum with superconducting circuits," *Rev. Mod. Phys.*, vol. 84, no. 1, pp. 1-24, Jan. 2012.
- [26] S. N. Shevchenko, S. Ashhab, and F. Nori, "Landau-Zener-Stückelberg interferometry," *Phys. Rep.*, vol. 492, no. 1, pp. 1-30, Jul. 2010.
- [27] C. P. Sun, L. F. Wei, Y. Liu, and F. Nori, "Quantum transducers: Integrating transmission lines and nanomechanical resonators via charge qubits," *Phys. Rev. A*, vol. 73, no. 2, p. 022318, Feb. 2006.
- [28] Z.-L. Xiang, S. Ashhab, J. Q. You, and F. Nori, "Hybrid quantum circuits: Superconducting circuits interacting with other quantum systems," *Rev. Mod. Phys.*, vol. 85, no. 2, pp. 623-653, Apr. 2013.
- [29] F. Xue, Y. Liu, C. P. Sun, and F. Nori, "Two-mode squeezed states and entangled states of two mechanical resonators," *Phys. Rev. B*, vol. 76, no. 6, p. 064305, Aug. 2007.
- [30] J. Q. You and F. Nori, "Atomic physics and quantum optics using superconducting circuits," *Nature*, vol. 474, no. 7353, pp. 589-597, Jun. 2011.
- [31] J. Q. You and F. Nori, "Superconducting circuits and quantum information," *Phys. Today*, vol. 58, no. 11, pp. 42-47, Nov. 2005.
- [32] X. Zhou and A. Mizel, "Nonlinear coupling of nanomechanical resonators to josephson quantum circuits.," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 97, no. 26, p. 267201, Dec. 2006.
- [33] W. E. Moerner, W. Lenth, and G. C. Bjorklund, "Frequency Domain Optical Storage and Other Applications of Persistent Spectral Hole-Burning," vol. 44, W. E. Moerner, Ed. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1988, pp. 251-307.
- [34] C. Valverde, H. C. B. de Oliveira, a. T. Avelar, and B. Baseia, "Controlling Excitation Inversion of a Cooper Pair Box Interacting with a Nanomechanical Resonator," *Chinese Phys. Lett.*, vol. 29, no. 8, p. 080303, 2012.
- [35] C. Valverde, a. T. Avelar, and B. Baseia, "Quantum communication via controlled holes in the statistical distribution of excitations in a nanoresonator coupled to a Cooper pair box," *Chinese Phys. B*, vol. 21, no. 3, p. 030308, 2012.
- [36] C. Valverde, a. T. Avelar, and B. Baseia, "Controlling statistical properties of a Cooper pair box interacting with a nanomechanical resonator," *Phys. A Stat. Mech. its Appl.*, vol. 390, no. 21-22, pp.

4045–4055, 2011.

- [37] C. Valverde, V. G. Gonçalves, and B. Baseia, “Controlling the nonclassical properties of a hybrid Cooper pair box system and an intensity dependent nanomechanical resonator,” *Physica A*, vol. 446, p. 8, 2015.
- [38] C. Valverde, A. N. Castro, and B. Baseia, “Using a hybrid system (Cooper pair box plus nanomechanical resonator) in the presence of Kerr nonlinearities and losses to control the entropy of the subsystems,” *Opt. Commun.*, vol. 366, pp. 301–307, 2016.
- [39] C. Valverde and B. Baseia, “Engineering information in states of a nanomechanical resonator coupled to a Cooper pair box,” *Quantum Inf. Process.*, vol. 12, no. 5, pp. 2019–2025, 2013.
- [40] C. Valverde, A. N. Castro, E. P. Santos, and B. Baseia, “Alguns aspectos da óptica quântica usando campos luminosos em modos viajantes,” *Rev. Bras. Ensino Física*, vol. 37, no. 2, pp. 2311–1–2311–10, Jun. 2015.
- [41] V. V. Dodonov, C. Valverde, L. S. Souza, and B. Baseia, “Classicalization times of parametrically amplified ‘schrodinger cat’ states coupled to phase-sensitive reservoirs,” *Phys. Lett. Sect. A Gen. At. Solid State Phys.*, vol. 375, no. 42, pp. 3668–3676, 2011.
- [42] F. L. Semião, K. Furuya, and G. J. Milburn, “Kerr nonlinearities and nonclassical states with superconducting qubits and nanomechanical resonators,” *Phys. Rev. A*, vol. 79, no. 6, p. 063811, Jun. 2009.
- [43] R. Sarala and F. Massel, “Cross-Kerr nonlinearity: a stability analysis,” *Nanoscale Syst. Math. Model. Theory Appl.*, vol. 4, no. 1, Jan. 2015.
- [44] M. J. W. and G. J. M. and C. M. Caves, “Nonlinear quantum metrology using coupled nanomechanical resonators,” *New J. Phys.*, vol. 10, no. 12, p. 125018, 2008.
- [45] H. Shiao, A. Mitra, and R. Vyas, “Enhancement of Entanglement Between Coupled Quantum Dots in a Cavity Driven by Modulating Field,” in *The Rochester Conferences on Coherence and Quantum Optics and the Quantum Information and Measurement meeting*, 2013, p. M6.22.
- [46] W. Rawlinson, A. Mitra, and R. Vyas, “Enhancement of Entanglement in Coupled Quantum Dots via interaction with Squeezed Light,” in *Frontiers in Optics 2011/Laser Science XXVII*, 2011, p. JTuA39.
- [47] A. Mitra and R. Vyas, “Entanglement and bistability in coupled quantum dots inside a driven cavity,” *Phys. Rev. A*, vol. 81, no. 1, p. 012329, Jan. 2010.
- [48] W. Rawlinson and R. Vyas, “Enhancement of discord and entanglement with detuning for two coupled quantum dots in a driven cavity,” *J. Mod. Opt.*, vol. 62, no. 13, pp. 1061–1067, Mar. 2015.
- [49] H. Shiao, A. Mitra, and R. Vyas, “Time evolution of entanglement and bistability of two coupled quantum dots in a driven cavity,” *J. Mod. Opt.*, vol. 60, no. 15, pp. 1273–1280, Sep. 2013.

- [50] W. Rawlinson, A. Mitra, H. Shiao, and R. Vyas, "Quantum Discord and Entanglement for Two Coupled Quantum Dots in a Driven Cavity," in *Frontiers in Optics 2013*, 2013, p. LTh1G.2.
- [51] Moraes Neto, G. D. et al., *Steady entanglement in bosonic dissipative network*, Phys. Rev. A **90**, 062322 (2014); Cereli, L.C., et al., *Switching off the reservoir through the nonstationary quantum system*, J. Phys. B – Atomic Molec. and Opt. Phys., **41**, 085504 (2008); de Ponte, M. A.; Mizrahi, S. S.; Moussa, M. H. Y., *Storing quantum states in bosonic dissipative networks*, J. Phys. B, Atomic Molec. and Opt. Phys. **43**, 105503 (2010).
- [52] C. Sartori, et al, *Triggered single photon from a quantum dot*, Phys. Rev. Lett. **84**, 2513 (2001); O. Benson et al., *Regulated and entangled photons from a single quantum dot*, Phys. Rev. Lett. **84**, 2513 (2000); C. Sartori, *Generation of nonclassical light using semiconductor quantum dot* (PhD Thesis, Stanford Univ, 2003).
- [53] A Majumdar et al., *Quantum optics with semiconductor nanostructures* (Ed. Frank Jahnke, Oxford, 2012), Chap. 2.
- [54] P. Michler, et al., *A Quantum Dot Single-Photon Turnstile Device*, Science **290**, 2282 (2000).
- [55] Mateo Pelton et al., *An Efficient Source of Single Photons: A Single Quantum Dot in a Micropost Microcavity*, 2002; [arXiv:quant-ph/0208054](https://arxiv.org/abs/quant-ph/0208054) – DOI: [10.1016/S1386-9477\(02\)00872-X](https://doi.org/10.1016/S1386-9477(02)00872-X)