

A gravitational wave observatory operating beyond the quantum shot-noise limit

J. Abadie¹, B. P. Abbott¹, R. Abbott¹, T. D. Abbott⁵⁹
M. Abernathy², C. Adams³, R. Adhikari¹, C. Affeldt^{4,11},
P. Ajith¹, B. Allen^{4,5,11}, G. S. Allen⁶, E. Amador Ceron⁵,
D. Amariutei⁸, R. S. Amin⁹, S. B. Anderson¹,
W. G. Anderson⁵, K. Arai¹, M. A. Arain⁸, M. C. Araya¹,
S. M. Aston¹⁰, D. Atkinson⁷, P. Aufmuth^{4,11}, C. Aulbert^{4,11},
B. E. Aylott¹⁰, S. Babak¹², P. Baker¹³, S. Ballmer²⁵, D. Barker⁷,
B. Barr², P. Barriga¹⁶, L. Barsotti¹⁵, M. A. Barton⁷, I. Bartos¹⁷,
R. Bassiri², M. Bastarrika², J. Batch⁷, J. Bauchrowitz^{4,11},
B. Behnke¹², A. S. Bell², I. Belopolski¹⁷, M. Benacquista¹⁸,
J. M. Berliner⁷, A. Bertolini^{4,11}, J. Betzwieser¹, N. Beveridge²,
P. T. Beyersdorf¹⁹, I. A. Bilenko²⁰, G. Billingsley¹, J. Birch³,
R. Biswas¹⁸, E. Black¹, J. K. Blackburn¹, L. Blackburn³⁰,
D. Blair¹⁶, B. Bland⁷, O. Bock^{4,11}, T. P. Bodiya¹⁵, C. Bogan^{4,11},
R. Bondarescu²¹, R. Bork¹, M. Born^{4,11}, S. Bose²²,
P. R. Brady⁵, V. B. Braginsky²⁰, J. E. Brau²⁴, J. Breyer^{4,11},
D. O. Bridges³, M. Brinkmann^{4,11}, M. Britzger^{4,11},
A. F. Brooks¹, D. A. Brown²⁵, A. Brummitt²⁶, A. Buonanno²⁷,
J. Burguet-Castell⁵, O. Burmeister^{4,11}, R. L. Byer⁶,
L. Cadonati²⁸, J. B. Camp³⁰, P. Campsie², J. Cannizzo³⁰,
K. Cannon⁶⁴, J. Cao³¹, C. D. Capano²⁵, S. Caride³², S. Caudill⁹,
M. Cavaglia²⁹, C. Cepeda¹, T. Chalermongsak¹, E. Chalkley¹⁰,
P. Charlton³³, S. Chelkowski¹⁰, Y. Chen²³, N. Christensen¹⁴,
H. Cho⁶⁵, S. S. Y. Chua³⁴, S. Chung¹⁶, C. T. Y. Chung³⁵,
G. Ciani⁸, F. Clara⁷, D. E. Clark⁶, J. Clark³⁶, J. H. Clayton⁵,
R. Conte³⁷, D. Cook⁷, T. R. Corbitt¹⁵, M. Cordier¹⁹,
N. Cornish¹³, A. Corsi¹, C. A. Costa⁹, M. Coughlin¹⁴,
P. Couvares²⁵, D. M. Coward¹⁶, D. C. Coyne¹,
J. D. E. Creighton⁵, T. D. Creighton¹⁸, A. M. Cruise¹⁰,
A. Cumming², L. Cunningham², R. M. Cutler¹⁰, K. Dahl^{4,11},
S. L. Danilishin²⁰, R. Dannenberg¹, K. Danzmann^{4,11},
B. Daudert¹, H. Daveloza¹⁸, G. Davies³⁶, E. J. Daw³⁸,
T. Dayanga²², D. DeBra⁶, J. Degallaix^{4,11}, T. Dent³⁶,
V. Dergachev¹, R. DeRosa⁹, R. DeSalvo¹, S. Dhurandhar³⁹,
J. DiGuglielmo^{4,11}, I. Di Palma^{4,11}, M. Díaz¹⁸, F. Donovan¹⁵,
K. L. Dooley⁸, S. Dorsher⁴¹, R. W. P. Drever⁴², J. C. Driggers¹,
Z. Du³¹, J. -C. Dumas¹⁶, S. Dwyer¹⁵, T. Eberle^{4,11}, M. Edgar²,
M. Edwards³⁶, A. Effler⁹, P. Ehrens¹, R. Engel¹, T. Etzel¹,
K. Evans², M. Evans¹⁵, T. Evans³, M. Factourovich¹⁷,
S. Fairhurst³⁶, Y. Fan¹⁶, B. F. Farr⁴³, W. Farr⁴³, D. Fazi⁴³,

H. Fehrmann^{4,11}, D. Feldbaum⁸, L. S. Finn²¹, R. P. Fisher²¹,
M. Flanigan⁷, S. Foley¹⁵, E. Forsi³, N. Fotopoulos¹,
M. Frede^{4,11}, M. Frei⁴⁴, Z. Frei⁴⁵, A. Freise¹⁰, R. Frey²⁴,
T. T. Fricke⁹, D. Friedrich^{4,11}, P. Fritschel¹⁵, V. V. Frolov³,
P. J. Fulda¹⁰, M. Fyffe³, M. R. Ganija⁴⁸, J. Garcia⁷,
J. A. Garofoli²⁵, R. Geng³¹, L. Á. Gergely⁷¹, S. Ghosh²²,
J. A. Giaime^{9,3}, S. Giampanis⁵, K. D. Giardina³, C. Gill²,
E. Goetz^{4,11}, L. M. Goggin⁵, G. González⁹, M. L. Gorodetsky²⁰,
S. Goßler^{4,11}, C. Graef^{4,11}, A. Grant², S. Gras¹⁶, C. Gray⁷,
N. Gray², R. J. S. Greenhalgh²⁶, A. M. Gretarsson⁴⁶,
R. Grosso¹⁸, H. Grote^{4,11}, S. Grunewald¹², C. Guido³,
R. Gupta³⁹, E. K. Gustafson¹, R. Gustafson³², T. Ha⁶⁹,
B. Hage^{4,11}, J. M. Hallam¹⁰, D. Hammer⁵, G. Hammond²,
J. Hanks⁷, C. Hanna^{1,72}, J. Hanson³, J. Harms¹, G. M. Harry¹⁵,
I. W. Harry³⁶, E. D. Harstad²⁴, M. T. Hartman⁸, K. Haughian²,
K. Hayama⁴⁷, J. Heefner¹, M. C. Heintze⁸, M. A. Hendry²,
I. S. Heng², A. W. Heptonstall¹, V. Herrera⁶, M. Hewitson^{4,11},
S. Hild², D. Hoak²⁸, K. A. Hodge¹, K. Holt³, T. Hong²³,
S. Hooper¹⁶, D. J. Hosken⁴⁸, J. Hough², E. J. Howell¹⁶,
B. Hughey⁵, T. Huynh-Dinh³, S. Husa⁴⁹, S. H. Huttner²,
D. R. Ingram⁷, R. Inta³⁴, T. Isogai¹⁴, A. Ivanov¹, K. Izumi⁴⁷,
M. Jacobson¹, H. Jang⁶⁸, W. W. Johnson⁹, D. I. Jones⁵⁰,
G. Jones³⁶, R. Jones², L. Ju¹⁶, P. Kalmus¹, V. Kalogera⁴³,
I. Kamaretsos³⁶, S. Kandhasamy⁴¹, G. Kang⁶⁸, J. B. Kanner²⁷,
E. Katsavounidis¹⁵, W. Katzman³, H. Kaufer^{4,11}, K. Kawabe⁷,
S. Kawamura⁴⁷, F. Kawazoe^{4,11}, W. Kells¹, D. G. Keppel^{4,11},
Z. Keresztes⁷¹, A. Khalaidovski^{4,11}, F. Y. Khalili²⁰,
E. A. Khazanov⁵¹, B. Kim⁶⁸, C. Kim⁶⁶, D. Kim¹⁶, H. Kim^{4,11},
K. Kim⁶⁷, N. Kim⁶, Y. -M. Kim⁶⁵, P. J. King¹, M. Kinsey²¹,
D. L. Kinzel³, J. S. Kissel¹⁵, S. Klimenko⁸, K. Kokeyama¹⁰,
V. Kondrashov¹, R. Kopparapu²¹, S. Koranda⁵, W. Z. Korth¹,
D. Kozak¹, V. Kringel^{4,11}, S. Krishnamurthy⁴³, B. Krishnan¹²,
G. Kuehn^{4,11}, R. Kumar², P. Kwee^{4,11}, P. K. Lam³⁴,
M. Landry⁷, M. Lang²¹, B. Lantz⁶, N. Lastzka^{4,11}, C. Lawrie²,
A. Lazzarini¹, P. Leaci¹², C. H. Lee⁶⁵, H. M. Lee⁷⁰,
N. Leindecker⁶, J. R. Leong^{4,11}, I. Leonor²⁴, J. Li³¹,
P. E. Lindquist¹, N. A. Lockerbie⁵², D. Lodhia¹⁰, M. Lormand³,
J. Luan²³, M. Lubinski⁷, H. Lück^{4,11}, A. P. Lundgren²¹,
E. Macdonald², B. Machenschalk^{4,11}, M. MacInnis¹⁵,
D. M. Macleod³⁶, M. Mageswaran¹, K. Mailand¹, I. Mandel¹⁵,
V. Mandic⁴¹, A. Marandi⁶, S. Márka¹⁷, Z. Márka¹⁷,
A. Markosyan⁶, E. Maros¹, I. W. Martin², R. M. Martin⁸,

J. N. Marx¹, K. Mason¹⁵, F. Matchard¹⁵, L. Matone¹⁷,
R. A. Matzner⁴⁴, N. Mavalvala¹⁵, G. Mazzolo^{4,11},
R. McCarthy⁷, D. E. McClelland³⁴, S. C. McGuire⁴⁰,
G. McIntyre¹, J. McIver²⁸, D. J. A. McKechnan³⁶,
G. D. Meadors³², M. Mehmet^{4,11}, T. Meier^{4,11}, A. Melatos³⁵,
A. C. Melissinos⁵³, G. Mendell⁷, D. Menendez²¹,
R. A. Mercer⁵, S. Meshkov¹, C. Messenger³⁶, M. S. Meyer³,
H. Miao¹⁶, J. Miller³⁴, V. P. Mitrofanov²⁰, G. Mitselmakher⁸,
R. Mittleman¹⁵, O. Miyakawa⁴⁷, B. Moe⁵, P. Moesta¹²,
S. D. Mohanty¹⁸, D. Moraru⁷, G. Moreno⁷, T. Mori⁴⁷,
K. Mossavi^{4,11}, C. M. Mow-Lowry³⁴, C. L. Mueller⁸,
G. Mueller⁸, S. Mukherjee¹⁸, A. Mullavey³⁴,
H. Müller-Ebhardt^{4,11}, J. Munch⁴⁸, D. Murphy¹⁷,
P. G. Murray², A. Mytidis⁸, T. Nash¹, R. Nawrodt²,
V. Nacula⁸, J. Nelson², G. Newton², A. Nishizawa⁴⁷,
D. Nolting³, L. Nuttall³⁶, J. O'Dell²⁶, B. O'Reilly³,
R. O'Shaughnessy⁵, E. Ochsner²⁷, E. Oelker¹⁵, J. J. Oh⁶⁹,
S. H. Oh⁶⁹, G. H. Ogin¹, R. G. Oldenburg⁵, C. Osthelder¹,
C. D. Ott²³, D. J. Ottaway⁴⁸, R. S. Ottens⁸, H. Overmier³,
B. J. Owen²¹, A. Page¹⁰, Y. Pan²⁷, C. Pankow⁸, M. A. Papa^{12,5},
P. Patel¹, M. Pedraza¹, P. Peiris⁶¹, L. Pekowsky²⁵, S. Penn⁵⁴,
C. Peralta¹², A. Perreca²⁵, M. Phelps¹, M. Pickenpack^{4,11},
I. M. Pinto⁵⁵, M. Pitkin², H. J. Pletsch^{4,11}, M. V. Plissi²,
J. Pöld^{4,11}, F. Postiglione³⁷, V. Predoi³⁶, L. R. Price¹,
M. Prijatelj^{4,11}, M. Principe⁵⁵, S. Privitera¹, R. Prix^{4,11},
L. Prokhorov²⁰, O. Puncken^{4,11}, V. Quetschke¹⁸, F. J. Raab⁷,
H. Radkins⁷, P. Raffai⁴⁵, M. Rakhmanov¹⁸, C. R. Ramet³,
B. Rankins²⁹, S. R. P. Mohapatra²⁸, V. Raymond⁴³,
K. Redwine¹⁷, C. M. Reed⁷, T. Reed⁵⁶, S. Reid², D. H. Reitze⁸,
R. Riesen³, K. Riles³², N. A. Robertson^{1,2}, C. Robinson³⁶,
E. L. Robinson¹², S. Roddy³, C. Rodriguez⁴³, M. Rodruck⁷,
J. Rollins¹⁷, J. D. Romano¹⁸, J. H. Romie³, C. Röver^{4,11},
S. Rowan², A. Rüdiger^{4,11}, K. Ryan⁷, H. Ryll^{4,11}, P. Sainathan⁸,
M. Sakosky⁷, F. Salemi^{4,11}, A. Samblowski^{4,11}, L. Sammut³⁵,
L. Sancho de la Jordana⁴⁹, V. Sandberg⁷, S. Sankar¹⁵,
V. Sannibale¹, L. Santamaría¹, I. Santiago-Prieto²,
G. Santostasi⁵⁸, B. S. Sathyaprakash³⁶, S. Sato⁴⁷,
P. R. Saulson²⁵, R. L. Savage⁷, R. Schilling^{4,11},
S. Schlamminger⁶³, R. Schnabel^{4,11}, R. M. S. Schofield²⁴,
B. Schulz^{4,11}, B. F. Schutz^{12,36}, P. Schwinberg⁷, J. Scott²,
S. M. Scott³⁴, A. C. Searle¹, F. Seifert¹, D. Sellers³,
A. S. Sengupta^{1,a}, A. Sergeev⁵¹, D. A. Shaddock³⁴,

M. Shaltev^{4,11}, B. Shapiro¹⁵, P. Shawhan²⁷, D. H. Shoemaker¹⁵,
 A. Sibley³, X. Siemens⁵, D. Sigg⁷, A. Singer¹, L. Singer¹,
 A. M. Sintes⁴⁹, G. Skelton⁵, B. J. J. Slagmolen³⁴, J. Slutsky⁹,
 R. J. E. Smith¹⁰, J. R. Smith⁵⁹, M. R. Smith¹, N. D. Smith¹⁵,
 K. Somiya²³, B. Sorazu², J. Soto¹⁵, F. C. Speirits², A. J. Stein¹⁵,
 E. Steinert⁷, J. Steinlechner^{4,11}, S. Steinlechner^{4,11},
 S. Steplewski²², M. Stefszky³⁴, A. Stochino¹, R. Stone¹⁸,
 K. A. Strain², S. Strigin²⁰, A. S. Stroeer¹⁸, A. L. Stuver³,
 T. Z. Summerscales⁵⁷, M. Sung⁹, S. Susmithan¹⁶, P. J. Sutton³⁶,
 D. Talukder²², D. B. Tanner⁸, S. P. Tarabrin^{4,11}, J. R. Taylor^{4,11},
 R. Taylor¹, P. Thomas⁷, K. A. Thorne³, K. S. Thorne²³,
 E. Thrane⁴¹, A. Thüring^{4,11}, C. Titsler²¹, K. V. Tokmakov⁵²,
 C. Torres³, C. I. Torrie^{1,2}, G. Traylor³, M. Trias⁴⁹, K. Tseng⁶,
 D. Ugolini⁶⁰, K. Urbanek⁶, H. Vahlbruch^{4,11}, M. Vallisneri²³,
 A. A. van Veggel², S. Vass¹, R. Vaulin¹⁵, A. Vecchio¹⁰,
 J. Veitch³⁶, P. J. Veitch⁴⁸, C. Veltkamp^{4,11}, A. E. Villar¹,
 S. Vitale⁴⁶, C. Vorvick⁷, S. P. Vyatchanin²⁰, A. Wade³⁴,
 S. J. Waldman¹⁵, L. Wallace¹, Y. Wan³¹, A. Wanner^{4,11},
 X. Wang³¹, Z. Wang³¹, R. L. Ward^{1,b}, P. Wei²⁵, M. Weinert^{4,11},
 A. J. Weinstein¹, R. Weiss¹⁵, L. Wen^{16,23}, S. Wen³,
 P. Wessels^{4,11}, M. West²⁵, T. Westphal^{4,11}, K. Wette^{4,11},
 J. T. Whelan⁶¹, S. E. Whitcomb^{1,16}, D. White³⁸, B. F. Whiting⁸,
 C. Wilkinson⁷, P. A. Willems¹, H. R. Williams²¹, L. Williams⁸,
 B. Willke^{4,11}, L. Winkelmann^{4,11}, W. Winkler^{4,11}, C. C. Wipf¹⁵,
 H. Wittel^{4,11}, A. G. Wiseman⁵, G. Woan², R. Wooley³,
 J. Worden⁷, J. Yablon⁴³, I. Yakushin³, K. Yamamoto^{4,11},
 H. Yamamoto¹, H. Yang²³, D. Yeaton-Massey¹, S. Yoshida⁶²,
 P. Yu⁵, M. Zanolin⁴⁶, F. Zhang³¹, L. Zhang¹, W. Zhang³¹,
 Z. Zhang¹⁶, C. Zhao¹⁶, N. Zotov⁵⁶, M. E. Zucker¹⁵, J. Zweizig¹

¹LIGO - California Institute of Technology, Pasadena, CA 91125, USA

²SUPA, University of Glasgow, Glasgow, G12 8QQ, United Kingdom

³LIGO - Livingston Observatory, Livingston, LA 70754, USA

⁴Albert-Einstein-Institut, Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik, D-30167 Hannover, Germany

⁵University of Wisconsin–Milwaukee, Milwaukee, WI 53201, USA

⁶Stanford University, Stanford, CA 94305, USA

⁷LIGO - Hanford Observatory, Richland, WA 99352, USA

⁸University of Florida, Gainesville, FL 32611, USA

⁹Louisiana State University, Baton Rouge, LA 70803, USA

¹⁰University of Birmingham, Birmingham, B15 2TT, United Kingdom

¹¹Leibniz Universität Hannover, D-30167 Hannover, Germany

¹²Albert-Einstein-Institut, Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik, D-14476 Golm, Germany

- ¹³Montana State University, Bozeman, MT 59717, USA
¹⁴Carleton College, Northfield, MN 55057, USA
¹⁵LIGO - Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA 02139, USA
¹⁶University of Western Australia, Crawley, WA 6009, Australia
¹⁷Columbia University, New York, NY 10027, USA
¹⁸The University of Texas at Brownsville and Texas Southmost College, Brownsville, TX 78520, USA
¹⁹San Jose State University, San Jose, CA 95192, USA
²⁰Moscow State University, Moscow, 119992, Russia
²¹The Pennsylvania State University, University Park, PA 16802, USA
²²Washington State University, Pullman, WA 99164, USA
²³Caltech-CaRT, Pasadena, CA 91125, USA
²⁴University of Oregon, Eugene, OR 97403, USA
²⁵Syracuse University, Syracuse, NY 13244, USA
²⁶Rutherford Appleton Laboratory, HSIC, Chilton, Didcot, Oxon OX11 0QX United Kingdom
²⁷University of Maryland, College Park, MD 20742, USA
²⁸University of Massachusetts - Amherst, Amherst, MA 01003, USA
²⁹The University of Mississippi, University, MS 38677, USA
³⁰NASA/Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD 20771, USA
³¹Tsinghua University, Beijing 100084, China
³²University of Michigan, Ann Arbor, MI 48109, USA
³³Charles Sturt University, Wagga Wagga, NSW 2678, Australia
³⁴Australian National University, Canberra, ACT 0200, Australia
³⁵The University of Melbourne, Parkville, VIC 3010, Australia
³⁶Cardiff University, Cardiff, CF24 3AA, United Kingdom
³⁷University of Salerno, I-84084 Fisciano (Salerno), Italy and INFN (Sezione di Napoli), Italy
³⁸The University of Sheffield, Sheffield S10 2TN, United Kingdom
³⁹Inter-University Centre for Astronomy and Astrophysics, Pune - 411007, India
⁴⁰Southern University and A&M College, Baton Rouge, LA 70813, USA
⁴¹University of Minnesota, Minneapolis, MN 55455, USA
⁴²California Institute of Technology, Pasadena, CA 91125, USA
⁴³Northwestern University, Evanston, IL 60208, USA
⁴⁴The University of Texas at Austin, Austin, TX 78712, USA
⁴⁵Eötvös Loránd University, Budapest, 1117 Hungary
⁴⁶Embry-Riddle Aeronautical University, Prescott, AZ 86301, USA
⁴⁷National Astronomical Observatory of Japan, Tokyo 181-8588, Japan
⁴⁸University of Adelaide, Adelaide, SA 5005, Australia
⁴⁹Universitat de les Illes Balears, E-07122 Palma de Mallorca, Spain
⁵⁰University of Southampton, Southampton, SO17 1BJ, United Kingdom
⁵¹Institute of Applied Physics, Nizhny Novgorod, 603950, Russia
⁵²University of Strathclyde, Glasgow, G1 1XQ, United Kingdom
⁵³University of Rochester, Rochester, NY 14627, USA
⁵⁴Hobart and William Smith Colleges, Geneva, NY 14456, USA
⁵⁵University of Sannio at Benevento, I-82100 Benevento, Italy and INFN (Sezione di Napoli), Italy
⁵⁶Louisiana Tech University, Ruston, LA 71272, USA
⁵⁷Andrews University, Berrien Springs, MI 49104, USA
⁵⁸McNeese State University, Lake Charles, LA 70609, USA
⁵⁹California State University Fullerton, Fullerton CA 92831, USA

⁶⁰Trinity University, San Antonio, TX 78212, USA

⁶¹Rochester Institute of Technology, Rochester, NY 14623, USA

⁶²Southeastern Louisiana University, Hammond, LA 70402, USA

⁶³University of Washington, Seattle, WA, 98195-4290, USA

⁶⁴Canadian Institute for Theoretical Astrophysics, University of Toronto, Toronto, Ontario, M5S 3H8, Canada

⁶⁵Pusan National University, Busan 609-735, Korea

⁶⁶Lund Observatory, Box 43, SE-221 00, Lund, Sweden

⁶⁷Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

⁶⁸Korea Institute of Science and Technology Information, Daejeon 305-806, Korea

⁶⁹National Institute for Mathematical Sciences, Daejeon 305-390, Korea

⁷⁰Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

⁷¹University of Szeged, 6720 Szeged, Dóm tér 9, Hungary

⁷²Perimeter Institute for Theoretical Physics, Ontario, Canada, N2L 2Y5

^a now at the Department of Physics and Astrophysics, University of Delhi, Delhi 110007, India

^b now at Laboratoire APC, 75205 Paris, Cedex 13, France