



# Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger

B. P. Abbott *et al.*\*

(LIGO Collaboration, C. D. O'Connell, et al., C. D. O'Connell, et al.)  
(21 January 2016; revised 11 February 2016)

On September 14, 2015 at 09:50:45 UTC, the LIGO gravitational-wave detectors observed a transient signal, GW150914, with a peak strain of  $h \approx 1.0 \times 10^{-21}$  at a frequency of  $f \approx 350$  Hz. The signal is consistent with the inspiral and merger of a pair of black holes of masses  $m_1 = 36_{-4}^{+5} M_\odot$  and  $m_2 = 29_{-4} M_\odot$ , which merged to form a final black hole of mass  $m_f = 62_{-4} M_\odot$ . The final black hole is spinning with dimensionless spin parameter  $a_f = 0.90_{-0.04}^{+0.03}$ . The signal is consistent with the merger of two black holes of masses  $m_1 = 3.0_{-0.5}^{+0.5} M_\odot c^2$  and  $m_2 = 3.0_{-0.5}^{+0.5} M_\odot c^2$ . All parameters are measured to within 90% confidence. This is the first direct observation of gravitational waves and the first observation of a binary black hole merger.

DOI: 10.1103/PhysRevLett.116.061102

## I. INTRODUCTION

In 1916, Albert Einstein predicted the existence of gravitational waves as a consequence of his general theory of relativity [1]. The first direct observation of gravitational waves was made by the LIGO Scientific Collaboration and the Virgo Collaboration on September 14, 2015 [2]. This paper reports the observation of a binary black hole merger, GW150914, on September 14, 2015. The signal is consistent with the inspiral and merger of a pair of black holes of masses  $m_1 = 36_{-4}^{+5} M_\odot$  and  $m_2 = 29_{-4} M_\odot$ , which merged to form a final black hole of mass  $m_f = 62_{-4} M_\odot$ . The final black hole is spinning with dimensionless spin parameter  $a_f = 0.90_{-0.04}^{+0.03}$ . The signal is consistent with the merger of two black holes of masses  $m_1 = 3.0_{-0.5}^{+0.5} M_\odot c^2$  and  $m_2 = 3.0_{-0.5}^{+0.5} M_\odot c^2$ . All parameters are measured to within 90% confidence. This is the first direct observation of gravitational waves and the first observation of a binary black hole merger.

Published for SISSA by Springer  
Received: February 11, 2016  
Accepted: February 20, 2016  
Published: February 20, 2016  
PAPER FOR THE RECORD



(N) f=24 45.

O 1 LIGO  
 G 150914.T  
 GEO 600, f= 1  
 f= 600, r<sup>2</sup> (90%  
 bl ) 39,46.

T b f, f=G 150914  
 b l k l  
 b l u, b f= l k  
 l .O 0.2, f  
 u l b 8 l f= u 35 150 H,  
 u l u u u T u l b l  
 l f= l f= b  
 u, m<sub>1</sub> m<sub>2</sub>, l l u A  
 l f= l b  
 u 11

$$M = \frac{m_1 m_2^{3/5}}{m_1^{1/5} m_2^{1/5}} \frac{c^3}{G} \left[ \frac{5}{96} \pi^{-8/3} f^{-11/3} \right]^{3/5}$$

f f b f, u  
 G c l

f= l .E u, f f= u Fr. 1,

b u f=M ≈ 30M<sub>⊙</sub>, u l

T b, u f= l f= u  
 b u 2GM/c<sup>2</sup> ≥ 210 km.T

b l f= f= 75 H ( f= l  
 f= ) b u b l

u ; l N u b  
 f= l b l ≈ 350 km . A f=

u, l b l k l b  
 u l l u, f= T

l b l k l l k b u  
 u b l f= f= 75 H

.F u, f= f= u f=

k u ll f= b l k

l l f= l K f= k

B l, l l l f=

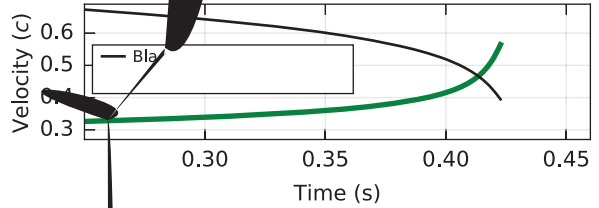
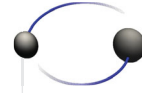
G 150914; Fr. 2 l l f= u

### III. DETECTORS

G l- u l u l l, l

l l u l u l, f= u

T LIGO l A LIGO



Fr. 3)

l f= l u .E u f= u  
 b u u, u b

L<sub>x</sub> L<sub>y</sub> L 4 km . A l f= -

ΔL t δL<sub>x</sub> - δL<sub>y</sub> h t L, h

T f= 11 l

b l f= l

T f= u l

b M l f= u .F, u u

u l f= f= l l l

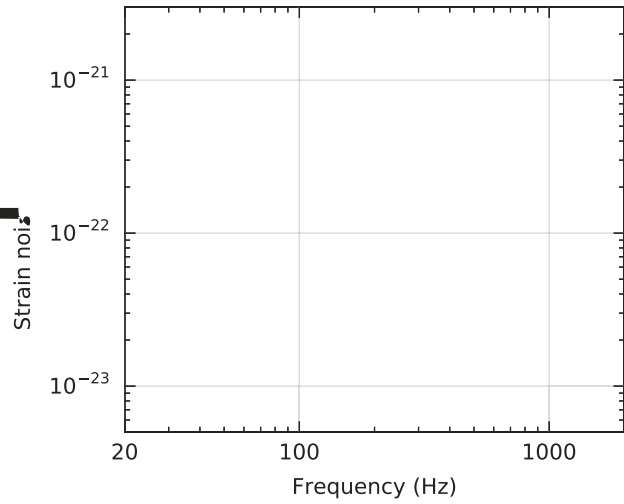
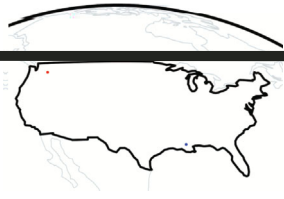
b f= f= 300 48. ll

u l f= l l f= u

49,50 : 20 f= l 700

b u l, f= T, ll

100 k l l u l l



b f = 1064 m N : AG 1  
 b l m l r , f = , b m m  
 53,54 . T  
 T f = m  
 m f = m l r l , b  
 m m r m f = ( m l  
 r f = m ) . H r m l  
 m m l m m ( l  
 f = m ) r m l m l  
 ( m f = m ) . E m  
 f = l r f = m l = r l m m 56 ,  
 b m m l l f = m 57 .  
 T m m l m 10  
 f = m r f = l f = m r m f = f = r -  
 b 10 H . T m l m m b r  
 l - m l - m l m m

: m 40- $\mu$  f = l r b  
 l - l l m l m 58,59 ,  
 f = l f = b f = m r b 60 .  
 T m m l m m , l l m  
 m l m m m m b  
 l f = m l m m . T m l  
 f = m b l r m r ,  
 m 1.2- $\mu$  m r b m m m  
 b m m b l 1  $\mu$ P .  
 l m l m m  
 61 m m m l r m f = l  
 m 62 . T m l b  
 b m m m m m m b  
 f = m m l l b m l b m  
 63 . T l b m b l m m (1 $\sigma$ ) f =  
 l 10% m l r 10  
 m l m m l b l  
 l f = m . T l m  
 l b l l b , f = m  
 l l r m m f = m l l





F b l , l  
 l u 41. A ff= 73  
 u u f=ll + 74 G 150914  
 f=ll l u

B. Binary coalescence search

T l u f= u  
 b u l u f= u l 99M<sub>⊙</sub>,  
 l u l 100M<sub>⊙</sub>, u l  
 0.99 44. T u l u l u l  
 4M<sub>⊙</sub>, ff= - b f= u l u 75,  
 ub l f= u -N  
 11,76 l f= u b l k l b  
 u l l l T f= u u l 77,78  
 u f= u , b l  
 b l l u u u, b l  
 u l , l , ff= l u  
 u l u f= u  
 G 150914 44. A u l 250 000 u l  
 f= u u u f= l  
 T l l u f= l l  
 ρ f f= u l f= f  
 u u f=ρ f u f= l f= l  
 79-81. F u u u l l  
 χ<sub>r</sub><sup>2</sup> l ff=  
 f= b u u l  
 82. l f=χ<sub>r</sub><sup>2</sup> l  
 u l f=χ<sub>r</sub><sup>2</sup> l ρ f  
 f= ρ /{ 1 χ<sub>r</sub><sup>2</sup> 3 /2 1/6 83,84 T f= l  
 f= b l u  
 u u l T 15-u u f= u  
 10-u u l 5 u f= u b  
 l u f= k l. k b  
 u u ρ<sub>c</sub> f= ρ<sub>c</sub> u b 45.  
 T b k l f= N  
 u u f= u f= f  
 ~10<sup>7</sup> u b k l u  
 l 608 000  
 T f= b k l  
 l l b k l  
 l l b u l l  
 T l f= F, 4 b k l f=  
 l f= G 150914. T G 150914  
 l f=ρ<sub>c</sub> 23.6 l b k l  
 , l b l b l f= l  
 l u .A l b l  
 203 000 T l f= l l u b b l  
 < 2 10<sup>-7</sup>, 5.1σ.  
 A u f= l l  
 ff= u f= u f= f  
 85,86, l G 150914 l  
 l u f=

TABLE I u f= G 150914.  
 u l 90% b l l l  
 , u f= u l f=  
 ff= f= u u l. M  
 f= u ; f= u u l l b (l z)  
 90. T f= u u l 91.

P u b l k l u	36 <sup>5</sup> <sub>-4</sub> M <sub>⊙</sub>
b l k l u	29 <sup>4</sup> <sub>-4</sub> M <sub>⊙</sub>
F l b l k l u	62 <sup>4</sup> <sub>-4</sub> M <sub>⊙</sub>
F l b l k l	0.67 <sup>0.05</sup> <sub>-0.07</sub>
L u	410 <sup>160</sup> <sub>-180</sub> M
f= z	0.09 <sup>0.03</sup> <sub>-0.04</sub>

f= l f= l  
 l f= G 150914, b k  
 u f= f  
 u b f= T  
 b k l b l l l  
 l f= F, 4. B u  
 f= f= l l u f= l 2.3  
 P f= l l u b b l f= 0.02.  
 f= u l f= f  
 l l b b l k l  
 u 44.

VI. SOURCE DISCUSSION

T u f= l u f=  
 l, b l u u f=  
 u T f= u l l  
 l b u l 77,78,87,88, u f=  
 l f= u l f= u  
 B l b  
 f= u 89 T l f= l u  
 f= l , f= f  
 T b l l. T f= u b l k l  
 b < 0.7 (90% b l l)  
 u u ll l f= l  
 k l T u  
 l 39. T u l  
 l f= ff= f= u u l.  
 f= f= u l u l f= b b l k  
 l u 92,93, u f= u  
 f= f= l b l k l, l  
 l k l l  
 39. T u l  
 l 3.0<sup>0.5</sup><sub>-0.5</sub>M<sub>⊙</sub>c<sup>2</sup>. T u  
 k l l f= 3.6<sup>0.5</sup><sub>-0.4</sub> 10<sup>56</sup> /,  
 l 200<sup>30</sup><sub>-20</sub>M<sub>⊙</sub>c<sup>2</sup> /  
 l l b f= u u  
 G 150914 b





T... I... & E... B  
 (E B), I... M... f=H... D... I...  
 I... M... E...  
 C... C... II... 'E...  
 C... C... II... 'E... G I...  
 f= G... I... III... B I...  
 N... I... C... f= P I... E...  
 C... I... F...  
 C... I... P... All...  
 H... f= F... (J KA), L...  
 I... f= O... (LIO), N... I...  
 F... f=K... I... C... P...  
 f=O... M... f=E... D... I...  
 I... N... I... E...  
 C... I... f=C... C... I... f=  
 A... B... I... M... f=  
 T... I... I... F... f=B...  
 L... T... C...  
 M... f=T... (MOT), T...  
 K I F... T... f=I... k...  
 f=N F, T FC, MP, INFN, CN  
 f=N... G... f=...  
 I... T... b...  
 LIGO-P150914 I -0015A-16.

1 A. E... b... K. P... A<sub>k</sub>... 1, 688 (1916).  
 2 A. E... b... K. P... A<sub>k</sub>... 1, 154 (1918).  
 3 P... I... G... I... G... 43, 3289 (2011).  
 4 K... I... b... K. P... A<sub>k</sub>... 1, 189 (1916).  
 5 D. F... P... 110, 965 (1958).  
 6 M. D. K... P... 119, 1743 (1960).  
 7 P. K... P... L... 11, 237 (1963).  
 8 C... N... (L...) 227, 936 (1970).  
 9 H. P... A... J. 170, L105 (1971).  
 10 C... L. D... I... P... A 344, 441 (1975).  
 11 L. B... T... D... B... I... C. M... II... A. G... P... L... 74, 3515 (1995).  
 12 L. B... L... I... 17, 2 (2014).  
 13 A. B... T... D... P... D 59, 084006 (1999).  
 14 F. P... P... L... 95, 121101 (2005).  
 15 M. C... II, C. O. L..., P. M..., Z..., P... L... 96, 111101 (2006).  
 16 J. G. B... J. C... II, D.-I. C..., M. K..., J. M..., P... L... 96, 111102 (2006).  
 17 B. L. b... P. M..., N... (L...) 235, 37 (1972).  
 18 C. T. B... I..., N... (L...) 240, 124 (1972).  
 19 J. C... P. G. J... 183, 223 (2014).  
 20 A. H... J. H. T... I..., A... J. 195, L51 (1975).

21 J. H. T... J. M. b..., A... J. 253, 908 (1982).  
 22 P... K. T..., A... A... A... 10, 335 (1972).  
 23 J. b..., P... 117, 306 (1960).  
 24 P. A... et al., P... D 82, 022003 (2010).  
 25 M. E. G... I. P..., P... JEP 16, 433 (1962).  
 26 G. E. M..., L... M II..., L. F..., A... I. O... 10, 2495 (1971).  
 27 E... II... I b b..., Q... I... f= L b... f= E... M... N... 105, 1972, // ... /LIGO-P720002/ | b | /...  
 28 P. D..., G a<sup>y</sup> t a<sup>y</sup> a R a d a t..., b N. D... T. P... (N -H II..., A... 1983), ... 321.  
 29 P. D..., F. J. b, K. T..., L... I... f= G... I- Ob... (LIGO) T... I..., 1989, // ... /LIGO-M890001/ | b | /...  
 30 A. Ab... et al., 256, 325 (1992).  
 31 A. B II..., A. G... et al., P... T... I... N... I -0517A-15, 1989, // ... / I? =11247.  
 32 J. H... et al., P... I f= G... -B... f=... I..., MPQT... 147, N... G... D/137/JH(89), 1989, // ... /114852.  
 33 J. A... et al., C I... I Q... I... G... 32, 074001 (2015).  
 34 F. A... et al., C I... I Q... I... G... 32, 024001 (2015).  
 35 C... I... et al., C I... I Q... I... G... 31, 224002 (2014).  
 36 A..., M... K..., M. A..., O. M... T... D. T..., H... P... D 88, 043007 (2013).  
 37 T... f=... :BBH:0305, | b | f=... // | b | k... I... / f=...  
 38 A. H. M... et al., P... L... 111, 241104 (2013).  
 39 B. Abb... et al., :1602.03840.  
 40 N. J. C... T... B. L... b..., C I... I Q... I... G... 32, 135012 (2015).  
 41 B. Abb... et al., :1602.03843.  
 42 C..., L. B... | b |, G. M..., E. K..., C I... I Q... I... G... 21, 1809 (2004).  
 43 K... k... et al., P... D 93, 042004 (2016).  
 44 B. Abb... et al., :1602.03839.  
 45 A... et al., :1508.02357.  
 46 B. Abb... et al., // ... /LIGO-P1500227/ | b | /...  
 47 B. Abb... et al., :1602.03838.  
 48 P. D..., T... e D e t e c t f G a<sup>y</sup> t a<sup>y</sup> a W a<sup>y</sup> e..., b D. G. B... I... (C... P..., C... E... I..., 1991).  
 49 P. D... et al., Q a t O t c, E x e e t a G a<sup>y</sup> t y, a d M e a e e t T e y, b P. M... M. O... II, N A O A I..., B... I. 94 (P... P..., N... k... 1983), ... 503-514.

50 . . . . . ( . . . . . ).

51 B.J. M . . . . . P . . . . . D **38**, 2317 (1988).

52 J. M . . . . ., K.A. . . . . , P.G. N . . . . ., J.M. C . . . . ., . . . . ., A. . . . ., . . . . ., K. D . . . . ., P . . . . . L . . . . . A **175**, 273 (1993).

53 P. K . . . . . *et al.*, O . . . . . E . . . . . **20**, 10617 (2012).

54 C.L. M . . . . . *et al.*, . . . . . I . . . . . **87**, 014502 (2016).

55 T.T. F . . . . . *et al.*, C l . . . . . I Q . . . . . **29**, 065005 (2012).

56 . . . . . M. A . . . . . *et al.*, C l . . . . . I Q . . . . . **29**, 235004 (2012).

57 F. M . . . . . *et al.*, C l . . . . . I Q . . . . . **32**, 185003 (2015).

58 G.M. H . . . . . *et al.*, C l . . . . . I Q . . . . . **24**, 405 (2007).

59 M. G . . . . . *et al.*, P . . . . . D **93**, 012007 (2016).

60 A. . . . . G . . . . . *et al.*, C l . . . . . I Q . . . . . **29**, 035003 (2012).

61 A. . . . . I . . . . . *et al.*, C l . . . . . I Q . . . . . **31**, 245010 (2014).

62 L. B . . . . ., M. E . . . . ., P. F . . . . . I, C l . . . . . I Q . . . . . **27**, 084026 (2010).

63 B. **Abb** *et al.*, :1602.03845.

64 E. G . . . . . *et al.*, *G a' y' t a' t a' W a' v e : P c e e d g , f t e e s t E d a d A a d C f e e c e, A a d, N e w Y*, 2009; E. G . . . . . L . . . . ., J., C l . . . . . I Q . . . . . **27**, 084024 (2010).

65 A. **H** . . . . ., M. . . . . F . . . . . I, . . . . . F . . . . . I, G. G . . . . . I, K. K . . . . . **b**, J. . . . . **u**, J. B . . . . ., M. C . . . . ., C l . . . . . I Q . . . . . **32**, 035017 (2015).

66 I. B . . . . ., B . . . . . M. F . . . . ., J. H . . . . . F . . . . ., M . . . . . **k**, Z. M . . . . . **k**, Z. . . . ., P . . . . . **b**, . . . . . D . . . . ., C l . . . . . I Q . . . . . **27**, 084025 (2010).

67 J. A . . . . . *et al.*, C l . . . . . I Q . . . . . **32**, 115012 (2015).

68 J. A . . . . . *et al.*, P . . . . . D **87**, 022002 (2013).

69 B. **Abb** *et al.*, :1602.03844.

70 L. N . . . . . *et al.*, C l . . . . . I Q . . . . . **32**, 245005 (2015).

71 L. L . . . . ., A . . . . . A . . . . . I . . . . . **2**, 887 (2008).

72 . . . . . K l . . . . . **k**, I . . . . . **k**, A. M . . . . ., G. M . . . . . I . . . . . **k**, C l . . . . . I Q . . . . . **25**, 114029 (2008).

73 . . . . . L . . . . ., . . . . . I, . . . . . E . . . . . **k** E. K . . . . ., . . . . . F. **b**, :1511.05955.

74 J. K . . . . ., T. B. L . . . . . **b**, N. C . . . . ., M. M . . . . . I . . . . ., E . . . . . **k**, F . . . . . I . . . . . **u**, M. D . . . . ., G. . . . ., K f . . . . . **u**, P . . . . . D **93**, 022002 (2016).

75 A. B . . . . . T. D . . . . . **u**, P . . . . . D **62**, 064015 (2000).

76 L. B l . . . . ., T. D . . . . . **u**, G. E . . . . . -F . . . . ., B . . . . . I . . . . ., P . . . . . L . . . . . **93**, 091101 (2004).

77 A. T . . . . . *et al.*, P . . . . . D **89**, 061502 (2014).

78 M. P . . . . ., C l . . . . . I Q . . . . . **31**, 195010 (2014).

79 B. A l l . . . . ., G. A . . . . ., P . . . . . B . . . . ., D. A. B . . . . ., J. D. E. C . . . . ., P . . . . . D **85**, 122006 (2012).

80 B. . . . . *et al.*, . . . . . D . . . . ., P . . . . . D **44**, 3819 (1991).

81 B.J. O . . . . . B. . . . . **k**, P . . . . . D **60**, 022002 (1999).

82 B. A l l . . . . ., P . . . . . D **71**, 062001 (2005).

83 J. **Ab** . . . . . *et al.*, P . . . . . D **85**, 082002 (2012).

84 . . . . . B **b** *et al.*, P . . . . . D **87**, 024033 (2013).

85 K. C . . . . . *et al.*, A . . . . . J. **748**, 136 (2012).

86 . . . . . P . . . . ., P. M . . . . ., P. A . . . . ., K. C . . . . ., N. F . . . . . I, M. A. F . . . . ., C. H . . . . ., A. J. . . . ., J. T . . . . . I, P . . . . . D **89**, 024003 (2014).

87 M. H . . . . ., P . . . . ., A. B . . . . ., L. H . . . . . I, . . . . . H . . . . ., F. O . . . . ., G. P . . . . ., M. P . . . . ., P . . . . . L . . . . . **113**, 151101 (2014).

88 . . . . . K . . . . ., H . . . . ., M. H . . . . . **u**, F. O . . . . ., M. P . . . . ., J . . . . . F . . . . ., A. B . . . . ., P . . . . . D **93**, 044007 (2016).

89 J. . . . . *et al.*, P . . . . . D **91**, 042003 (2015).

90 A. K . . . . . I . . . . . **k**, B. F . . . . ., G . . . . . I . . . . . G . . . . . **19**, 1163 (1987).

91 P. A . . . . . A . . . . . *et al.*, :1502.01589.

92 J. H . . . . . I, C. O. L . . . . ., Z l . . . . ., P . . . . . D **90**, 104004 (2014).

93 . . . . . H . . . . ., M. H . . . . . **u**, M. P . . . . ., F. O . . . . ., J . . . . . F . . . . ., A. B . . . . ., P . . . . . D **93**, 044006 (2016).

94 B. **Abb** *et al.*, :1602.03841.

95 C. K. M . . . . ., K. G. A . . . . ., B . . . . . I . . . . ., B . . . . . **k**, P . . . . . D **82**, 064010 (2010).

96 T. G. F. L . . . . ., D I P . . . . . I, C . . . . . D . . . . . B . . . . . **k** M. A . . . . ., J . . . . ., K. G . . . . . T . . . . ., A . . . . ., P . . . . . D **85**, 082003 (2012).

97 C. M . . . . . I l l, P . . . . . D **57**, 2061 (1998).

98 C. T . . . . . **u**, J. P. B . . . . ., H . . . . . I l l, E. M. . . . ., P . . . . . L . . . . . **61**, 1159 (1988).

99 L . . . . . F . . . . . P. J . . . . ., P . . . . . D **65**, 044022 (2002).

100 A . . . . . G I . . . . . **b** M. M. N . . . . ., P . . . . . D **9**, 1119 (1974).

101 . . . . . C . . . . ., G . . . . ., E . . . . . P . . . . . J. C **74**, 3159 (2014).

102 A. T . . . . . **k** L . . . . . I . . . . ., N . . . . . I f . . . . . **27**, 70 (1973).

103 . . . . . M. L . . . . ., K. A. P . . . . ., M. E. P . . . . . **k**, M . . . . . N . . . . . A . . . . . **288**, 245 (1997).

104 K. B I . . . . . **k**, D. H I . . . . ., O' . . . . ., T. B l **k** E. B . . . . ., C. F . . . . ., M. D . . . . . **k** :1510.04615 A . . . . . J. ( **b** . . . . . ).

105 . . . . . L. H . . . . ., N . . . . . ( L . . . . . ) **364**, 423 (1993).

106 . . . . . F. P . . . . . Z . . . . . L . . . . . M M I l l, A . . . . . J. L . . . . . **528**, L17 (2000).

107 C. L . . . . ., M. M . . . . ., B. P . . . . . **b** **u**, C . . . . ., C. J. H . . . . ., F. A . . . . ., P . . . . . L . . . . . **115**, 051101 (2015).

108 K. B I . . . . . **k**, T. B l **k** C. L. F . . . . ., A . . . . ., F . . . . . I . . . . ., J . . . . . **k** J . . . . . H I . . . . ., A . . . . . J. **714**, 1217 (2010).

109 M . . . . ., M. M . . . . . I l l, A. B . . . . ., M . . . . . N . . . . . A . . . . . **451**, 4086 (2015).

110 B. **Abb** *et al.*, A . . . . . J. **818**, L22 (2016).

111 B. **Abb** *et al.*, :1602.03842.

112 C. K  $\mu$ , K I  $\nu$ , D. L  $\mu$ , A  $\nu$ . J. 584, 985 (2009).

113 M. F  $\nu$ , J. G  $\nu$ , I. M  $\nu$ , C. G I  $\nu$ , P  $\nu$ . D 91, 023005 (2015).

114 J. Ab  $\nu$  et al., Cl I Q  $\nu$  G  $\nu$  27, 173001 (2010).

115 B. Ab  $\nu$  et al., :1602.03847.

116 LIGO Q C (LO C), // / 150914/.

117 B. P. Ab  $\nu$  et al. (LIGO f= C II b), L  $\nu$  19, 1 (2016).

118 B. I  $\nu$  et al., LIGO-I T  $\nu$  N. LIGO-M1100296, 2011, // /LIGO-M1100296/



B. P. Ab  $\nu$ , <sup>1</sup> Ab  $\nu$ , T. D. Ab  $\nu$ , <sup>2</sup> M. Ab  $\nu$ , <sup>1</sup> F. A  $\nu$ , <sup>3,4</sup> K. A  $\nu$ , <sup>5</sup> C. A  $\nu$ , <sup>6</sup> T. A  $\nu$ , <sup>7</sup> P. A  $\nu$ , <sup>3</sup>  
 $\nu$ , A  $\nu$ , <sup>1</sup> B. A  $\nu$ , <sup>8</sup> C. A  $\nu$ , <sup>8</sup> M. A  $\nu$ , <sup>9</sup> K. A  $\nu$ , <sup>9</sup> N. A  $\nu$ , <sup>10</sup> O. D. A  $\nu$ , <sup>11</sup> L. A  $\nu$ , <sup>12,13</sup>  
A. A  $\nu$ , <sup>14</sup> P. A  $\nu$ , <sup>15</sup> B. A  $\nu$ , <sup>8,16,17</sup> A. A  $\nu$ , <sup>18,19</sup> P. A. A  $\nu$ , <sup>20</sup> B. A  $\nu$ , <sup>1</sup> G. A  $\nu$ , <sup>16</sup> K. A  $\nu$ , <sup>1</sup> M. A. A  $\nu$ , <sup>5</sup>  
M. C. A  $\nu$ , <sup>1</sup> C. C. A  $\nu$ , <sup>21</sup> J. A  $\nu$ , <sup>22</sup> N. A  $\nu$ , <sup>23</sup> K. G. A  $\nu$ , <sup>24</sup> A  $\nu$ , <sup>25,13</sup> G. A  $\nu$ , <sup>26</sup> M. A  $\nu$ , <sup>27</sup>  
M. A  $\nu$ , <sup>6</sup> P. A  $\nu$ , <sup>28</sup> P. A  $\nu$ , <sup>8</sup> C. A  $\nu$ , <sup>8</sup> B  $\nu$ , <sup>29</sup> P. B  $\nu$ , <sup>30</sup> M. K. M. B  $\nu$ , <sup>9</sup> P. T. B  $\nu$ , <sup>31</sup>  
F. B I  $\nu$ , <sup>32,33</sup> G. B  $\nu$ , <sup>34</sup> B  $\nu$ , <sup>35</sup> J. C. B  $\nu$ , <sup>1</sup> E. B  $\nu$ , <sup>36</sup> B. C. B  $\nu$ , <sup>1</sup> D. B  $\nu$ , <sup>37</sup> F. B  $\nu$ , <sup>3,4</sup>  
B. B  $\nu$ , <sup>36</sup> L. B  $\nu$ , <sup>10</sup> M. B  $\nu$ , <sup>30</sup> D. B  $\nu$ , <sup>38</sup> J. B  $\nu$ , <sup>37</sup> M. A. B  $\nu$ , <sup>37</sup> I. B  $\nu$ , <sup>39</sup> B  $\nu$ , <sup>40</sup> A. B  $\nu$ , <sup>18,19</sup>  
J. C. B  $\nu$ , <sup>37</sup> C. B  $\nu$ , <sup>8</sup> B  $\nu$ , <sup>34</sup> M. B  $\nu$ , <sup>41,42</sup> B. B  $\nu$ , <sup>29</sup> M. B  $\nu$ , <sup>43</sup> C. B I  $\nu$ ,  $\nu$

A G<sup>15</sup> .G<sup>52,9</sup> J.A.G<sup>2,6</sup> K.D.G<sup>6</sup> A.G<sup>19</sup> K.G II<sup>97</sup> A.G I f<sub>k</sub><sup>36</sup> J . G I<sup>5</sup>  
E.G<sup>98</sup> .G<sup>5</sup> L.G<sup>54</sup> G.G I<sup>2</sup> J.M.G I C<sup>18,19</sup> A.G k<sup>99</sup> N.A.G<sup>36</sup>  
M.L.G<sup>49</sup> k<sup>49</sup> .E.G<sup>1</sup> M.G I<sup>34</sup> .G I<sup>7</sup> C.G f<sub>k</sub><sup>36</sup> P.B.G f<sub>k</sub><sup>62</sup> M.G<sup>65</sup> A.G<sup>36</sup> .G<sup>10</sup>  
C.G<sup>37</sup> G.G<sup>57,58</sup> A.C.G<sup>45</sup> J . G I<sup>100</sup> P.G<sup>52</sup> H.G<sup>8</sup> .G I<sup>29</sup> G.M.G<sup>57,58</sup>  
.G<sup>70</sup> A.G<sup>14</sup> M.K.G<sup>95</sup> K.E.G<sup>1</sup> E.K.G f<sub>k</sub><sup>1</sup> .G f<sub>k</sub><sup>98</sup> J.J.H k<sup>22</sup> B . H II<sup>56</sup>  
E.D.H II<sup>1</sup> G.H<sup>36</sup> M.H<sup>99</sup> M.M.H k<sup>8</sup> J.H k<sup>37</sup> C.H<sup>72</sup> M.D.H<sup>91</sup> J.H<sup>6</sup>  
T.H<sup>2</sup> J.H<sup>57,58</sup> G.M.H<sup>101</sup> I . H<sup>29</sup> M.J.H<sup>36</sup> M.T.H<sup>5</sup> C-J.H<sup>45</sup> K.H<sup>36</sup>  
J.H I<sup>102</sup> J.H f<sub>k</sub><sup>1</sup> A.H<sup>60</sup> M.C.H<sup>5,6</sup> G.H<sup>8</sup> H.H<sup>53</sup> P.H II<sup>23</sup> G.H<sup>34</sup>  
M.H<sup>36</sup> I . H<sup>36</sup> J.H<sup>36</sup> A . H<sup>11</sup> M.H<sup>8,17</sup> .H I<sup>36</sup> D.H<sup>103</sup> K.A.H<sup>1</sup> D.H f<sub>k</sub><sup>65</sup>  
.E.H II<sup>104</sup> K.H I<sup>6</sup> D.E.H I<sup>75</sup> P.H k<sup>91</sup> D.J.H k<sup>104</sup> J.H<sup>36</sup> E.A.H<sup>36</sup> E.J.H II<sup>51</sup>  
.M.H<sup>36</sup> H<sup>73</sup> E.A.H<sup>105,82</sup> D.H<sup>23</sup> B.H<sup>97</sup> .H<sup>66</sup> .H.H<sup>36</sup> T.H<sup>72</sup> -D<sup>6</sup> A.I<sup>72</sup>  
N.I k<sup>8</sup> D . I<sup>37</sup> I<sup>71</sup> H.N.I<sup>36</sup> J-M.I<sup>60</sup> M.I<sup>1</sup> G.I I<sup>22</sup> T.I<sup>10</sup> B . I<sup>15</sup> K.I<sup>37</sup>  
M.B.J b<sup>60</sup> T.J<sup>60</sup> H.J<sup>77</sup> K.J<sup>63</sup> P.J<sup>106</sup> J<sup>107</sup> F.J<sup>66</sup> .J<sup>2</sup>  
N.K.J -M D I<sup>15</sup> D.I.J<sup>26</sup> J<sup>36</sup> J.G.J k<sup>9</sup> L.J<sup>51</sup> K.H<sup>108</sup> C . K I<sup>24,91</sup>  
.K I<sup>82</sup> .K<sup>21</sup> G.K<sup>77</sup> J.B.K<sup>1</sup> .K k<sup>59</sup> M.K<sup>2,23,34</sup> E.K<sup>10</sup>  
.K<sup>6</sup> .K f<sub>k</sub><sup>17</sup> T.K I<sup>51</sup> K.K b<sup>37</sup> F.K<sup>8,17</sup> F.K f<sub>k</sub><sup>1</sup> M . K I<sup>69</sup> D.K I<sup>8,66</sup> D.B.K II<sup>35</sup>  
.K II<sup>1</sup> .K<sup>86</sup> D.G.K I<sup>8</sup> J . K<sup>83</sup> A.K I<sup>8</sup> F . K II<sup>49</sup> I.K<sup>12</sup> .K<sup>91</sup> Z.K<sup>95</sup>  
E.A.K<sup>109</sup> N.K b<sup>37</sup> C.K<sup>77</sup> J.K<sup>110</sup> K.K<sup>111</sup> N-G I<sup>77</sup> K<sup>40</sup> N<sup>40</sup> K<sup>110</sup> -M.K<sup>110</sup>  
E.J.K<sup>104</sup> P.J.K<sup>37</sup> D.L.K I<sup>6</sup> J . K I<sup>37</sup> L.K I b<sup>1</sup> .K I<sup>5</sup> M.K I b<sup>8</sup> K.K k<sup>2</sup>  
.K I<sup>9</sup> .K<sup>1</sup> A.K<sup>10</sup> .K<sup>16</sup> M.K b<sub>k</sub><sup>27</sup> Z.K<sup>1</sup> I.K I k<sup>44</sup> D.B.K k<sup>1</sup>  
.K<sup>1</sup> B.K<sup>8</sup> A.K<sup>112,113</sup> C.K<sup>17</sup> G.K<sup>8</sup> P.K<sup>69</sup> .K<sup>36</sup> L.K<sup>73</sup> A.K<sup>112</sup>  
P.K<sup>8</sup> B.D.L k<sup>35</sup> M.L<sup>37</sup> J.L<sup>102</sup> B.L<sup>40</sup> P.D.L k<sup>114</sup> A.L<sup>1</sup> C.L<sup>63,42</sup> P.L<sup>29,79,28</sup>  
.L<sup>36</sup> E.O.L b<sup>30,70</sup> C.H.L<sup>110</sup> H.K.L<sup>111</sup> H.M.L<sup>115</sup> K.L<sup>36</sup> A.L<sup>35</sup> M.L<sup>89,90</sup>  
J . L<sup>8</sup> N.L<sup>23</sup> N.L<sup>7</sup> .L<sup>114</sup> B.M.L<sup>37</sup> T.G.F.L<sup>1</sup> A.L b<sup>10</sup> T.B.L b<sup>116</sup>  
N.A.L k<sup>107</sup> J.L<sup>36</sup> A.L.L<sup>103</sup> L.T.L<sup>91</sup> J.E.L<sup>35</sup> M.L<sup>12,13</sup> .L<sup>117</sup>  
M.L<sup>6</sup> G.L<sup>58</sup> J.D.L<sup>8,17</sup> C.O.L<sup>102</sup> G.L I<sup>22</sup> H.L k<sup>17,8</sup> A.P.L<sup>8</sup> J.L<sup>78</sup>  
.L<sup>10</sup> M<sup>51</sup> T.M D I<sup>40</sup> B.M<sup>1</sup> M.M I<sup>8</sup> M.M I<sup>10</sup> D.M.M I<sup>2</sup> F.M<sup>1</sup>  
.M.M<sup>56</sup> M.M<sup>1</sup> E.M<sup>28</sup> I.M k<sup>117</sup> M I<sup>25,13</sup> N.M<sup>53</sup> I.M<sup>45</sup> M<sup>84</sup>  
.M<sup>36</sup> G.L.M II<sup>20</sup> M.M k<sup>16</sup> M.M<sup>34</sup> F.M<sup>118,33</sup> F.M<sup>7</sup> M k<sup>39</sup> Z.M k<sup>39</sup>  
A . M k<sup>40</sup> E.M<sup>1</sup> F.M II<sup>57,58</sup> L.M II<sup>53</sup> I . M<sup>36</sup> M.M<sup>5</sup> D . M<sup>1</sup> J.N.M<sup>1</sup>  
K.M<sup>10</sup> A.M<sup>7</sup> T.J.M<sup>35</sup> M.M<sup>36</sup> F.M<sup>10</sup> L.M<sup>39</sup> N.M I I<sup>10</sup>  
N.M<sup>56</sup> G.M I<sup>8</sup> M C<sup>37</sup> D.E.M C I II<sup>20</sup> M C<sup>6</sup> C.M G<sup>119</sup> G.M I<sup>1</sup>  
J.M I<sup>1</sup> D.J.M M I<sup>20</sup> T.M II<sup>105</sup> D.M<sup>72</sup> G.D.M<sup>29,8</sup> J.M<sup>9</sup> A.M I<sup>85</sup>  
G.M II<sup>37</sup> D.M<sup>8</sup> -G<sup>16</sup> E.M I<sup>37</sup> M.M<sup>53</sup> M k<sup>1</sup> C.M<sup>36</sup>  
C.M k<sup>72</sup> P.M.M<sup>84</sup> F.M<sup>28,79</sup> H.M<sup>45</sup> C.M I<sup>65</sup> H.M I<sup>45</sup> E.E.M k<sup>1</sup> L.M I<sup>67,4</sup>  
J.M II<sup>10</sup> M.M II<sup>31</sup> M<sup>13</sup> J.M<sup>29,8</sup> M<sup>121</sup> C.M<sup>15</sup> M<sup>14</sup> P.M f<sub>k</sub><sup>49</sup>  
G.M I k<sup>5</sup> M I<sup>10</sup> A.M<sup>19</sup> M.M<sup>34</sup> P.M<sup>10</sup> M.M<sup>57,38</sup> B.C.M<sup>88</sup>  
C.J.M<sup>122</sup> D.M<sup>37</sup> G.M<sup>37</sup> M<sup>83</sup> K.M<sup>8</sup> B.M<sup>7</sup> C.M.M -L<sup>45</sup> C.L.M II<sup>5</sup>  
G.M II<sup>5</sup> A . M<sup>91</sup> A<sup>15</sup> M<sup>16</sup> D.M k<sup>16</sup> M<sup>83</sup> N.M<sup>14</sup> A.M II<sup>6</sup>  
J.M<sup>104</sup> D.J.M<sup>39</sup> P.G.M<sup>36</sup> A.M<sup>5</sup> I.N<sup>25,13</sup> L.N<sup>79,28</sup> K.N<sup>123</sup> N I<sup>5</sup>  
K.N k<sup>103</sup> G.N I<sup>52,9</sup> M.N<sup>46,47</sup> A.N<sup>98</sup> G.N<sup>36</sup> T.T.N<sup>20</sup> A.B.N I<sup>8</sup> N<sup>52,9</sup>  
A.N<sup>8</sup> F.N<sup>34</sup> D.N I<sup>6</sup> M.E.N.N<sup>83</sup> L.K.N II<sup>35</sup> J.O b I<sup>37</sup> E.O<sup>16</sup> J.O'D II<sup>100</sup>  
E.O I k<sup>10</sup> G.H.O<sup>124</sup> J.J.O<sup>125</sup> H.O<sup>125</sup> F.O<sup>91</sup> M.O I<sup>66</sup> P.O<sup>8</sup> J.O<sup>6</sup> B.O' II<sup>6</sup>  
.O<sup>102</sup> C.D.O<sup>76</sup> D.J.O<sup>104</sup> .O<sup>5</sup> H.O<sup>6</sup> B.J.O<sup>71</sup> A.P<sup>108</sup> .A.P<sup>48</sup>  
J . P I<sup>59</sup> O.P I<sup>109</sup> C.P I<sup>28</sup> A.P I<sup>27</sup> H.P<sup>73</sup> .P<sup>62</sup> C.P k<sup>82</sup> F.P<sup>91</sup> B.C.P<sup>48</sup>  
F.P I<sup>34,19</sup> A.P I<sup>34</sup> M.A.P<sup>29,16,8</sup> H . P<sup>40</sup> P k<sup>6</sup> D.P<sup>36</sup> A.P I<sup>34</sup> .P<sup>18,19</sup>  
D.P I<sup>19</sup> B.P II<sup>18,19</sup> Z.P<sup>40</sup> B.L.P I<sup>36</sup> M.P<sup>1</sup> .P<sup>65</sup> L.P k<sup>35</sup> A.P I<sup>6</sup>  
.P<sup>126</sup> A.P<sup>1</sup> H.P f<sub>k</sub><sup>69,29</sup> M.P I<sup>36</sup> O.P<sup>79,28</sup> M.P<sup>53</sup> M.P k<sup>8</sup> F.P<sup>57,58</sup>  
.P<sup>87</sup> G.P II<sup>34</sup> L.P<sup>65</sup> I.M.P<sup>87</sup> M.P k<sup>36</sup> J.H.P I<sup>8</sup> .P<sup>18,19</sup> P.P I<sup>34</sup> A.P<sup>8</sup>

J. P. ll, <sup>36</sup> J. P. <sup>14</sup> P. <sup>91</sup> P. <sup>114</sup> T. P. <sup>84</sup> L. P. <sup>1</sup> M. P. <sup>1</sup> <sup>34</sup> M. P. <sup>87</sup>  
. P. <sup>29</sup> P. <sup>8</sup> G. A. P. <sup>89,90</sup> L. P. <sup>k</sup> <sup>49</sup> O. P. <sup>k</sup> <sup>8</sup> M. P. <sup>33</sup> P. P. <sup>28</sup> M. P. <sup>29</sup> H. Q. <sup>16</sup>  
J. Q. <sup>51</sup> Q. <sup>k</sup> <sup>83</sup> E. A. Q. <sup>1</sup> Q. <sup>59</sup> F. J. <sup>b</sup> <sup>37</sup> D. <sup>b</sup> <sup>1</sup> <sup>20</sup> H. <sup>k</sup> <sup>25</sup> P. <sup>ff</sup> <sup>54</sup>  
M. <sup>k</sup> <sup>48</sup> C. <sup>u</sup> <sup>83</sup> P. <sup>6</sup> <sup>79,28</sup> M. <sup>29</sup> <sup>18,19</sup> J. <sup>25</sup> <sup>22</sup>  
C. M. <sup>37</sup> T. <sup>ub</sup> <sup>53</sup> L. <sup>47</sup> <sup>50</sup> D. H. <sup>16</sup> H. <sup>120</sup> D. <sup>35</sup> F. <sup>79,28</sup> K. <sup>1</sup> <sup>98</sup>  
N. A. <sup>b</sup> <sup>1,36</sup> <sup>b</sup> <sup>36</sup> F. <sup>b</sup> <sup>23</sup> A. <sup>13</sup> L. <sup>ll</sup> <sup>7</sup> J. G. <sup>ll</sup> <sup>1</sup> J. <sup>u</sup> <sup>59</sup> J. D. <sup>u</sup> <sup>83</sup>  
G. <sup>u</sup> <sup>3,4</sup> <sup>120</sup> J. H. <sup>u</sup> <sup>6</sup> D. <sup>ñ</sup> <sup>k</sup> <sup>127,43</sup> A. <sup>8</sup> P. <sup>34</sup> K. <sup>37</sup>  
T. <sup>k</sup> <sup>37</sup> L. <sup>16</sup> L. <sup>l</sup> <sup>34</sup> M. <sup>l</sup> <sup>u</sup> <sup>108</sup> F. <sup>l</sup> <sup>u</sup> <sup>8</sup> A. <sup>u</sup> <sup>123</sup> L. <sup>uuu</sup> <sup>85,114</sup>  
L. M. <sup>u</sup> <sup>82</sup> E. J. <sup>1</sup> <sup>b</sup> <sup>37</sup> B. <sup>82</sup> G. H. <sup>1</sup> J. <sup>98,35</sup> B. <sup>1</sup> <sup>65</sup>  
B. <sup>k</sup> <sup>91</sup> P. <sup>1</sup> <sup>35</sup> O. <sup>1</sup> <sup>98</sup> L. <sup>37</sup> A. <sup>17</sup> P. <sup>1</sup> <sup>59</sup> <sup>ll</sup> <sup>8b</sup> J. <sup>u</sup> <sup>8</sup>  
P. <sup>u</sup> <sup>1,76</sup> <sup>b</sup> <sup>l</sup> <sup>27</sup> M. <sup>ff</sup> <sup>1</sup> <sup>59</sup> A. <sup>b</sup> <sup>k</sup> <sup>27</sup> E. <sup>b</sup> <sup>8</sup> D. <sup>8,17</sup> B. F. <sup>91,29</sup>  
J. <sup>36</sup> M. <sup>20</sup> D. <sup>ll</sup> <sup>6</sup> A. <sup>94</sup> D. <sup>34</sup> <sup>25,13</sup> A. <sup>109</sup> G. <sup>22</sup>  
A. <sup>52,9</sup> D. A. <sup>k</sup> <sup>20</sup> T. <sup>ff</sup> <sup>37</sup> <sup>59</sup> M. <sup>82</sup> M. <sup>1</sup> <sup>8</sup> Z. <sup>1</sup>  
B. <sup>40</sup> P. <sup>62</sup> A. <sup>16</sup> D. H. <sup>u</sup> <sup>k</sup> <sup>10</sup> D. M. <sup>u</sup> <sup>k</sup> <sup>63</sup> K. <sup>ll</sup> <sup>53,63</sup> <sup>u</sup> <sup>16</sup> D. <sup>37</sup>  
A. D. <sup>1</sup> <sup>11</sup> D. <sup>u</sup> <sup>k</sup> <sup>8</sup> A. <sup>1</sup> L. P. <sup>68</sup> A. <sup>29,8</sup> <sup>2</sup> A. <sup>12</sup> A. M. <sup>66</sup>  
B. J. J. <sup>1</sup> <sup>u</sup> <sup>1</sup> <sup>20</sup> J. <sup>u</sup> <sup>22</sup> M. <sup>u</sup> <sup>1</sup> N. D. <sup>u</sup> <sup>1</sup> J. E. <sup>u</sup> <sup>1</sup> E. J. <sup>125</sup> B. <sup>36</sup> F. <sup>47</sup>  
T. <sup>14</sup> A. K. <sup>95</sup> A. <sup>1</sup> <sup>39</sup> M. <sup>k</sup> <sup>8</sup> J. <sup>1</sup> <sup>36</sup> <sup>1</sup> <sup>36</sup> D. <sup>u</sup> <sup>8,17</sup>  
B. C. <sup>16</sup> P. <sup>45</sup> <sup>83</sup> K. A. <sup>36</sup> N. <sup>65</sup> G. <sup>57,58</sup> N. A. <sup>78</sup> <sup>49</sup>  
A. L. <sup>121</sup> T. Z. <sup>uuu</sup> <sup>1</sup> L. <sup>128</sup> <sup>85</sup> P. J. <sup>91</sup> B. L. <sup>k</sup> <sup>1</sup> <sup>34</sup> M. J. <sup>ñ</sup> <sup>97</sup>  
M. T. <sup>30</sup> D. T. <sup>l</sup> <sup>k</sup> <sup>59</sup> D. B. T. <sup>5</sup> M. T. <sup>96</sup> P. T. <sup>b</sup> <sup>8</sup> A. T. <sup>29</sup> T. <sup>1</sup> T. T. <sup>8</sup>  
M. P. T. <sup>ub</sup> <sup>1</sup> E. G. T. <sup>u</sup> <sup>45</sup> M. T. <sup>u</sup> <sup>6</sup> P. T. <sup>u</sup> <sup>37</sup> K. A. T. <sup>6</sup> K. T. <sup>76</sup> E. T. <sup>114</sup>  
T. <sup>12</sup> T. <sup>91</sup> K. T. <sup>u</sup> <sup>k</sup> <sup>107</sup> C. T. <sup>u</sup> <sup>86</sup> M. T. <sup>ll</sup> <sup>18,19</sup> C. T. <sup>83</sup> C. I. T. <sup>1</sup> D. T. <sup>45</sup>  
F. T. <sup>32,33</sup> G. T. <sup>1</sup> <sup>6</sup> D. T. <sup>ff</sup> <sup>21</sup> M. C. T. <sup>1</sup> <sup>89,90</sup> L. T. <sup>129,19</sup> M. T. <sup>u</sup> <sup>10</sup> M. T. <sup>53</sup> D. T. <sup>b</sup> <sup>83</sup>  
D. <sup>1</sup> <sup>130</sup> C. <sup>k</sup> <sup>99</sup> A. L. <sup>b</sup> <sup>16</sup> A. <sup>u</sup> <sup>35</sup> H. <sup>lb</sup> <sup>17</sup> G. <sup>1</sup> G. <sup>1</sup> <sup>83</sup>  
M. <sup>ll</sup> <sup>76</sup> N. <sup>B</sup> <sup>k</sup> <sup>1</sup> <sup>9</sup> M. <sup>B</sup> <sup>k</sup> <sup>u</sup> <sup>9</sup> J. F. J. <sup>B</sup> <sup>61,9</sup> C. <sup>u</sup> <sup>9</sup> D. <sup>u</sup> <sup>9</sup> D. C. <sup>u</sup> <sup>9</sup> H. <sup>35,22</sup>  
L. <sup>u</sup> <sup>9</sup> J. <sup>ff</sup> <sup>9</sup> H. <sup>9</sup> A. A. <sup>1</sup> <sup>36</sup> M. <sup>4</sup> <sup>102</sup> <sup>1</sup> M. <sup>1</sup>  
A. <sup>45</sup> G. <sup>u</sup> <sup>42</sup> J. <sup>45</sup> P. J. <sup>104</sup> K. <sup>u</sup> <sup>131</sup> D. <sup>u</sup> <sup>7</sup> F. <sup>u</sup> <sup>57,58</sup> A. <sup>u</sup> <sup>57,58</sup>  
D. J. <sup>50</sup> J. <sup>u</sup> <sup>53</sup> <sup>1</sup> <sup>10</sup> T. <sup>u</sup> <sup>35</sup> H. <sup>32,33</sup> C. <sup>u</sup> <sup>37</sup> D. <sup>u</sup> <sup>5</sup> D. <sup>u</sup> <sup>45</sup>  
P. <sup>u</sup> <sup>49</sup> A. <sup>u</sup> <sup>20</sup> L. E. <sup>13</sup> M. <sup>u</sup> <sup>2</sup> J. <sup>u</sup> <sup>10</sup> M. <sup>u</sup> <sup>1</sup> L. <sup>u</sup> <sup>ll</sup> <sup>1</sup> <sup>u</sup> <sup>1</sup> <sup>16,8,29</sup>  
G. <sup>u</sup> <sup>12</sup> H. <sup>45</sup> M. <sup>45</sup> <sup>70</sup> <sup>51</sup> H. <sup>36</sup> L. <sup>20</sup> J. <sup>37</sup> M. <sup>7</sup> B. <sup>37</sup>  
L. <sup>53</sup> M. <sup>8</sup> A. J. <sup>1</sup> <sup>10</sup> T. <sup>lb</sup> <sup>6</sup> L. <sup>51</sup> P. <sup>1</sup> <sup>8</sup> T. <sup>1</sup> <sup>8</sup> K. <sup>8</sup>  
J. T. <sup>1</sup> <sup>102,8</sup> E. <sup>ub</sup> <sup>1</sup> D. J. <sup>86</sup> B. F. <sup>5</sup> K. <sup>8</sup> C. <sup>l</sup> <sup>k</sup> <sup>37</sup> P. A. <sup>ll</sup> <sup>u</sup> <sup>1</sup> L. <sup>ll</sup> <sup>u</sup> <sup>5</sup>  
D. <sup>ll</sup> <sup>u</sup> ,

- <sup>11</sup>I t t t Nac a de Pe a E ac a , 12227-010 & J e d Ca , & Pa , B a  
<sup>12</sup>INFN, G a Sa Sce ce I t t te, I-67100 L'A a, Ita y  
<sup>13</sup>INFN, Se e d R a T Ve gata, I-00133 R a, Ita y  
<sup>14</sup>I te -U ye ty Ce t ef A t y a d A t y c , P e 411007, I d a  
<sup>15</sup>I te at a Ce t ef T e et ca Sce ce , Tata I t t te f F da e ta Re ea c , Ba ga e 560012, I d a  
<sup>16</sup>U ye ty f W c -M na ee, M na ee, W c 53201, USA  
<sup>17</sup>Le b U ye t Ha ye , D-30167 Ha ye , Ge a y  
<sup>18</sup>U ye t d P a, I-56127 P a, Ita y  
<sup>19</sup>INFN, Se e d P a, I-56127 P a, Ita y  
<sup>20</sup>A t a a Nat a U ye ty, Ca be a, A t a a Ca ta Te t y 0200, A t a a  
<sup>21</sup>T e U ye ty f M , U ye ty, M 38677, USA  
<sup>22</sup>Ca f a State U ye ty F e t , F e t , Ca f a 92831, USA  
<sup>23</sup>LAL, U ye te Pa -S d, CNRS/IN2P3, U ye te Pa -Sac a y, O a y, F a ce  
<sup>24</sup>C e a Mat e at ca I t t te, C e a, I d a 603103  
<sup>25</sup>U ye t d R a T Ve gata, I-00133 R a, Ita y  
<sup>26</sup>U ye ty f S t a t , S t a t SO17 1BJ, U ted K gd  
<sup>27</sup>U ye t Ha b g, D-22761 Ha b g, Ge a y  
<sup>28</sup>INFN, Se e d R a, I-00185 R a, Ita y  
<sup>29</sup>A be t-E te -I t t t, Max-P a c -I t t t f G a y tat y , D-14476 P t da -G , Ge a y  
<sup>30</sup>APC, A t Pa t c e et C ge, U ye te Pa D de t, CNRS/IN2P3, CEA/ f , Ob e y at e de Pa ,  
S b e Pa C te, F-75205 Pa Cedex 13, F a ce  
<sup>31</sup>M ta a State U ye ty, B e a , M ta a 59717, USA  
<sup>32</sup>U ye t d Pe ga, I-06123 Pe ga, Ita y  
<sup>33</sup>INFN, Se e d Pe ga, I-06123 Pe ga, Ita y  
<sup>34</sup>E ea G a y tat a Ob e y at y (EGO), I-56021 Ca c a, P a, Ita y  
<sup>35</sup>Sy ac e U ye ty, Sy ac e, New Y 13244, USA  
<sup>36</sup>SUPA, U ye ty f G a g w; G a g w G12 8QQ, U ted K gd  
<sup>37</sup>LIGO Ha f d Ob e y at y, R c a d, Wa gt 99352, USA  
<sup>38</sup>W g e RCP, RMKI, H-1121 B da e t, K y T ege M t 29-33, H ga y  
<sup>39</sup>C b a U ye ty, New Y , New Y 10027, USA  
<sup>40</sup>Sta f d U ye ty, Sta f d, Ca f a 94305, USA  
<sup>41</sup>U ye t d Pad ya, D a t e t d F ca e A t a, I-35131 Pad ya, Ita y  
<sup>42</sup>INFN, Se e d Pad ya, I-35131 Pad ya, Ita y  
<sup>43</sup>CAMK-PAN, 00-716 Wa a w; P a d  
<sup>44</sup>A t ca Ob e y at y Wa a w U ye ty, 00-478 Wa a w; P a d  
<sup>45</sup>U ye ty f B ga , B ga B15 2TT, U ted K gd  
<sup>46</sup>U ye t deg St d d Ge ya, I-16146 Ge ya, Ita y  
<sup>47</sup>INFN, Se e d Ge ya, I-16146 Ge ya, Ita y  
<sup>48</sup>RRCAT, I d e MP 452013, I d a  
<sup>49</sup>Fac ty f P y c , L y M c w State U ye ty, M c w 119991, R a  
<sup>50</sup>SUPA, U ye ty f t e We t f Sc ta d, Pa e y PA1 2BE, U ted K gd  
<sup>51</sup>U ye ty f We te A t a a, C a w e y, We te A t a a 6009, A t a a  
<sup>52</sup>De a t e t f A t y c /IMAPP, Radb d U ye ty N ege , P.O. B x 9010, 6500 GL N ege , Net e a d  
<sup>53</sup>A te , U ye te C te d'A , CNRS, Ob e y at e C te d'A , CS 34229, N ce cedex 4, F a ce  
<sup>54</sup>MTA E t y U ye ty, "Le d et" A t y c Re ea c G , B da e t 1117, H ga y  
<sup>55</sup>I t t t de P y e de Re e , CNRS, U ye te de Re e , F-35042 Re e , F a ce  
<sup>56</sup>Wa gt State U ye ty, P a , Wa gt 99164, USA  
<sup>57</sup>U ye t deg St d d U b "Ca B," I-61029 U b , Ita y  
<sup>58</sup>INFN, Se e d F e e, I-50019 Se t F e t , F e e, Ita y  
<sup>59</sup>U ye ty f O eg , E ge e, O eg 97403, USA  
<sup>60</sup>Lab at e Ka te B e, UPMC-S b e U ye te , CNRS, ENS-PSL Re ea c U ye ty, C e ge de F a ce,  
F-75005 Pa , F a ce  
<sup>61</sup>VU U ye ty A te da , 1081 HV A te da , Net e a d  
<sup>62</sup>U ye ty f Ma ya d, C ege Pa , Ma ya d 20742, USA  
<sup>63</sup>Ce te f Re at y t c A t y c a d Sc f P y c , Ge ga I t t te f Tec g y, A t a ta, Ge ga 30332, USA  
<sup>64</sup>I t t t L e e Mat e e, U ye te de Ly , U ye te Ca de Be a d Ly 1, UMR CNRS 5306, 69622 V e ba e, F a ce  
<sup>65</sup>Lab at e de Ma te a x A y a ce (LMA), IN2P3/CNRS, U ye te de Ly , F-69622 V e ba e, Ly , F a ce  
<sup>66</sup>U ye tat de e I e Ba ea , IAC3-IEEC, E-07122 Pa a de Ma ca, S a  
<sup>67</sup>U ye t d Na "Fede c II," C e U ye ta d M te S. A ge , I-80126 Na , Ita y  
<sup>68</sup>NASA/G dda d S ace F g t Ce te , G ee be t, Ma ya d 20771, USA

- <sup>69</sup>Ca ada I tt tef Te etca A t y c, U ye ty fT t, T t, O ta M5S 3H8, Ca ada  
<sup>70</sup>T g a U ye ty, Be g 100084, C a  
<sup>71</sup>Texa Tec U ye ty, L bb c, Texa 79409, USA  
<sup>72</sup>Te Pe y ya a State U ye ty, U ye ty Pa, Pe y ya a 16802, USA  
<sup>73</sup>Nat a T g H a U ye ty, H c C ty, 30013 Ta na, Re b c f C a  
<sup>74</sup>Ca e St t U ye ty, Wagga Wagga, NewS t Wae 2678, A t a a  
<sup>75</sup>U ye ty fC cag, C cag, I 60637, USA  
<sup>76</sup>Ca tec CaRT, Pa ade a, Ca f a 91125, USA  
<sup>77</sup>Kea I tt tef Sce ce a d Tec gy I f at, Dae e 305-806, Kea  
<sup>78</sup>Ca et C ege, N t fed, M e ta 55057, USA  
<sup>79</sup>U ye t d R a "La Sa e a," I-00185 R a, Ita y  
<sup>80</sup>U ye ty fB e, B e 1050, Be g  
<sup>81</sup>S a State U ye ty, R e t Pa, Ca f a 94928, USA  
<sup>82</sup>N t ne te U ye ty, E ya t, I 60208, USA  
<sup>83</sup>Te U ye ty fTexa R G a de Va ey, B w y e, Texa 78520, USA  
<sup>84</sup>U ye ty fM e ta, M ea, M e ta 55455, USA  
<sup>85</sup>Te U ye ty fMeb e, Pa y e, V ct a 3010, A t a a  
<sup>86</sup>Te U ye ty fS effed, S effed S10 2TN, U ted K gd  
<sup>87</sup>U ye ty fSa at Be e ye t, I-82100 Be e ye t, Ita ya d INFN, Se e d Na, I-80100 Na, Ita y  
<sup>88</sup>M tca State U ye ty, M tca, NewJe ey 07043, USA  
<sup>89</sup>U ye t d T e t, D a t e t d F ca, I-38123 P y, T e t, Ita y  
<sup>90</sup>INFN, T e t I tt tef F da e ta P y c a d A cat, I-38123 P y, T e t, Ita y  
<sup>91</sup>Ca dff U ye ty, Ca dff CF24 3AA, U ted K gd  
<sup>92</sup>Nat a A t ca Ob e y at y fJa a, 2-21-1 O ana, M ta a, T y 181-8588, Ja a  
<sup>93</sup>Sc fMat e at c, U ye ty fEd b g, Ed b g EH9 3FD, U ted K gd  
<sup>94</sup>I da I tt tef Tec gy, Ga d aga A edabad G a at 382424, I da  
<sup>95</sup>I tt tef Pa a Re ea c, B at, Ga d aga 382428, I da  
<sup>96</sup>U ye ty fS eged, D te 9, S eged 6720, H ga y  
<sup>97</sup>E b y-R dde Ae a tca U ye ty, P e c t, A a 86301, USA  
<sup>98</sup>U ye ty fM c ga, A A b, M c ga 48109, USA  
<sup>99</sup>Tata I tt tef F da e ta Re ea c, M ba 400005, I da  
<sup>100</sup>R t e f d A et Lab at y, HSIC, C t, D dc t, Ox OX11 0QX, U ted K gd  
<sup>101</sup>A e ca U ye ty, Wa gt, D.C. 20016, USA  
<sup>102</sup>R c e te I tt tef Tec gy, R c e te, NewY 14623, USA  
<sup>103</sup>U ye ty fMa ac ett -A e t, A e t, Ma ac ett 01003, USA  
<sup>104</sup>U ye ty fAde a de, Ade a de, S t A t a a 5005, A t a a  
<sup>105</sup>We t V g a U ye ty, M ga t w, We t V g a 26506, USA  
<sup>106</sup>U ye ty fB at y t, 15-424 B at y t, P a d  
<sup>107</sup>SUPA, U ye ty fSt at c yde, G a g w G1 IXQ, U ted K gd  
<sup>108</sup>IISER-TVM, CET Ca, T ya d Ke a a 695016, I da  
<sup>109</sup>I tt tef A ed P y c, N y N y g d, 603950, R a  
<sup>110</sup>P a Nat a U ye ty, B a 609-735, Kea  
<sup>111</sup>Ha ya g U ye ty, Se 133-791, Kea  
<sup>112</sup>NCBJ, 05-400 S we -O t w c, P a d  
<sup>113</sup>IM-PAN, 00-956 Wa a w, P a d  
<sup>114</sup>M a U ye ty, V ct a 3800, A t a a  
<sup>115</sup>Se Nat a U ye ty, Se 151-742, Kea  
<sup>116</sup>U ye ty fAba a H t y e, H t y e, A ba a 35899, USA  
<sup>117</sup>ESPCI, CNRS, F-75005 Pa, F a ce  
<sup>118</sup>U ye t d Ca e, D a t e t d F ca, I-62032 Ca e, Ita y  
<sup>119</sup>S t e U ye ty a d A & M C ege, Bat R ge, L a a 70813, USA  
<sup>120</sup>C ege fW a a d Ma y, W a b g, V g a 23187, USA  
<sup>121</sup>I tt t de F ca Te ca, U ye ty E tad a Pa ta ICTP S t A e ca I tt tef F da e ta Re ea c,  
& Pa SP 01140-070, B a  
<sup>122</sup>U ye ty fCa b dge, Ca b dge CB2 ITN, U ted K gd  
<sup>123</sup>IISER-K ata, M a, We t Be ga 741252, I da  
<sup>124</sup>W t a C ege, 345 B ye A ye e, Wa a Wa a, Wa gt 99362 USA  
<sup>125</sup>Nat a I tt tef Mat e at ca Sce ce, Dae e 305-390, Kea  
<sup>126</sup>H ba t a d W a S t C ege, Ge e ya, NewY 14456, USA  
<sup>127</sup>Ja G I tt tef A t y, U ye ty fZe a G a, 65-265 Ze a G a, P a d

- <sup>128</sup>*A d e w U e t y, B e e S g, M c g a 49104, USA*
- <sup>129</sup>*U e d S e a, I-53100 S e a, I t a y*
- <sup>130</sup>*T t y U e t y, S a A t, T e x a 78212, USA*
- <sup>131</sup>*U e t y f W a g t, S e a t t e, W a g t 98195, USA*
- <sup>132</sup>*K e y C e g e, G a b e, O 43022, USA*
- <sup>133</sup>*A b e e C t a U e t y, A b e e, T e x a 79699, USA*

- D., A 1 2012.
- D., M 2015.
- D., M 2015.