

Bibliography

- [1] G. E. Moore, *Electronics* **38**, 114 (1965).
- [2] J. Shalf, *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* **378**, 20190061 (2020), <https://royalsocietypublishing.org/doi/pdf/10.1098/rsta.2019.0061>.
- [3] M. M. Waldrop, *Nature* **530**, 144 (2016).
- [4] G. Moore, *Proceedings of the IEEE* **86**, 82 (1998).
- [5] C. E. Leiserson, N. C. Thompson, J. S. Emer, B. C. Kuszmaul, B. W. Lampson, D. Sanchez, and T. B. Schardl, *Science* **368**, eaam9744 (2020), <https://www.science.org/doi/pdf/10.1126/science.aam9744>.
- [6] F. Schwierz and J. J. Liou, in *2020 IEEE Latin America Electron Devices Conference (LAEDC)* (2020) pp. 1–4.
- [7] G. Nogues, A. Rauschenbeutel, S. Osnaghi, M. Brune, J. Raimond, and S. Haroche, *Nature* **400**, 239 (1999).
- [8] D. DiVincenzo, *Fortschr. Phys.* **48**, 771 (2000), preprint quant-ph/0002077.
- [9] N. A. Gershenfeld and I. L. Chuang, *Science* **275**, 350 (1997).
- [10] D. G. Cory, A. F. Fahmy, and T. F. Havel, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **94**, 1634 (1997).
- [11] F. Schmidt-Kaler, H. Häffner, M. Riebe, S. Gulde, G. P. T. Lancaster, T. Deuschle, C. Becher, C. F. Roos, J. Eschner, and R. Blatt, *Nature* **422**, 408 (2003).
- [12] D. Leibfried, B. DeMarco, V. Meyer, D. Lucas, M. Barrett, J. Britton, W. M. Itano, B. Jelenkovic, C. Langer, T. Rosenband, and D. J. Wineland, *Nature* **422**, 412 (2003).
- [13] P. R. Berman, *Rev. Mod. Phys.* **29**, 515 (1982).
- [14] R. P. Feynman, *Int. J. Theor. Phys.* **21**, 467 (1982).
- [15] E. Bernstein and U. Vazirani, in *Proceedings of the 25th Annual ACM Symposium on Theory of Computing* (1993) pp. 11–22.
- [16] D. Deutsch, *Proc. Roy. Soc. London A* **400**, 97 (1985).
- [17] D. Deutsch and R. Jozsa, *Proc. Roy. Soc. London A* **439**, 553 (1992).
- [18] D. Coppersmith, IBM Research Report No. RC19642 (1994).
- [19] P. Shor, in *Proceedings, 35th Annual Symposium on Foundations of Computer Science* (IEEE Press, Piscataway, NJ, 1994).
- [20] R. Crandall and C. Pomerance, *Prime Numbers: A Computational Perspective* (Springer, Berlin, 2001).
- [21] T. L. Scholten, C. J. Williams, D. Moody, M. Mosca, W. Hurley, W. J. Zeng, M. Troyer, and J. M. Gambetta, preprint (2024), [arXiv:2401.16317 \[quant-ph\]](https://arxiv.org/abs/2401.16317).
- [22] R. Landauer, *Physics Today* **May1991**, 23 (1991).
- [23] R. Landauer, *Phys. Lett. A* **217**, 188 (1996).
- [24] A. Church, *Am. J. Math.* **58**, 345 (1936).

- [25] A. M. Turing, Proc. Lond. Math. Soc. Ser. **42**, 230 (1936), see also ibidem 43:544.
- [26] C. E. Shannon, Bell System Tech. J. **27**, 379 (1948).
- [27] R. Landauer, IBM Journal Res. Dev. **5**, 183 (1961).
- [28] R. Keyes and R. Landauer, IBM J. Res. Develop. **14**, 152 (1970).
- [29] L. Szilard, Z. Physik **53**, 840 (1929).
- [30] A. Berut, A. Arakelyan, A. Petrosyan, S. Ciliberto, R. Dillenschneider, and E. Lutz, *Nature* **483**, 187 (2012).
- [31] C. Bennett, IBM J. Res. Dev. **17**, 525 (1973).
- [32] E. Fredkin and T. Toffoli, Int. J. theor. phys. **21**, 219 (1982).
- [33] N. Margolus and L. Levitin, Physica D **120**, 188 (1998), (Proceedings of the Fourth Workshop on Physics and Computation PhysComp96, New England Complex Systems Institute, Boston, MA, 1996. Edited by T. Toffoli and M. Biafore).
- [34] S. Lloyd, Nature **406**, 1047 (2000).
- [35] C. H. Bennett and R. Landauer, Scientific American **July 1985**, 38 (1985).
- [36] C. H. Bennett, Scientific American **257**, 88 (1987).
- [37] J. Preskill, “Quantum computation,” Course material available online at <http://theory.caltech.edu/preskill/ph229/> (1997).
- [38] S. Mertens, Computing in Science and Engineering **4**, 31 (2002), preprint cond-mat/0012185.
- [39] D. R. Hofstadter., *Gödel, Escher, Bach: An Eternal Golden Braid* (Basic Books, New York, 1979).
- [40] M. A. Nielsen and I. L. Chuang, *Quantum computation and quantum information* (Cambridge Univ. Press, Cambridge, 2001).
- [41] A. Steane, Rep. Prog. Phys. **61**, 117 (1998).
- [42] W. Heisenberg, *Zeitschrift für Physik* **33**, 879 (1925).
- [43] M. Born and P. Jordan, *Zeitschrift für Physik* **34**, 858 (1925).
- [44] M. Born, W. Heisenberg, and P. Jordan, *Zeitschrift für Physik* **35**, 557 (1926).
- [45] E. Schrödinger, *Annalen der Physik* **385**, 437 (1926).
- [46] E. H. Lieb, *Rev. Mod. Phys.* **48**, 553 (1976).
- [47] R. Feynman, F. Vernon, and R. Hellwarth, J. Appl. Phys. **28**, 49 (1957).
- [48] C. Hughes and S. Wimperis, J. Chem. Phys. **106**, 2105 (1997).
- [49] W. K. Wootters, Phys. Rev. Lett. **80**, 2245 (1998).
- [50] W. K. Wootters, Quantum Information and Computation **1**, 27 (2001).
- [51] D. Bruß, J. Math. Phys. **43**, 4237 (2002).
- [52] A. Einstein, B. Podolsky, and N. Rosen, Phys. Rev. **47**, 777 (1935).
- [53] J. Bell, Physics **1**, 195 (1964).
- [54] A. Aspect, P. Grangier, and G. Roger, Phys. Rev. Lett. **47**, 460 (1981).
- [55] J. Clauser, M. Horne, A. Shimony, and R. Holt, Phys. Rev. Lett. **23**, 880 (1969).
- [56] W. Wootters and W. Zurek, Nature **299**, 802 (1982).
- [57] D. Dieks, Phys. Lett. A **92**, 271 (1982).

- [58] J. von Neumann, *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics* (Princeton Univ. Press, Princeton, NJ, 1955).
- [59] D. Bohm, [Phys. Rev. **85**, 166 \(1952\)](#).
- [60] D. Bohm, [Phys. Rev. **85**, 180 \(1952\)](#).
- [61] H. Everett, [Rev. Mod. Phys. **29**, 454 \(1957\)](#).
- [62] X. Peng, X. Zhu, D. Suter, J. Du, M. Liu, and K. Gao, *Phys. Rev. A* **72**, 052109 (2005).
- [63] A. Peres, [Phys. Rev. Lett. **77**, 1413 \(1996\)](#).
- [64] H. Michal, H. Pawel, and R. Horodecki, [Physics Letters A **223**, 1 \(1996\)](#).
- [65] H. Ollivier and W. H. Zurek, [Phys. Rev. Lett. **88**, 017901 \(2001\)](#).
- [66] L. Henderson and V. Vedral, [Journal of Physics A: Mathematical and General **34**, 6899 \(2001\)](#).
- [67] P. A. M. Dirac, *The principles of quantum mechanics*, 4th ed. (Clarendon Press, Oxford, 1958).
- [68] C. Cohen-Tannoudji, B. Diu, and F. Laloë, *Quantum mechanics* (John Wiley & Sons, New York, 1992).
- [69] L. E. Ballentine, *Quantum mechanics, a modern development* (World Scientific, Singapore, 1999).
- [70] A. Peres, *Quantum theory, concepts and methods* (Kluwer Academic, Dordrecht, 1998).
- [71] P. O. Boykin, T. Mor, M. Pulver, V. Roychowdhury, and F. Vatan, “On universal and fault-tolerant quantum computing,” (1999), preprint quant-ph/9906054.
- [72] F. Bloch and A. Siegert, *Phys. Rev.* **57**, 522 (1940).
- [73] I. Rabi, J. Zacharias, S. Millman, and P. Kusch, *Phys. Rev.* **53**, 318 (1938).
- [74] R. P. Feynman, [Optics News **11**, 11 \(1985\)](#).
- [75] R. P. Feynman, “Feynman lectures on computing,” (Addison-Wesley, 1996) Chap. 6, Quantum Mechanical Computers, originally published in *Optics News*, February 1985, pp. 11-20; see also *Found. Phys.* **16**, 507-532 (1986).
- [76] R. J. Costales, A. Gunning, and T. Dorlas, [Phys. Rev. A **111**, 022615 \(2025\)](#).
- [77] D. Suter and G. A. Álvarez, [Rev. Mod. Phys. **88**, 041001 \(2016\)](#).
- [78] M. Levitt, *Spin Dynamics. Basics of Nuclear Magnetic Resonance*. (John Wiley & Sons, 2001).
- [79] A. Redfield, *IBM Journal Res. Dev.* **1**, 19 (1957).
- [80] G. Palma, K.-A. Suominen, and A. Ekert, *Proc. Roy. Soc. A* **452**, 567 (1996), preprint quant-ph/9702001.
- [81] Gaudin, M., [J. Phys. France **37**, 1087 \(1976\)](#).
- [82] G. A. Álvarez and D. Suter, [Phys. Rev. Lett. **107**, 230501 \(2011\)](#).
- [83] A. J. Leggett, in *Fundamentals of Quantum Information*, Lecture Notes in Physics, Vol. 587, edited by D. Heiss (Springer Verlag, Berlin, 2002) pp. 3–46.
- [84] E. Schrödinger, *Die Naturwissenschaften* **23**, 807 (1935).
- [85] H. G. Krojanski and D. Suter, *Phys. Rev. Lett.* **93**, 090501 (2004).
- [86] H. Cho, P. Cappellaro, D. G. Cory, and C. Ramanathan, *Phys. Rev. B* **74**, 224434 (2006).
- [87] C. S. Maierle and D. Suter, in *Quantum Information Processing*, edited by G. Leuchs and T. Beth (Wiley-VCH, Weinheim, 2003) pp. 121–130.

- [88] X. Wang, C.-S. Yu, and X. Yi, [Physics Letters A **373**, 58 \(2008\)](#).
- [89] I. L. Chuang, N. Gershenfeld, and M. Kubinec, *Phys. Rev. Lett.* **80**, 3408 (1998).
- [90] I. Chuang, N. Gershenfeld, M. Kubinec, and D. Leung, *Proc. Roy. Soc. Lond. A* **454**, 447 (1998).
- [91] I. L. Chuang and M. A. Nielsen, *J. mod. Opt.* **44**, 2455 (1997).
- [92] A. M. Souza, R. S. Sarthour, I. S. Oliveira, and D. Suter, [Phys. Rev. A **92**, 062332 \(2015\)](#).
- [93] J. Emerson, M. Silva, O. Moussa, C. Ryan, M. Laforest, J. Baugh, D. G. Cory, and R. Laflamme, *Science* **317**, 1893 (2007).
- [94] M. Rini and M. Schirber, *Physics* **17**, 176 (2024).
- [95] J. Preskill, *Proc. Roy. Soc. Lond. A* **454**, 385 (1998).
- [96] P. Aliferis, [“Level reduction and the quantum threshold theorem,” Thesis, Caltech, quant-ph/0703230 \(2007\), \[quant-ph/0703230\]\(#\)](#).
- [97] E. Knill, R. Laflamme, and W. H. Zurek, *Science* **279**, 342 (1998).
- [98] B. M. Terhal, [Rev. Mod. Phys. **87**, 307 \(2015\)](#).
- [99] P. W. Shor, *Phys. Rev. A* **52**, R2493 (1995).
- [100] A. Steane, *Phys. Rev. Lett.* **77**, 793 (1996).
- [101] R. Laflamme, C. Miquel, J. P. Paz, and W. H. Zurek, *Phys. Rev. Lett.* **77**, 198 (1996).
- [102] C. H. Bennett, D. P. DiVincenzo, J. A. Smolin, and W. K. Wootters, *Phys. Rev. A* **54**, 3824 (1996).
- [103] A. R. Calderbank and P. W. Shor, *Phys. Rev. A* **54**, 1098 (1996).
- [104] A. Steane, *Proc. Roy. Soc. A* **452**, 2551 (1996).
- [105] J. Zhang, R. Laflamme, and D. Suter, [Phys. Rev. Lett. **109**, 100503 \(2012\)](#).
- [106] M. Levitt and R. Freeman, *J. Magn. Reson.* **33**, 473 (1979).
- [107] M. Levitt, *Progr. NMR Spectr.* **18**, 61 (1986).
- [108] T. S. Mahesh and D. Suter, *Phys. Rev. A* **74**, 062312 (2006).
- [109] A. M. Souza, G. A. Álvarez, and D. Suter, [Phys. Rev. Lett. **106**, 240501 \(2011\)](#).
- [110] D. Lidar, I. Chuang, and K. Whaley, *Phys. Rev. Lett.* **81**, 2594 (1998).
- [111] G. Lindblad, *Commun. math. Phys.* **48**, 119 (1976).
- [112] P. Zanardi and M. Rasetti, *Phys. Rev. Lett.* **79**, 3306 (1997).
- [113] E. Knill, R. Laflamme, and L. Viola, *Phys. Rev. Lett.* **84**, 2525 (2000).
- [114] L. Viola, E. Fortunato, M. Pravia, E. Knill, R. Laflamme, and D. Cory, *Science* **293**, 2059 (2001).
- [115] J. E. Ollerenshaw, D. A. Lidar, and L. E. Kay, *Phys. Rev. Lett.* **91**, 217904 (2003).
- [116] G. Wolfowicz, A. M. Tyryshkin, R. E. George, H. Riemann, N. V. Abrosimov, P. Becker, H.-J. Pohl, M. L. W. Thewalt, S. A. Lyon, and J. J. L. Morton, [Nat Nano **8**, 561 \(2013\)](#).
- [117] M. Zhong, M. P. Hedges, R. L. Ahlefeldt, J. G. Bartholomew, S. E. Beavan, S. M. Wittig, J. J. Longdell, and M. J. Sellars, [Nature **517**, 177 \(2015\)](#).
- [118] J.-M. Cai, B. Naydenov, R. Pfeiffer, L. P. McGuinness, K. D. Jahnke, F. Jelezko, M. B. Plenio, and A. Retzker, [New Journal of Physics **14**, 113023 \(2012\)](#).

- [119] N. Aharon, M. Drewsen, and A. Retzker, [Physical Review Letters **111**, 230507 \(2013\)](#).
- [120] N. Erez, Y. Aharonov, B. Reznik, and L. Vaidman, “Quantum error correction in the Zeno regime,” (2003), preprint quant-ph/0309162.
- [121] W. Itano, D. Heinzen, J. Bollinger, and D. Wineland, *Phys. Rev. A* **41**, 2295 (1990).
- [122] E. Hahn, *Phys. Rev.* **80**, 580 (1950).
- [123] H. Carr and E. Purcell, *Phys. Rev.* **94**, 630 (1954).
- [124] S. Meiboom and D. Gill, [Review of Scientific Instruments **29**, 688 \(1958\)](#).
- [125] L. Viola, E. Knill, and S. Lloyd, *Phys. Rev. Lett.* **82**, 2417 (1999).
- [126] A. A. Maudsley, [Journal of Magnetic Resonance \(1969\) **69**, 488 \(1986\)](#).
- [127] A. Steane, in *Decoherence and its implications in quantum computation and information transfer*, edited by A. Gonis (IOS Press, Amsterdam, 2001) pp. 284–298, preprint quant-ph/0304016.
- [128] D. A. Lidar and K. B. Whaley, in *Irreversible Quantum Dynamics*, Lecture Notes in Physics, Vol. 622, edited by F. Benatti and R. Floreanini (Springer Verlag, Berlin, 2003) pp. 83–120.
- [129] A. M. Souza, G. A. Álvarez, and D. Suter, [Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences **370**, 4748 \(2012\)](#).
- [130] D. Gottesman, *Stabilizer codes and quantum error correction*, Ph.D. thesis, Caltech (1997), preprint quant-ph/9705022.
- [131] A. Galindo and M. A. Martin-Delgado, *Rev. Mod. Phys.* **74**, 347 (2002).
- [132] L. K. Grover, in *Proc. 28th Annual ACM Symposium on the Theory of Computation* (ACM Press, New York, 1996) pp. 212–219.
- [133] L. K. Grover, *Phys. Rev. Lett.* **79**, 325 (1997).
- [134] S. Gulde, M. Riebe, G. P. T. Lancaster, C. Becher, J. Eschner, H. Häffner, F. Schmidt-Kaler, I. L. Chuang, and R. Blatt, *Nature* **421**, 48 (2003).
- [135] J. Myers, A. Fahmy, S. Glaser, and R. Marx, *Phys. Rev. A* **63**, 032302 (2001).
- [136] R. Cleve, A. Ekert, C. Macchiavello, and M. Mosca, *Proc. Roy. Soc. London A* **453**, 339 (1998).
- [137] D. P. Chi, J. Kim, and S. Lee, *J. Phys. A: Math. Gen.* **34**, 5251 (2001).
- [138] A. Ekert and R. Jozsa, *Rev. Mod. Phys.* **68**, 733 (1996).
- [139] M. Heideman, D. Johnson, and C. Burns, *IEEE ASSP Magazine* **1**, 14 (1984).
- [140] W. H. Press, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling, and B. P. Flannery, *Numerical Recipes in FORTRAN: the Art of Scientific Computing* (Cambridge U.P., Cambridge, 1992).
- [141] R. Das, T. Mahesh, and A. Kumar, *Chem. Phys. Lett.* **369**, 8 (2003).
- [142] N. Bhattacharya, H. B. van Linden van den Heuvell, and R. J. C. Spreeuw, *Phys. Rev. Lett.* **88**, 137901 (2002).
- [143] L. K. Grover, *The Sciences* **July/August**, 24 (1999).
- [144] S. P. Jordan, *Phys. Rev. Lett.* **95**, 050501 (2005).
- [145] A. W. Harrow, A. Hassidim, and S. Lloyd, [Physical Review Letters **103**, 150502 \(2009\)](#).

-
- [146] F. Tennie, S. Laizet, S. Lloyd, and L. Margri, *Nature Reviews Physics* **7**, 220 (2025).
- [147] K. Sugisaki, H. Wakimoto, K. Toyota, K. Sato, D. Shiomi, and T. Takui, *J Phys Chem Lett* **13**, 11105 (2022).
- [148] T. E. O'Brien, B. Senjean, R. Sagastizabal, X. Bonet-Monroig, A. Dutkiewicz, F. Buda, L. DiCarlo, and L. Visscher, *npj Quantum Information* **5**, 113 (2019).
- [149] J. Stokes, J. Izaac, N. Killoran, and G. Carleo, *Quantum* **4**, 269 (2020).
- [150] A. W. Harrow and J. C. Napp, *Phys. Rev. Lett.* **126**, 140502 (2021).
- [151] J. Biamonte, P. Wittek, N. Pancotti, P. Rebentrost, N. Wiebe, and S. Lloyd, *Nature* **549**, 195 (2017).
- [152] X.-W. Yao, H. Wang, Z. Liao, M.-C. Chen, J. Pan, J. Li, K. Zhang, X. Lin, Z. Wang, Z. Luo, W. Zheng, J. Li, M. Zhao, X. Peng, and D. Suter, *Phys. Rev. X* **7**, 031041 (2017).
- [153] S. Lloyd, *Science* **273**, 1073 (1996).
- [154] D. S. Abrams and S. Lloyd, *Phys. Rev. Lett.* **83**, 5162 (1999).
- [155] S. Lloyd and L. Viola, *Phys. Rev. A* **65**, 010101 (2001).
- [156] G. Castagnoli, A. Ekert, and C. Macchiavello, *Int. J. theor. Phys.* **37**, 463 (1998).
- [157] E. Farhi, J. Goldstone, S. Gutmann, J. Lapan, A. Lundgren, and D. Preda, *Science* **292**, 472 (2001).
- [158] R. Somma, G. Ortiz, J. E. Gubernatis, E. Knill, and R. Laflamme, *Phys. Rev. A* **64**, 042323 (2002).
- [159] D. S. Abrams and S. Lloyd, *Phys. Rev. Lett.* **79**, 2586 (1997).
- [160] U. Haeberlen and J. Waugh, *Phys. Rev.* **175**, 453 (1968).
- [161] U. Haeberlen, *High resolution NMR in solids* (Acad. Press, New York, 1976) advances in Magnetic Resonance, Supplement 1.
- [162] C. H. Tseng, S. Somaroo, Y. Sharf, E. Knill, R. Laflamme, T. F. Havel, and D. G. Cory, *Phys. Rev. A* **61**, 12302 (1999).
- [163] S. Somaroo, C. H. Tseng, T. F. Havel, R. Laflamme, and D. G. Cory, *Phys. Rev. Lett.* **82**, 5381 (1999).
- [164] G. A. Álvarez, D. Suter, and R. Kaiser, *Science* **349**, 846 (2015), <http://www.sciencemag.org/content/349/6250/846.full>.
- [165] X. Peng, J. Du, and D. Suter, *Phys. Rev. A* **71**, 012307 (2005), preprint quant-ph/0411049.
- [166] X.-h. Peng and D. Suter, *Frontiers of Physics in China* **5**, 1 (2010).
- [167] G. A. Álvarez, R. Kaiser, and D. Suter, *Annalen der Physik* **525**, 833 (2013).
- [168] D. Deutsch, *Proc. R. Soc. Lond. A* **425**, 73 (1989).
- [169] D. Kielpinski, C. Monroe, and D. J. Wineland, *Nature* **417**, 709 (2002).
- [170] B. Lekitsch, S. Weidt, A. G. Fowler, K. Mølmer, S. J. Devitt, C. Wunderlich, and W. K. Hensinger, *Science Advances* **3** (2017), 10.1126/sciadv.1601540, <http://advances.sciencemag.org/content/3/2/e1601540>.
- [171] P. Bianucci, A. Muller, C. K. Shih, Q. Q. Wang, Q. K. Xue, and C. Piermarocchi, *Phys. Rev. B* **69**, 161303 (2004).
- [172] S. Takeuchi, *Phys. Rev. A* **62**, 032301 (2000).
- [173] P. G. Kwiat, J. R. Mitchell, P. D. D. Schwindt, and A. G. White, *J. Mod. Optics* **47**, 257 (2000).
-

-
- [174] G. Milburn, Phys. Rev. Lett. **62**, 2124 (1989).
 - [175] E. Knill, R. Laflamme, and G. J. Milburn, Nature **409**, 46 (2000).
 - [176] M. O. Scully and M. S. Zubairy, PNAS **98**, 9490 (2001).
 - [177] S. C. Benjamin and S. Bose, Phys. Rev. Lett. **90**, 247901 (2003).
 - [178] J. Cirac and P. Zoller, Phys. Rev. Lett. **74**, 4091 (1995).
 - [179] P. Grangier, J. A. Levenson, and J.-P. Poizat, Nature **396**, 537 (1998).
 - [180] D. Averin, Phys. Rev. Lett. **88**, 207901 (2002).
 - [181] H. Kampermann, D. Bruß, X. Peng, and D. Suter, Phys. Rev. A **81**, 040304 (2010).
 - [182] .
 - [183] S. Lloyd, Science **261**, 1569 (1993).
 - [184] S. C. Benjamin and N. F. Johnson, Appl. Phys. Lett. **70**, 2321 (1997).
 - [185] S. C. Benjamin and N. F. Johnson, Phys. Rev. A **60**, 4334 (1999).
 - [186] S. C. Benjamin, Phys. Rev. A **61**, 020301 (2000).
 - [187] J. Twamley, Phys. Rev. A **67**, 052318 (2003).
 - [188] R. Raussendorf and H. J. Briegel, Phys. Rev. Lett. **86**, 5188 (2001).
 - [189] R. Raussendorf, D. E. Browne, and H. J. Briegel, Phys. Rev. A **68**, 022312 (2003).
 - [190] W. Dür, R. Raussendorf, V. M. Kendon, and H.-J. Briegel, Phys. Rev. A **66**, 052319 (2002).
 - [191] C.-Y. Lu, X.-Q. Zhou, O. Gühne, W.-B. Gao, J. Zhang, Z.-S. Yuan, A. Goebel, T. Yang, and J.-W. Pan, Nature Physics **3**, 91 (2007).
 - [192] R. Prevedel, P. Walther, F. Tiefenbacher, P. Böhi, R. Kaltenbaek, T. Jennewein, and A. Zeilinger, Nature **445**, 65 (2007).
 - [193] M. H. S. Amin, Phys. Rev. Lett. **102**, 220401 (2009).
 - [194] X. Peng, Z. Liao, N. Xu, G. Qin, X. Zhou, D. Suter, and J. Du, Phys. Rev. Lett. **101**, 220405 (2008).
 - [195] F. Bloch, Phys. Rev. **70**, 460 (1946).
 - [196] J. Köhler, J. Disselhorst, M. Donckers, E. Groenen, J. Schmidt, and W. Moerner, Nature **363**, 242 (1993).
 - [197] J. Wrachtrup, C. v. Borczyskowski, J. Bernard, M. Orrit, and R. Brown, Nature **363**, 244 (1993).
 - [198] A. Gruber, A. Dräbenstedt, C. Tietz, L. Fleury, J. Wrachtrup, and C. v. Borczyskowski, Science **276**, 2012 (1997).
 - [199] J. Köhler, Physics Reports **310**, 261 (1999).
 - [200] F. Jelezko, T. Gaebel, I. Popa, M. Domhan, A. Gruber, and J. Wrachtrup, Phys. Rev. Lett. **93**, 130501 (2004).
 - [201] L. Childress, M. V. G. Dutt, J. M. Taylor, A. S. Zibrov, F. Jelezko, J. Wrachtrup, P. R. Hemmer, and M. D. Lukin, Science **314**, 281 (2006).
 - [202] E. Knill, I. Chuang, and R. Laflamme, Phys. Rev. A **57**, 3348 (1998).
 - [203] L. M. K. Vandersypen, C. S. Yannoni, M. H. Sherwood, and I. L. Chuang, Phys. Rev. Lett. **83**, 3085 (1999).
 - [204] W. S. Warren, Science **277**, 1688 (1997).
 - [205] B. M. Fung, Phys. Rev. A **63**, 022304 (2001).
 - [206] T. S. Mahesh and A. Kumar, Phys. Rev. A **64**, 012307 (2001).
-

- [207] R. Brüscheiler, Phys. Rev. Lett. **85**, 4815 (2000).
- [208] R. Stadelhofer, D. Suter, and W. Banzhaf, Phys. Rev. A **71**, 032345 (2005).
- [209] R. Freeman, T. Frenkiel, and M. Levitt, J. Magn. Reson. **44**, 409 (1981).
- [210] M. D. Price, S. S. Somaroo, A. E. Dunlop, T. F. Havel, and D. G. Cory, Phys. Rev. A **60**, 2777 (1999).
- [211] T. S. Mahesh, K. Dorai, Arvin, and A. Kumar, J. Magn. Reson. **148**, 95 (2001).
- [212] J. Zhang, X. Peng, and D. Suter, Phys. Rev. A **73**, 062325 (2006).
- [213] L. Vandersypen, M. Steffen, G. Breyta, C. Yannoni, M. Sherwood, and I. Chuang, Nature **414**, 883 (2001).
- [214] D. G. Cory, M. D. Price, and T. F. Havel, Physica D **120**, 82 (1998).
- [215] Z. L. Mádi, R. Brüscheiler, and R. R. Ernst, J. Chem. Phys. **109**, 10603 (1998).
- [216] E. Biham and D. Kenigsberg, Phys. Rev. A **66**, 062301 (2002).
- [217] C. Bowers and D. Weitekamp, Phys. Rev. Lett. **57**, 2645 (1986).
- [218] P. Hübner, J. Bargon, and S. J. Glaser, J. Chem. Phys. **113**, 2056 (2000).
- [219] M. S. Anwar, D. Blazina, H. A. Carteret, S. B. Duckett, T. K. Halstead, J. A. Jones, C. Kozak, and R. J. K. Taylor, Phys. Rev. Lett. **93**, 040501 (2004).
- [220] A. Kastler, Science **158**, 214 (1967).
- [221] A. S. Bracker, E. A. Stinaff, D. Gammon, M. E. Ware, J. G. Tischler, A. Shabaev, A. L. Efros, D. Park, D. Gershoni, V. L. Korenev, and I. A. Merkulov, Phys. Rev. Lett. **94**, 047402 (2005).
- [222] M. Dobers, K. Klitzing, J. Schneider, G. Weimann, and K. Ploog, Phys. Rev. Lett. **61**, 1650 (1988).
- [223] V. Weis and R. Griffin, Solid State Nuclear Magnetic Resonance **29**, 66 (2006).
- [224] D. Burgarth, V. Giovannetti, and S. Bose, Phys. Rev. A **75**, 062327 (2007).
- [225] E. Schrödinger, Brit. J. Philos. Sci. **3**, 233 (1952).
- [226] H. Dehmelt, Rev. Mod. Phys. **62**, 525 (1990).
- [227] M. V. Berry and A. K. Geim, European Journal of Physics **18**, 307 (1997).
- [228] D. Leibfried, R. Blatt, C. Monroe, and D. Wineland, Rev. Mod. Phys. **75**, 281 (2003).
- [229] B. King, C. Wood, C. Myatt, Q. Turchette, D. Leibfried, W. Itano, C. Monroe, and D. Wineland, Phys. Rev. Lett. **81**, 1525 (1998).
- [230] D. Wineland and H. Dehmelt, Bull. Am. Phys. Soc. **20**, 637 (1975).
- [231] W. Neuhauser, M. Hohenstatt, P. Toschek, and H. Dehmelt, Phys. Rev. Lett. **41**, 233 (1978).
- [232] D. Wineland, R. Drullinger, and F. Walls, Phys. Rev. Lett. **40**, 1639 (1978).
- [233] S. Chu, Rev. Mod. Phys. **70**, 685 (1998).
- [234] W. D. Phillips, Rev. Mod. Phys. **70**, 721 (1998).
- [235] C. N. Cohen-Tannoudji, Rev. Mod. Phys. **70**, 707 (1998).
- [236] A. Einstein, Phys. Zeitschrift **18**, 121 (1917).
- [237] R. Frisch, Z. Physik **86**, 42 (1933).
- [238] A. Steane, Appl. Phys. B **64**, 623 (1997).

- [239] F. Schmidt-Kaler, in *Lectures on Quantum Information*, edited by D. Bruss and G. Leuchs (Wiley-VCH, Berlin, 2006) Chap. 6.
- [240] R. Blatt, H. Häffner, C. F. Roos, C. Becher, and F. Schmidt-Kaler, *Quantum Information Processing* **3**, 61 (2004).
- [241] H. C. Nägerl, C. Roos, D. Leibfried, H. Rohde, G. Thalhammer, J. Eschner, F. Schmidt-Kaler, and R. Blatt, *Phys. Rev. A* **61**, 023405 (2000).
- [242] C. Monroe, D. Meekhof, B. King, W. Itano, and D. Wineland, *Phys. Rev. Lett.* **75**, 4714 (1995).
- [243] B. B. Blinov, D. Leibfried, C. Monroe, and D. J. Wineland, *Quantum Information Processing* **3**, 45 (2004).
- [244] F. Mintert and C. Wunderlich, *Phys. Rev. Lett.* **87**, 257904 (2001).
- [245] C. A. Sackett, D. Kielpinski, B. E. King, C. Langer, V. Meyer, C. J. Myatt, M. Rowe, Q. A. Turchette, W. Itano, D. J. Wineland, and C. Monroe, *Nature* **404**, 256 (2000).
- [246] A. Sørensen and K. Mølmer, *Phys. Rev. Lett.* **82**, 1971 (1999).
- [247] T. Sauter, R. Blatt, W. Neuhauser, and P. Toschek, *Optics Commun.* **60**, 287 (1986).
- [248] H. C. Nägerl, D. Leibfried, H. Rohde, G. Thalhammer, J. Eschner, F. Schmidt-Kaler, and R. Blatt, *Phys. Rev. A* **60**, 145 (1999).
- [249] C. Roos, T. Zeiger, H. Rohde, H. C. Nägerl, J. Eschner, D. Leibfried, F. Schmidt-Kaler, and R. Blatt, *Phys. Rev. Lett.* **83**, 4713 (1999).
- [250] M. Berry, *Proc. Roy. Soc. Lond. A* **392**, 45 (1984).
- [251] K.-A. Brickman, P. C. Haljan, P. J. Lee, M. Acton, L. Deslauriers, and C. Monroe, *Phys. Rev. A* **72**, 050306 (2005).
- [252] T. Monz, P. Schindler, J. T. Barreiro, M. Chwalla, D. Nigg, W. A. Coish, M. Harlander, W. Hänsel, M. Hennrich, and R. Blatt, *Phys. Rev. Lett.* **106**, 130506 (2011).
- [253] F. Kranzl, M. K. Joshi, C. Maier, T. Brydges, J. Franke, R. Blatt, and C. F. Roos, *Phys. Rev. A* **105**, 052426 (2022).
- [254] J. I. Cirac and P. Zoller, *Nature* **404**, 579 (2000).
- [255] J. I. Cirac, P. Zoller, H. J. Kimble, and H. Mabuchi, *Phys. Rev. Lett.* **78**, 3221 (1997).
- [256] P. Maunz, D. L. Moehring, S. Olmschenk, K. C. Younge, D. N. Matsukevich, and C. Monroe, *Nature Physics* **3**, 538 (2007).
- [257] D. Stick, W. Hensinger, S. Olmschenk, M. Madsen, K. Schwab, and C. Monroe, *Nature Physics* **2**, 36 (2006).
- [258] S. A. Moses, C. H. Baldwin, M. S. Allman, R. Ancona, L. Ascarrunz, C. Barnes, J. Bartolotta, B. Bjork, P. Blanchard, M. Bohn, J. G. Bohnet, N. C. Brown, N. Q. Burdick, W. C. Burton, S. L. Campbell, J. P. Campora, C. Carron, J. Chambers, J. W. Chan, Y. H. Chen, A. Chernoguzov, E. Chertkov, J. Colina, J. P. Curtis, R. Daniel, M. DeCross, D. Deen, C. Delaney, J. M. Dreiling, C. T. Ertsgaard, J. Esposito, B. Estey, M. Fabrikant, C. Figgatt, C. Foltz, M. Foss-Feig, D. Francois, J. P. Gaebler, T. M. Gatterman, C. N. Gilbreth, J. Giles, E. Glynn, A. Hall, A. M. Hankin, A. Hansen, D. Hayes, B. Higashi, I. M. Hoffman, B. Hornung, J. J. Hout, R. Jacobs, J. Johansen, L. Jones, J. Karcz, T. Klein, P. Lauria, P. Lee, D. Liefer, S. T. Lu, D. Lucchetti, C. Lytle, A. Malm, M. Matheny,

- B. Mathewson, K. Mayer, D. B. Miller, M. Mills, B. Neyenhuis, L. Nugent, S. Olson, J. Parks, G. N. Price, Z. Price, M. Pugh, A. Ransford, A. P. Reed, C. Roman, M. Rowe, C. Ryan-Anderson, S. Sanders, J. Sedlacek, P. Shevchuk, P. Siegfried, T. Skripka, B. Spaun, R. T. Sprenkle, R. P. Stutz, M. Swallows, R. I. Tobey, A. Tran, T. Tran, E. Vogt, C. Volin, J. Walker, A. M. Zolot, and J. M. Pino, [Phys. Rev. X **13**, 041052 \(2023\)](#).
- [259] P. S. Jessen, I. H. Deutsch, and R. Stock, *Quantum Information Processing* **3**, 91 (2004).
- [260] S. Chu, *Scientific American* **February 1992**, 49 (1992).
- [261] C. E. Wieman, D. E. Pritchard, and D. J. Wineland, *Rev. Mod. Phys.* **71**, S253 (1999).
- [262] R. Dumke, M. Volk, F. B. J. B. T. Mütther, G. Birkel, and W. Ertmer, *Phys. Rev. Lett.* **89**, 097903 (2002).
- [263] F. B. J. Buchkremer, R. Dumke, M. Volk, T. Mütther, G. Birkel, and W. Ertmer, *Laser Physics* **12**, 736 (2002).
- [264] A. Lengwenus, J. Kruse, M. Volk, W. Ertmer, and G. Birkel, *Appl. Phys. B* **86**, 377 (2007).
- [265] N. Schlosser, G. Reymond, I. Protsenko, and P. Grangier, *Nature* **411**, 1024 (2001).
- [266] M. Greiner, O. Mandel, T. Esslinger, T. W. Hänsch, and I. Bloch, *Nature* **415**, 39 (2002).
- [267] Y. Miroshnychenko, W. Alt, I. Dotsenko, L. Förster, M. Khudaverdyan, D. Meschede, D. Schrader, and A. Rauschenbeutel, *Nature* **442**, 151 (2006).
- [268] Y. Miroshnychenko, W. Alt, I. Dotsenko, L. Förster, M. Khudaverdyan, A. Rauschenbeutel, and D. Meschede, *New Journal of Physics* **8**, 191 (2006).
- [269] S. Kuhr, W. Alt, D. Schrader, M. Müller, V. Gomer, and D. Meschede, *Science* **293**, 278 (2001).
- [270] D. Meschede, *Physik Journal* **6**, 47 (2007).
- [271] D. Schrader, I. Dotsenko, M. Khudaverdyan, Y. Miroshnychenko, A. Rauschenbeutel, and D. Meschede, *Phys. Rev. Lett.* **93**, 150501 (2004).
- [272] D. Meschede and A. Rauschenbeutel, *Adv. At. Mol. Opt. Phys.* **53**, 75 (2006).
- [273] G. K. Brennen, C. M. Caves, P. S. Jessen, and I. H. Deutsch, *Phys. Rev. Lett.* **82**, 1060 (1999).
- [274] D. Jaksch, H.-J. Briegel, J. I. Cirac, C. W. Gardiner, and P. Zoller, *Phys. Rev. Lett.* **82**, 1975 (1999).
- [275] M. Anderlini, P. J. Lee, B. L. Brown, J. Sebby-Strabley, W. D. Phillips, and J. V. Porto, *Nature* **448**, 452 (2007).
- [276] D. Jaksch, J. I. Cirac, P. Zoller, S. L. Rolston, R. Côté, and M. D. Lukin, *Phys. Rev. Lett.* **85**, 2208 (2000).
- [277] L. You, X. X. Yi, and X. H. Su, *Phys. Rev. A* **67**, 032308 (2003).
- [278] D. Jaksch, C. Bruder, J. Cirac, C. Gardiner, and P. Zoller, *Phys. Rev. Lett.* **81**, 3108 (1998).
- [279] W. Hofstetter, *Phil. Mag.* **86**, 1891 (2006).
- [280] I. Bloch, *Nature Physics* **1**, 23 (2005).
- [281] D. Jaksch and P. Zoller, *Ann. Phys. (New York)* **315**, 52 (2005).
- [282] A. Georges, “Condensed matter physics with light and atoms: Strongly correlated cold fermions in optical lattices,” Preprint cond-mat/0702122 (2007), lectures given

- at the International School of Physics "Enrico Fermi", Course CLXIV, Varenna, 20-30 June 2006, edited by M. Inguscio, W. Ketterle, and C. Salomon.
- [283] M. Lewenstein, A. Sanpera, V. Ahufinger, B. Damski, A. S. (De), and U. Sen, *Adv. Phys.* **56**, 243 (2007), preprint cond-mat/0606771.
 - [284] N. W. Ashcroft and N. D. Mermin, *Solid State Physics* (Holt, Rinehart & Winston, 1976).
 - [285] M. P. Marder, *Condensed Matter Physics* (Wiley, New York, 2000).
 - [286] J. Hubbard, *Proc. Roy. Soc. London A* **276**, 238 (1963).
 - [287] M. C. Gutzwiller, *Phys. Rev. Lett.* **10**, 159 (1963).
 - [288] J. Kanamori, *Prog. Theor. Phys.* **30**, 275 (1963).
 - [289] M. P. A. Fisher, P. B. Weichman, G. Grinstein, and D. S. Fisher, *Phys. Rev. B* **40**, 546 (1989).
 - [290] M. Köhl, H. Moritz, T. Stöferle, K. Günter, and T. Esslinger, *Phys. Rev. Lett.* **94**, 080403 (2005).
 - [291] H. Kampermann and W. S. Veeman, *Quantum Information Processing* **1**, 327 (2002).
 - [292] K. V. R. M. Murali, N. Sinha, T. S. Mahesh, M. H. Levitt, K. V. Ramanathan, and A. Kumar, *Phys. Rev. A* **66**, 022313 (2002).
 - [293] F. Yamaguchi and Y. Yamamoto, *Appl. Phys. A* **68**, 1 (1999).
 - [294] T. Ladd, Y. Yamamoto, J. Goldman, and F. Yamaguchi, *Quantum Information and Computation* **1**, 56 (2001).
 - [295] T. D. Ladd, J. R. Goldman, F. Yamaguchi, Y. Yamamoto, E. Abe, and K. M. Itoh, *Phys. Rev. Lett.* **89**, 017901 (2002).
 - [296] B. C. Stipe, H. J. Mamin, C. S. Yannoni, T. D. Stowe, T. Kenny, and D. Rugar, *Phys. Rev. Lett.* **87**, 277602 (2001).
 - [297] M. Mehring, J. Mende, and W. Scherer, *Phys. Rev. Lett.* **90**, 153001 (2003).
 - [298] B. Kane, *Nature* **393**, 133 (1998).
 - [299] G. Feher and E. A. Gere, *Phys. Rev.* **114**, 1245 (1959).
 - [300] L. C. L. Hollenberg, C. J. Wellard, C. I. Pakes, and A. G. Fowler, *Phys. Rev. B* **60**, 233301 (2004).
 - [301] M. Xiao, I. Martin, E. Yablonovitch, and H. W. Jiang, *Nature* **430**, 435 (2004).
 - [302] A. R. Stegner, C. Böhme, H. Hübl, M. Stutzmann, K. Lips, and M. S. Brandt, *Nature Physics* **2**, 835 (2006).
 - [303] J. L. O'Brien, S. R. Schofield, M. Y. Simmons, R. G. Clark, A. S. Dzurak, N. J. Curson, B. E. Kane, N. S. McAlpine, M. E. Hawley, and G. W. Brown, *Phys. Rev. B* **64**, 161401 (2001).
 - [304] S. R. Schofield, N. J. Curson, M. Y. Simmons, F. J. Rueß, T. Hallam, L. Oberbeck, and R. G. Clark, *Phys. Rev. Lett.* **91**, 136104 (2003).
 - [305] R. Vrijen, E. Yablonovitch, K. Wang, H. W. Jiang, A. Balandin, V. Roychowdhury, T. Mor, and D. DiVincenzo, *Phys. Rev. A* **62**, 012306 (2000).
 - [306] M. Friesen, P. Rugheimer, D. E. Savage, M. G. Lagally, D. W. v. d. Weide, R. Joynt, and M. A. Eriksson, *PRB* **67**, 121301 (2003).
 - [307] A. M. Stoneham, A. J. Fisher, and P. T. Greenland, *J. Phys.: Condens. Matter* **15**, L447 (2003).

- [308] W. Harneit, C. Meyer, A. Weidinger, D. Suter, and J. Twamley, Phys. Stat. Sol. (b) **233**, 453 (2002).
- [309] W. Harneit, C. Meyer, A. Weidinger, D. Suter, and J. Twamley, Phys. Stat. Sol. (b) **233**, 453 (2002).
- [310] M. Waiblinger, *Untersuchungen der endohedralen Fullerene mit eingeschlossenen Stickstoff- und Phosphor-Atomen.*, Ph.D. thesis (2001).
- [311] M. J. Butcher, F. H. Jones, P. Moriarty, P. H. Beton, K. Prassides, K. Kordatos, and N. Tagmatarchis, Appl. Phys. Lett. **75**, 1074 (1999).
- [312] M. Mehring, W. Scherer, and A. Weidinger, Phys. Rev. Lett. **93**, 206603 (2004).
- [313] D. Suter and K. Lim, Phys. Rev. A **65**, 052309 (2002).
- [314] C. Ju, D. Suter, and J. Du, Physics Letters A **375**, 1441 (2011).
- [315] J. E. Grose, E. S. Tam, C. Timm, M. Scheloske, B. Ulgut, J. J. Parks, H. D. Abruna, W. Harneit, and D. C. Ralph, Nat Mater **7**, 884 (2008).
- [316] Y. Manassen, I. Mukhopadhyay, and N. R. Rao, Phys. Rev. B **61**, 16223 (2000).
- [317] A. V. Balatsky, Y. Manassen, and R. Salem, Phys. Rev. B **66**, 195416 (2002).
- [318] C. Durkan and M. E. Welland, Appl. Phys. Lett. **80**, 458 (2002).
- [319] D. Rugar, C. Yannoni, and J. Sidles, Nature **360**, 563 (1992).
- [320] D. Rugar, R. Budakian, H. J. Mamin, and B. W. Chui, Nature **430**, 329 (2004).
- [321] B. E. Kane, N. S. McAlpine, A. S. Dzurak, R. G. Clark, G. J. Milburn, H. B. Sun, and H. Wiseman, Phys. Rev. B **61**, 2961 (2000).
- [322] T. M. Buehler, D. J. Reilly, R. Brenner, A. R. Hamilton, A. S. Dzurak, and R. G. Clark, Appl. Phys. Lett. **82**, 577 (2003).
- [323] J. v. Vleck, J. Chem. Phys. **41**, 67 (1937).
- [324] B. Wyborne, *Spectroscopic properties of rare earths* (Wiley Interscience, New York, 1965).
- [325] H. Lin, T. Wang, and T. W. Mossberg, Opt. Lett. **20**, 1658 (1995).
- [326] T. L. Harris, K. D. Merkel, R. K. Mohan, T. Chang, Z. Cole, A. Olson, and W. R. Babbitt, Appl. Opt. **45**, 343 (2006).
- [327] T. Hannemann, D. Reiss, C. Balzer, W. Neuhauser, P. E. Toschek, and C. Wunderlich, Phys. Rev. A **65**, 050303 (2002).
- [328] J. H. Wesenberg, K. Mølmer, L. Rippe, and S. Kröll, Phys. Rev. A **75**, 012304 (2007).
- [329] N. Timoney, I. Baumgart, M. Johanning, A. F. Varon, M. B. Plenio, A. Retzker, and C. Wunderlich, Nature **476**, 185 (2011).
- [330] J. J. Longdell, M. J. Sellars, and N. B. Manson, prl **93**, 130503 (2004).
- [331] W. Tittel, M. Afzelius, T. Chaneliere, R. Cone, S. Kroell, S. Moiseev, and M. Sellars, Laser and Photonics Reviews **4**, 244 (2010).
- [332] Y.-P. Liu, Z.-W. Ou, T.-X. Zhu, M.-X. Su, C. Liu, Y.-J. Han, Z.-Q. Zhou, C.-F. Li, and G.-C. Guo, Science Advances **11**, eadu5264 (2025), <https://www.science.org/doi/pdf/10.1126/sciadv.adu5264>.
- [333] E. Fraval, M. J. Sellars, and J. J. Longdell, Phys. Rev. Lett. **95**, 030506 (2005).
- [334] J. J. Longdell, E. Fraval, M. J. Sellars, and N. B. Manson, Phys. Rev. Lett. **95**, 063601 (2005).

-
- [335] S. E. Harris, *Physics Today* **July 1997**, 36 (1997).
- [336] N. Ohlsson, R. K. Mohan, and S. Kroell, *Opt. Commun.* **201**, 71 (2002).
- [337] B. Kraus, W. Tittel, N. Gisin, M. Nilsson, S. Kroell, and J. I. Cirac, *Phys. Rev. A* **73**, 020302 (2006).
- [338] S. A. Moiseev and S. Kroell, *Phys. Rev. Lett.* **87**, 173601 (2001).
- [339] J. J. Longdell, G. Hetet, P. K. Lam, and M. J. Sellars, *Phys. Rev. A* **78**, 032337 (2008).
- [340] C. Simon, M. Afzelius, J. Appel, A. Boyer de la Giroday, S. J. Dewhurst, N. Gisin, C. Y. Hu, F. Jelezko, S. Kröll, J. H. Müller, J. Nunn, E. S. Polzik, J. G. Rarity, H. De Riedmatten, W. Rosenfeld, A. J. Shields, N. Sköld, R. M. Stevenson, R. Thew, I. A. Walmsley, M. C. Weber, H. Weinfurter, J. Wrachtrup, and R. J. Young, *The European Physical Journal D - Atomic, Molecular, Optical and Plasma Physics* **58**, 1 (2010), 10.1140/epjd/e2010-00103-y.
- [341] M. D. Lukin, *Rev. Mod. Phys.* **75**, 457 (2003).
- [342] D. F. Phillips, A. Fleischhauer, A. Mair, R. L. Walsworth, and M. D. Lukin, *Phys. Rev. Lett.* **86**, 783 (2001).
- [343] A. L. Alexander, J. J. Longdell, M. J. Sellars, and N. B. Manson, *Phys. Rev. Lett.* **96**, 043602 (2006).
- [344] J. J. Longdell, A. L. Alexander, and M. J. Sellars, *Phys. Rev. B* **74**, 195101 (2006).
- [345] S. E. Beavan, E. Fraval, M. J. Sellars, and J. J. Longdell, *Phys. Rev. A* **80**, 032308 (2009).
- [346] F. Wang, M. Ren, W. Sun, M. Guo, M. J. Sellars, R. L. Ahlefeldt, J. G. Bartholomew, J. Yao, S. Liu, and M. Zhong, *PRX Quantum* **6**, 010302 (2025).
- [347] M. N. Leuenberger and D. Loss, *Nature* **410**, 789 (2001).
- [348] L. Thomas, F. Lioni, R. Ballou, D. Gatteschi, R. Sessoli, and B. Barbara, *Nature* **383**, 145 (1996).
- [349] J. R. Friedman, M. P. Sarachik, J. Tejada, and R. Ziolo, *Phys. Rev. Lett.* **76**, 3830 (1996).
- [350] C. Sangregorio, T. Ohm, C. Paulsen, R. Sessoli, and D. Gatteschi, *Phys. Rev. Lett.* **78**, 4645 (1997).
- [351] M. Mannini, F. Pineider, C. Danieli, F. Totti, L. Sorace, P. Saintavit, M. A. Arrio, E. Otero, L. Joly, J. C. Cezar, A. Cornia, and R. Sessoli, *Nature* **468**, 417 (2010).
- [352] M. W. Doherty, N. B. Manson, P. Delaney, and L. C. L. Hollenberg, *New Journal of Physics* **13**, 025019 (2011).
- [353] F. Jelezko and J. Wrachtrup, *physica status solidi (a)* **203**, 3207 (2006).
- [354] B. Smeltzer, L. Childress, and A. Gali, *New Journal of Physics* **13**, 025021 (2011).
- [355] J. R. Maze, P. L. Stanwix, J. S. Hodges, S. Hong, J. M. Taylor, P. Cappellaro, L. Jiang, M. V. G. Dutt, E. Togan, A. S. Zibrov, A. Yacoby, R. L. Walsworth, and M. D. Lukin, *Nature* **455**, 644 (2008).
- [356] W. F. Koehl, B. B. Buckley, F. J. Heremans, G. Calusine, and D. D. Awschalom, *Nature* **479**, 84 (2011).
- [357] J. A. Sidles, *Appl. Phys. Lett.* **58**, 2854 (1991).
- [358] J. Gallop, P. Josephs-Franks, J. Davies, L. Hao, and J. Macfarlane, *Physica C* **368**, 109 (2002).
-

-
- [359] I. Martin, D. Mozyrsky, and H. Jiang, Phys. Rev. Lett. **90**, 018301 (2003).
 - [360] F. Jelezko, T. Gaebel, I. Popa, A. Gruber, and J. Wrachtrup, Phys. Rev. Lett. **92**, 027601 (2004).
 - [361] R. Hanson, F. M. Mendoza, R. J. Epstein, and D. D. Awschalom, Phys. Rev. Lett. **97**, 087601 (2006).
 - [362] H. Kimble, M. Dagenais, and L. Mandel, Phys. Rev. Lett. **39**, 691 (1977).
 - [363] R.-Z. Fang, X.-Y. Lai, T. Li, R.-Z. Su, B.-W. Lu, C.-W. Yang, R.-Z. Liu, Y.-K. Qiao, C. Li, Z.-G. He, J. Huang, H. Li, L.-X. You, Y.-H. Huo, X.-H. Bao, and J.-W. Pan, Phys. Rev. Lett. **132**, 160801 (2024).
 - [364] X.-Y. Lai, R.-Z. Fang, T. Li, R.-Z. Su, J. Huang, H. Li, L.-X. You, X.-H. Bao, and J.-W. Pan, Phys. Rev. Lett. **132**, 180803 (2024).
 - [365] T. D. Ladd, F. Jelezko, R. Laflamme, Y. Nakamura, C. Monroe, and J. L. O'Brien, Nature **464**, 45 (2010).
 - [366] Y. Makhlin, G. Schön, and A. Shnirman, Rev. Mod. Phys. **73**, 357 (2001).
 - [367] Y. Makhlin, G. Schön, and A. Shnirman, Nature **398**, 305 (1999).
 - [368] J. E. Mooij, T. P. Orlando, L. Levitov, L. Tian, C. H. v. d. Wal, and S. Lloyd, Science **285**, 1036 (1999).
 - [369] Y. Nakamura, Y. A. Pashkin, and J. S. Tsai, Nature **398**, 786 (1999).
 - [370] D. Vion, A. Aassime, A. Cottet, P. Joyez, H. Pothier, C. Urbina, D. Esteve, and M. H. Devoret, Science **296**, 886 (2002).
 - [371] Y. Yu, S. Han, X. Chu, S.-I. Chu, and Z. Wang, Science **296**, 889 (2002).
 - [372] F. W. Strauch, P. R. Johnson, A. J. Dragt, C. J. Lobb, J. R. Anderson, and F. C. Wellstood, Phys. Rev. Lett. **91**, 167005 (2003).
 - [373] T. Yamamoto, Y. A. Pashkin, O. Astafiev, Y. Nakamura, and J. S. Tsai, Nature **425**, 941 (2003).
 - [374] A. J. Berkley, H. Xu, R. C. Ramos, M. A. Gubrud, F. W. Strauch, P. R. Johnson, J. R. Anderson, A. J. Dragt, C. J. Lobb, and F. C. Wellstood, Science **300**, 1548 (2003).
 - [375] J. H. Plantenberg, P. C. de Groot, C. J. P. M. Harmans, and J. E. Mooij, Nature **447**, 836 (2007).
 - [376] L. DiCarlo, J. M. Chow, J. M. Gambetta, L. S. Bishop, B. R. Johnson, D. I. Schuster, J. Majer, A. Blais, L. Frunzio, S. M. Girvin, and R. J. Schoelkopf, Nature **460**, 240 (2009).
 - [377] I. Chiorescu, Y. Nakamura, C. J. P. M. Harmans, and J. E. Mooij, Science **299**, 1869 (2003).
 - [378] D. I. Schuster, A. Wallraff, A. Blais, L. Frunzio, R.-S. Huang, J. Majer, S. M. Girvin, and R. J. Schoelkopf, Phys. Rev. Lett. **94**, 123602 (2005).
 - [379] A. Lupascu, C. J. M. Verwijs, R. N. Schouten, C. J. P. M. Harmans, and J. E. Mooij, Phys. Rev. Lett. **93**, 177006 (2004).
 - [380] R. Acharya, D. A. Abanin, L. Aghababaie-Beni, I. Aleiner, T. I. Andersen, M. Ansmann, F. Arute, K. Arya, A. Asfaw, N. Astrakhantsev, J. Atalaya, R. Babush, D. Bacon, B. Ballard, J. C. Bardin, J. Bausch, A. Bengtsson, A. Bilmes, S. Blackwell, S. Boixo, G. Bortoli, A. Bourassa, J. Bovaird, L. Brill, M. Broughton, D. A. Browne, B. Buchea, B. B. Buckley, D. A. Buell, T. Burger, B. Burkett, N. Bushnell, A. Cabrera, J. Campero, H.-S. Chang, Y. Chen, Z. Chen, B. Chiaro, D. Chik, C. Chou, J. Claes, A. Y. Cleland, J. Cogan,
-

R. Collins, P. Conner, W. Courtney, A. L. Crook, B. Curtin, S. Das, A. Davies, L. De Lorenzo, D. M. Debroy, S. Demura, M. Devoret, A. Di Paolo, P. Donohoe, I. Drozdov, A. Dunsworth, C. Earle, T. Edlich, A. Eickbusch, A. M. Elbag, M. Elzouka, C. Erickson, L. Faoro, E. Farhi, V. S. Ferreira, L. F. Burgos, E. Forati, A. G. Fowler, B. Foxen, S. Ganjam, G. Garcia, R. Gasca, É. Genois, W. Giang, C. Gidney, D. Gilboa, R. Gosula, A. G. Dau, D. Graumann, A. Greene, J. A. Gross, S. Habegger, J. Hall, M. C. Hamilton, M. Hansen, M. P. Harrigan, S. D. Harrington, F. J. H. Heras, S. Heslin, P. Heu, O. Higgott, G. Hill, J. Hilton, G. Holland, S. Hong, H.-Y. Huang, A. Huff, W. J. Huggins, L. B. Ioffe, S. V. Isakov, J. Iveland, E. Jeffrey, Z. Jiang, C. Jones, S. Jordan, C. Joshi, P. Juhas, D. Kafri, H. Kang, A. H. Karamlou, K. Kechedzhi, J. Kelly, T. Khaire, T. Khattar, M. Khezri, S. Kim, P. V. Klimov, A. R. Klots, B. Kobrin, P. Kohli, A. N. Korotkov, F. Kostritsa, R. Kothari, B. Kozlovskii, J. M. Kreikebaum, V. D. Kurilovich, N. Lacroix, D. Landhuis, T. Lange-Dei, B. W. Langley, P. Laptev, K.-M. Lau, L. Le Guevel, J. Ledford, J. Lee, K. Lee, Y. D. Lensky, S. Leon, B. J. Lester, W. Y. Li, Y. Li, A. T. Lill, W. Liu, W. P. Livingston, A. Locharla, E. Lucero, D. Lundahl, A. Lunt, S. Madhuk, F. D. Malone, A. Maloney, S. Mandrà, J. Manyika, L. S. Martin, O. Martin, S. Martin, C. Maxfield, J. R. McClean, M. McEwen, S. Meeks, A. Megrant, X. Mi, K. C. Miao, A. Mieszala, R. Molavi, S. Molina, S. Montazeri, A. Morvan, R. Movassagh, W. Mruczkiewicz, O. Naaman, M. Neeley, C. Neill, A. Nersisyan, H. Neven, M. Newman, J. H. Ng, A. Nguyen, M. Nguyen, C.-H. Ni, M. Y. Niu, T. E. O'Brien, W. D. Oliver, A. Opremcak, K. Ottosson, A. Petukhov, A. Pizzuto, J. Platt, R. Potter, O. Pritchard, L. P.

Pryadko, C. Quintana, G. Ramachandran, M. J. Reagor, J. Redding, D. M. Rhodes, G. Roberts, E. Rosenberg, E. Rosenfeld, P. Roushan, N. C. Rubin, N. Saei, D. Sank, K. Sankaragomathi, K. J. Satzinger, H. F. Schurkus, C. Schuster, A. W. Senior, M. J. Shearn, A. Shorter, N. Shutty, V. Shvarts, S. Singh, V. Sivak, J. Skrzynny, S. Small, V. Smelyanskiy, W. C. Smith, R. D. Somma, S. Springer, G. Sterling, D. Strain, J. Suchard, A. Szasz, A. Sztein, D. Thor, A. Torres, M. M. Torunbalci, A. Vaishnav, J. Vargas, S. Vdovichev, G. Vidal, B. Villalonga, C. V. Heidweiller, S. Waltman, S. X. Wang, B. Ware, K. Weber, T. Weidel, T. White, K. Wong, B. W. K. Woo, C. Xing, Z. J. Yao, P. Yeh, B. Ying, J. Yoo, N. Yosri, G. Young, A. Zalcman, Y. Zhang, N. Zhu, N. Zobrist, G. Q. AI, and Collaborators, [Nature **638**, 920 \(2025\)](#).

[381] D. Gao, D. Fan, C. Zha, J. Bei, G. Cai, J. Cai, S. Cao, F. Chen, J. Chen, K. Chen, X. Chen, X. Chen, Z. Chen, Z. Chen, Z. Chen, W. Chu, H. Deng, Z. Deng, P. Ding, X. Ding, Z. Ding, S. Dong, Y. Dong, B. Fan, Y. Fu, S. Gao, L. Ge, M. Gong, J. Gui, C. Guo, S. Guo, X. Guo, L. Han, T. He, L. Hong, Y. Hu, H.-L. Huang, Y.-H. Huo, T. Jiang, Z. Jiang, H. Jin, Y. Leng, D. Li, D. Li, F. Li, J. Li, J. Li, J. Li, J. Li, N. Li, S. Li, W. Li, Y. Li, Y. Li, F. Liang, X. Liang, N. Liao, J. Lin, W. Lin, D. Liu, H. Liu, M. Liu, X. Liu, X. Liu, Y. Liu, H. Lou, Y. Ma, L. Meng, H. Mou, K. Nan, B. Nie, M. Nie, J. Ning, L. Niu, W. Peng, H. Qian, H. Rong, T. Rong, H. Shen, Q. Shen, H. Su, F. Su, C. Sun, L. Sun, T. Sun, Y. Sun, Y. Tan, J. Tan, L. Tang, W. Tu, C. Wan, J. Wang, B. Wang, C. Wang, C. Wang, C. Wang, J. Wang, L. Wang, R. Wang, S. Wang, X. Wang, X. Wang, X. Wang, Y. Wang, Z. Wei, J. Wei, D. Wu, G. Wu, J. Wu, S. Wu, Y. Wu, S. Xie, L. Xin, Y. Xu, C. Xue, K. Yan, W. Yang, X. Yang, Y. Yang, Y. Ye, Z. Ye, C. Ying,

- J. Yu, Q. Yu, W. Yu, X. Zeng, S. Zhan, F. Zhang, H. Zhang, K. Zhang, P. Zhang, W. Zhang, Y. Zhang, Y. Zhang, L. Zhang, G. Zhao, P. Zhao, X. Zhao, X. Zhao, Y. Zhao, Z. Zhao, L. Zheng, F. Zhou, L. Zhou, N. Zhou, N. Zhou, S. Zhou, S. Zhou, Z. Zhou, C. Zhu, Q. Zhu, G. Zou, H. Zou, Q. Zhang, C.-Y. Lu, C.-Z. Peng, X. Zhu, and J.-W. Pan, *Phys. Rev. Lett.* **134**, 090601 (2025).
- [382] A. Barenco, D. Deutsch, A. Ekert, and R. Jozsa, *Phys. Rev. Lett.* **74**, 4083 (1995).
- [383] M. Bayer, P. Hawrylak, K. Hinzer, S. Fafard, M. Korkusinski, Z. R. Wasilewski, O. Stern, and A. Forchel, *Science* **291**, 451 (2001).
- [384] G. Ortner, I. Yugova, G. B. H. von Högersthal, A. Larionov, H. Kurtze, D. R. Yakovlev, M. Bayer, S. Fafard, Z. Wasilewski, P. Hawrylak, Y. Lyanda-Geller, T. Reinecke, A. Babiniski, M. Potemski, V. Timofeev, and A. Forchel, *Phys. Rev. B* **71**, 125335 (2005).
- [385] J. M. Elzerman, R. Hanson, J. S. Greidanus, L. H. W. v. Beveren, S. D. Franceschi, L. M. K. Vandersypen, S. Tarucha, and L. P. Kouwenhoven, *PRB* **67**, 161308 (2003).
- [386] G. Chen, N. H. Bonadeo, D. G. Steel, D. Gammon, D. S. Katzer, D. Park, and L. J. Sham, *Science* **289**, 1906 (2000).
- [387] H. Kamada, H. Gotoh, J. Temmyo, T. Takagahara, and H. Ando, *Phys. Rev. Lett.* **87**, 246401 (2001).
- [388] A. Zrenner, E. Beham, S. Stuffer, F. Findels, M. Bichler, and G. Abstreiter, *Nature* **418**, 612 (2002).
- [389] X. Li, Y. Wu, D. Steel, D. Gammon, T. H. Stievater, D. S. Katzer, D. Park, C. Piermarocchi, and L. J. Sham, *Science* **301**, 809 (2003).
- [390] M. Bayer and A. Forchel, *Phys. Rev. B* **65**, 041308 (2002).
- [391] J. M. Kikkawa and D. D. Awschalom, *Phys. Rev. Lett.* **80**, 4313 (1998).
- [392] R. Hanson, L. H. W. v. Beveren, I. T. Vink, J. M. Elzerman, W. J. M. Naber, F. L. Koppens, L. P. Kouwenhoven, and L. M. K. Vandersypen, *Phys. Rev. Lett.* **94**, 196802 (2005).
- [393] S. Datta and B. Das, *Appl. Phys. Lett.* **56**, 665 (1990).
- [394] J. M. Taylor, C. M. Marcus, and M. D. Lukin, *Phys. Rev. Lett.* **90**, 206803 (2003).
- [395] M. Oestreich, J. Hübner, D. Hägele, P. J. Klar, W. Heimbrod, W. W. Rühle, D. E. Ashenford, and B. Lunn, *Appl. Phys. Lett.* **74**, 1251 (1999).
- [396] H. J. Zhu, M. Ramsteiner, H. Kostial, M. Wassermeier, H.-P. Schönherr, and K. H. Ploog, *Phys. Rev. Lett.* **87**, 016601 (2001).
- [397] Y. Ohno, D. K. Young, B. Beschoten, F. Matsukura, H. Ohno, and D. D. Awschalom, *Nature* **402**, 790 (1999).
- [398] I. Zutic, J. Fabian, and S. D. Sarma, *Rev. Mod. Phys.* **76**, 323 (2004).
- [399] T. Calarco, A. Datta, P. Fedichev, E. Pazy, and P. Zoller, *Phys. Rev. A* **68**, 012310 (2003).
- [400] P. Chen, C. Piermarocchi, L. J. Sham, D. Gammon, and D. G. Steel, *Phys. Rev. B* **69**, 075320 (2004).
- [401] D. Loss and D. P. DiVincenzo, *Phys. Rev. A* **57**, 120 (1998).
- [402] F. H. L. Koppens, C. Buizert, K. J. Tielrooij, I. T. Vink, K. C. Nowack, T. Meunier, L. P. Kouwenhoven, and L. M. K. Vandersypen, *Nature* **442**, 766 (2006).

-
- [403] A. V. Khaetskii, D. Loss, and L. Glazman, Phys. Rev. Lett. **88**, 186802 (2002).
- [404] R. d. Sousa and S. D. Sarma, Phys. Rev. B **67**, 033301 (2003).
- [405] A. Shabaev, A. L. Efros, D. Gammon, and I. A. Merkulov, Phys. Rev. B **68**, 201305 (2003).
- [406] J. Berezovsky, M. H. Mikkelsen, O. Gywat, N. G. Stoltz, L. A. Coldren, and D. D. Awschalom, Science **314**, 1916 (2006).
- [407] P. Recher, E. V. Sukhorukov, and D. Loss, Phys. Rev. Lett. **85**, 1962 (2000).
- [408] C. Boehme and K. Lips, Phys. Rev. Lett. **91**, 246603 (2003).
- [409] V. Scarola, K. Park, and S. D. Sarma, Phys. Rev. Lett. **91**, 167903 (2003).
- [410] M. Friesen, C. Tahan, R. Joynt, and M. A. Eriksson, Phys. Rev. Lett. **92**, 037901 (2004).
- [411] D. Aasen, M. Aghaee, Z. Alam, M. Andrzejczuk, A. Antipov, M. Astafev, L. Avilovas, A. Barzegar, B. Bauer, J. Becker, J. M. Bello-Rivas, U. Bhaskar, A. Bocharov, S. Boddapati, D. Bohn, J. Bommer, P. Bonderson, J. Borovsky, L. Bourdet, S. Boutin, T. Brown, G. Campbell, L. Casparis, S. Chakravarthi, R. Chao, B. J. Chapman, S. Chatoor, A. W. Christensen, P. Codd, W. Cole, P. Cooper, F. Corsetti, A. Cui, W. van Dam, T. E. Dandachi, S. Daraeizadeh, A. Dumitrascu, A. Ekefjård, S. Fallahi, L. Galletti, G. Gardner, R. Gatta, H. Gavranovic, M. Goulding, D. Govender, F. Griggio, R. Grigoryan, S. Grijalva, S. Gronin, J. Gukelberger, J. Haah, M. Hamdast, E. B. Hansen, M. Hastings, S. Heedt, S. Ho, J. Hogaboam, L. Holgaard, K. V. Hoogdalem, J. Indrapiromkul, H. Ingerslev, L. Ivancevic, S. Jablonski, T. Jensen, J. Jhoja, J. Jones, K. Kalashnikov, R. Kallaher, R. Kalra, F. Karimi, T. Karzig, S. Kimes, V. Kliuchnikov, M. E. Kloster, C. Knapp, D. Knee, J. Koski, P. Kostamo, J. Kuesel, B. Lackey, T. Laeven, J. Lai, G. de Lange, T. Larsen, J. Lee, K. Lee, G. Leum, K. Li, T. Lindemann, M. Lucas, R. Lutchyn, M. H. Madsen, N. Madulid, M. Manfra, S. B. Markussen, E. Martinez, M. Mattila, J. Mattinson, R. McNeil, A. R. Mei, R. V. Mishmash, G. Mohandas, C. Mollgaard, M. de Moor, T. Morgan, G. Moussa, A. Narla, C. Nayak, J. H. Nielsen, W. H. P. Nielsen, F. Nolet, M. Nystrom, E. O'Farrell, K. Otani, A. Paetznick, C. Papon, A. Paz, K. Petersson, L. Petit, D. Pikulin, D. O. F. Pons, S. Quinn, M. Rajpalke, A. A. Ramirez, K. Rasmussen, D. Razmadze, B. Reichardt, Y. Ren, K. Reneris, R. Riccomini, I. Sadovskyy, L. Sainiemi, J. C. E. Saldaña, I. Sanlorenzo, S. Schaal, E. Schmidgall, C. Sfiligoj, M. P. da Silva, S. Sinha, M. Soeken, P. Sohr, T. Stankevic, L. Stek, P. Strøm-Hansen, E. Stuppard, A. Sundaram, H. Suominen, J. Suter, S. Suzuki, K. Svore, S. Teicher, N. Thiyagarajah, R. Tholapi, M. Thomas, D. Tom, E. Toomey, J. Tracy, M. Troyer, M. Turley, M. D. Turner, S. Upadhyay, I. Urban, A. Vaschillo, D. Viazmitinov, D. Vogel, Z. Wang, J. Watson, A. Webster, J. Weston, T. Williamson, G. W. Winkler, D. J. van Woerkom, B. P. Wütz, C. K. Yang, R. Yu, E. Yucelen, J. H. Zamorano, R. Zeisel, G. Zheng, J. Zilke, and A. Zimmerman, preprint (2025), arXiv:2502.12252 [quant-ph].
- [412] L. Hormozi, G. Zikos, and N. E. Bonesteel, Phys. Rev. B **75**, 165310 (2007).
- [413] A. Stern and N. H. Lindner, Science **339**, 1179 (2013), <https://www.science.org/doi/pdf/10.1126/science.12314>.
- [414] M. Aghaee, A. Alcaraz Ramirez, Z. Alam, R. Ali, M. Andrzejczuk, A. Antipov,

- M. Astafev, A. Barzegar, B. Bauer, J. Becker, U. K. Bhaskar, A. Bocharov, S. Boddapati, D. Bohn, J. Bommer, L. Bourdet, A. Bousquet, S. Boutin, L. Casparis, B. J. Chapman, S. Chatoor, A. W. Christensen, C. Chua, P. Codd, W. Cole, P. Cooper, F. Corsetti, A. Cui, P. Dalpasso, J. P. Dehollain, G. de Lange, M. de Moor, A. Ekefj rd, T. El Dandachi, J. C. Estrada Saldaña, S. Fallahi, L. Galletti, G. Gardner, D. Govender, F. Griggio, R. Grigoryan, S. Grijalva, S. Gronin, J. Gukelberger, M. Hamdast, F. Hamze, E. B. Hansen, S. Heedt, Z. Heidarnia, J. Herranz Zamorano, S. Ho, L. Holgaard, J. Hornibrook, J. Indrapiromkul, H. Ingerslev, L. Ivancevic, T. Jensen, J. Jhoja, J. Jones, K. V. Kalashnikov, R. Kallaher, R. Kalra, F. Karimi, T. Karzig, E. King, M. E. Kloster, C. Knapp, D. Koccon, J. V. Koski, P. Kostamo, M. Kumar, T. Laeven, T. Larsen, J. Lee, K. Lee, G. Leum, K. Li, T. Lindemann, M. Looij, J. Love, M. Lucas, R. Lutchyn, M. H. Madsen, N. Madulid, A. Malmros, M. Manfra, D. Mantri, S. B. Markussen, E. Martinez, M. Mattila, R. McNeil, A. B. Mei, R. V. Mishmash, G. Mohandas, C. Mollgaard, T. Morgan, G. Moussa, C. Nayak, J. H. Nielsen, J. M. Nielsen, W. H. P. Nielsen, B. Nijholt, M. Nyström, E. O’Farrell, T. Ohki, K. Otani, B. Paquelet W tz, S. Pauka, K. Petersson, L. Petit, D. Pikulin, G. Prawiroatmodjo, F. Preiss, E. Puchol Morejon, M. Rajpalke, C. Ranta, K. Rasmussen, D. Razmadze, O. Reentila, D. J. Reilly, Y. Ren, K. Reneris, R. Rouse, I. Sadovskyy, L. Sainiemi, I. Sanlorenzo, E. Schmidgall, C. Sfiligoj, M. B. Shah, K. Simoes, S. Singh, S. Sinha, T. Sørensen, P. Sohr, T. Stankevic, L. Stek, E. Stuppard, H. Suominen, J. Suter, S. Teicher, N. Thiagarajah, R. Tholapi, M. Thomas, E. Toomey, J. Tracy, M. Turley, S. Upadhyay, I. Urban, K. Van Hoogdalem, D. J. Van Woerkom, D. V. Viazmitinov, D. Vogel, J. Watson, A. Webster, J. Weston, G. W. Winkler, D. Xu, C. K. Yang, E. Yucelen, R. Zeisel, G. Zheng, J. Zilke, and M. A. Quantum, [Nature](#) **638**, 651 (2025).
- [415] S. L. Braunstein and P. van Loock, [Rev. Mod. Phys.](#) **77**, 513 (2005).
- [416] D. Gottesman, A. Kitaev, and J. Preskill, *Phys. Rev. A* **64**, 012310 (2001).
- [417] J. R. Klauder and B. S. Skagerstam, *Coherent States – Applications in Physics and Mathematical Physics* (World Scientific, Singapore, 1985).
- [418] T. Ralph, A. Gilchrist, G. Milburn, W. Munro, and S. Glancy, *Phys. Rev. A* **68**, 042319 (2003).
- [419] P. Grangier, B. Sanders, and J. Vuckovic, eds., *“Focus Issue: Single photons on demand,”* (IOP, 2004) new J. Phys. Vol. 6.
- [420] A. Migdall and J. Dowling, eds., *Special Issue: Single-photon: detectors, applications, and measurement methods, J. Mod. Opt.*, Vol. 51, pp. 1265-1557 (2004).
- [421] A. Imamoglu and Y. Yamamoto, *Phys. Rev. Lett.* **72**, 210 (1994).
- [422] A. B. U’Ren, Y. Jeronimo-Moreno, and H. Garcia-Gracia, *Phys. Rev. A* **75**, 023810 (2007).
- [423] C. Brunel, B. Lounis, P. Tamarat, and M. Orrit, [Phys. Rev. Lett.](#) **83**, 2722 (1999).
- [424] A. Kuhn, M. Hennrich, and G. Rempe, *Phys. Rev. Lett.* **89**, 067901 (2002).
- [425] J. McKeever, A. Boca, A. D. Boozer, R. Miller, J. R. Buck, A. Kuzmich, and H. J. Kimble, *Science* **303**, 1992 (2004).
- [426] C. Kurtsiefer, S. Mayer, P. Zarda, and H. Weinfurter, [Phys. Rev. Lett.](#) **85**, 290 (2000).

- [427] P. Michler, A. Kiraz, C. Becher, W. V. Schoenfeld, P. M. Petroff, L. Zhang, E. Hu, and A. Imamoglu, *Science* **290**, 2282 (2000).
- [428] C. Santori, M. Pelton, G. Solomon, Y. Dale, and Y. Yamamoto, *Phys. Rev. Lett.* **86**, 1502 (2001).
- [429] Z. Yuan, B. E. Kardynal, R. M. Stevenson, A. J. Shields, C. J. Lobo, K. Cooper, N. S. Beattie, D. A. Ritchie, and M. Pepper, *Science* **295**, 102 (2002).
- [430] P. Grangier, G. Roger, and A. Aspect, *Eur. Phys. Lett.* **1**, 173 (1986).
- [431] P. G. Kwiat, E. Waks, A. G. White, I. Appelbaum, and P. H. Eberhard, *Phys. Rev. A* **60**, R773 (1999).
- [432] C. Santori, D. Fattal, J. Vuckovic, G. Solomon, and Y. Yamamoto, *Fortschr. Phys.* **52**, 1180 (2004).
- [433] E. Moreau, I. Robert, L. Manin, V. Thierry-Mieg, J. M. Gérard, and I. Abram, *Phys. Rev. Lett.* **87**, 183601 (2001).
- [434] A. J. Miller, S. W. Nam, J. M. Martinis, and A. V. Sergienko, *Appl. Phys. Lett.* **83**, 791 (2003).
- [435] D. Rosenberg, A. E. Lita, A. J. Miller, and S. W. Nam, *Phys. Rev. A* **71**, 061803 (2005).
- [436] D. I. Schuster, A. A. Houck, J. A. Schreier, A. Wallraff, J. M. Gambetta, A. Blais, L. Frunzio, J. Majer, B. Johnson, M. H. Devoret, S. M. Girvin, and R. J. Schoelkopf, *Nature* **445**, 515 (2007).
- [437] Z. Wang, L. Balembois, M. Rančić, E. Billaud, M. Le Dantec, A. Ferrier, P. Goldner, S. Bertaina, T. Chanelière, D. Esteve, D. Vion, P. Bertet, and E. Flurin, *Nature* **619**, 276 (2023).
- [438] S. Tanzilli, A. Martin, F. Kaiser, M. De Micheli, O. Alibart, and D. Ostrowsky, *Laser and Photonics Reviews* **6**, 115 (2012), <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/lpor.201100011>.
- [439] P. Kok, W. J. Munro, K. Nemoto, T. C. Ralph, J. P. Dowling, and G. J. Milburn, *Rev. Mod. Phys.* **79**, 135 (2007).
- [440] J. L. O'Brien, G. J. Pryde, A. G. White, T. C. Ralph, and D. Branning, *Nature* **426**, 264 (2003).
- [441] B. Lounis and W. Moerner, *Nature* **407**, 491 (2000).
- [442] F. Treussart, R. Alléaume, V. L. Floch, L. T. Xiao, J.-M. Courty, and J.-F. Roch, *Phys. Rev. Lett.* **89**, 093601 (2002).
- [443] N. Carlson, W. Babbitt, and T. Mossberg, *Optics Lett.* **8**, 623 (1983).
- [444] C. Liu, Z. Dutton, C. H. Behroozi, and L. V. Hau, *Nature* **409**, 490 (2001).
- [445] A. V. Turukhin, V. S. Sudarshanam, M. S. Shahriar, J. A. Musser, B. S. Ham, and P. R. Hemmer, *Phys. Rev. Lett.* **88**, 023602 (2002).
- [446] T. B. Pittman, M. J. Fitch, B. C. Jacobs, and J. D. Franson, *Phys. Rev. A* **68**, 032316 (2003).
- [447] K. Sanaka, T. Jennewein, J.-W. Pan, K. Resch, and A. Zeilinger, *Phys. Rev. Lett.* **92**, 017902 (2004).
- [448] Z. Zhao, A.-N. Zhang, Y.-A. Chen, H. Zhang, J.-F. Du, T. Yang, and J.-W. Pan, *Phys. Rev. Lett.* **94**, 030501 (2005).
- [449] G. Hutchinson and G. Milburn, *J. Mod. Optics* **51**, 1211 (2004).
- [450] P. Kok, H. Lee, and J. P. Dowling, *Phys. Rev. A* **66**, 063814 (2002).

-
- [451] J. C. F. Matthews, A. Politi, StefanovAndre, and J. L. O'Brien, [Nat Photon **3**, 346 \(2009\)](#).
- [452] K. Alexander, A. Benyamini, D. Black, D. Bonneau, S. Burgos, B. Burrige, H. Cable, G. Campbell, G. Catalano, A. Ceballos, C.-M. Chang, S. S. Choudhury, C. J. Chung, F. Danesh, T. Dauer, M. Davis, E. Dudley, P. Er-Xuan, J. Fargas, A. Farsi, C. Fenrich, J. Frazer, M. Fukami, Y. Ganesan, G. Gibson, M. Gimeno-Segovia, S. Goeldi, P. Goley, R. Haislmaier, S. Halimi, P. Hansen, S. Hardy, J. Horng, M. House, H. Hu, M. Jadidi, V. Jain, H. Johansson, T. Jones, V. Kamineneni, N. Kelez, R. Koustuban, G. Kovall, P. Krogen, N. Kumar, Y. Liang, N. LiCausi, D. Llewellyn, K. Lokovic, M. Lovelady, V. R. Manfrinato, A. Melnichuk, G. Mendoza, B. Moores, S. Mukherjee, J. Munns, F.-X. Musalem, F. Najafi, J. L. OBrien, J. E. Ortmann, S. Pai, B. Park, H.-T. Peng, N. Penthorn, B. Peterson, G. Peterson, M. Poush, G. J. Pryde, T. Ramprasad, G. Ray, A. V. Rodriguez, B. Roxworthy, T. Rudolph, D. J. Saunders, P. Shadbolt, D. Shah, A. Bahgat Shehata, H. Shin, J. Sinsky, J. Smith, B. Sohn, Y.-I. Sohn, G. Son, M. C. M. M. Souza, C. Sparrow, M. Staffaroni, C. Stavrakas, V. Sukumaran, D. Tamborini, M. G. Thompson, K. Tran, M. Triplett, M. Tung, A. Veitia, A. Vert, M. D. Vidrighin, I. Vorobeichik, P. Weigel, M. Wingert, J. Wooding, X. Zhou, and P. team, [Nature **641**, 876 \(2025\)](#).
- [453] C. Bennett, G. Brassard, C. Crépeau, R. Jozsa, A. Peres, and W. Wootters, *Phys. Rev. Lett.* **70**, 1895 (1993).
- [454] C. Bennett and S. Wiesner, *Phys. Rev. Lett.* **69**, 2881 (1992).
- [455] N. Gisin, G. Ribordy, W. Tittel, and H. Zbinden, *Rev. Mod. Phys.* **74**, 145 (2002).
- [456] C. Bennett and G. Brassard, in *Proceedings of IEEE International Conference on Computers, Systems, and Signal Processing (Bangalore, India, December 1984)* (IEEE, New York, 1984) pp. 175–179.
- [457] H. Zbinden, J. Gautier, N. Gisin, B. Huttner, A. Muller, and W. Tittel, *Electron. Lett.* **33**, 586 (1997).
- [458] C. Gobby, Z. L. Yuan, and A. J. Shields, *Appl. Phys. Lett.* **84**, 3762 (2004).
- [459] T. Schmitt-Manderbach, H. Weier, M. Furst, R. Ursin, F. Tiefenbacher, T. Scheidl, J. Perdigues, Z. Sodnik, C. Kurtsiefer, J. G. Rarity, A. Zeilinger, and H. Weinfurter, [Phys. Rev. Lett. **98**, 010504 \(2007\)](#).
- [460] A. Beveratos, R. Brouri, T. Gacoin, A. Villing, J.-P. Poizat, and P. Grangier, [Phys. Rev. Lett. **89**, 187901 \(2002\)](#).
- [461] M. Hijlkema, B. Weber, H. P. Specht, S. C. Webster, A. Kuhn, and G. Rempe, *Nature Physics* **3**, 253 (2007).
- [462] C. Bennett, G. Brassard, and N. Mermin, *Phys. Rev. Lett.* **68**, 557 (1992).
- [463] N. Gisin and R. Thew, *Nature Photonics* **1**, 165 (2007).
- [464] D. C. Mattis, *The Theory of Magnetism I*, Springer Series in Solid-state Sciences, Vol. 17 (Springer, 1981).
-