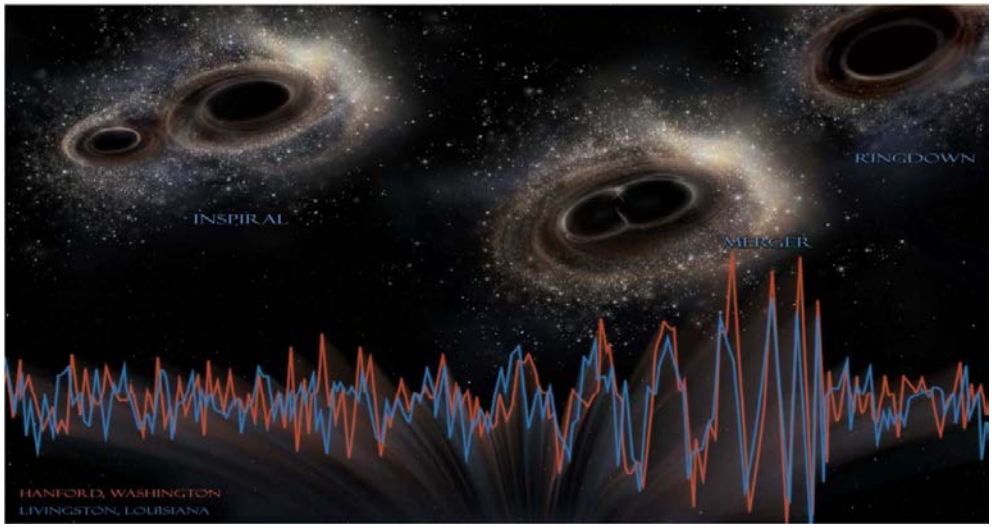


LIGO/Aurore Simonnet

Ondes gravitationnelles
un regard neuf sur l'Univers

Frédérique Marion

LAPP

CNRS IN2P3 Les deux infinis

UNIVERSITÉ SAVOIE MONT BLANC

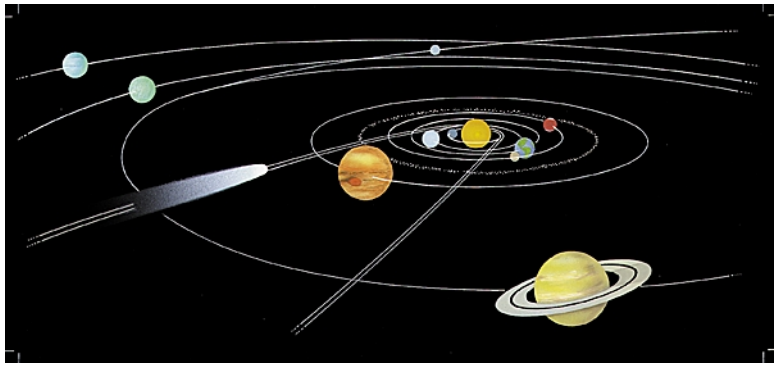
CPPM

10 décembre 2016

Gravitation

- Une des quatre forces fondamentales de la nature
- De loin l'interaction la moins intense
  - Entre deux électrons :
    force électromagnétique
    / force gravitationnelle ~ $4 \cdot 10^{42}$

- Les systèmes planétaires

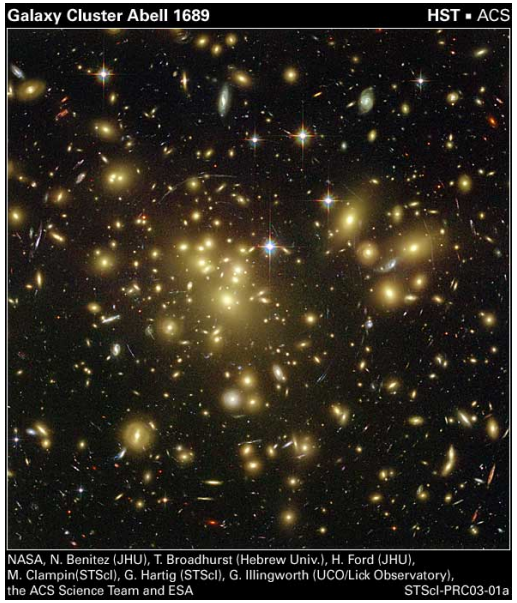


Larousse

- La pesanteur

archives Reuters

- La structure à grande échelle de l'Univers

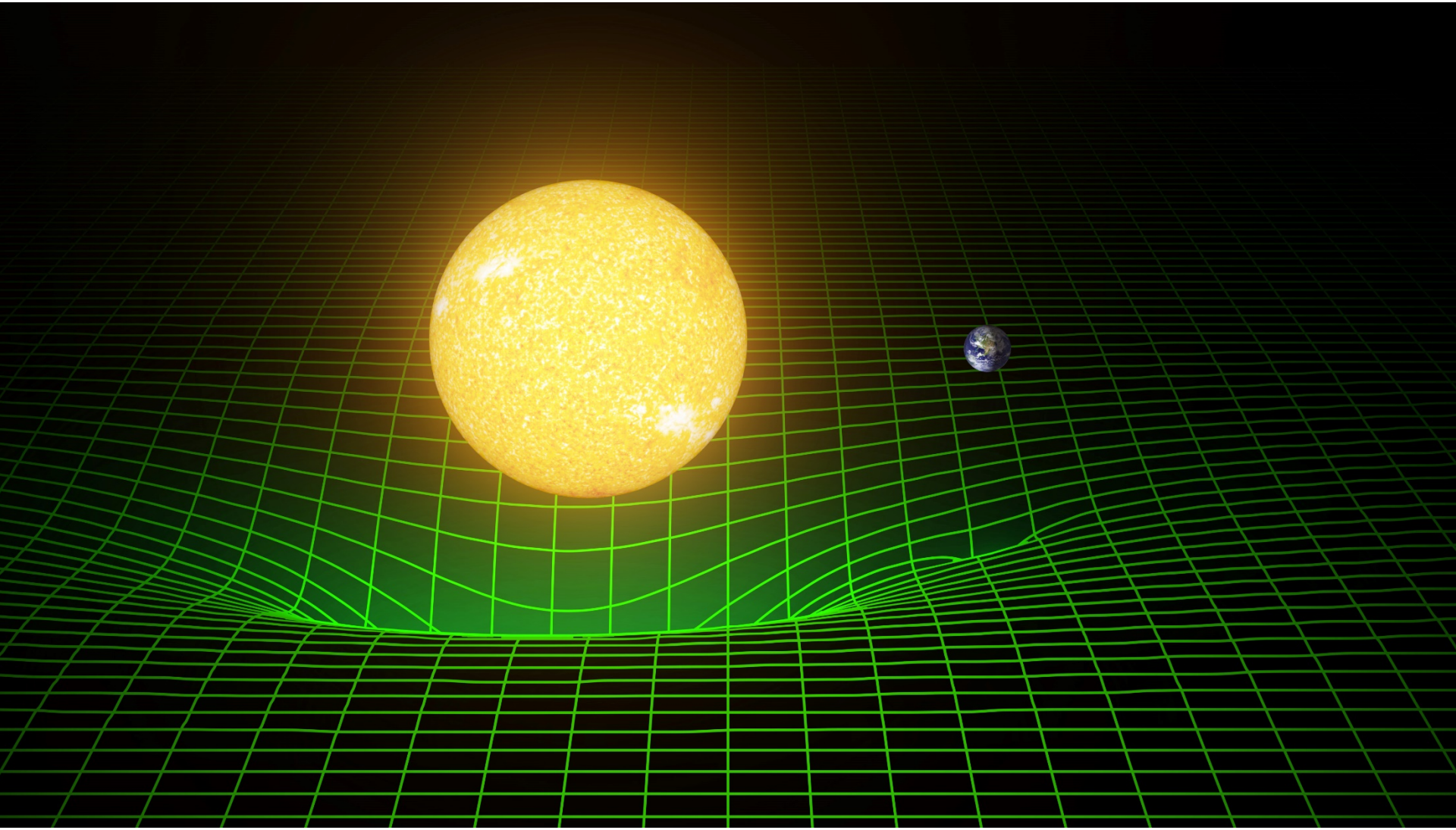


Newton vs Einstein

- Théorie classique de la gravitation
  - Espace plat, temps absolu
  - $F = G\, m_1\, m_2 / r^2$
  - Action à distance instantanée

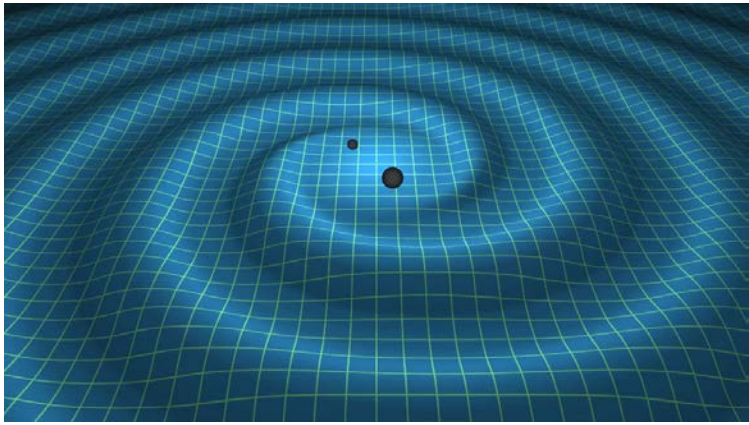
- Théorie moderne de la gravitation (relativité générale)
  - Espace et temps liés, espace-temps dynamique
  - Principe d'équivalence : masse inertielle = masse gravitationnelle
  - Attraction gravitationnelle = manifestation de la courbure de l'espace-temps
  - J. A. Wheeler : ***"Space tells matter how to move and matter tells space how to curve"***

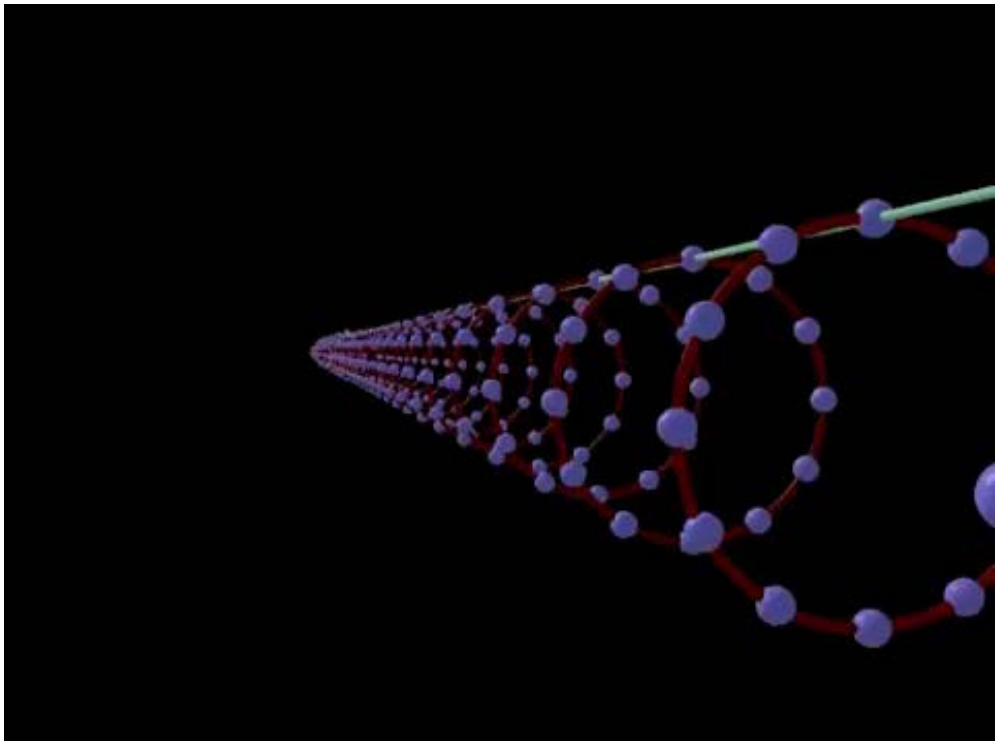
La gravitation selon Einstein



Ondes gravitationnelles

- Fluctuations de la courbure de l'espace-temps se propageant dans l'espace à la vitesse de la lumière
  - Les distances séparant des masses libres changent





Ondes gravitationnelles : amplitude et sources

- Relation entre l'amplitude de l'onde et la variation de longueur

$$h = 2 \frac{\delta L}{L}$$

Plus la longueur L est grande, plus la variation de longueur δL est grande

- Au niveau de l'observateur

$$h \propto \frac{1}{d}$$

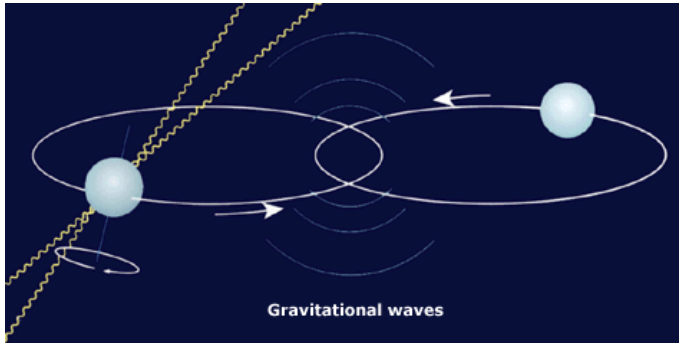
L'amplitude s'amenuise avec la distance entre la source et l'observateur

- Quelles sources?
  - Génération en laboratoire : amplitude (beaucoup) trop faible
  - Sources astrophysiques (masses et accélérations mises en jeu énormes)
    - Malgré la pénalité de la distance

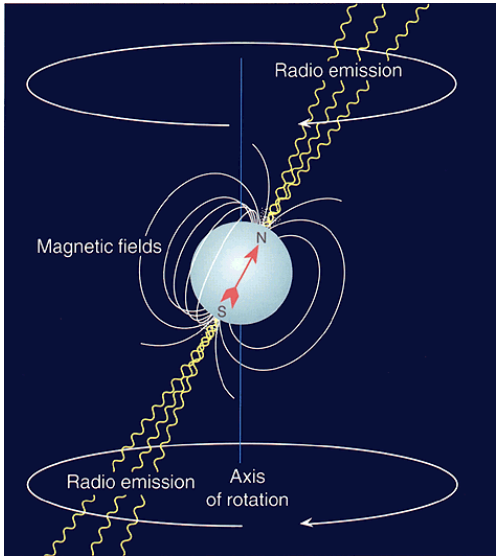
PSR 1913+16 : les noces d'émeraude d'un couple star

- Découvert par R.Hulse et J.Taylor en 1974
  - Deux étoiles à neutrons en orbite l'une autour de l'autre
    - Étoile à neutrons : ~1,4 fois la masse du Soleil dans un astre d'environ 30 km de diamètre !
    - Période orbitale du système ~ 8 heures
  - Une des étoiles est un pulsar
    - Pulsar : étoile à neutrons en rotation émettant des faisceaux d'ondes radio le long de l'axe des pôles magnétiques

      ➔ Phénomène de « phare »
      L'observateur reçoit des impulsions radio
    - La mesure du temps d'arrivée des impulsions permet de déterminer tous les paramètres du système



The Nobel Foundation, 1993

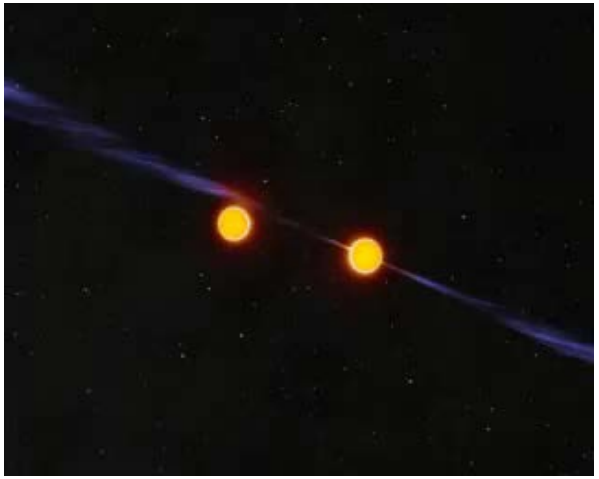


The Nobel Foundation, 1993

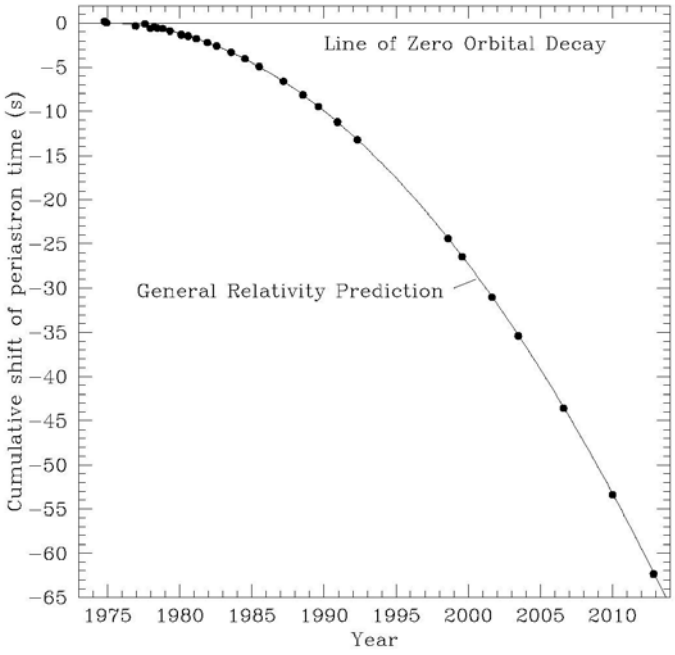
- Prix Nobel en 1993

Ondes gravitationnelles : première preuve

- La période orbitale du système décroît avec le temps
  - L'orbite rétrécit
- Le système perd de l'énergie par rayonnement gravitationnel
  - Accord au millième près entre la décroissance de la période orbitale observée et la prédiction de la Relativité Générale
- Preuve indirecte seulement
  - Restait à mettre en évidence les effets physiques d'une onde gravitationnelle



John Rowe Animation/Australia Telescope National Facility, CSIRO



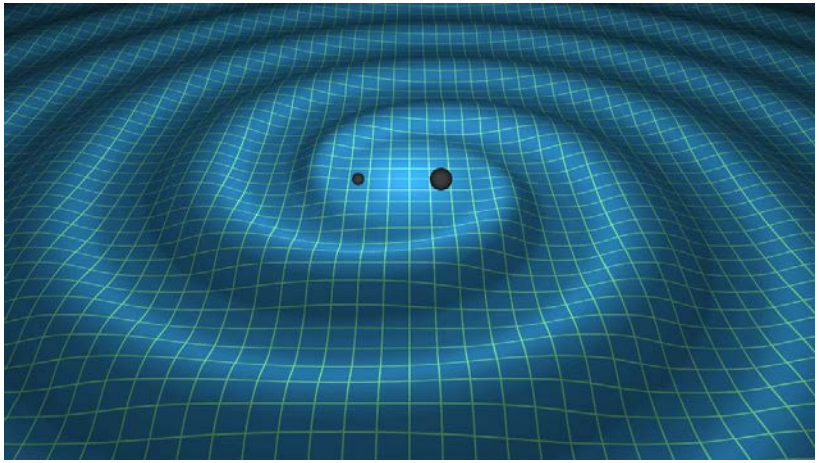
J. M. Weisberg et al., 2016

Quelles sources? Anticipons un peu…

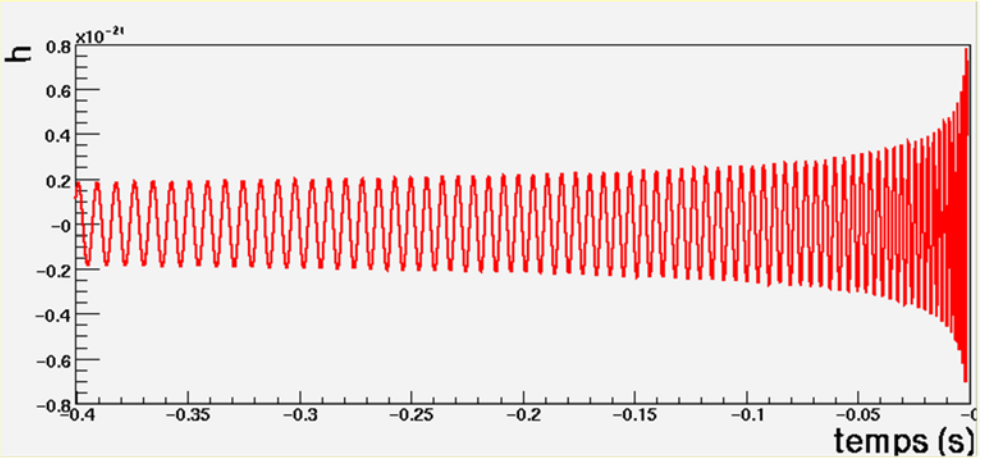
- La gamme de fréquence des détecteurs interférométriques terrestres est 10 Hz – 10 kHz
  - C'est aussi la gamme de fréquence accessible à l'oreille humaine
- La fréquence des ondes gravitationnelles émises par le système PSR 1913+16 est ~ 0,07 mHz
  - Inaccessible aux détecteurs terrestres
- Envisager d'autres sources
  - Dans la gamme de fréquence accessible
  - Détectable avec une sensibilité réaliste
  - Phénomènes relativement fréquents

Coalescences binaires d'astres compacts

- Systèmes binaires d'astres compacts à la fin de leur évolution
  - Etoiles à neutrons et/ou trous noirs
- Phénomène très rare dans la Galaxie
  - Quelques dizaines par million d'années
- Amplitude typique (étoiles à neutrons)
  - $h \sim 10^{-22}$ à 20 Mpc
  - 1 parsec = 3,26 années lumière
- Forme d'onde très caractéristique



Courtesy Caltech/MIT/LIGO Laboratory



Ondes gravitationnelles : enjeux

- Explorer en profondeur la gravitation
  - Ondes gravitationnelles produites dans des phénomènes violents du cosmos, où les effets gravitationnels sont extrêmes
  - Gravitation au cœur des énigmes de la cosmologie d'aujourd'hui (énergie noire & matière sombre)
- Ouvrir une nouvelle fenêtre sur l'Univers
  - Nouveau messager complémentaire de l'astronomie traditionnelle
  - Un outil pour l'astrophysique et la cosmologie
- Challenge instrumental
  - Des détecteurs hors du commun : interféromètres géants à la sensibilité diabolique

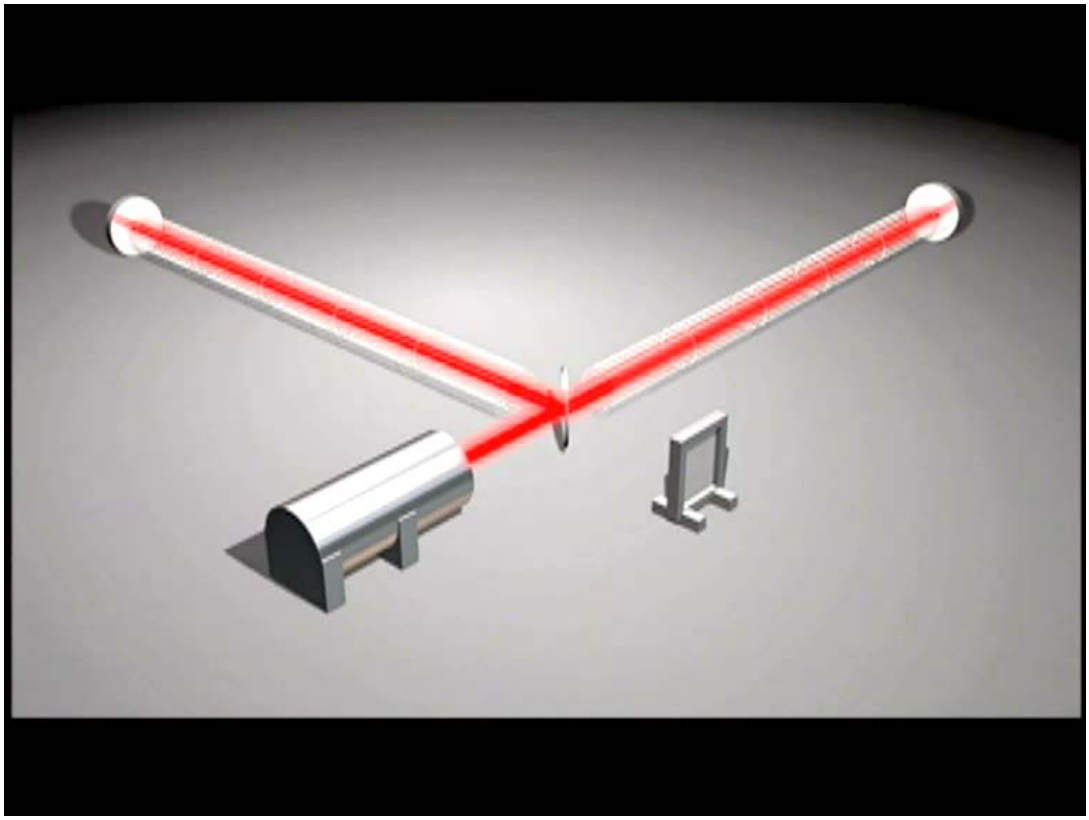
Challenge expérimental

- Amplitude de l'onde ≡ variation relative de distance

  $\leq 10^{-21}$ pour le signal reçu sur Terre

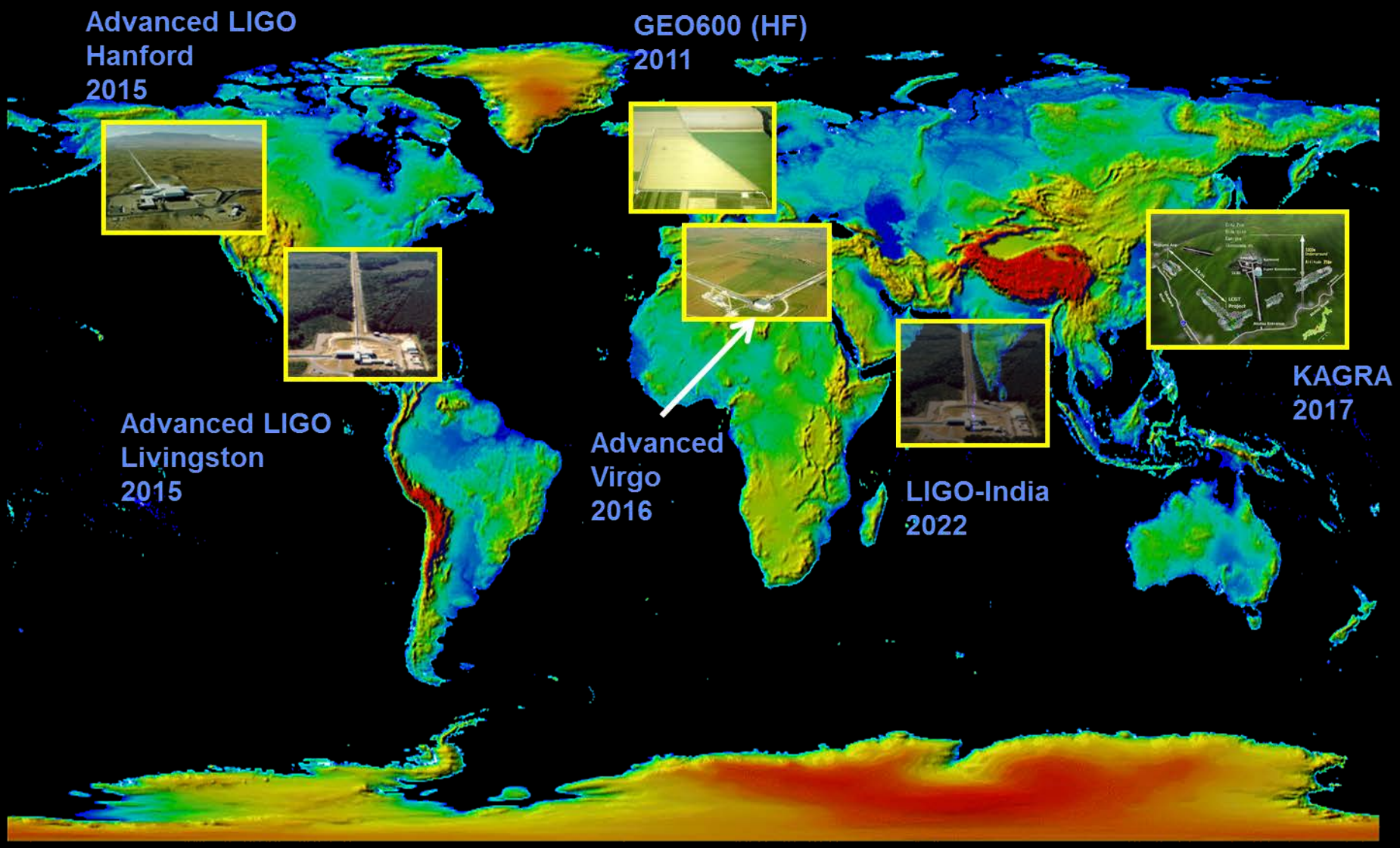
  ≡ Observer une variation de la distance entre la Terre et le Soleil correspondant à la taille d'un atome

- Une quête de 50 ans
  - D'abord avec des détecteurs du type « barres résonnantes »
  - Depuis ~ 20 ans, avec des détecteurs interférométriques géants



Courtesy Caltech/MIT/LIGO Laboratory

Un réseau de détecteurs

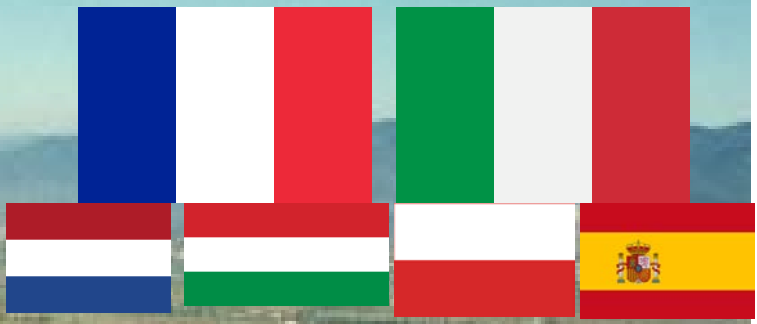


LIGO

2 interféromètres de 4 km

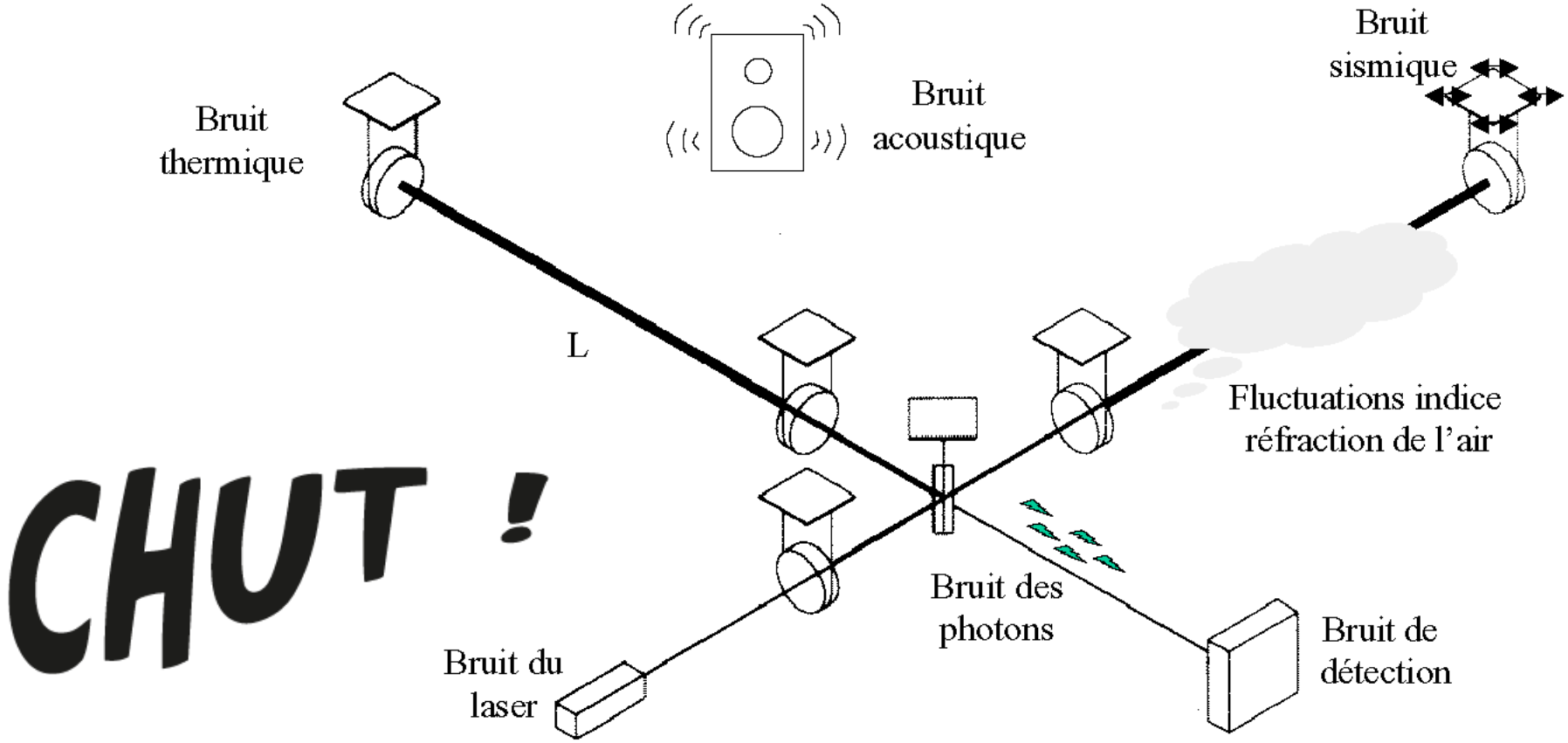
- Un en Louisiane
- Un dans l'état de Washington
- Un troisième sera installé en Inde

Virgo



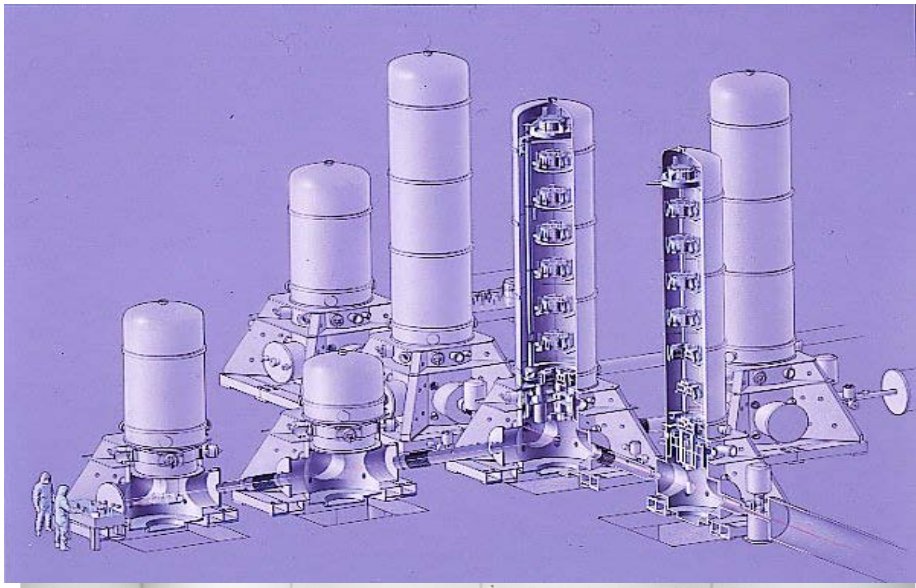
- 3 km, près de Pise en Italie
- Projet piloté par le CNRS (Fr) + l'INFN (It)
  - + Pays-Bas, Hongrie, Pologne, Espagne
- ~200 personnes, 20 laboratoires

Les sources de bruit de fond



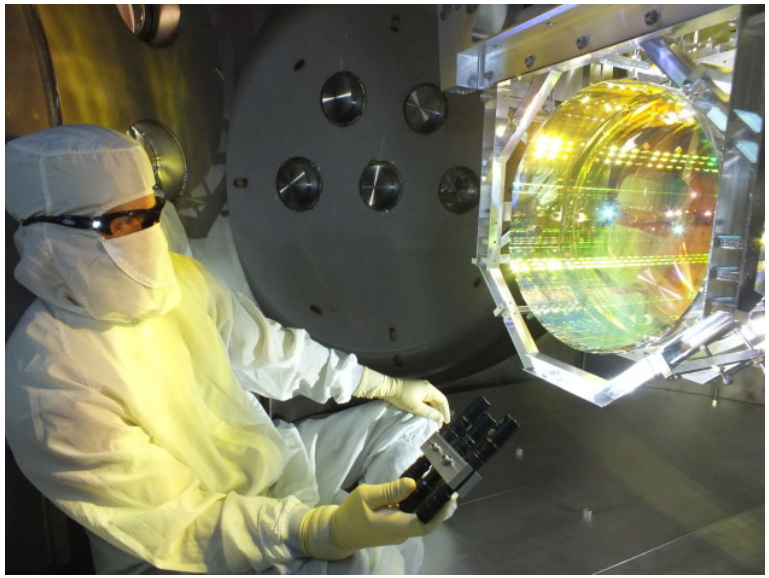
Sous (ultra) vide

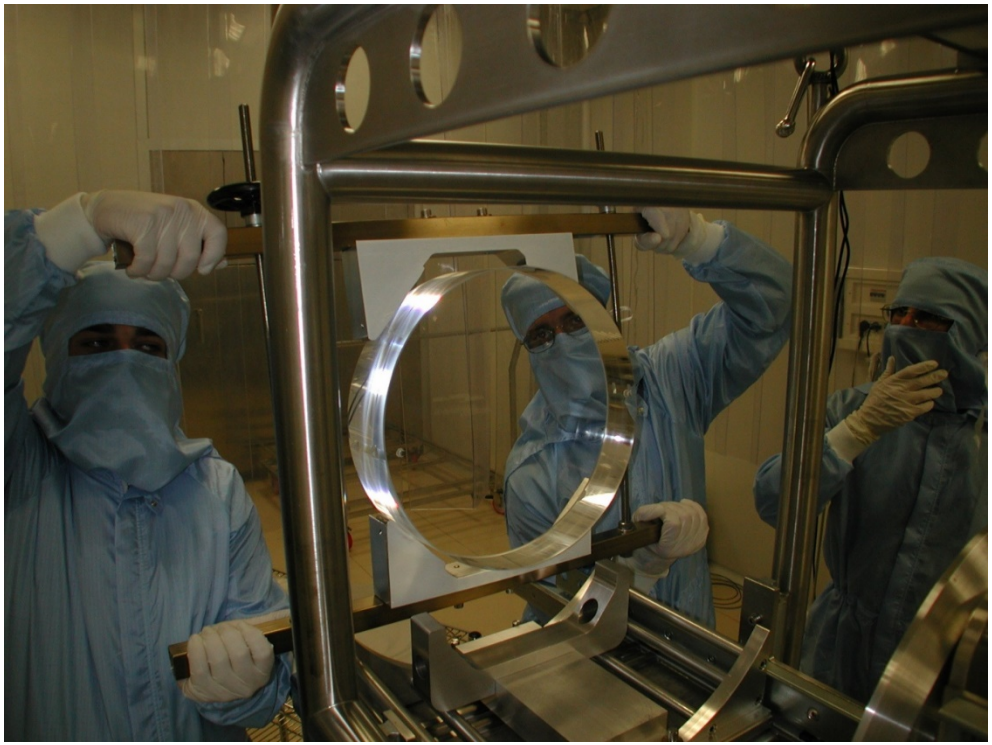
- Se protéger du bruit acoustique
- Éviter le bruit de mesure qui proviendrait des fluctuations d'indice de réfraction de l'air
- Conserver la propreté des miroirs



Miroirs

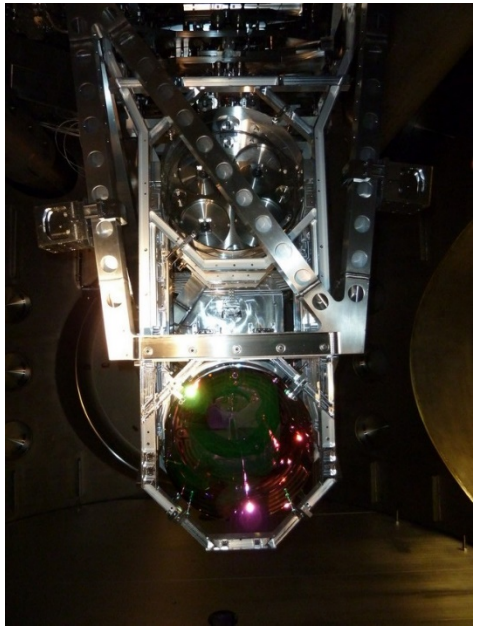
- Grands miroirs
- Miroirs quasi-parfaits
- Manipulés en salles blanches

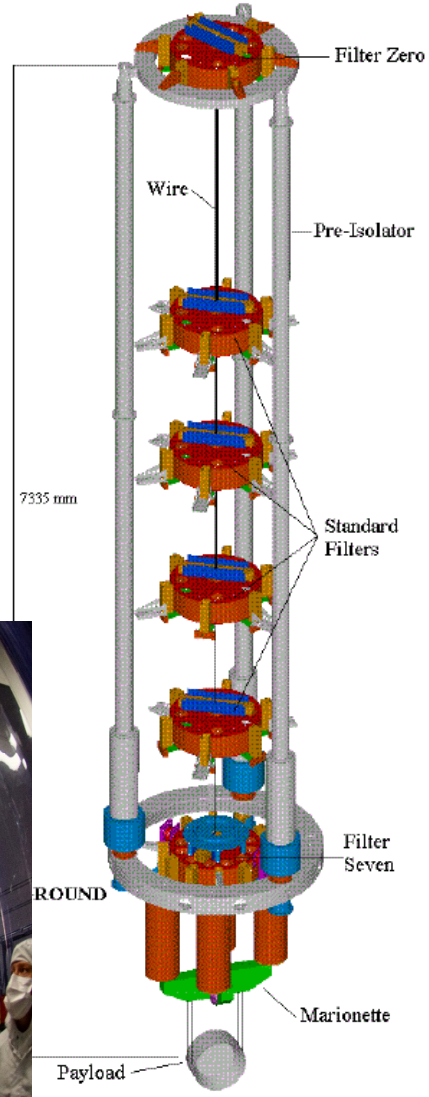




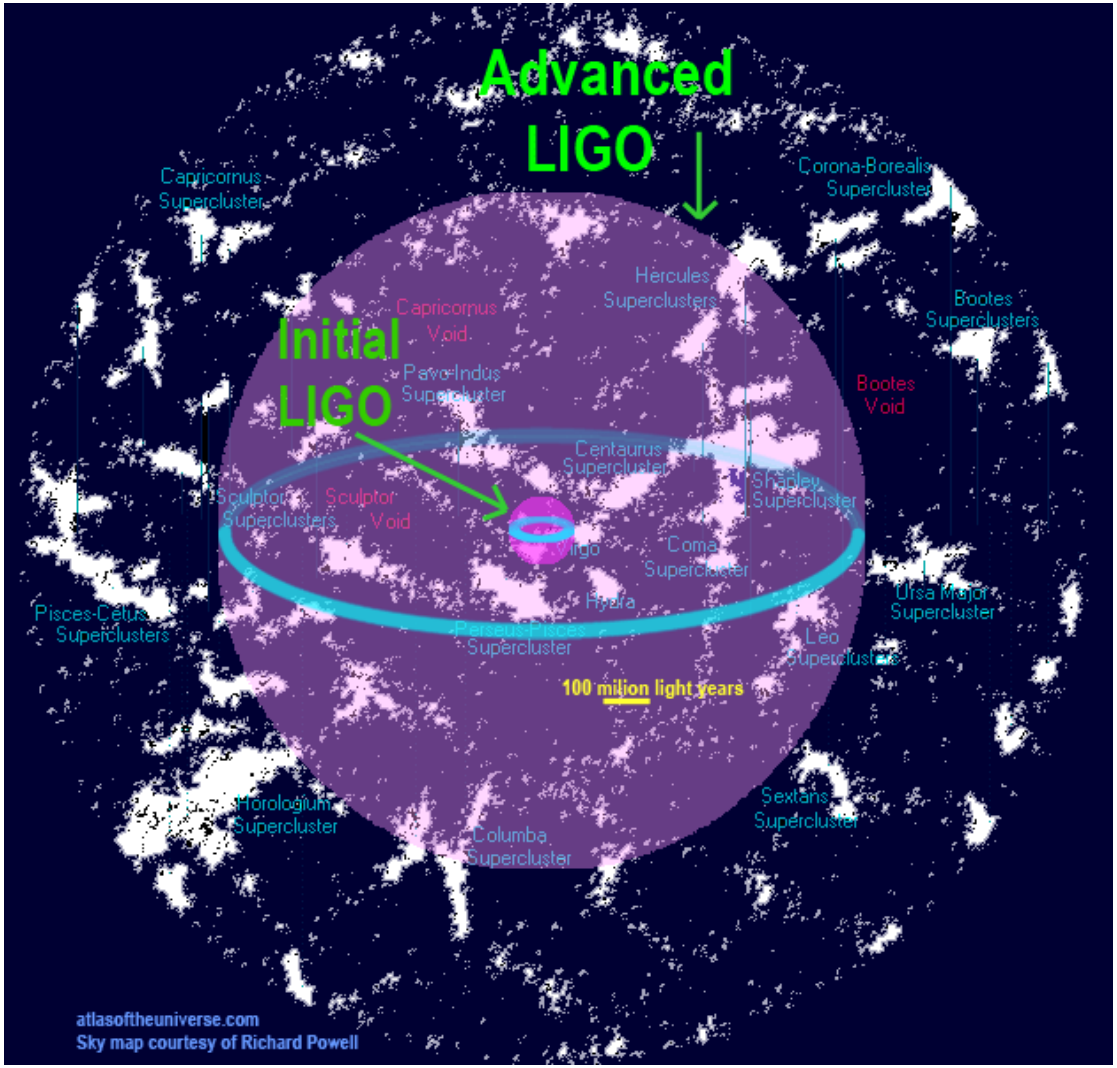
Traitement de surface réalisé par le Laboratoire des Matériaux Avancés à Lyon

Isolation sismique





De la première à la deuxième génération d'instruments

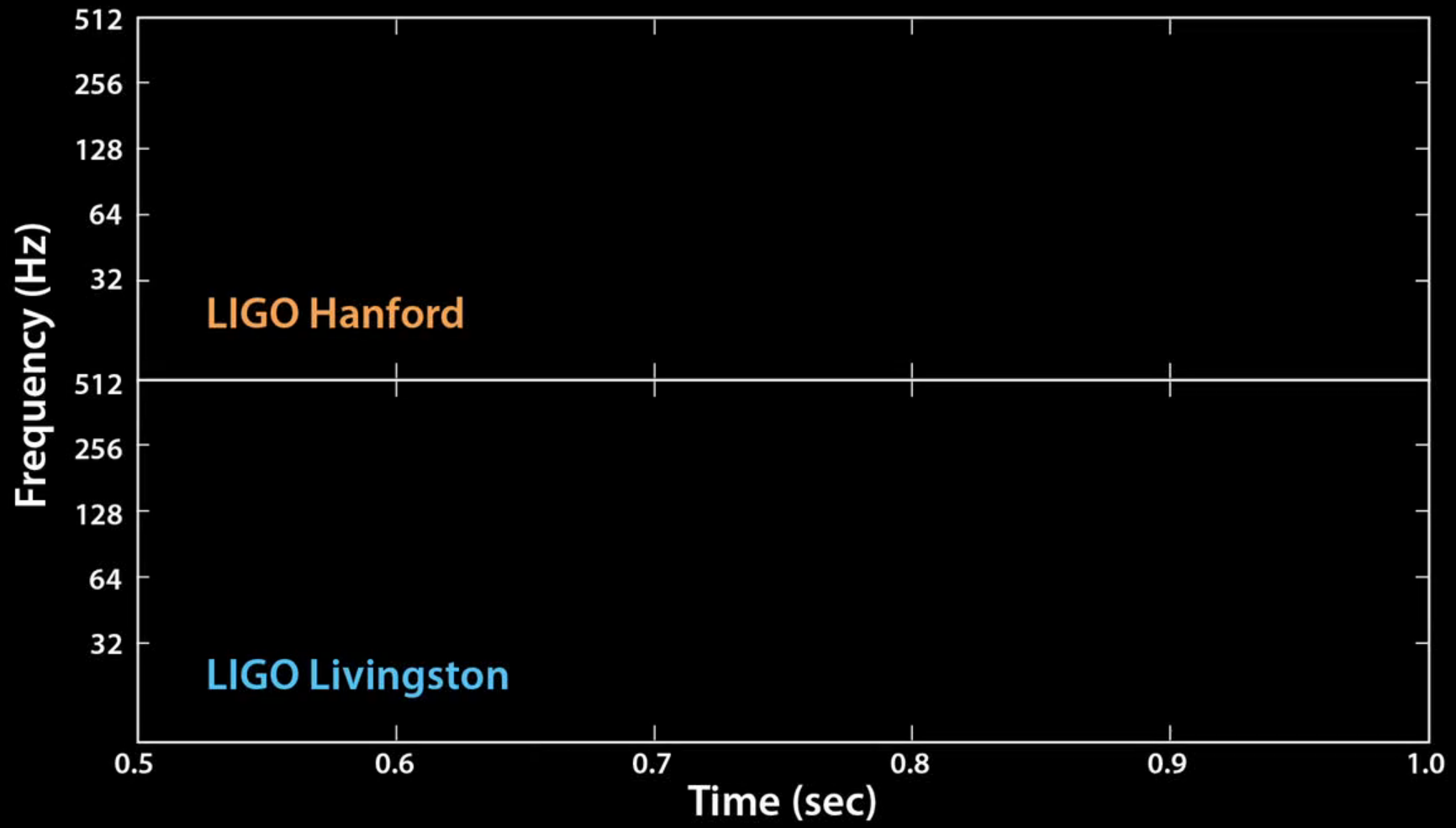


Pourquoi travailler en réseau?

≡≡

≡≡

- Pas de direction privilégiée, il faut comparer les signaux dans plusieurs détecteurs pour déterminer la direction de la source par triangulation
- On cherche à observer des signaux rares et faibles, une observation simultanée dans au moins deux détecteurs est nécessaire



Caltech/MIT/LIGO Lab

Les collaborations LIGO et Virgo ont la joie de vous faire part de l'observation de

GW150914

Le 14 septembre 2015 à 09:50:45 UTC | 29 + 36 $M_\odot$

La publication scientifique

Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger

The LIGO Scientific Collaboration and The Virgo Collaboration

Authors

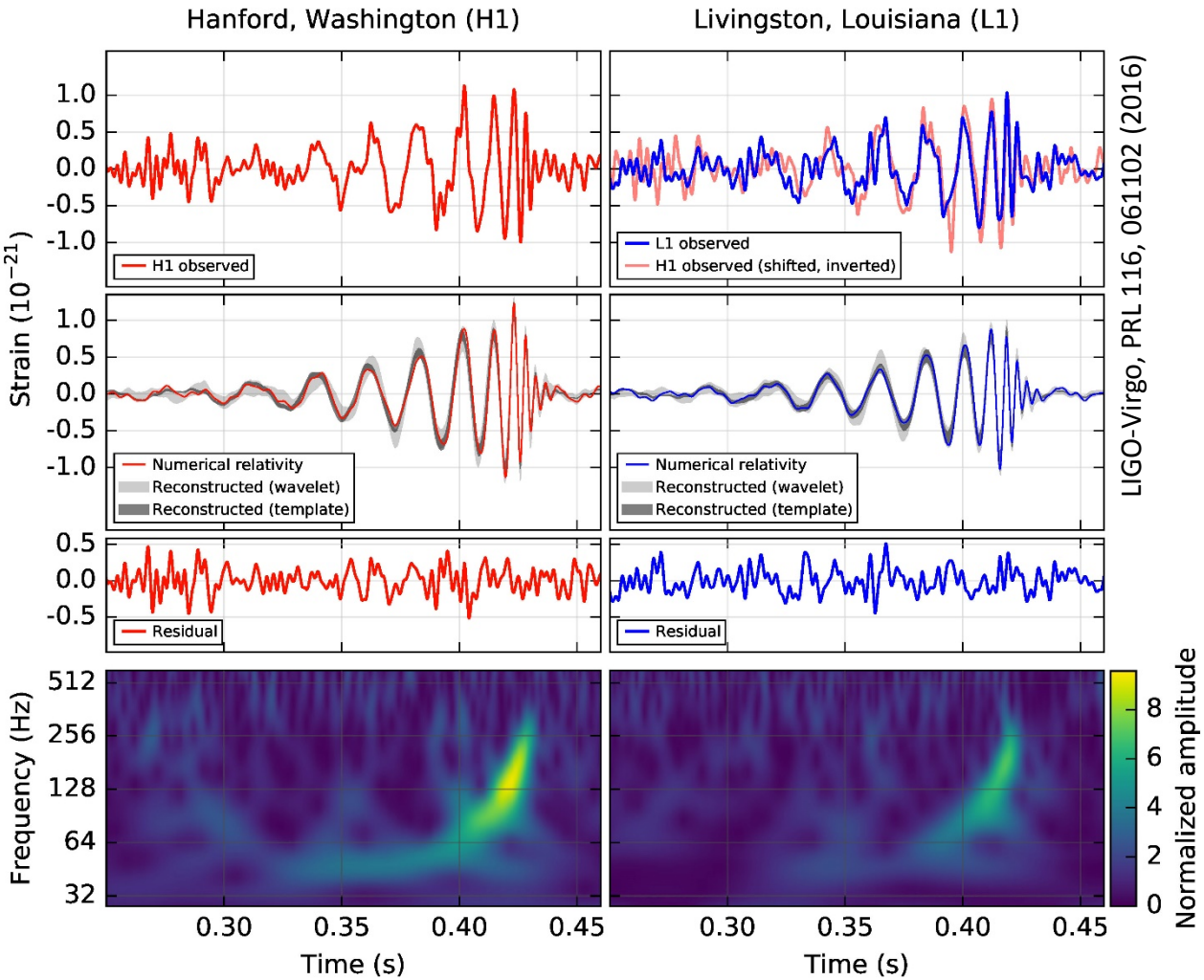
B. P. Abbott,[1] R. Abbott,[1] T. D. Abbott,[2] M. R. Abernathy,[1] F. Acernese,[3,4] K. Ackley,[5] C. Adams,[6] T. Adams,[7] P. Addesso,[3] R. X. Adhikari,[1] V. B. Adya,[8] C. Affeldt,[8] M. Agathos,[9] K. Agatsuma,[9] N. Aggarwal,[10] O. D. Aguiar,[11] L. Aiello,[12,13] A. Ain,[14] P. Ajith,[15] B. Allen,[8,16,17] A. Allocca,[18,19] P. A. Altin,[20] S. B. Anderson,[1] W. G. Anderson,[16] K. Arai,[1] M. A. Arain,[5] M. C. Araya,[1] C. C. Arceneaux,[21] J. S. Areeda,[22] N. Arnaud,[23] K. G. Arun,[24] S. Ascenzi,[25,13] G. Ashton,[26] M. Ast,[27] S. M. Aston,[6] P. Astone,[28] P. Aufmuth,[8] C. Aulbert,[8] S. Babak,[29] P. Bacon,[30] M. K. M. Bader,[9] P. T. Baker,[31] F. Baldaccini,[32,33] G. Ballardin,[34] S. W. Ballmer,[35] J. C. Barayoga,[1] S. E. Barclay,[36] B. C. Barish,[1] D. Barker,[37] F. Barone,[3,4] B. Barr,[36] L. Barsotti,[10] M. Barsuglia,[30] D. Barta,[38] J. Bartlett,[37] M. A. Barton,[37] I. Bartos,[39] R. Bassiri,[40] A. Basti,[18,19] J. C. Batch,[37] C. Baune,[8] V. Bavigadda,[34] M. Bazzan,[41,42] B. Behnke,[29] M. Bejger,[43] C. Belczynski,[44] A. S. Bell,[36] C. J. Bell,[36] B. K. Berger,[1] J. Bergman,[37] G. Bergmann,[8] C. P. L. Berry,[45] D. Bersanetti,[46,47] A. Bertolini,[9] J. Betzwieser,[6] S. Bhagwat,[35] R. Bhandare,[48] I. A. Bilenko,[49] G. Billingsley,[1] J. Birch,[6] R. Birney,[50] O. Birnholtz,[8] S. Biscans,[10] A. Bisht,[8,17] M. Bitossi,[34] C. Biwer,[35] M. A. Bizouard,[23] J. K. Blackburn,[1] C. D. Blair,[51] D. G. Blair,[51] R. M. Blair,[37] S. Bloemen,[52] O. Bock,[8] T. P. Bodiya,[10] M. Boer,[53] G. Bogaert,[53] C. Bogan,[8] A. Bohe,[29] P. Bojtos,[54] C. Bond,[45] F. Bondu,[55] R. Bonnand,[7] B. A. Boom,[9] R. Bork,[1] V. Boschi,[18,19] S. Bose,[56,14] Y. Bouffanais,[30] A. Bozzi,[34] C. Bradaschia,[19] P. R. Brady,[16] V. B. Braginsky,[49] M. Branchesi,[57,58] J. E. Brau,[59] T. Briant,[60] A. Brillet,[55] M. Brinkmann,[8] V. Brisson,[23] P. Brockill,[16] A. F. Brooks,[1] D. A. Brown,[35] D. D. Brown,[45] N. M. Brown,[10] C. C. Buchanan,[2] A. Buikema,[10] T. Bulik,[44] H. J. Bulten,[61,9] A. Buonanno,[29,62] D. Buskulic,[7] C. Buy,[30] R. L. Byer,[40] M. Cabero,[8] L. Cadonati,[63] G. Cagnoli,[64,65] C. Cahillane,[1] J. Calderón Bustillo,[66,67] T. Callister,[1] E. Calloni,[67,4] J. B. Camp,[68] K. C. Cannon,[69] J. Cao,[70] C. D. Capano,[8] E. Capocasa,[30] F. Carbognani,[34] S. Caride,[71] J. Casanueva Diaz,[23] C. Casentini,[25,13] S. Caudill,[16] M. Cavaglià,[21] F. Cavalier,[23] R. Cavalieri,[34] G. Cella,[19] C. Cepeda,[1] L. Cerboni Baiardi,[57,58] G. Cerretani,[18,19] E. Cesarini,[26,13] R. Chakraborty,[1] T. Chalermsongsak,[1] S. J. Chamberlin,[72] M. Chan,[36] S. Chao,[73] P. Charlton,[74] E. Chassande-Mottin,[30] H. Y. Chen,[75] Y. Chen,[76] C. Cheng,[73] A. Chincarini,[47] A. Chiummo,[34] H. S. Cho,[77] M. Cho,[62] J. H. Chow,[20] N. Christensen,[78] Q. Chu,[51] S. Chua,[60] S. Chung,[51] G. Ciani,[5] F. Clara,[37] J. A. Clark,[63] F. Cleva,[55] E. Coccia,[25,12,13] P.-F. Cohadon,[60] A. Colla,[79,28] C. G. Collette,[80] L. Cominsky,[81] M. Constancio Jr.,[11] A. Conte,[79,28] L. Conti,[42] D. Cook,[37] T. R. Corbitt,[2] N. Cornish,[31] A. Corsi,[82] S. Cortese,[34] C. A. Costa,[11] M. W. Coughlin,[78] S. B. Coughlin,[83] J.-P. Coulon,[55] S. T. Countryman,[39] P. Couvares,[1] E. E. Cowan,[63] D. M. Coward,[51] M. J. Cowart,[6] D. C. Coyne,[1] R. Coyne,[82] K. Craig,[36] J. D. E. Creighton,[16] J. Cripe,[2] S. G. Crowder,[84] A. M. Cruise,[45] A. Cumming,[36] L. Cunningham,[36] E. Cuoco,[34] T. Dal Canton,[8] S. L. Danilishin,[36] S. D'Antonio,[13] K. Danzmann,[17,8] N. S. Darman,[85] C. F. Da Silva Costa,[5] V. Dattilo,[34] I. Dave,[48] H. P. Daveloza,[86] M. Davier,[23] G. S. Davies,[36] E. J. Daw,[87] R. Day,[34] S. De,[35] D. DeBra,[40] G. Debreczeni,[38] J. Degallaix,[65] M. De Laurentis,[67,4] S. Deléglise,[60] W. Del Pozzo,[45] T. Denker,[8,17] T. Dent,[8] H. Dereli,[55] V. Dergachev,[1] R. T. DeRosa,[6] R. De Rosa,[67,4] R. DeSalvo,[88] S. Dhurandhar,[14] M. C. Díaz,[86] L. Di Fiore,[4] M. Di Giovanni,[79,28] A. Di Lieto,[18,19] S. Di Pace,[79,28] I. Di Palma,[29,8] A. Di Virgilio,[19] G. Dojcinoski,[89] V. Dolique,[65] F. Donovan,[10] K. L. Dooley,[21] S. Doravari,[6,8] R. Douglas,[36] T. P. Downes,[16] M. Drago,[8,90,91] R. W. P. Drever,[1] J. C. Driggers,[37] Z. Du,[70] M. Ducrot,[7] S. E. Dwyer,[37] T. B. Edo,[87] M. C. Edwards,[78] A. Effler,[6] H.-B. Eggenstein,[8] P. Ehrens,[1] J. Eichholz,[5] S. S. Eikenberry,[5] W. Engels,[76] R. C. Essick,[10] T. Etzel,[1] M. Evans,[10] T. M. Evans,[6] R. Everett,[22] M. Factourovich,[39] V. Fafone,[25,13,12] H. Fair,[35] S. Fairhurst,[92] X. Fan,[70] Q. Fang,[51] S. Farinon,[47] B. Farr,[75] W. M. Farr,[45] M. Favata,[89] M. Fays,[92] H. Fehrmann,[8] M. M. Fejer,[40] D. Feldbaum,[5] I. Ferrante,[18,19] E. C. Ferreira,[11] F. Ferrini,[34] F. Fidecaro,[18,19] L. S. Finn,[72] I. Fiori,[34] D. Fiorucci,[30] R. P. Fisher,[35] R. Flaminio,[65,93] M. Fletcher,[36] H. Fong,[69] J.-D. Fournier,[55] S. Franco,[23] S. Frasca,[79,28] F. Frasconi,[19] M. Frede,[8] Z. Frei,[54] A. Freise,[45] R. Frey,[59] V. Frey,[23] T. T. Fricke,[8] P. Fritschel,[10] V. V. Frolov,[6] P. Fulda,[5] M. Fyffe,[6] H. A. G. Gabbard,[21] J. R. Gair,[94] L. Gammaitoni,[32,33] S. G. Gaonkar,[14] F. Garufi,[67,4] A. Gatto,[30] G. Gaur,[95,96] N. Gehrels,[68] G. Gemme,[47] B. Gendre,[55] E. Genin,[34] A. Gennai,[19] J. George,[48] L. Gergely,[97] V. Germain,[7] Abhirup Ghosh,[15] Archisman Ghosh,[15] S. Ghosh,[52,9] J. A. Giaime,[2,6] K. D. Giardina,[6] A. Giazotto,[19] K. Gill,[98] A. Glaefke,[36] J. R. Gleason,[5] E. Goetz,[71] R. Goetz,[5] L. Gondan,[54] G. González,[2] J. M. Gonzalez Castro,[18,19] A. Gopakumar,[99] N. A. Gordon,[36] M. L. Gorodetsky,[49] S. E. Gossan,[1] M. Gosselin,[34] R. Gouaty,[7] C. Graef,[36] P. B. Graff,[62] M. Granata,[65] A. Grant,[36] S. Gras,[10] C. Gray,[37] G. Greco,[57,58] A. C. Green,[45] R. J. S. Greenhalgh,[100] P. Groot,[52] H. Grote,[8] S. Grunewald,[29] G. M. Guidi,[57,58] X. Guo,[70] A. Gupta,[14] M. K. Gupta,[96] K. E. Gushwa,[1] E. K. Gustafson,[1] R. Gustafson,[71] J. J. Hacker,[22] B. R. Hall,[56] E. D. Hall,[1] G. Hammond,[36] M. Haney,[99] M. M. Hanke,[8] J. Hanks,[37] C. Hanna,[72] M. D. Hannam,[92] J. Hanson,[6] T. Hardwick,[2] J. Harms,[57,58] G. M. Harry,[101] I. W. Harry,[29] M. J. Hart,[36] M. T. Hartman,[5] C.-J. Haster,[45] K. Haughian,[36] J. Healy,[102] J. Heefner*,[1] A. Heidmann,[60] M. C. Heintze,[5,6] G. Heinzel,[8] H. Heitmann,[53] P. Hello,[23] G. Hemming,[34] M. Hendry,[36] I. S. Heng,[36] J. Hennig,[36] A. W. Heptonstall,[1] M. Heurs,[8,17] S. Hild,[36] D. Hoak,[103] K. A. Hodge,[1] D. Hofman,[65] S. E. Hollitt,[104] K. Holt,[6] D. E. Holz,[75] P. Hopkins,[92] D. J. Hosken,[104] J. Hough,[36] E. A. Houston,[36] E. J. Howell,[51] Y. M. Hu,[36] S. Huang,[73] E. A. Huerta,[105,83] D. Huet,[23] B. Hughey,[98] S. Husa,[66] S. H. Huttner,[36] T. Huynh-Dinh,[6] A. Idrisy,[72] N. Indik,[8] D. R. Ingram,[37] R. Inta,[82] H. N. Isa,[36] J.-M. Isac,[60] M. Isi,[1] G. Islas,[22] T. Isogai,[10] B. R. Iyer,[15] K. Izumi,[37] M. B. Jacobson,[1] T. Jacqmin,[60] H. Jang,[77] K. Jani,[83] P. Jaranowski,[106] S. Jawahar,[107] F. Jiménez-Forteza,[66] W. W. Johnson,[2] N. K. Johnson-McDaniel,[15] D. I. Jones,[26] R. Jones,[36] R. J. G. Jonker,[9] L. Ju,[51] Haris K,[108] C. V. Kalaghatgi,[24,92] V. Kalogera,[83] S. Kandhasamy,[21] G. Kang,[77] J. B. Kanner,[1] S. Karki,[59] M. Kasprzack,[2,23,34] E. Katsavounidis,[10] W. Katzman,[6] S. Kaufer,[17] T. Kaur,[51] K. Kawabe,[37] F. Kawazoe,[8] F. Kéfélian,[55] M. S. Kehl,[66] D. Keitel,[8,66] D. B. Kelley,[35] W. Kells,[1] R. Kennedy,[87] D. G. Keppel,[8] J. S. Key,[86] A. Khalaidovski,[8] F. Y. Khalili,[49] I. Khan,[12] S. Khan,[92] Z. Khan,[96] E. A. Khazanov,[109] N. Kijbunchoo,[37] C. Kim,[77] J. Kim,[110] K. Kim,[111] Nam-Gyu Kim,[77] Namjun Kim,[40] Y.-M. Kim,[110] E. J. King,[104] P. J. King,[37] D. L. Kinzel,[6] J. S. Kissel,[37] L. Kleybolte,[27] S. Klimenko,[5] S. M. Koehlenbeck,[8] K. Kokeyama,[2] S. Koley,[9] V. Kondrashov,[1] A. Kontos,[10] S. Koranda,[16] M. Korobko,[27] W. Z. Korth,[1] I. Kowalska,[44] D. B. Kozak,[1] V. Kringel,[8] B. Krishnan,[8] A. Królak,[112,113] C. Krueger,[17] G. Kuehn,[8] P. Kumar,[69] R. Kumar,[36] L. Kuo,[73] A. Kutynia,[112] P. Kwee,[8] B. D. Lackey,[35] M. Landry,[37] J. Lange,[102] B. Lantz,[40] P. D. Lasky,[114] A. Lazzarini,[1] C. Lazzaro,[63,42] P. Leaci,[29,79,28] S. Leavey,[36] E. O. Lebigot,[30,70] C. H. Lee,[110] H. K. Lee,[111] H. M. Lee,[115] K. Lee,[36] A. Lenon,[35] M. Leonardi,[90,91] J. R. Leong,[8] N. Leroy,[23] N. Letendre,[7] Y. Levin,[114] B. M. Levine,[37] T. G. F. Li,[1] A. Libson,[10] T. B. Littenberg,[116] N. A. Lockerbie,[107] J. Logue,[36] A. L. Lombardi,[103] L. T. London,[92] J. E. Lord,[35] M. Lorenzini,[12,13] V. Loriette,[117] M. Lormand,[6] G. Losurdo,[58] J. D. Lough,[8,17] C. O. Lousto,[102] G. Lovelace,[22] H. Lück,[17,8] A. P. Lundgren,[8] J. Luo,[78] R. Lynch,[10] Y. Ma,[51] T. MacDonald,[40] B. Machenschalk,[8] M. MacInnis,[10] D. M. Macleod,[2] F. Magaña-Sandoval,[35] R. M. Magee,[56] M. Mageswaran,[1] E. Majorana,[28] I. Maksimovic,[117] V. Malvezzi,[25,13] N. Man,[53] I. Mandel,[45] V. Mandic,[84] V. Mangano,[36] G. L. Mansell,[20] M. Manske,[16] M. Mantovani,[34] F. Marchesoni,[118,33] F. Marion,[7] S. Márka,[39] Z. Márka,[39] A. S. Markosyan,[40] E. Maros,[1] F. Martelli,[57,58] L. Martellini,[53] I. W. Martin,[36] R. M. Martin,[5] D. V. Martynov,[1] J. N. Marx,[1] K. Mason,[10] A. Masserot,[7] T. J. Massinger,[35] M. Masso-Reid,[36] F. Matichard,[10] L. Matone,[39] N. Mavalvala,[10] N. Mazumder,[56] G. Mazzolo,[8] R. McCarthy,[37] D. E. McClelland,[20] S. McCormick,[6] S. C. McGuire,[119] G. McIntyre,[1] J. McIver,[1] D. J. McManus,[20] S. T. McWilliams,[105] D. Meacher,[72] G. D. Meadors,[29,8] J. Meidam,[9] A. Melatos,[85] G. Mendell,[37] D. Mendoza-Gandara,[8] R. A. Mercer,[16] E. Merilh,[37] M. Merzougui,[53] S. Meshkov,[1] C. Messenger,[36] C. Messick,[72] P. M. Meyers,[84] F. Mezzani,[28,79] H. Miao,[45] C. Michel,[65] H. Middleton,[45] E. E. Mikhailov,[120] L. Milano,[67,4] J. Miller,[10] M. Millhouse,[31] Y. Minenkov,[13] J. Ming,[29,8] S. Mirshekari,[121] C. Mishra,[15] S. Mitra,[14] V. P. Mitrofanov,[49] G. Mitselmakher,[5] R. Mittleman,[10] A. Moggi,[19] M. Mohan,[34] S. R. P. Mohapatra,[10] M. Montani,[57,58] B. C. Moore,[89] C. J. Moore,[122] D. Moraru,[37] G. Moreno,[37] S. R. Morriss,[86] K. Mossavi,[8] B. Mours,[7] C. M. Mow-Lowry,[45] C. L. Mueller,[5] G. Mueller,[5] A. W. Muir,[92] Arunava Mukherjee,[15] D. Mukherjee,[16] S. Mukherjee,[86] N. Mukund,[14] A. Mullavey,[6] J. Munch,[104] D. J. Murphy,[39] P. G. Murray,[36] A. Mytidis,[5] I. Nardecchia,[25,13] L. Naticchioni,[79,28] R. K. Nayak,[123] V. Necula,[5] K. Nedkova,[103] G. Nelemans,[52,9] M. Neri,[46,47] A. Neunzert,[71] G. Newton,[36] T. T. Nguyen,[20] A. B. Nielsen,[8] S. Nissanke,[52,9] A. Nitz,[8] F. Nocera,[34] D. Nolting,[6] M. E. N. Normandin,[86] L. K. Nuttall,[35] J. Oberling,[37] E. Ochsner,[16] J. O'Dell,[100] E. Oelker,[10] G. H. Ogin,[124] J. J. Oh,[125] S. H. Oh,[125] F. Ohme,[92] M. Oliver,[66] P. Oppermann,[8] Richard J. Oram,[6] B. O'Reilly,[6] R. O'Shaughnessy,[102] C. D. Ott,[76] D. J. Ottaway,[104] R. S. Ottens,[5] H. Overmier,[6] B. J. Owen,[82] A. Pai,[108] S. A. Pai,[48] J. R. Palamos,[59] O. Palashov,[109] C. Palomba,[28] A. Pal-Singh,[27] H. Pan,[73] Y. Pan,[62] C. Pankow,[83] F. Pannarale,[92] B. C. Pant,[48] F. Paoletti,[34,19] A. Paoli,[34] M. A. Papa,[29,16,8] H. R. Paris,[40] W. Parker,[6] D. Pascucci,[36] A. Pasqualetti,[34] R. Passaquieti,[18,19] D. Passuello,[19] B. Patricelli,[18,19] Z. Patrick,[40] B. L. Pearlstone,[36] M. Pedraza,[1] R. Pedurand,[65] L. Pekowsky,[35] A. Pele,[6] S. Penn,[126] A. Perreca,[1] H. P. Pfeiffer,[69,29] M. Phelps,[36] O. Piccinni,[79,28] M. Pichot,[55] M. Pickenpack,[8] F. Piergiovanni,[57,58] V. Pierro,[88] G. Pillant,[34] L. Pinard,[65] I. M. Pinto,[88] M. Pitkin,[36] J. H. Poeld,[8] R. Poggiani,[18,19] P. Popolizio,[34] A. Post,[8] J. Powell,[36] J. Prasad,[14] V. Predoi,[92] S. S. Premachandra,[114] T. Prestegard,[84] L. R. Price,[1] M. Prijatelj,[34] M. Principe,[88] S. Privitera,[29] R. Prix,[8] G. A. Prodi,[90,91] L. Prokhorov,[49] O. Puncken,[8] M. Punturo,[33] P. Puppo,[28] M. Pürrer,[29] H. Qi,[16] J. Qin,[51] V. Quetschke,[86] E. A. Quintero,[1] R. Quitzow-James,[59] F. J. Raab,[37] D. S. Rabeling,[20] H. Radkins,[37] P. Raffai,[54] S. Raja,[48] M. Rakhmanov,[86] C. R. Ramet,[6] P. Rapagnani,[79,28] V. Raymond,[29] M. Razzano,[18,19] V. Re,[25] J. Read,[22] C. M. Reed,[37] T. Regimbau,[53] L. Rei,[47] S. Reid,[50] D. H. Reitze,[1,5] H. Rew,[120] S. D. Reyes,[35] F. Ricci,[79,28] K. Riles,[71] N. A. Robertson,[1,36] R. Robie,[36] F. Robinet,[23] A. Rocchi,[13] L. Rolland,[7] G. Rollins,[1] V. J. Roma,[59] J. D. Romano,[86] R. Romano,[3,4] G. Romanov,[120] J. H. Romie,[6] D. Rosińska,[127,43] S. Rowan,[36] A. Rüdiger,[8] P. Ruggi,[34] K. Ryan,[37] S. Sachdev,[1] T. Sadecki,[37] L. Sadeghian,[16] L. Salconi,[34] M. Saleem,[108] F. Salemi,[8] A. Samajdar,[123] L. Sammut,[85,114] L. M. Sampson,[83] E. J. Sanchez,[1] V. Sandberg,[37] B. Sandeen,[83] G. H. Sanders,[1] J. R. Sanders,[71,35] B. Sassolas,[65] B. S. Sathyaprakash,[92] P. R. Saulson,[35] O. Sauter,[71] R. L. Savage,[37] A. Sawadsky,[17] P. Schale,[59] R. Schilling†,[8] J. Schmidt,[8] P. Schmidt,[1,76] R. Schnabel,[27] R. M. S. Schofield,[59] A. Schönbeck,[27] E. Schreiber,[8] D. Schuette,[8,17] B. F. Schutz,[92] J. Scott,[36] S. M. Scott,[20] D. Sellers,[6] D. Sentenac,[34] V. Sequino,[25,13] A. Sergeev,[109] G. Serna,[22] Y. Setyawati,[52,9] A. Sevigny,[37] D. A. Shaddock,[20] T. Shaffer,[37] S. Shah,[52,9] M. S. Shahriar,[83] M. Shalev,[8] Z. Shao,[1] B. Shapiro,[40] P. Shawhan,[62] A. Sheperd,[16] D. H. Shoemaker,[10] D. M. Shoemaker,[68] K. Siellez,[53,83] X. Siemens,[16] D. Sigg,[37] A. D. Silva,[11] D. Simakov,[8] A. Singer,[1] L. P. Singer,[68] A. Singh,[29,8] R. Singh,[2] A. Singhal,[12] A. M. Sintes,[66] B. J. J. Slagmolen,[20] J. R. Smith,[22] M. R. Smith,[1] N. D. Smith,[1] R. J. E. Smith,[1] E. J. Son,[125] B. Sorazu,[36] F. Sorrentino,[47] T. Souradeep,[14] A. K. Srivastava,[96] A. Staley,[39] M. Steinke,[8] J. Steinlechner,[36] S. Steinlechner,[36] D. Steinmeyer,[8,17] B. C. Stephens,[16] S. P. Stevenson,[45] R. Stone,[86] K. A. Strain,[36] N. Straniero,[65] G. Stratta,[57,58] N. A. Strauss,[78] S. Strigin,[49] R. Sturani,[121] A. L. Stuver,[6] T. Z. Summerscales,[128] L. Sun,[85] P. J. Sutton,[92] B. L. Swinkels,[34] M. J. Szczepańczyk,[88] M. Tacca,[30] D. Talukder,[59] D. B. Tanner,[5] M. Tápai,[97] S. P. Tarabrin,[8] A. Taracchini,[29] R. Taylor,[1] T. Theeg,[8] M. P. Thirugnanasambandam,[1] E. G. Thomas,[45] M. Thomas,[6] P. Thomas,[37] K. A. Thorne,[6] K. S. Thorne,[76] E. Thrane,[114] S. Tiwari,[12] V. Tiwari,[92] K. V. Tokmakov,[107] C. Tomlinson,[87] M. Tonelli,[18,19] C. V. Torres‡,[86] C. I. Torrie,[1] D. Töyrä,[45] F. Travasso,[32,33] G. Traylor,[6] D. Trifirò,[21] M. C. Tringali,[90,91] L. Trozzo,[129,19] M. Tse,[10] M. Turconi,[53] D. Tuyenbayev,[86] D. Ugolini,[130] C. S. Unnikrishnan,[99] A. L. Urban,[16] S. A. Usman,[35] H. Vahlbruch,[17] G. Vajente,[1] G. Valdes,[86] M. Vallisneri,[76] N. van Bakel,[9] M. van Beuzekom,[9] J. F. J. van den Brand,[61,9] C. Van Den Broeck,[9] D. C. Vander-Hyde,[35,22] L. van der Schaaf,[9] J. V. van Heijningen,[9] A. A. van Veggel,[36] M. Vardaro,[41,42] S. Vass,[1] M. Vasúth,[38] R. Vaulin,[10] A. Vecchio,[45] G. Vedovato,[42] J. Veitch,[45] P. J. Veitch,[104] K. Venkateswara,[131] D. Verkindt,[7] F. Vetrano,[57,58] A. Viceré,[57,58] S. Vinciguerra,[45] D. J. Vine,[50] J.-Y. Vinet,[53] S. Vitale,[10] T. Vo,[35] H. Vocca,[32,33] C. Vorvick,[37] D. Voss,[5] W. D. Vousden,[45] S. P. Vyatchanin,[49] A. R. Wade,[20] L. E. Wade,[132] M. Wade,[132] S. J. Waldman,[10] M. Walker,[2] L. Wallace,[1] S. Walsh,[16,8,29] G. Wang,[12] H. Wang,[45] M. Wang,[45] X. Wang,[70] Y. Wang,[51] H. Ward,[36] R. L. Ward,[20] J. Warner,[37] M. Was,[7] B. Weaver,[37] L.-W. Wei,[53] M. Weinert,[8] A. J. Weinstein,[1] R. Weiss,[10] T. Welborn,[6] L. Wen,[51] P. Weßels,[8] T. Westphal,[8] K. Wette,[8] J. T. Whelan,[102,8] S. E. Whitcomb,[1] D. J. White,[87] B. F. Whiting,[5] K. Wiesner,[8] C. Wilkinson,[37] P. A. Willems,[1] L. Williams,[5] R. D. Williams,[1] A. R. Williamson,[92] J. L. Willis,[133] B. Willke,[17,8] M. H. Wimmer,[8,17] L. Winkelmann,[8] W. Winkler,[8] C. C. Wipf,[1] A. G. Wiseman,[16] H. Wittel,[8,17] G. Woan,[36] J. Worden,[37] J. L. Wright,[36] G. Wu,[6] J. Yablon,[83] I. Yakushin,[6] W. Yam,[10] H. Yamamoto,[1] C. C. Yancey,[62] M. J. Yap,[20] H. Yu,[10] M. Yvert,[7] A. Zadrożny,[112] L. Zangrando,[42] M. Zanolin,[98] J.-P. Zendri,[42] M. Zevin,[83] F. Zhang,[10] L. Zhang,[1] M. Zhang,[120] Y. Zhang,[102] C. Zhao,[51] M. Zhou,[83] Z. Zhou,[83] X. J. Zhu,[51] M. E. Zucker,[1,10] S. E. Zuraw,[103] and J. Zweizig[1]

(LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration)

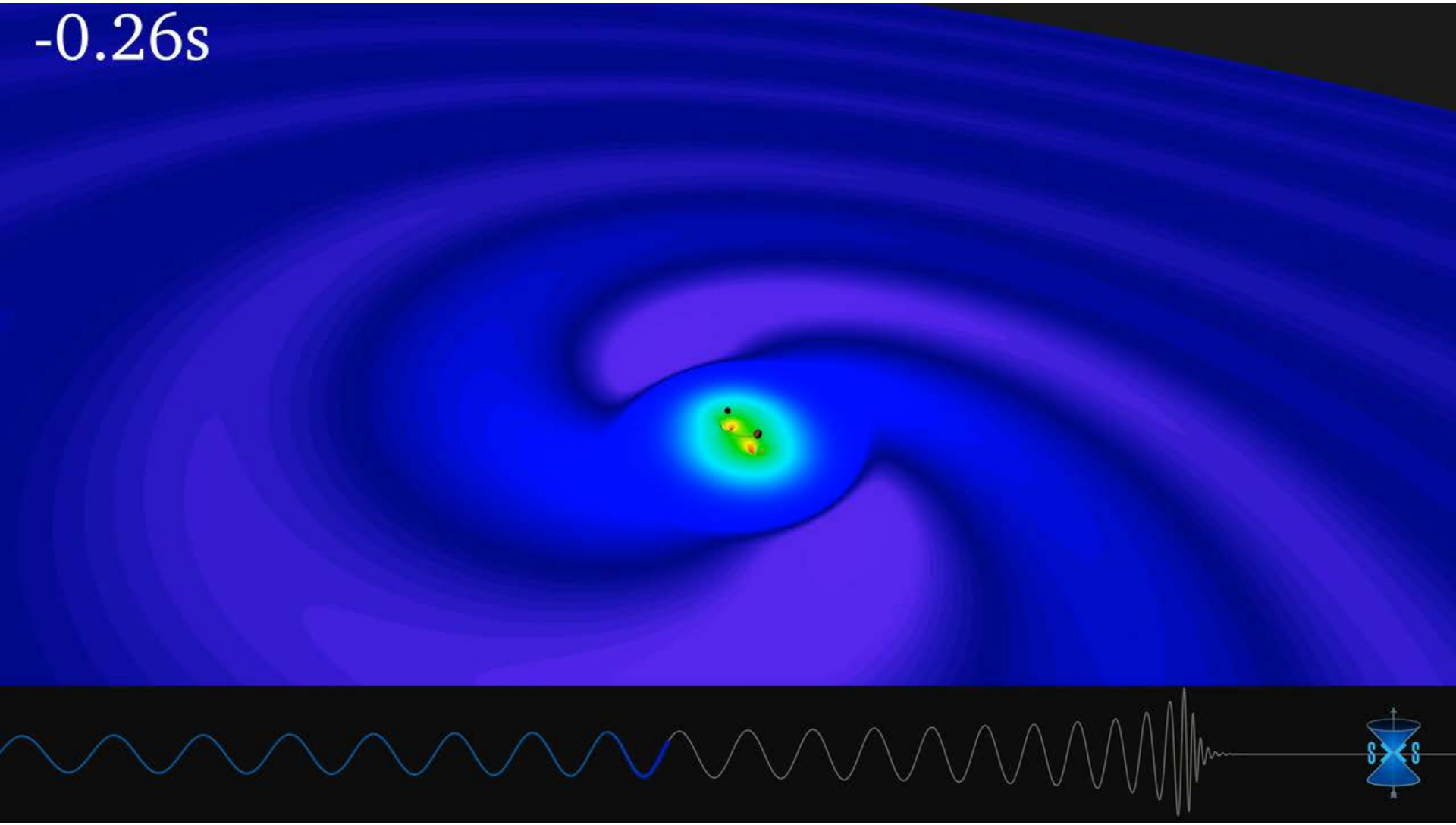
- 1009 auteurs – dont 75 Français – dans 133 laboratoires

Le signal observé

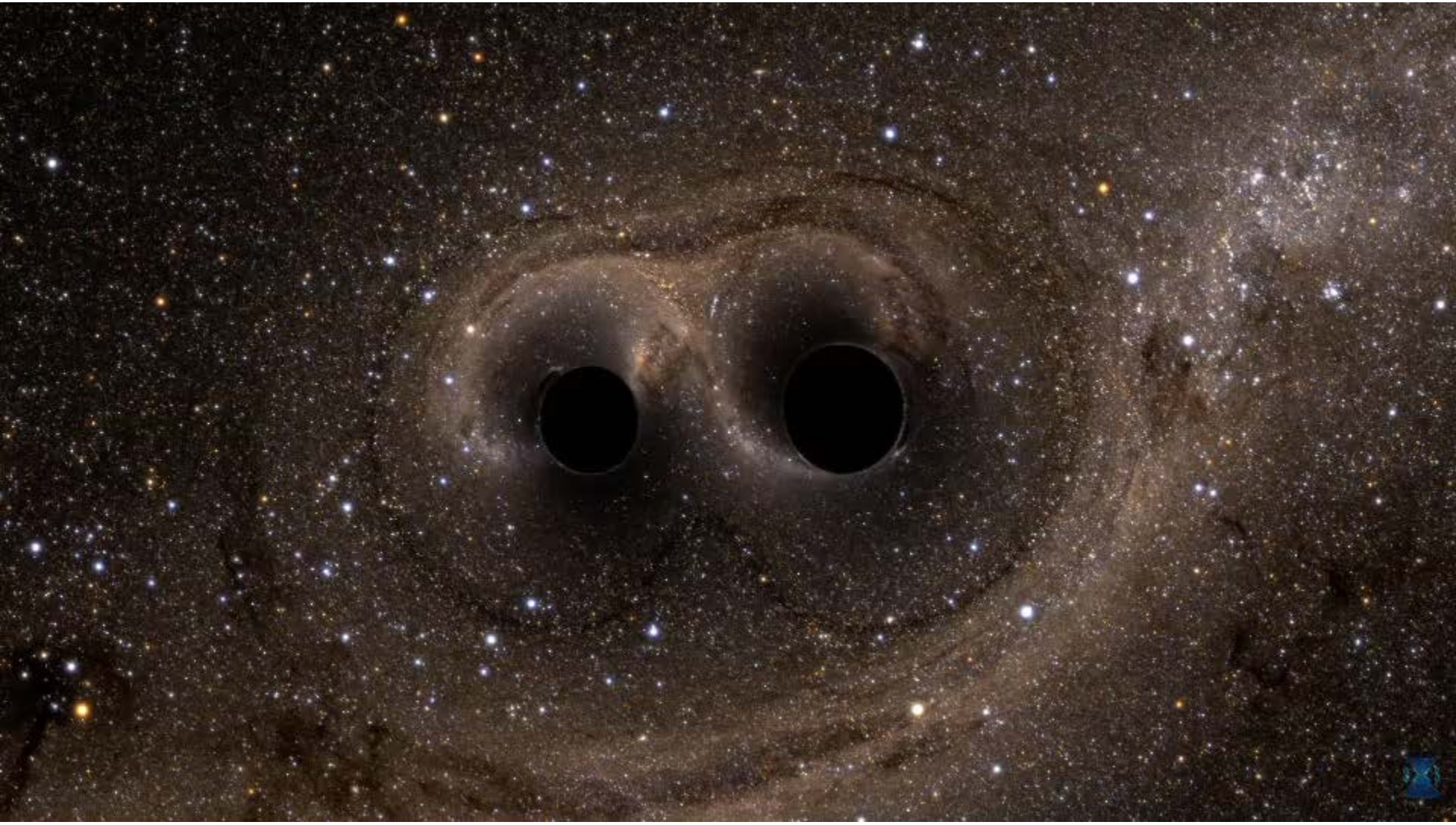
- Même signal dans les deux détecteurs LIGO, avec un décalage de 7 ms
- Evolution caractéristique d'une coalescence
- Signal extrait des données en accord avec le signal attendu pour la coalescence de deux trous noirs de 36 et 29 fois la masse du Soleil



Du signal à la source

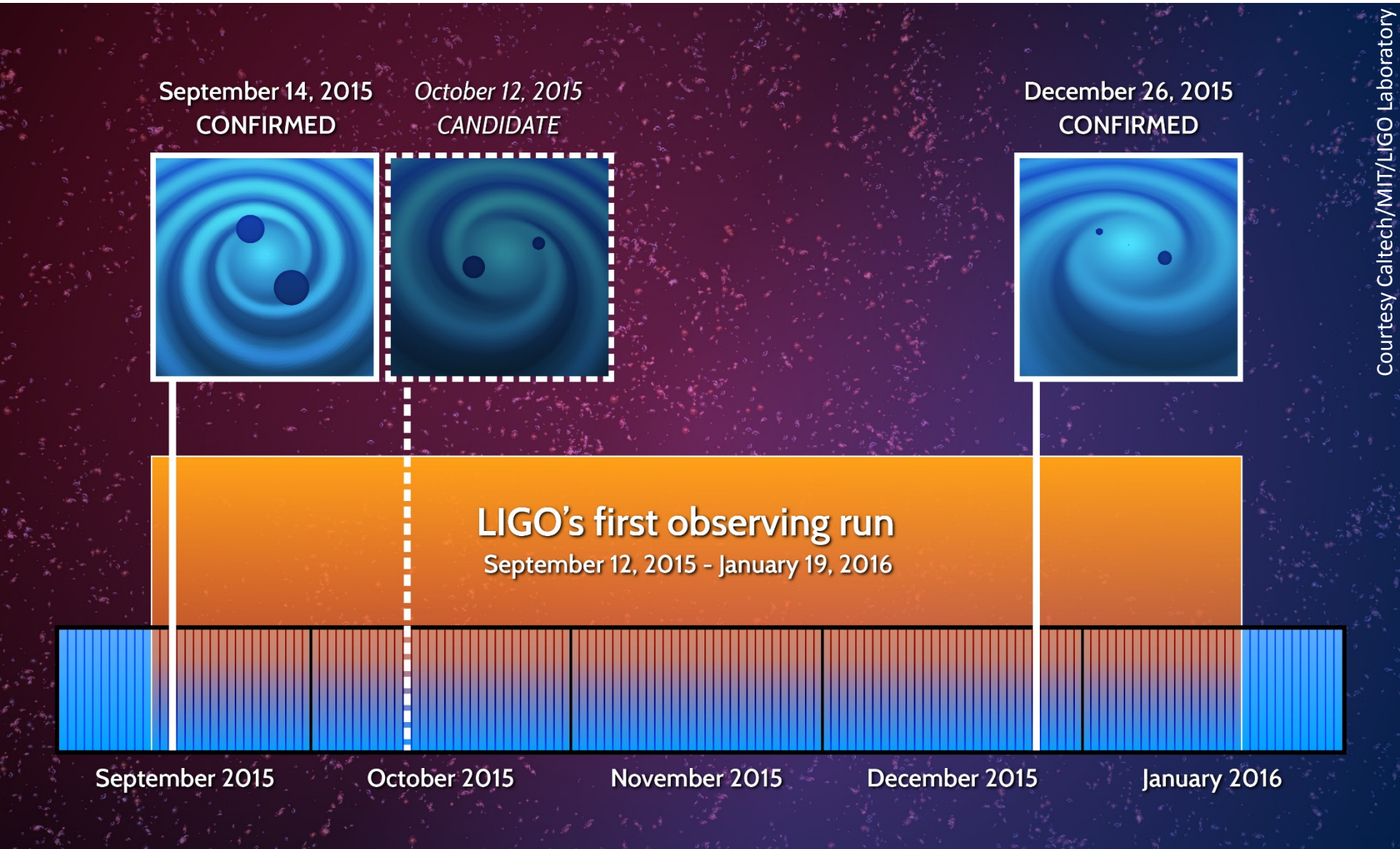


Comme si vous y étiez



Simulating eXtreme Spacetimes project

Premières photos de famille

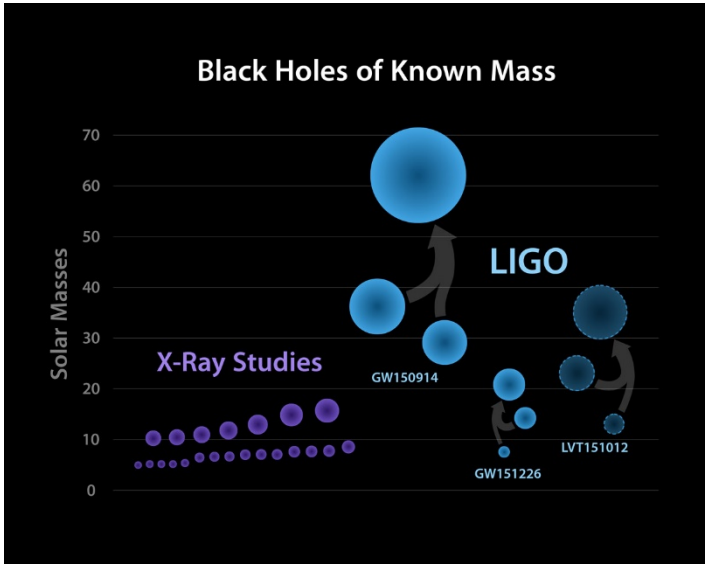


GW150914 en quelques chiffres saisissants

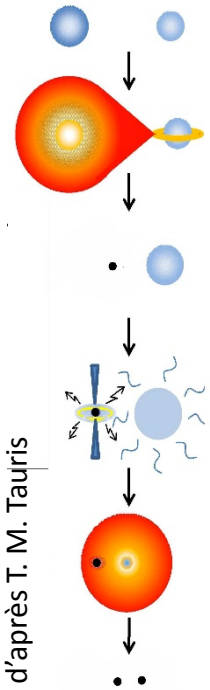
- Amplitude au maximum du signal $h \sim 10^{-21}$
  - La longueur des bras de LIGO a changé de $4 \,.\, 10^{-18}$ m
  - Quatre millièmes de la taille d'un proton
- Distance de la source $D \sim 1{,}3$ milliard d'années-lumière
  - Les ondes émises lors de la coalescence se sont propagées dans l'espace pendant ~ 1,3 milliard d'années avant de traverser la Terre le 14 septembre 2015
- Energie émise par le système de trous noirs sous forme d'ondes gravitationnelles $E \sim 62 - (36 + 29) = 3\ M_\odot$
  - La plupart dans la fraction de seconde précédant la fusion
- Luminosité au maximum du signal $\mathcal{L} \sim 200\ M_\odot / s$
  - Brièvement plus puissant que toutes les galaxies de l'Univers
  - Brièvement plus « brillant » que la pleine lune malgré la distance

Implications astrophysiques

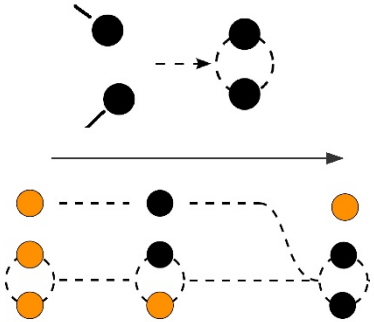
- Première observation directe de trous noirs
- Il existe des trous noirs de masse stellaire relativement lourds (> 25 $M_\odot$)
  - L'environnement des étoiles mères favorise de faibles vents stellaires



Courtesy Caltech/MIT/LIGO Laboratory



d'après T. M. Tauris



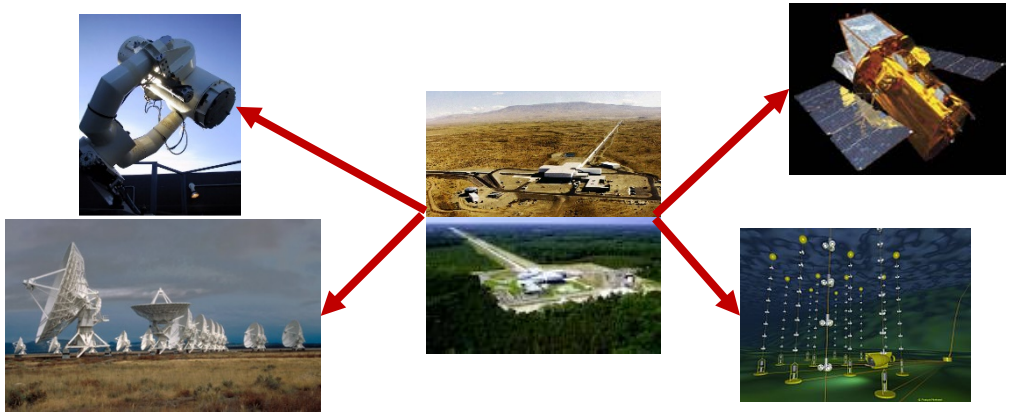
d'après B. M. Ziosi et al.

- La nature forme des systèmes binaires de trous noirs
  - GW150914 et GW151226 ne permettent pas d'identifier le mécanisme de formation
  - Issus de systèmes binaires d'étoiles massives ou formés dynamiquement par capture?

- Ces systèmes évoluent jusqu'à la coalescence en un temps inférieur à l'âge de l'Univers
- Ces coalescences se produisent relativement souvent

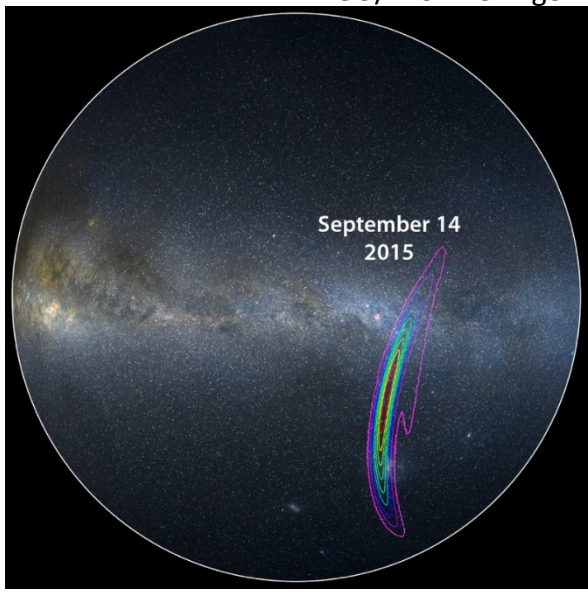
Astronomie multi-messager

- Accord entre LIGO et Virgo et des partenaires de l'astronomie traditionnelle
  - LIGO et Virgo diffusent rapidement l'information sur les événements intéressants
  - 70 accords conclus, 160 instruments couvrant tout le spectre des ondes radio aux rayons gamma de très haute énergie



- 25 équipes ont réalisé des observations de suivi de GW150914 dans les jours / semaines suivants
  - A la recherche d'un éventuel signal électromagnétique associé
  - Difficile : zone probable de GW150914 ~ 590 deg^2

LIGO/Axel Mellinger



Explorer la gravitation

- Vitesse orbitale dans le système solaire $v/c \sim 10^{-5}$
- Pulsar binaire le plus relativiste connu à ce jour
  - J0737-3039, vitesse orbitale $v/c \sim 2 \times 10^{-3}$
- GW150914 et GW151226
  - Champ gravitationnel très fort, effets non linéaires, vitesse orbitale élevée $v/c \sim 0{,}5$
- Premiers tests inédits de la gravitation
  - Les signaux observés correspondent-il aux prédictions de la Relativité Générale ?

    Oui ! (A la précision permise par ces deux observations)
  - Contrainte sur la masse d'un hypothétique graviton

Conclusion et perspectives

- 2015 : Premières détections directes d'ondes gravitationnelles, premières détections de systèmes de trous noirs
- Une prouesse instrumentale
- Une vérification de la Relativité Générale, et l'avènement d'un nouvel outil pour la tester de façon approfondie
- L'émergence d'une nouvelle discipline scientifique, l'astronomie des ondes gravitationnelles
- 2016 : Nouvelle campagne d'observation avec LIGO
- 2017 : Virgo va redémarrer les observations
- Plus de détecteurs, des détecteurs de plus en plus sensibles, des campagnes d'observation plus longues…
  - Des premières détections à la routine… et à l'inattendu ?

Un peu de pub

CARNETS
DE SCIENCE
La revue du CNRS #1
Astronomie
La quête des exomondes
Géographie
EN MISSION DANS LA JUNGLE
DOSSIER
Le siècle du vivant
Mathématiques
Les confessions d'Ávila et de Villani
Histoire
Ce que la psychologie doit à Platon

Encore un peu de pub