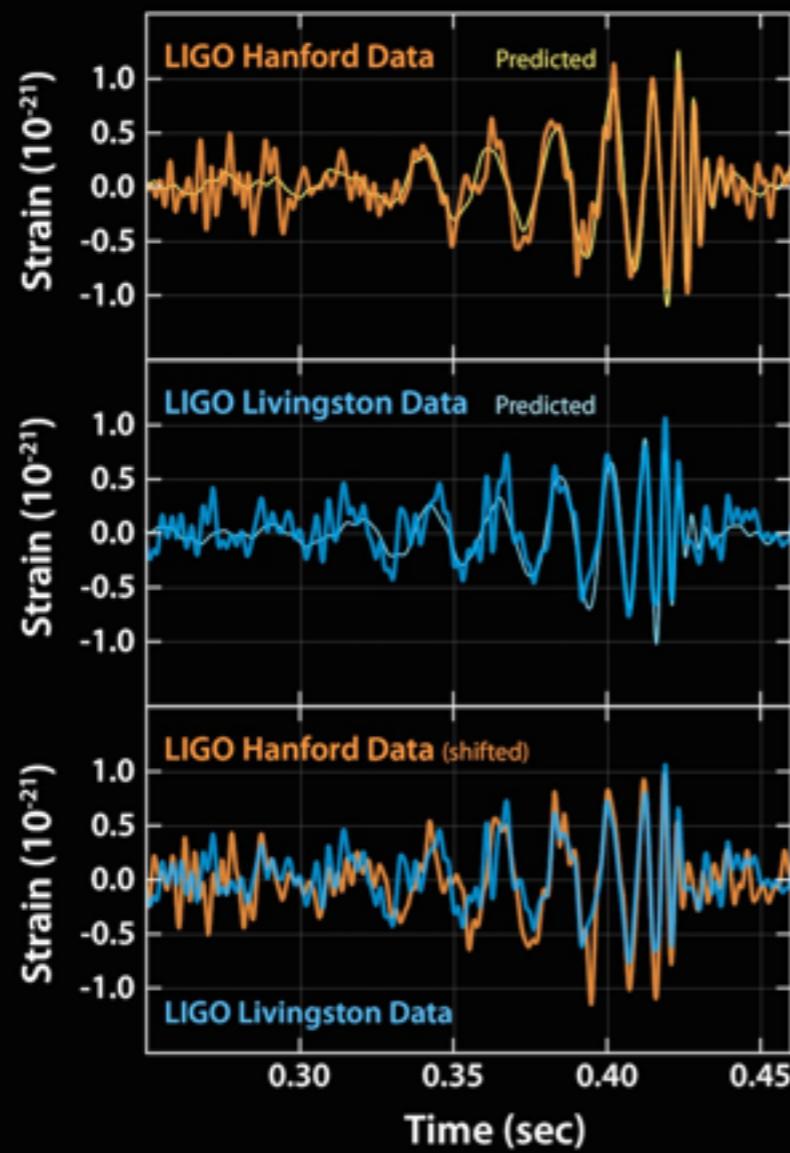


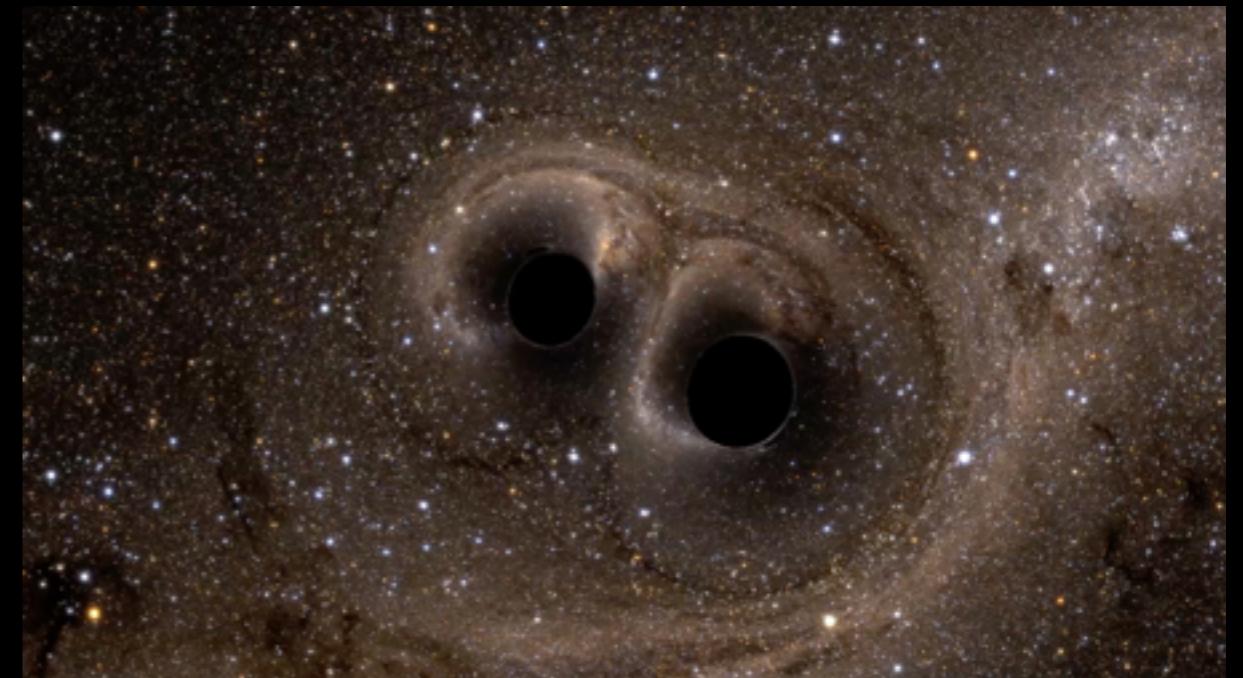
重力波

直接観測の意義と展望



真貝寿明 (大阪工業大)

<http://www.oit.ac.jp/is/~shinkai/>



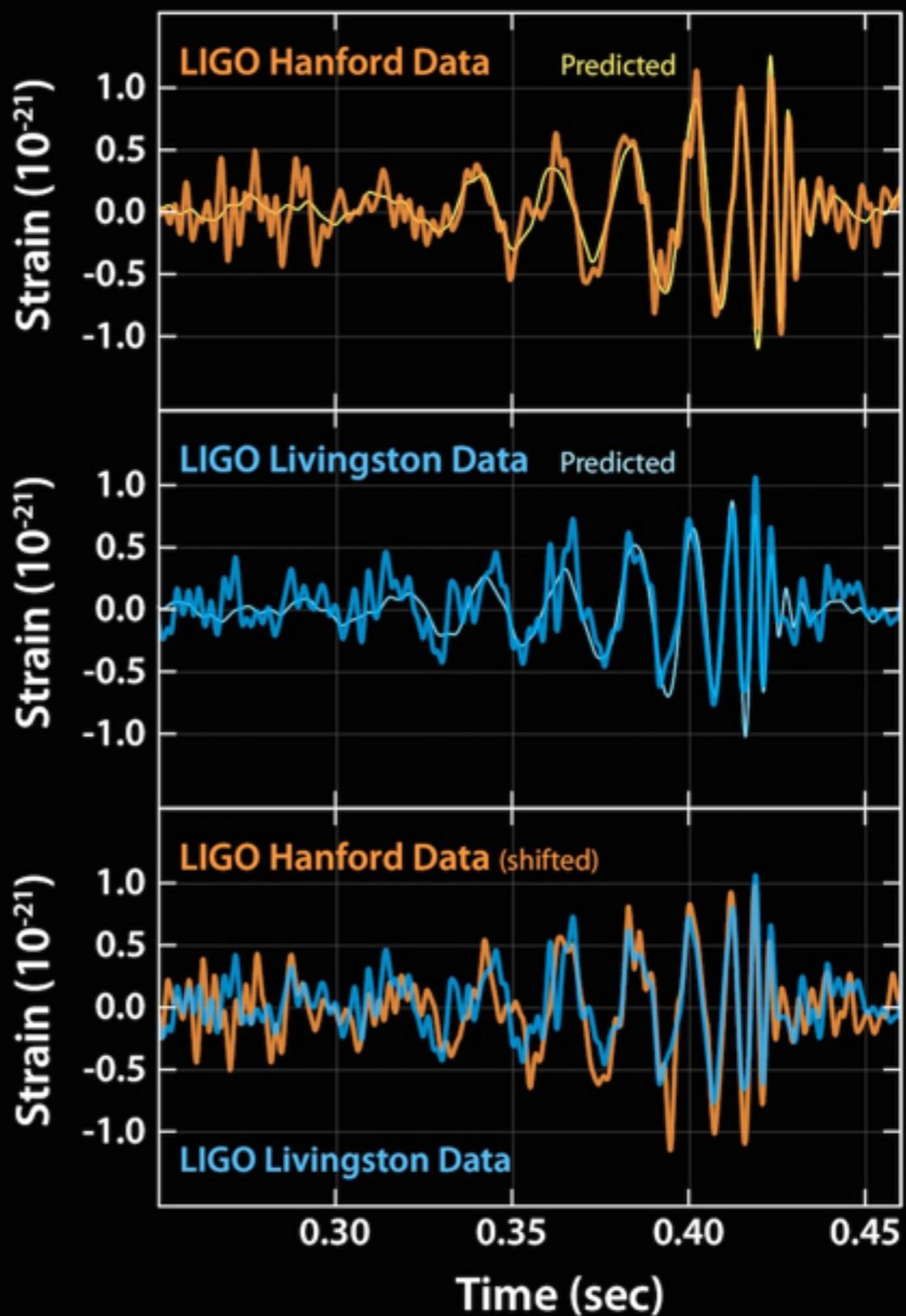
2016年2月, LIGOが重力波を初めて検出した, と発表した



四国新聞だけ
ちがった. . . 残念 (笑)

2016年2月, LIGOが重力波を初めて検出した, と発表した

2015年9月14日



contents

1. 重力波とは

Einsteinが残した100年越しの宿題

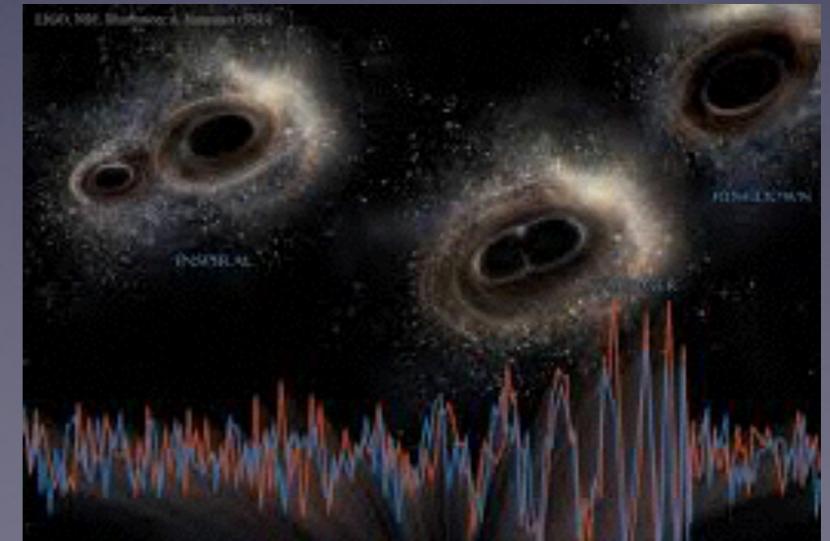
2. 直接観測された重力波

LIGOグループが発見した3つの重力波イベント

3. 将来の重力波観測

日本のKAGRA

宇宙空間での重力波観測



contents

1. 重力波とは

Einsteinが残した100年越しの宿題

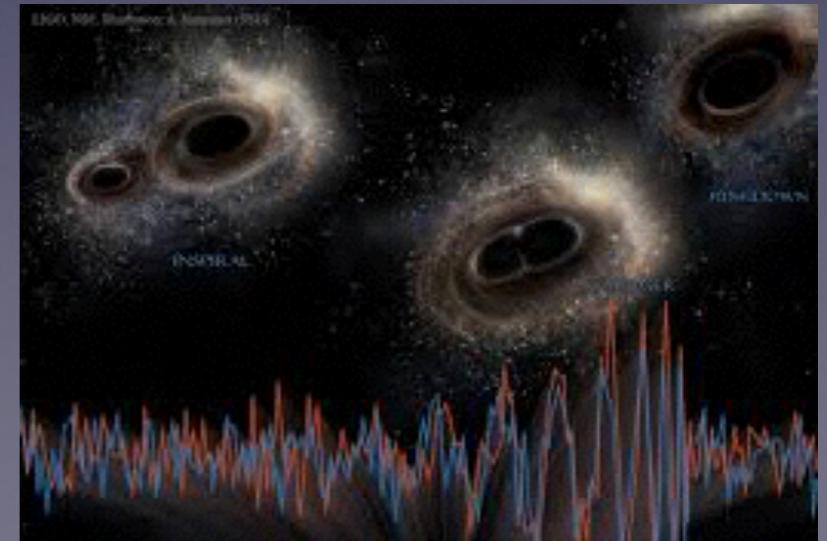
2. 直接観測された重力波

LIGOグループが発見した3つの重力波イベント

3. 将来の重力波観測

日本のKAGRA

宇宙空間での重力波観測



重力の正体は？



by Frits Ahlefeldt

<http://hikingartist.com/>



by Frits Ahlefeldt



by Frits Ahlefeldt



amonaimages



by Frits Ahlefeldt

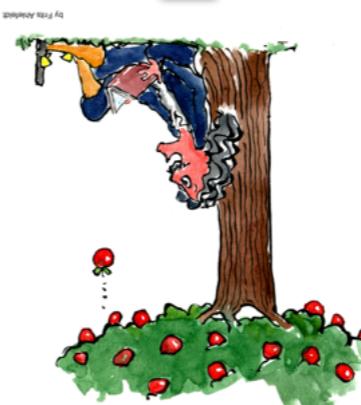
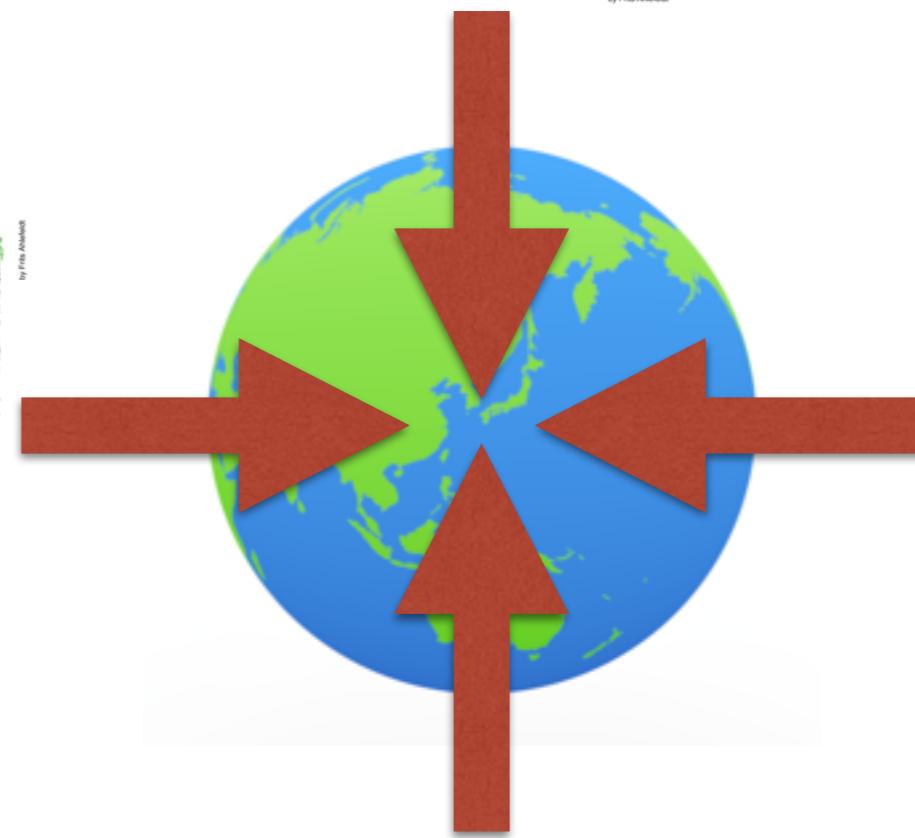


by Frits Ahlefeldt

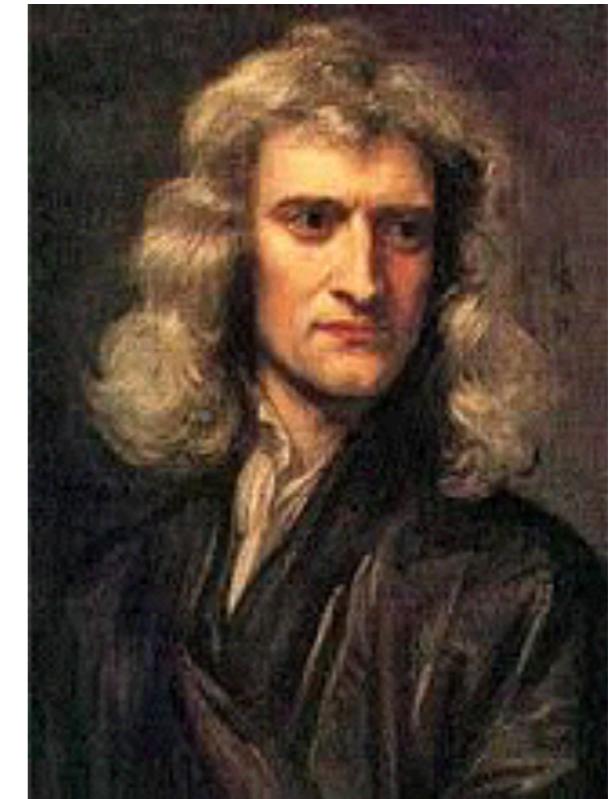
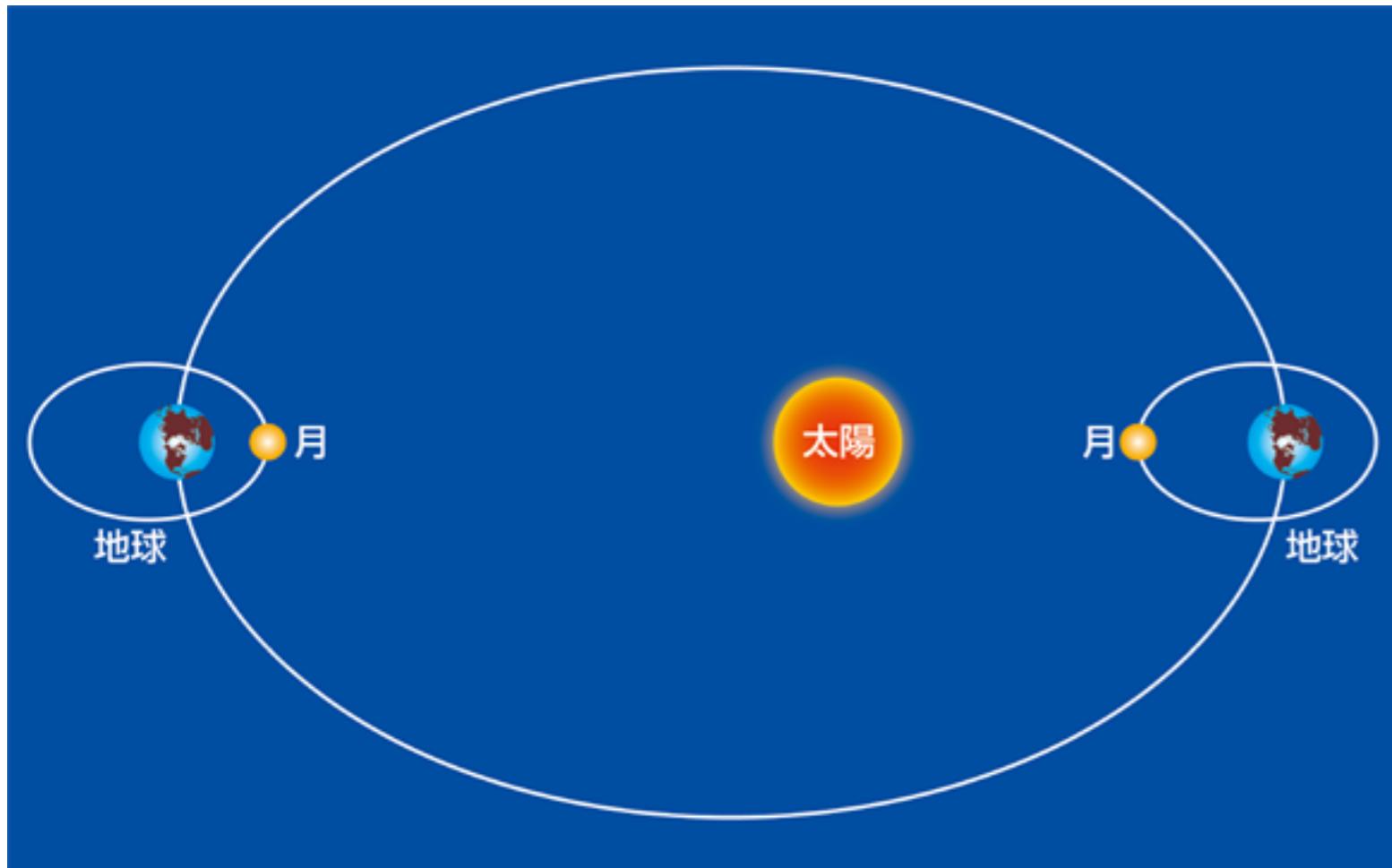
重力の正体は？



<http://hikingartist.com/>



重力の正体は？



ニュートン

$$F = G \frac{Mm}{r^2}$$

万有引力

=すべてのものは引力で引き合う

重力の正体は？



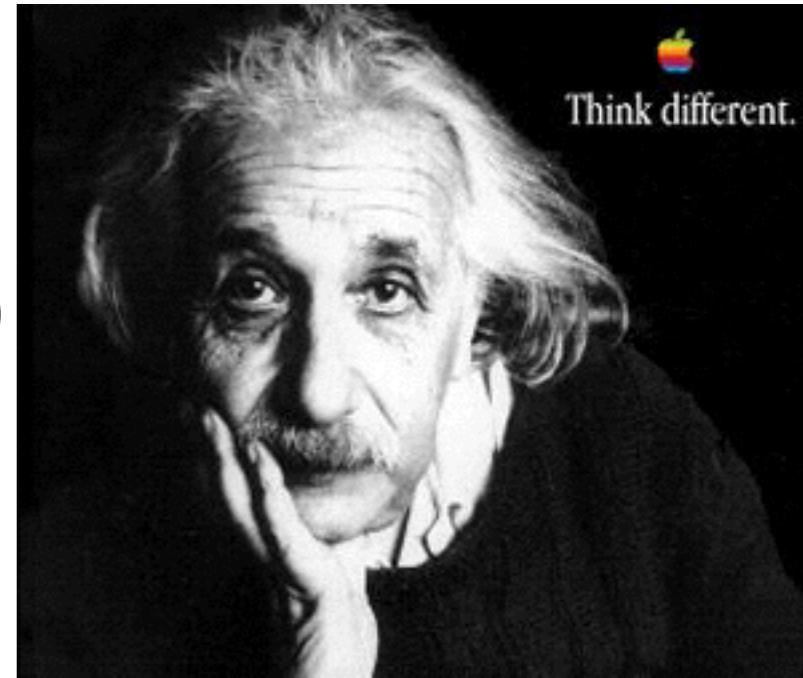
<http://hikingartist.com/>

「万有引力があるからだ」 (ニュートン, 1687)

$$F = G \frac{Mm}{r^2}$$

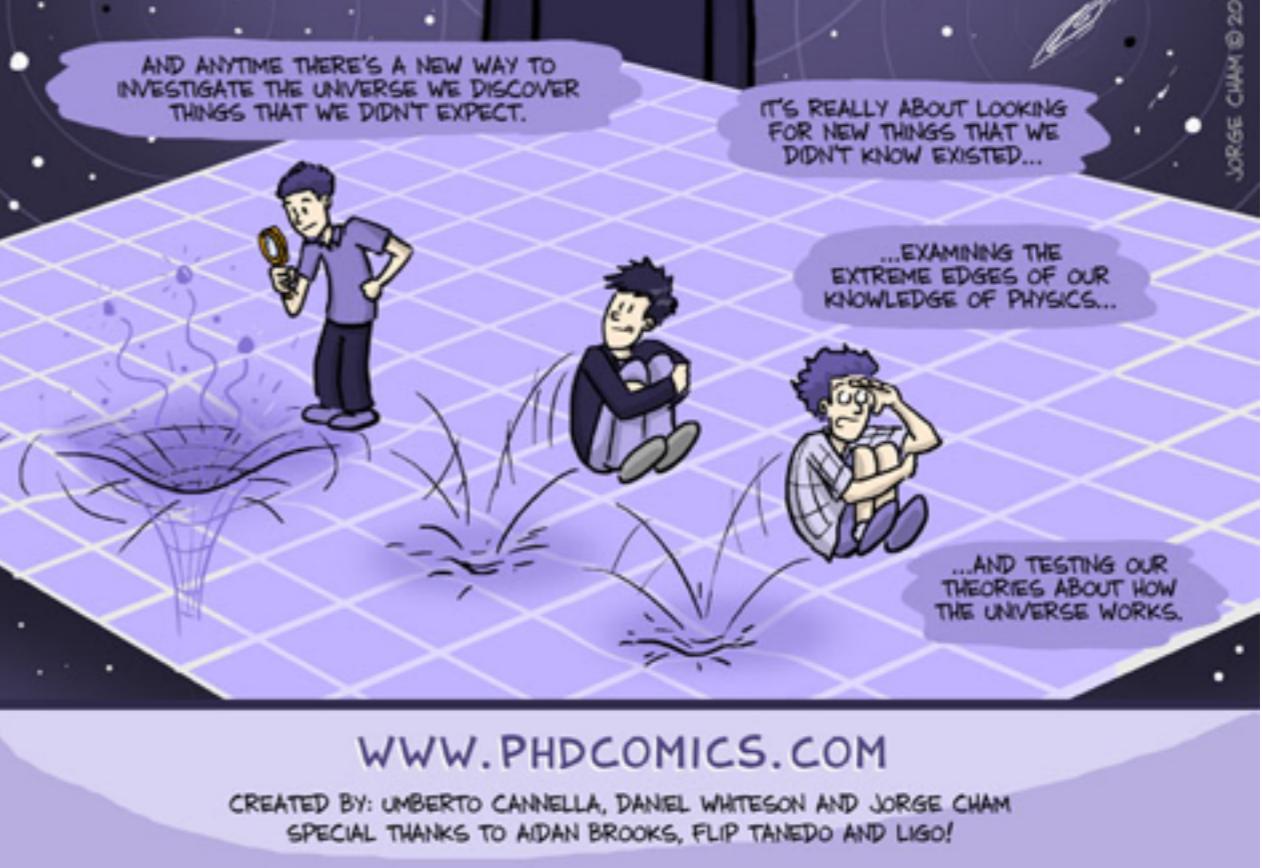
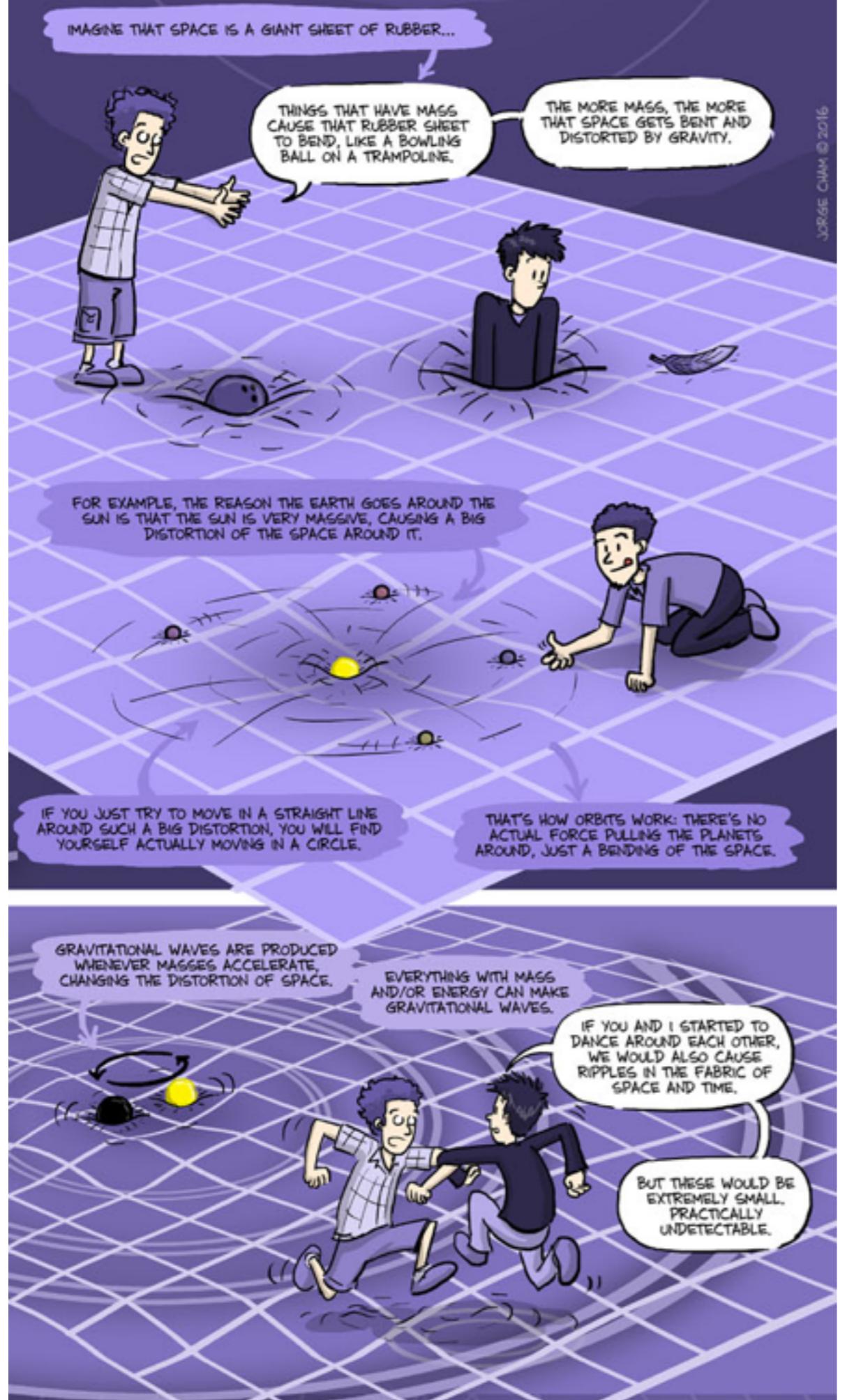
$$m \frac{d^2x}{dt^2} = F$$

「時空のゆがみだ」
(アインシュタイン, 1915)
一般相対性理論

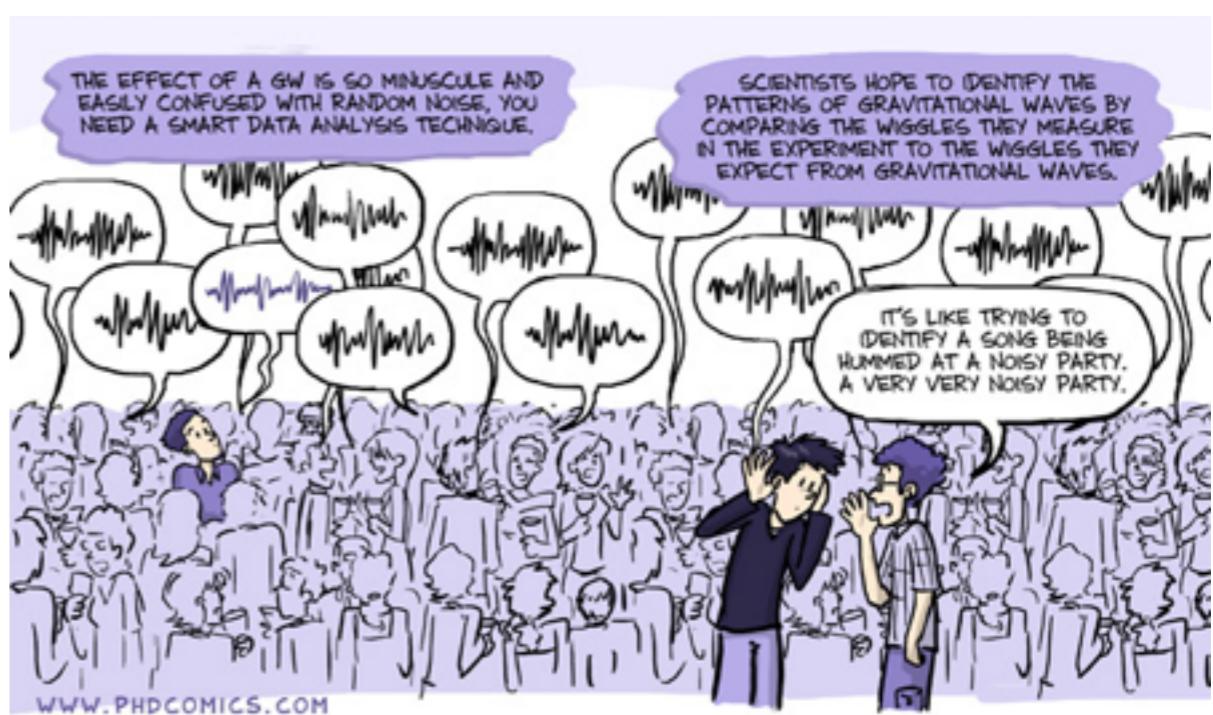


$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

$$\frac{d^2\xi^\mu}{d\tau^2} = R^\mu{}_{\nu\rho\sigma} \frac{d\xi^\nu}{d\tau} \frac{d\xi^\rho}{d\tau} \xi^\sigma$$



www.phdcomics.com
“gravitational waves explained”

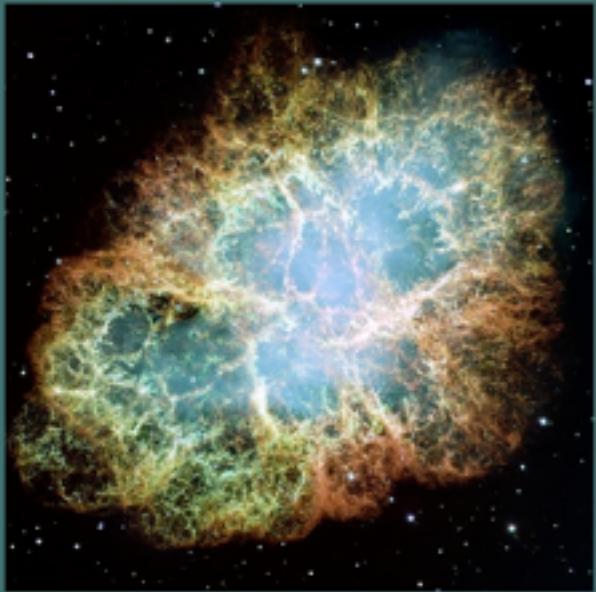


重力波の波源

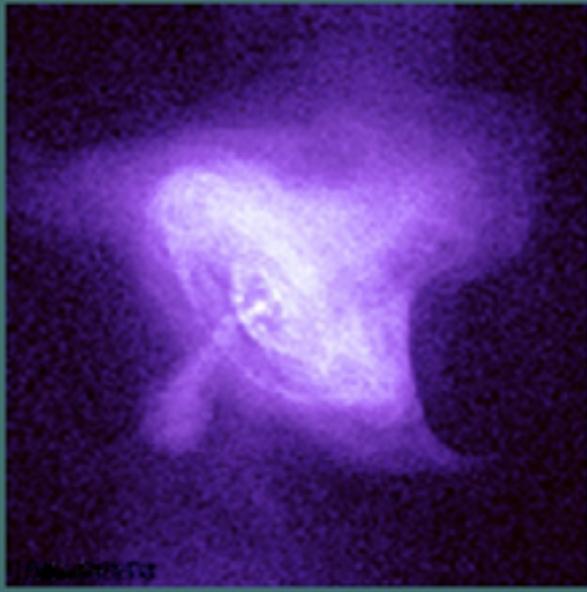
sources of gravitational wave

<http://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/>

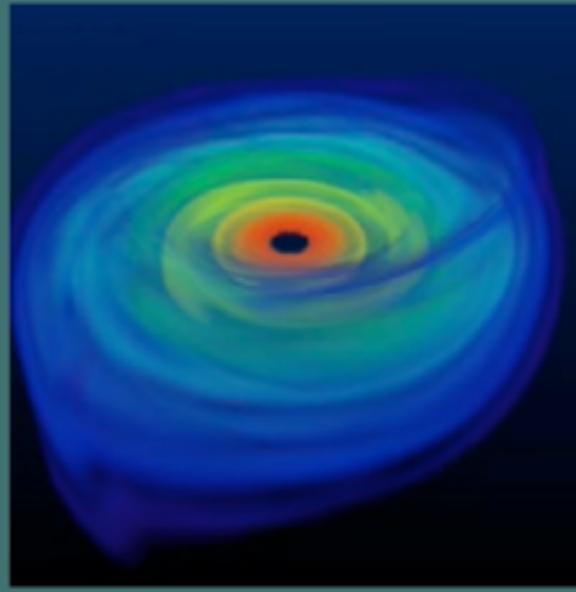
超新星爆発 (写真出典: NASA)



パルサー (写真出典: NASA)



ブラックホール
(想像図)



連星中性子星合体
(想像図)



予測が難しい

振幅が小さい

振幅が小さい

連星合体を
ターゲットに

重力波は弱いのであらかじめ、波形の予測が必要
ノイズにまみれたデータに、予測した波形があるか探す

重力波 幻の発見 (1968/70)



Joseph Weber (**pictured**), a physicist at the University of Maryland in College Park, believed that gravitational waves were real. In 1969, he announced that he had found them with a detector of his own invention: an aluminium cylinder, about 2 metres long and 1 metre in diameter, that 'rang' when it was struck by such a wave². His result was never replicated, and was eventually rejected by nearly everyone except Weber himself. Nonetheless, his work drew many other researchers into the gravitational wave field.

68年に「2台の装置で同時に重力波信号を検出」

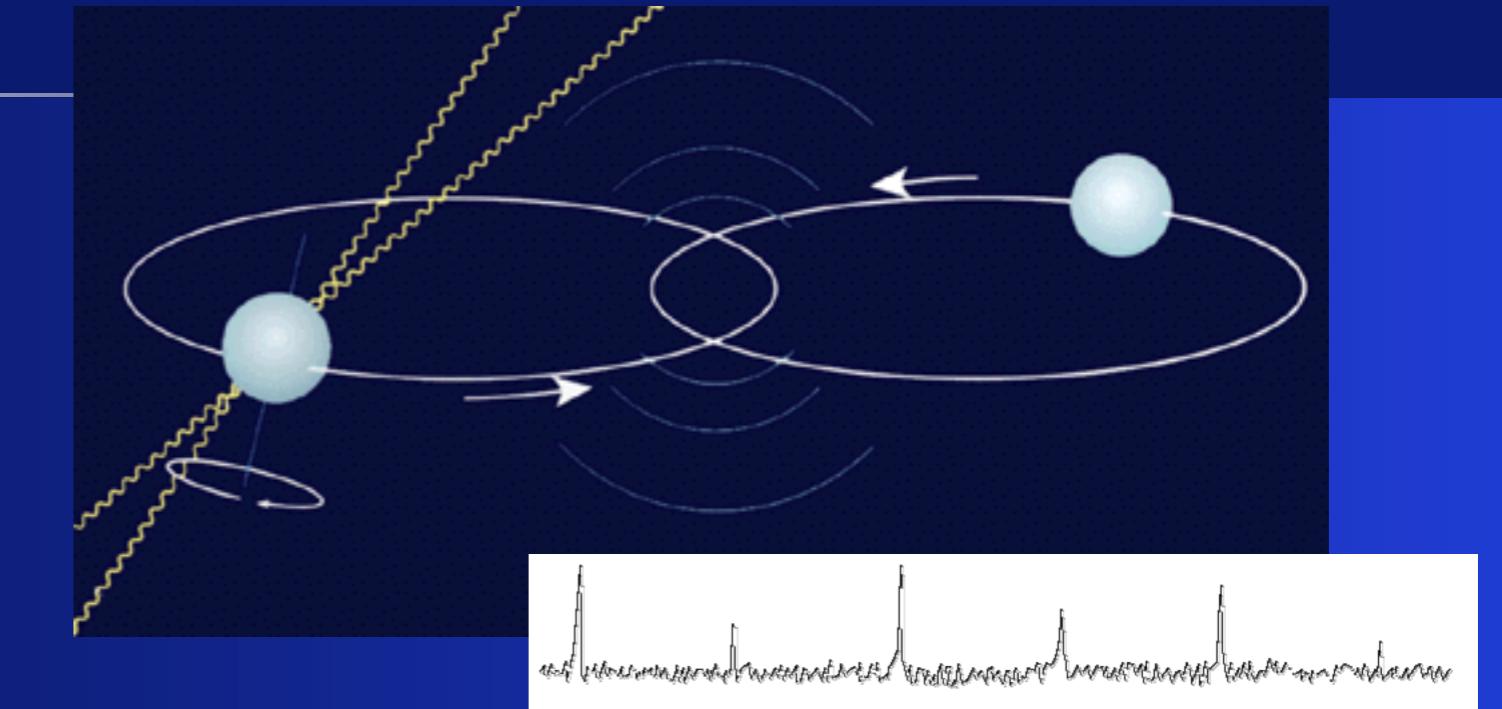
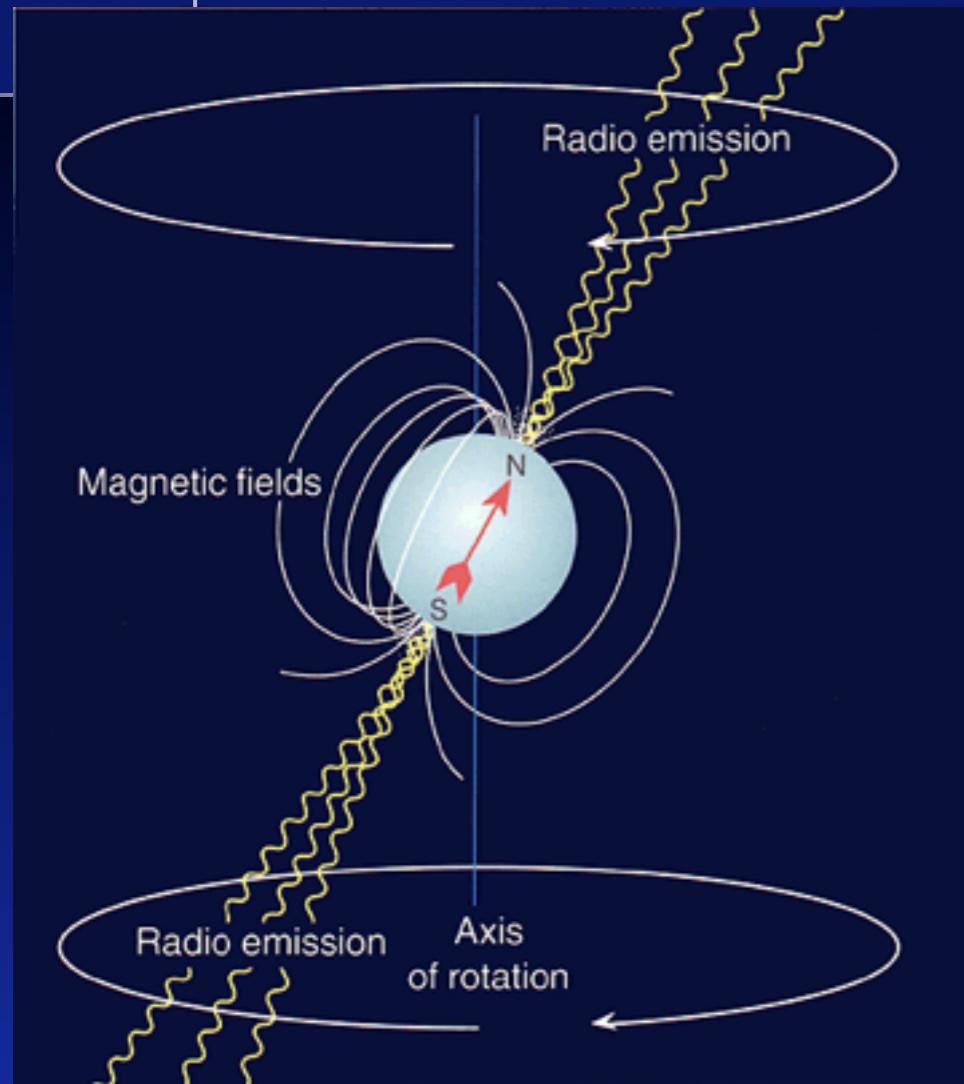
70年に「重力波信号はおよそ一日に三回の頻度で検出され、検出装置が銀河の中心に対して垂直方向に向いているときに検出率が高い」

と発表したが、他のグループで追試されず。

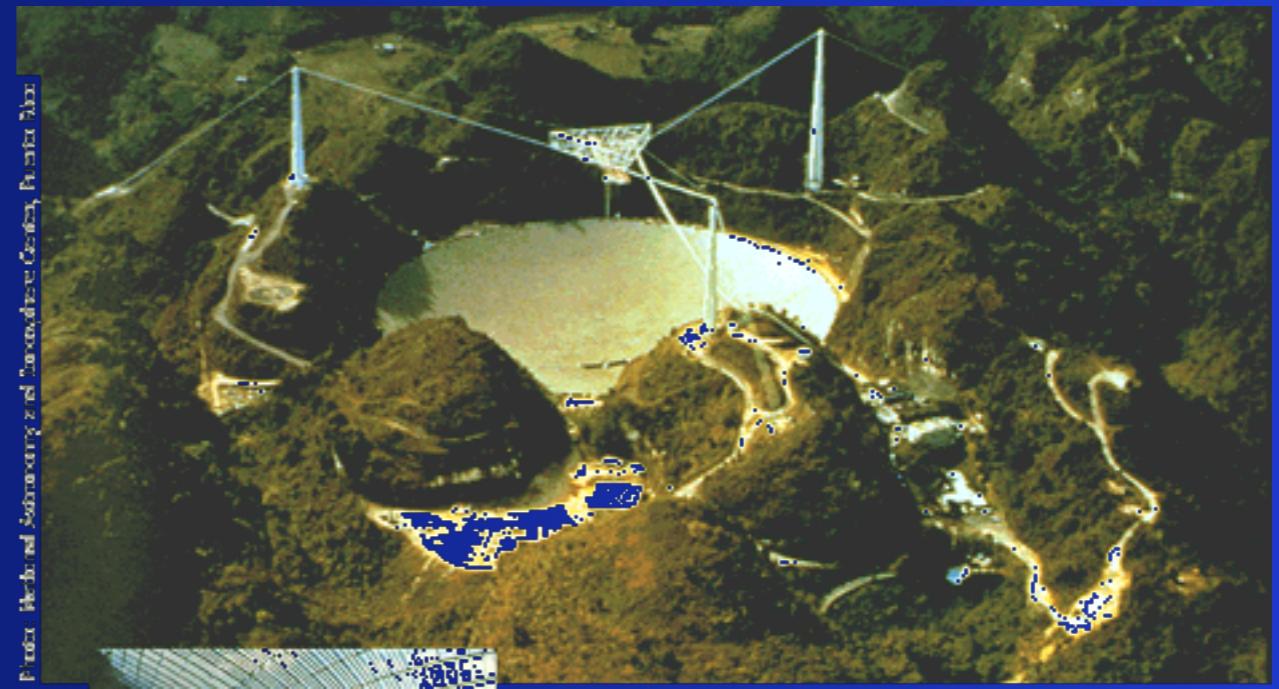
ウェーバー

Joseph Weber

連星中性子星の発見 (1974)

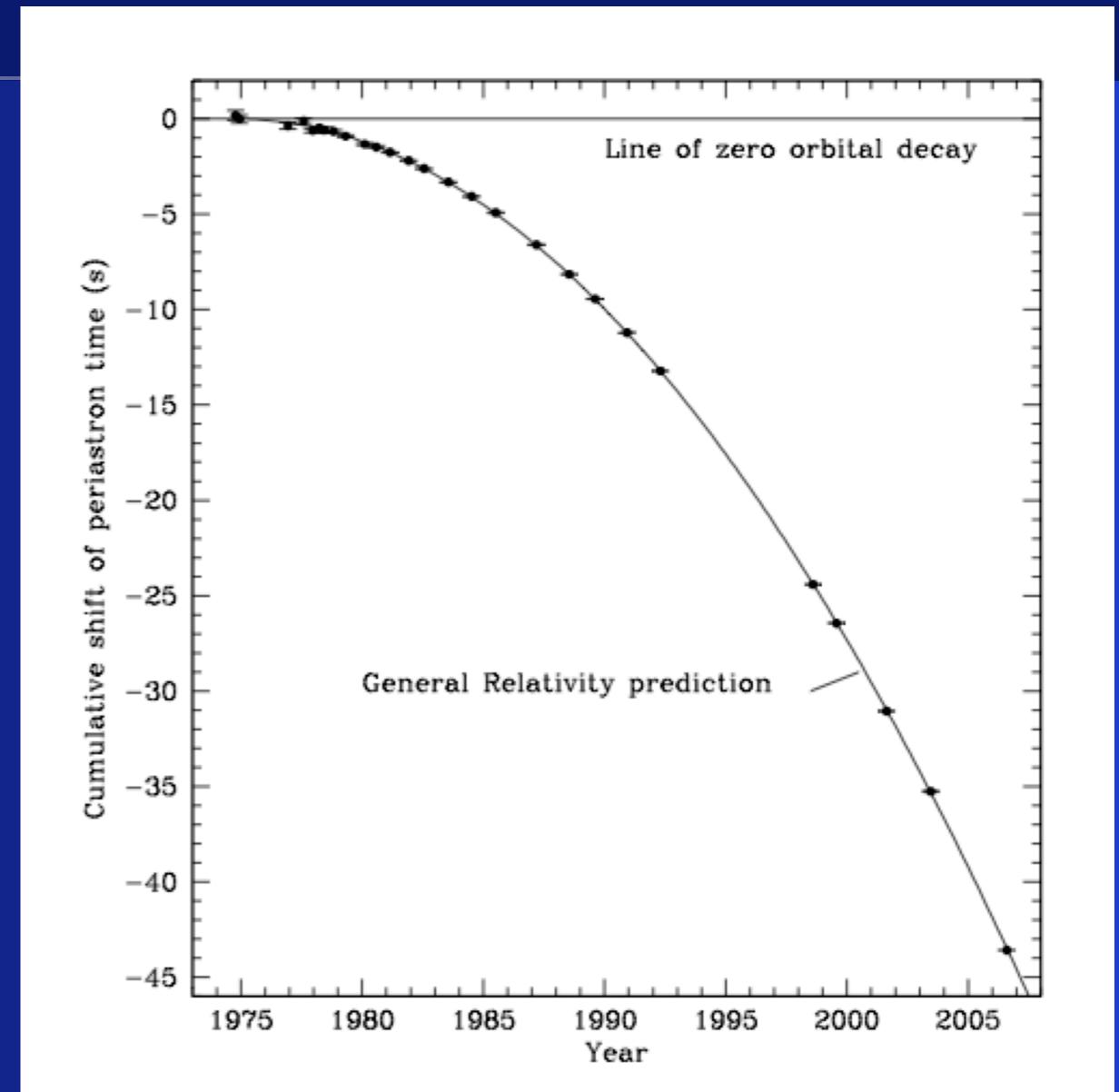
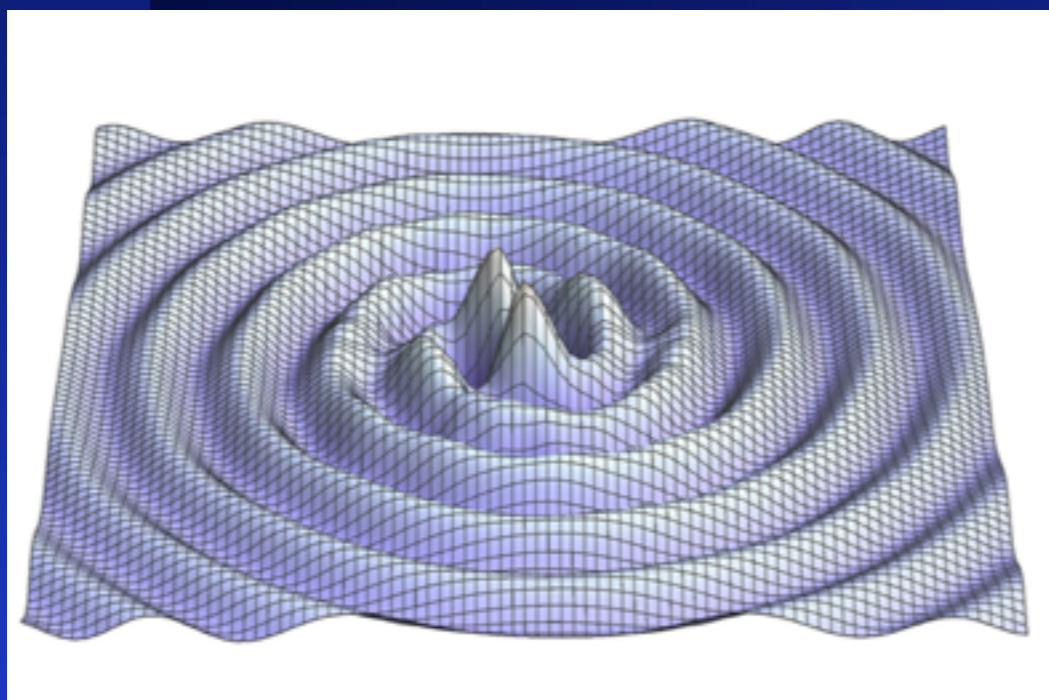
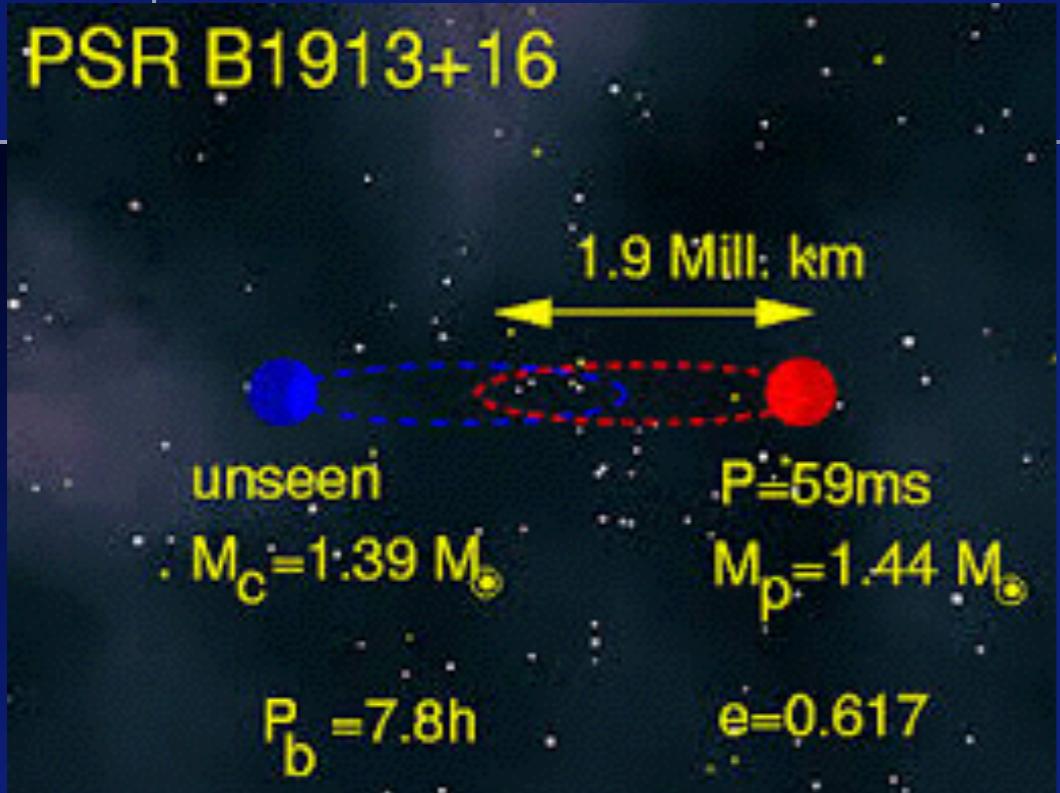


パルサー＝中性子星
半径 10km位
質量 1.4x太陽



Arecibo, Puerto Rico

連星中性子星の発見 (1974)



重力波を放出してエネルギーを失うので、星が近づいてゆく。

重力波の存在が間接的に確かめられた。

連星中性子星の発見 (1974)

The Nobel Prize in Physics 1993
Russell A. Hulse, Joseph H. Taylor Jr.

Share this: 25

The Nobel Prize in Physics 1993

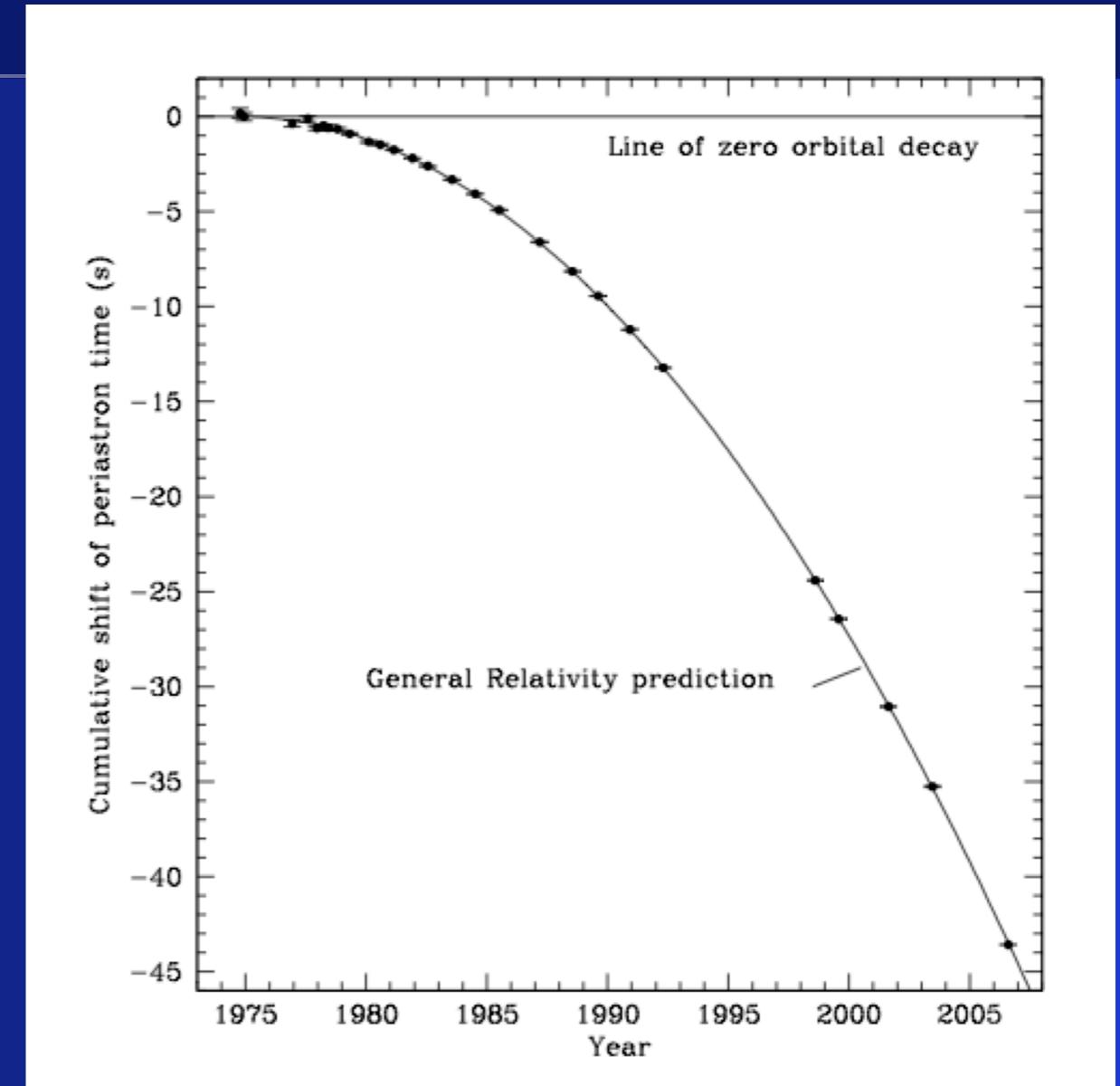


Russell A. Hulse
Prize share: 1/2

Joseph H. Taylor Jr.
Prize share: 1/2

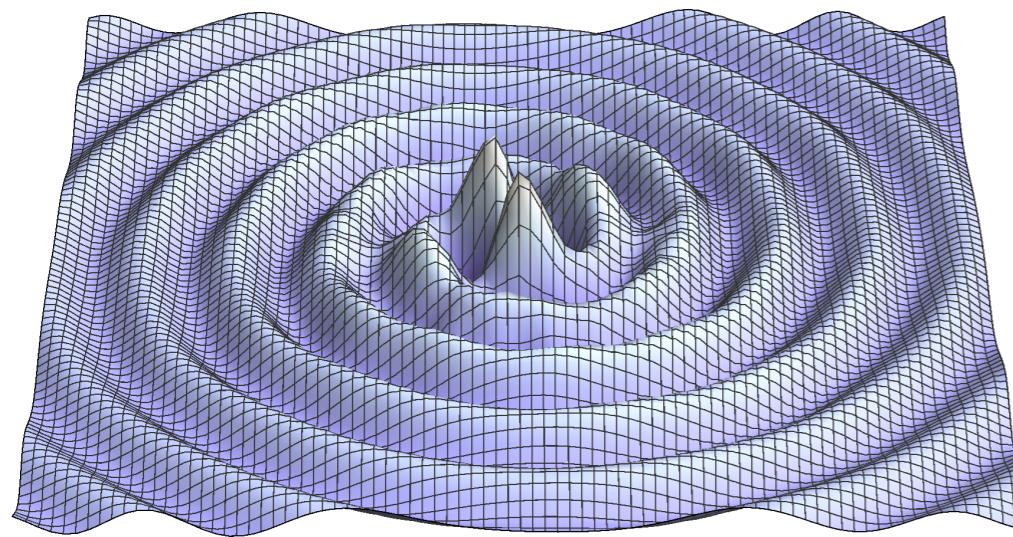
"for the discovery of a new type of pulsar, a discovery that has opened up new possibilities for the study of gravitation"

"重力についての新しい研究を開いた、新種のパルサーの発見に対して"



重力波の存在が間接的に確かめられた。

重力波の存在が間接的に確かめられた。

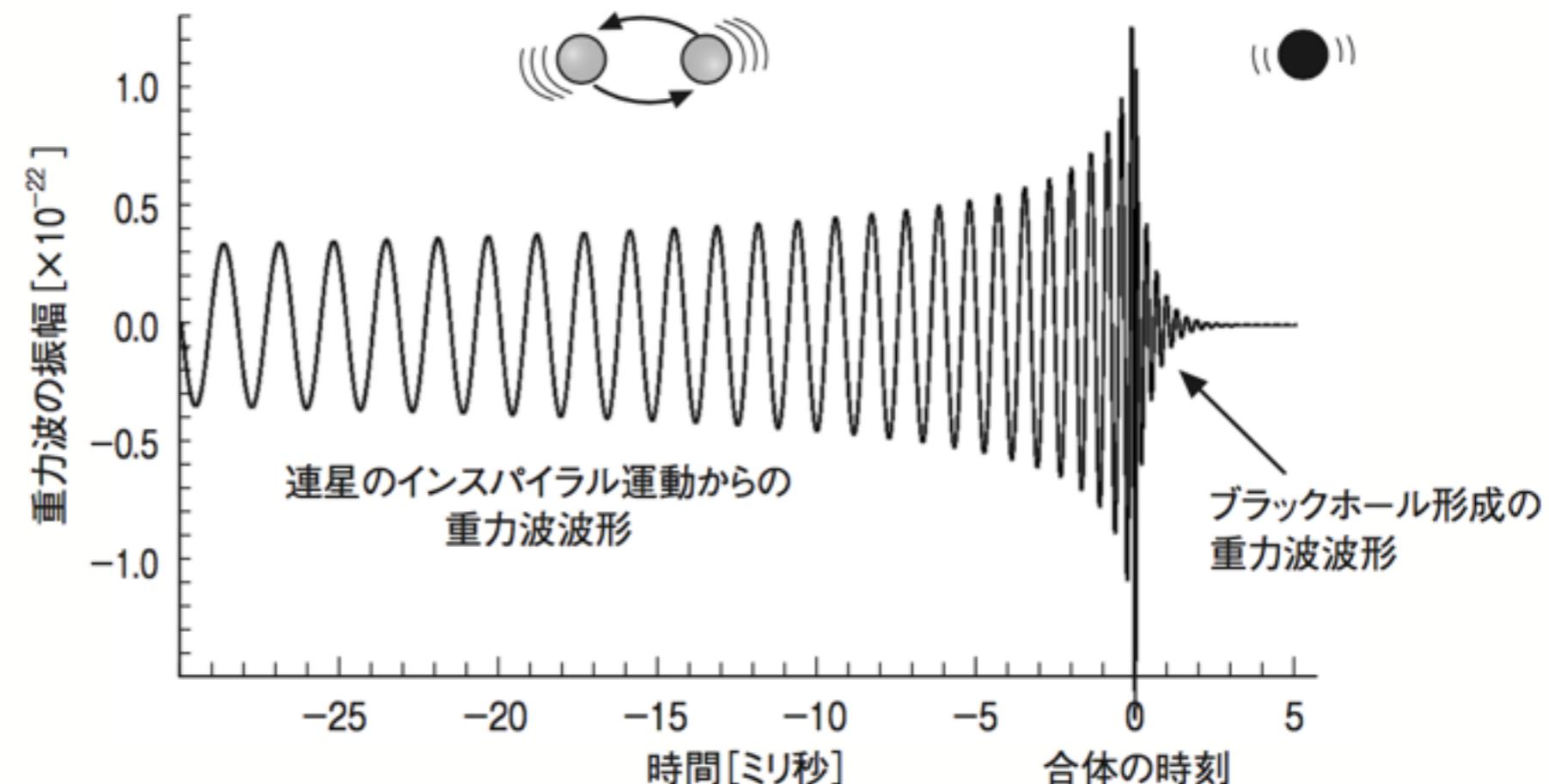


重力波の直接観測をしたい！

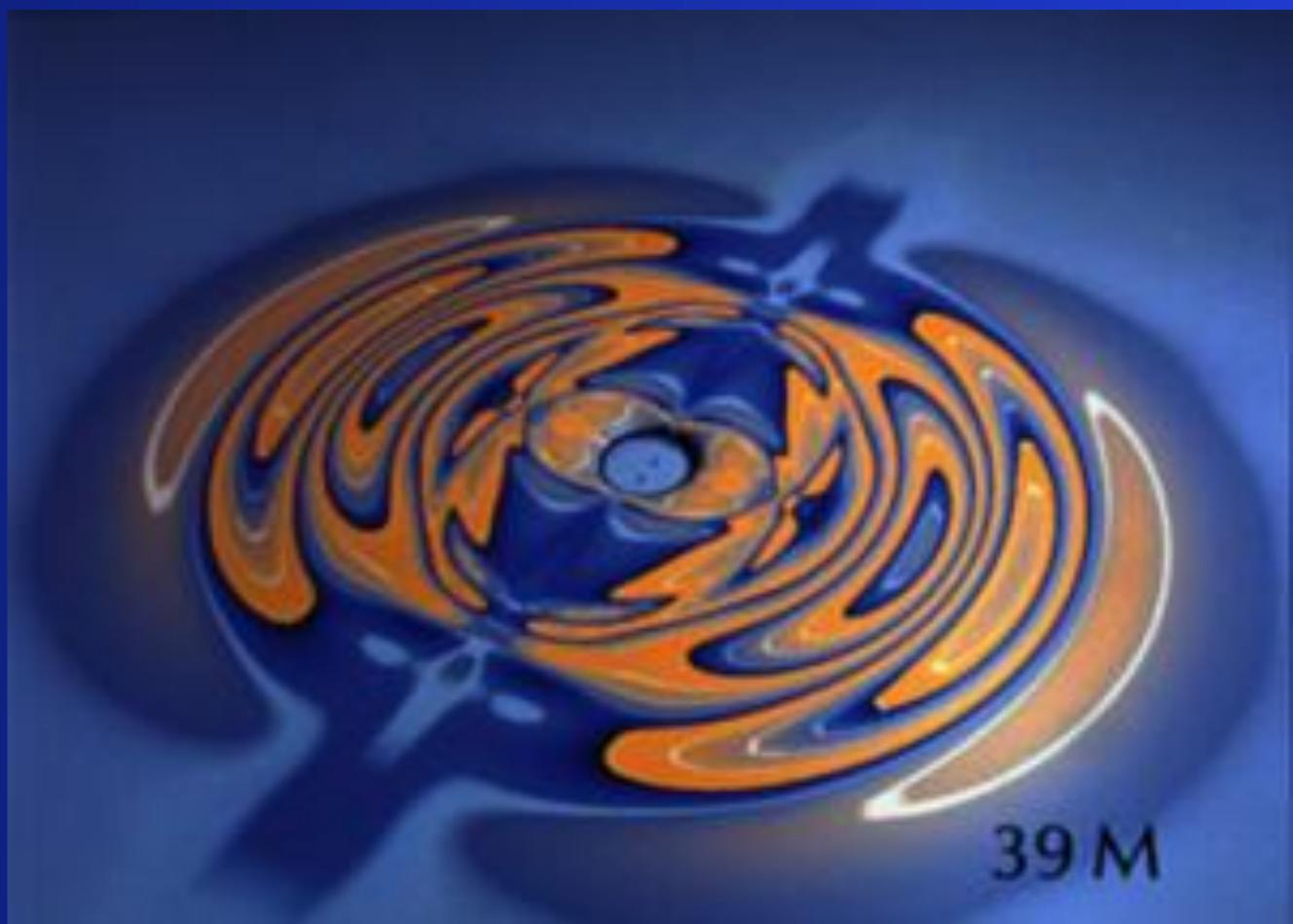
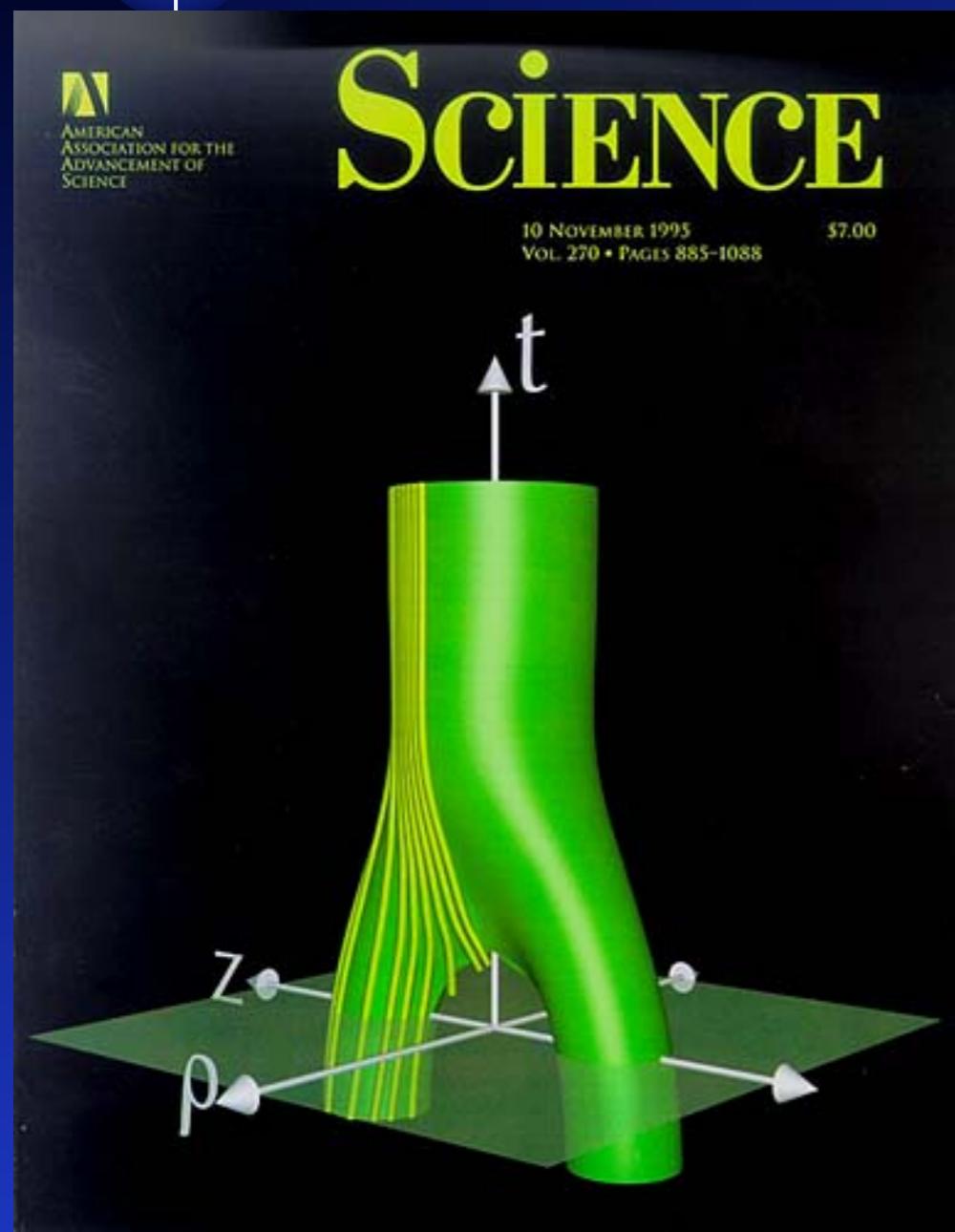
連星中性子星
連星ブラックホール

Inspiral

Merger Ringdown

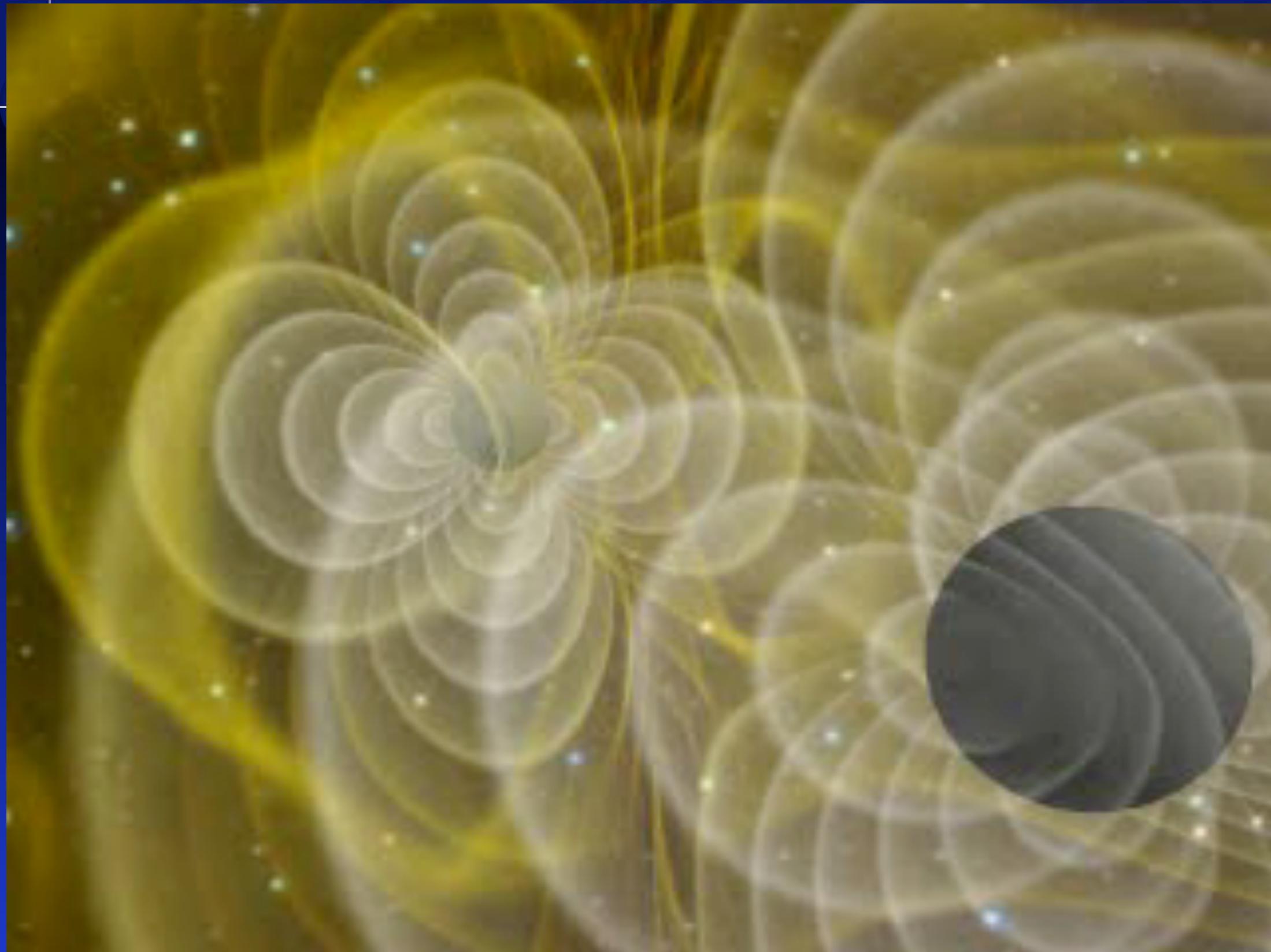


ブラックホールの合体シミュレーション



2つのブラックホールの合体と重力波放出
(90年代, NCSAグループ)

ブラックホールの合体シミュレーション



NCSA-AEI group (1998)

contents

1. 重力波とは

Einsteinが残した100年越しの宿題

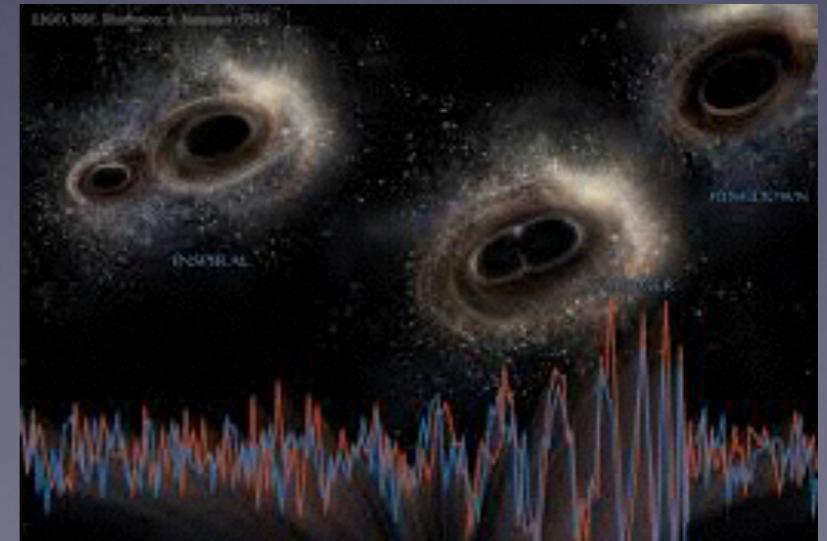
2. 直接観測された重力波

LIGOグループが発見した3つの重力波イベント

3. 将来の重力波観測

日本のKAGRA

宇宙空間での重力波観測

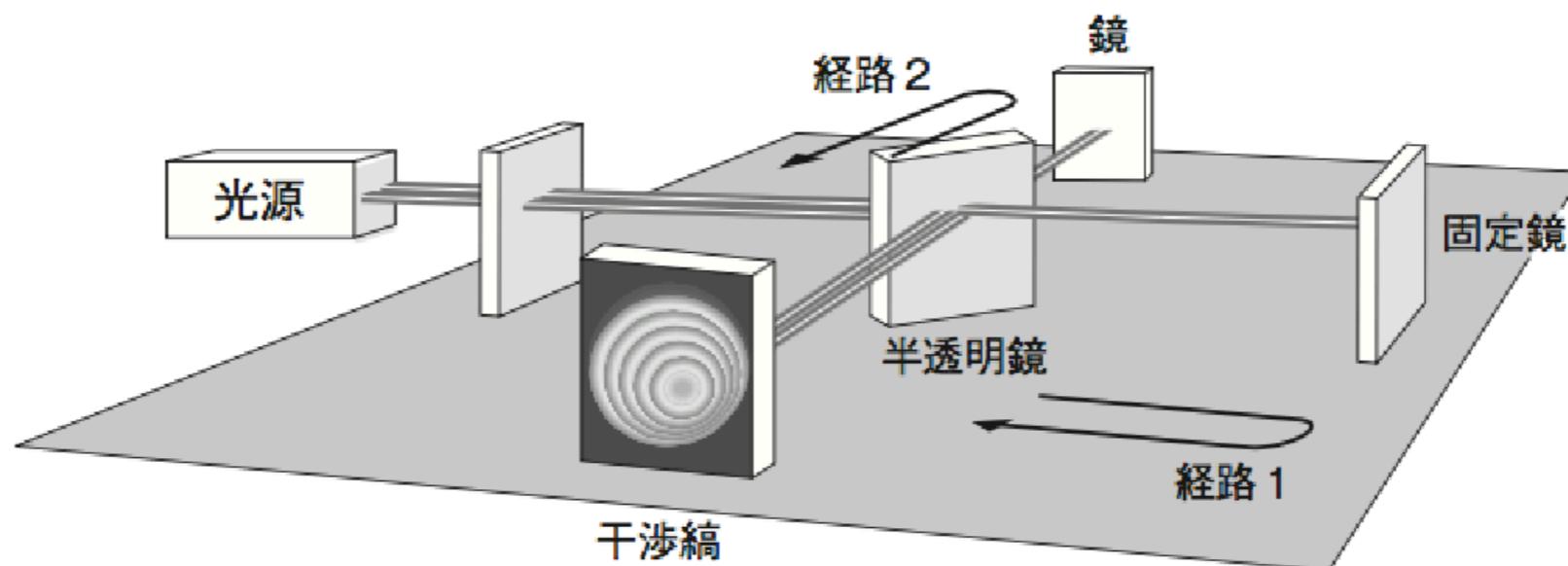


LIGO (ライゴ：レーザー干渉計重力波天文台)

Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory (1992年予算承認)



<https://mediaassets.caltech.edu/gwave>



LIGO: The Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory

Alex Abramovici, William E. Althouse, Ronald W. P. Drever,
Yekta Gürsel, Seiji Kawamura, Frederick J. Raab,
David Shoemaker, Lisa Sievers, Robert E. Spero,
Kip S. Thorne, Rochus E. Vogt, Rainer Weiss,
Stanley E. Whitcomb, Michael E. Zucker

The goal of the Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory (LIGO) Project is to detect and study astrophysical gravitational waves and use data from them for research in physics and astronomy. LIGO will support studies concerning the nature and nonlinear dynamics of gravity, the structures of black holes, and the equation of state of nuclear matter. It will also measure the masses, birth rates, collisions, and distributions of black holes and neutron stars in the universe and probe the cores of supernovae and the very early universe. The technology for LIGO has been developed during the past 20 years. Construction will begin in 1992, and under the present schedule, LIGO's gravitational-wave searches will begin in 1998.

Einstein's general relativity theory describes gravity as due to a curvature of space-time (1). When the curvature is weak, it produces the familiar Newtonian gravity that governs the solar system. When

The authors are the members of the LIGO Science Steering Group. A. Abramovici, W. E. Althouse (Chief Engineer), R. W. P. Drever, S. Kawamura, F. J. Raab, L. Sievers, R. E. Spero, K. S. Thorne, R. E. Vogt (Director), S. E. Whitcomb (Deputy Director), and M. E. Zucker are with the California Institute of Technology, Pasadena, CA 91125. Y. Gürsel is at the Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, CA 91109. D. Shoemaker and R. Weiss are at the Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA 02129.

SCIENCE • VOL. 256 • 17 APRIL 1992

325

the curvature is strong, however, it should behave in a radically different, highly nonlinear way. According to general relativity, the nonlinearity creates black holes (curvature produces curvature without the aid of any matter), governs their structure, and holds them together against disruption (2). Inside a black hole, the curvature should nonlinearly amplify itself to produce a space-time singularity (2), and near some singularities the nonlinearity should force the curvature to evolve chaotically (3). When an object's curvature varies rapidly (for example, because of pulsations, colli-

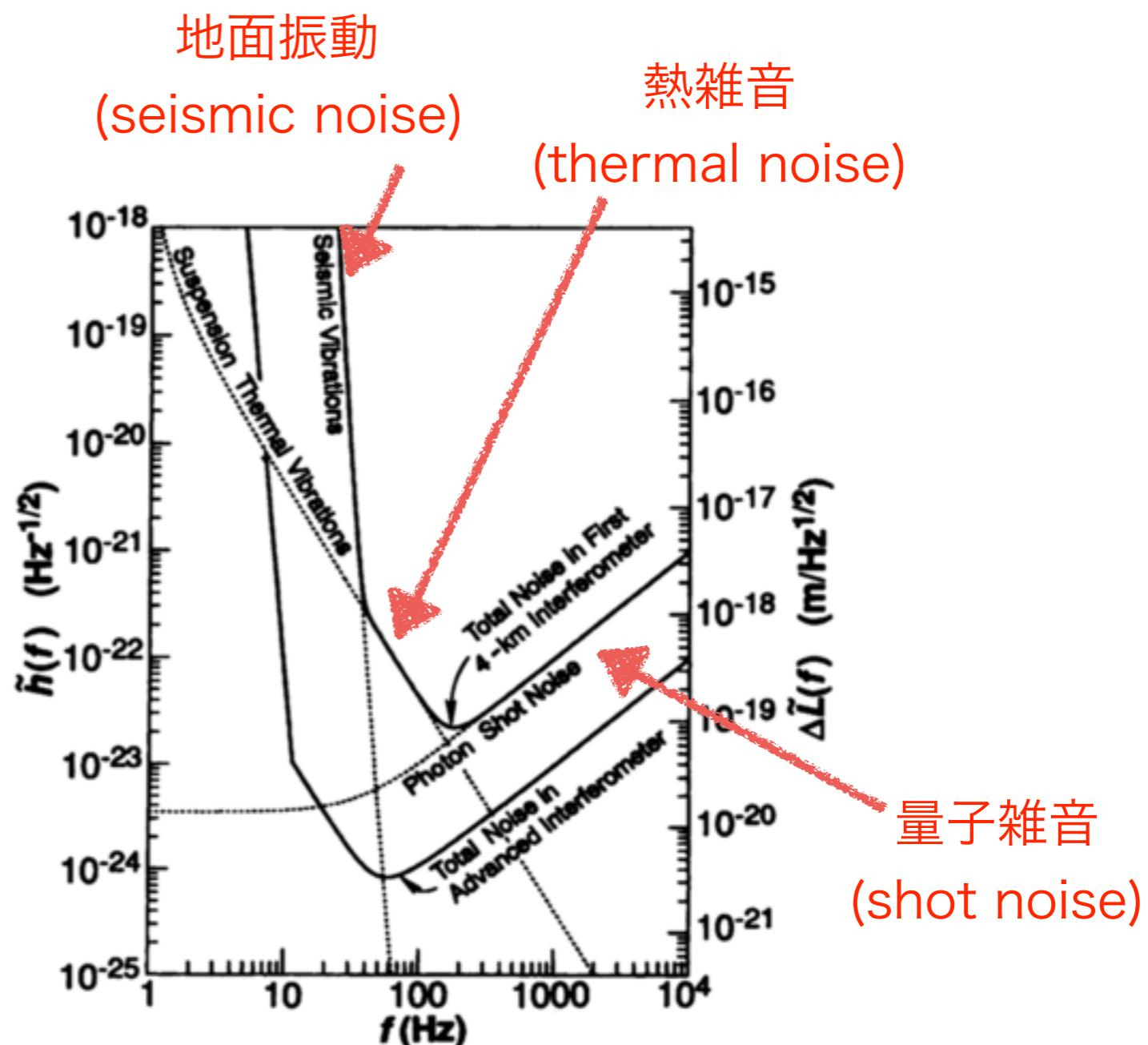


Fig. 7. The expected total noise in each of LIGO's first 4-km interferometers (upper solid curve) and in a more advanced interferometer (lower solid curve). The dashed curves show various contributions to the first interferometer's noise.

signal = gw + noise

$$s(t) = h(t) + n(t)$$

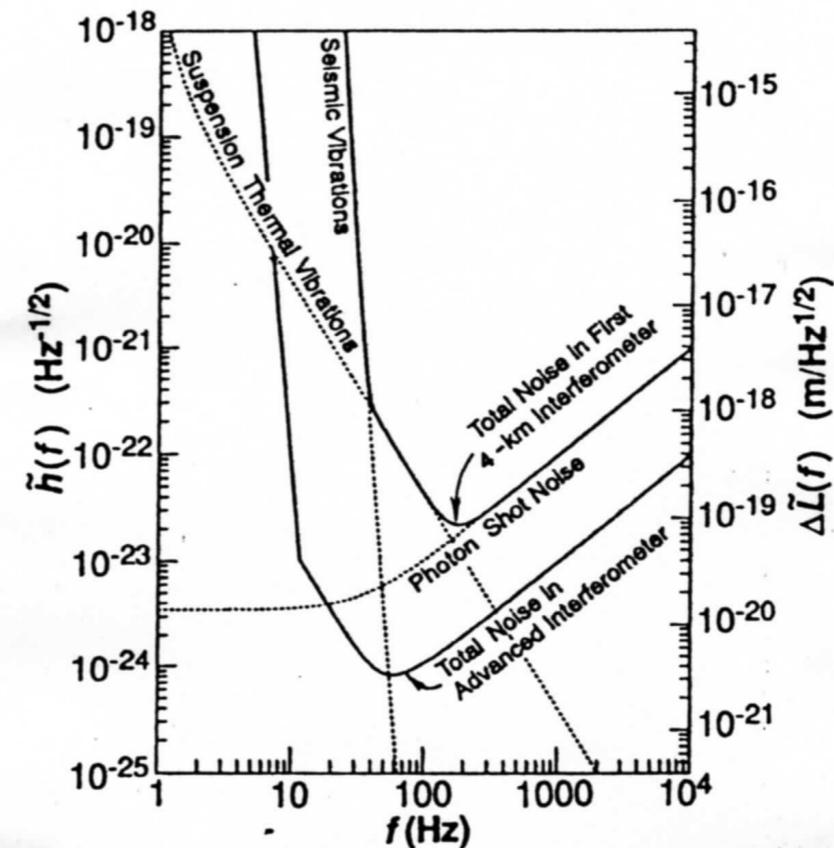
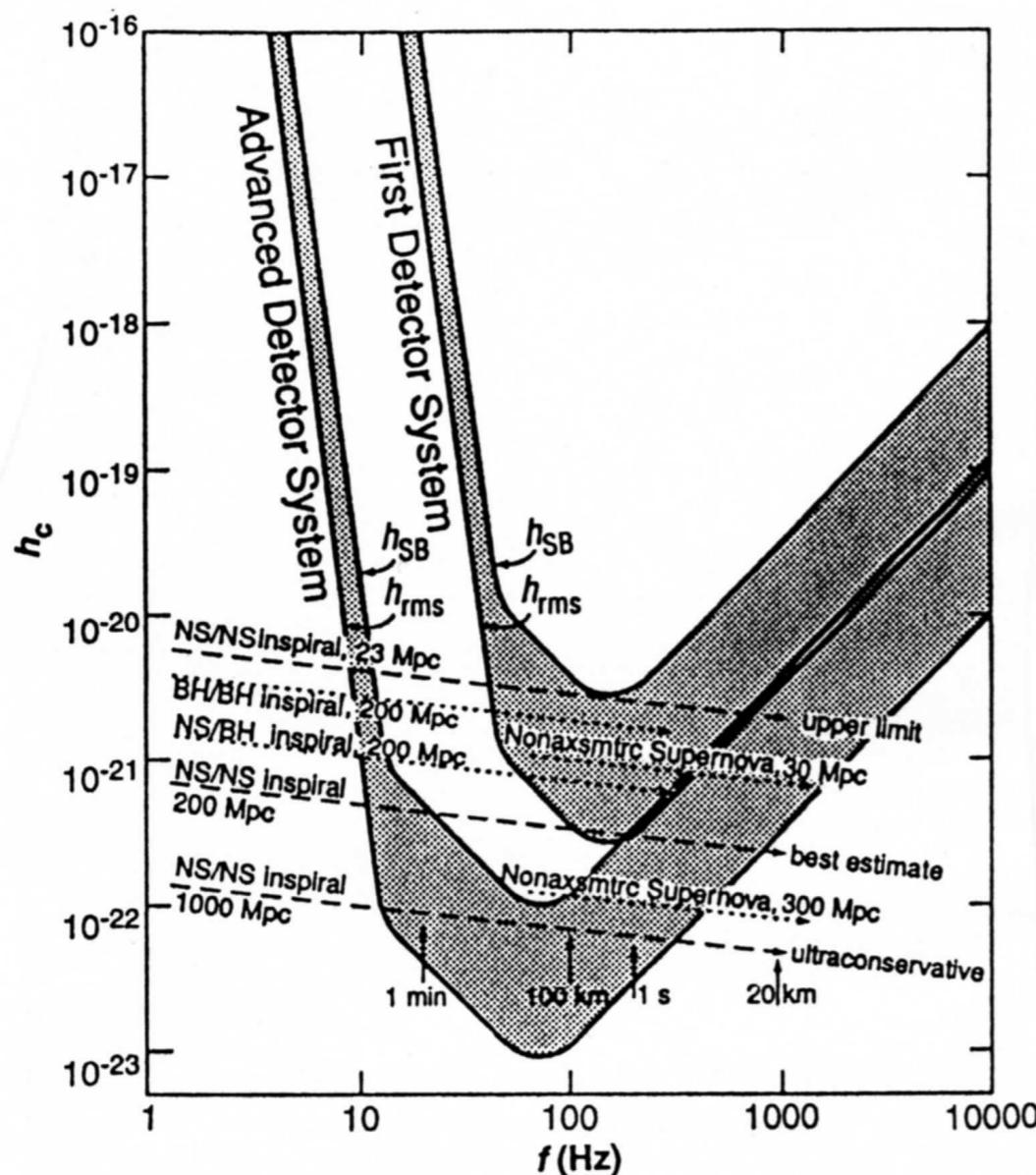


Fig. 7. The expected total noise in each of LIGO's first 4-km interferometers (upper solid curve) and in a more advanced interferometer (lower solid curve). The dashed curves show various contributions to the first interferometer's noise.

spectral density [sec]

$$S_n(f) = 2 \int C_n(\tau) e^{i2\pi f\tau} d\tau$$

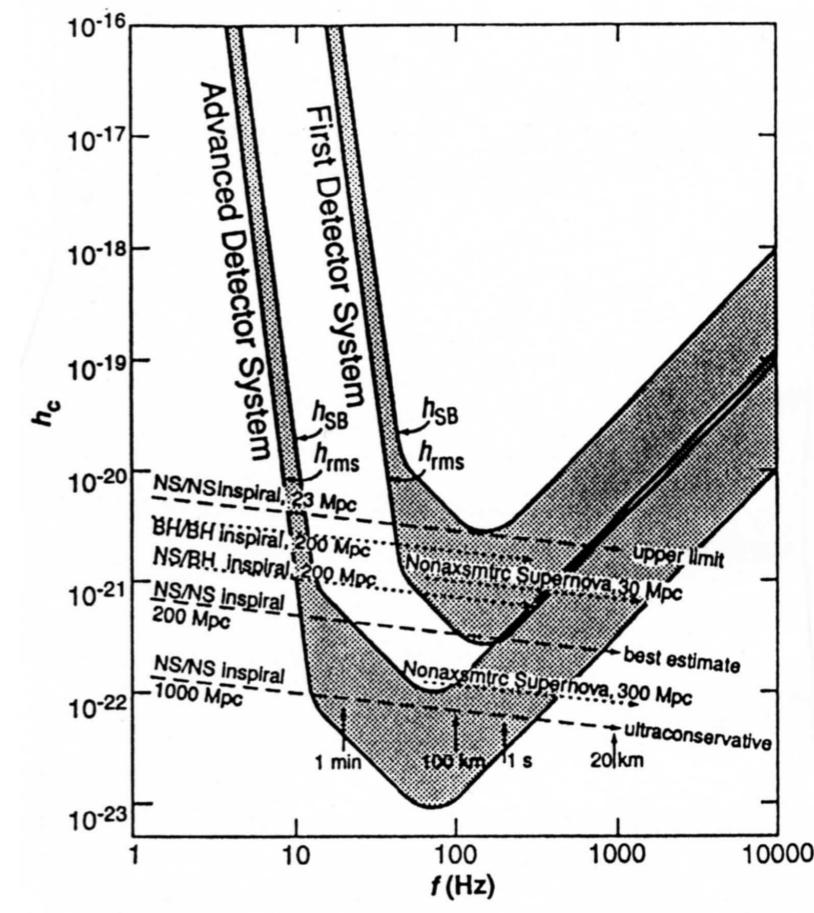
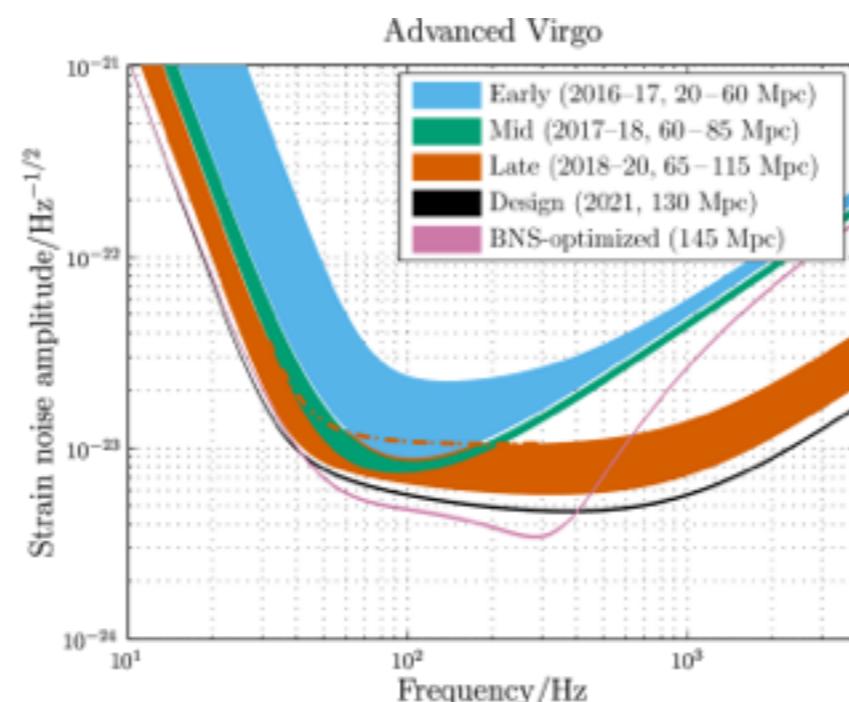
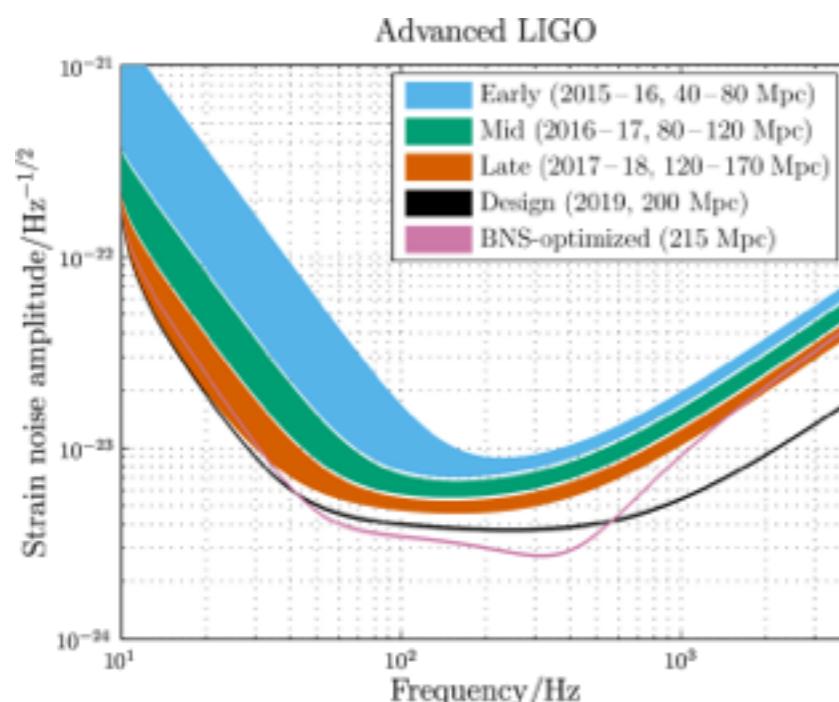
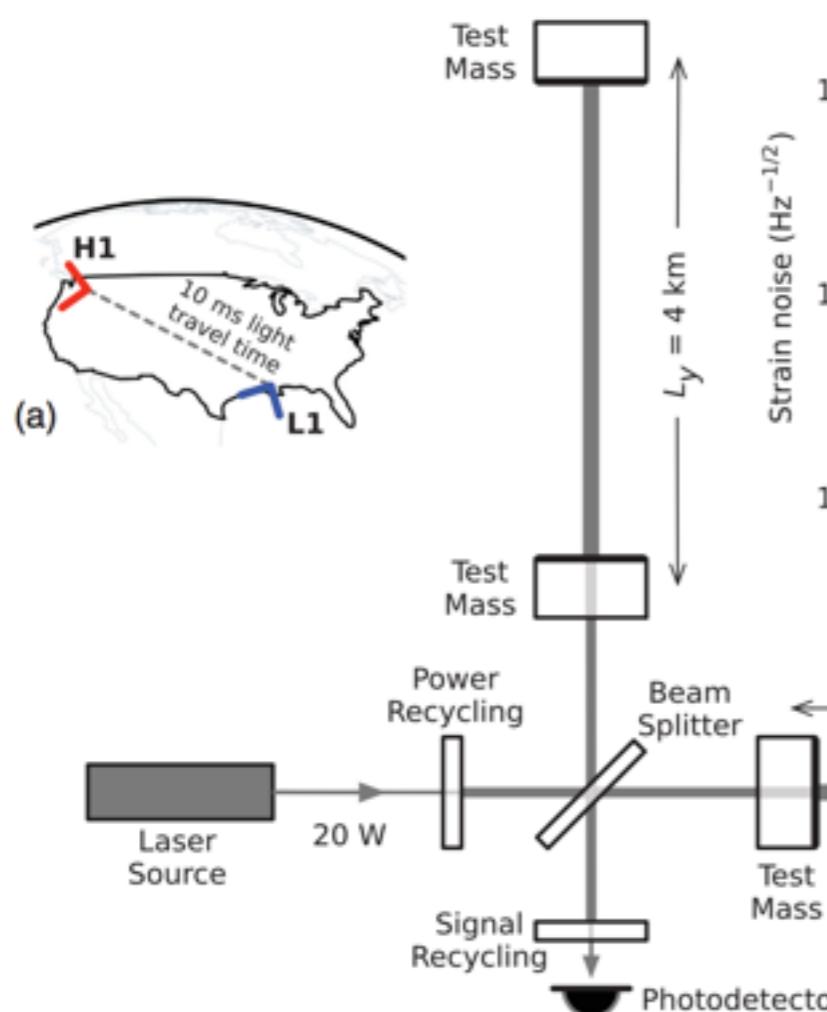
$$C_n(\tau) = \overline{n(t)n(t+\tau)}$$

$$h_n(f) = \sqrt{f S_n(f)} \rightarrow \sqrt{S_n(f)}$$

$$\overline{n(t)} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} n(t) dt$$

PRL 116, 061102 (2016)

PHYSICAL REVIEW LETTERS

week ending
12 FEBRUARY 2016

**2015/9/16–2016/1/15
Observational run 1**

**2016/11/30—
Observational run 2**

nature International weekly journal of science

Home | News & Comment | Research | Careers & Jobs | Current Issue | Archive | Audio & Video | For Authors

News & Comment > Column > Muse > 2016 > February > Article

NATURE | COLUMN: MUSE

 Has giant LIGO experiment seen gravitational waves?

An improbable rumour has started that the observatory has already made a discovery — but even if true, the signal could be a drill.

Davide Castelvecchi

30 September 2015

Rights & Permissions

On 25 September, a sensational rumour appeared on Twitter: Lawrence Krauss, a cosmologist, reported hearing that the world's largest gravitational-wave observatory had seen a signal, barely a week after its official re-opening.

Lawrence M. Krauss 
@LKrauss1

フォロー

Rumor of a gravitational wave detection at LIGO detector. Amazing if true. Will post details if it survives.

635 リツイート 666 いいね

13:39 - 2015年9月25日

...

2015/9/25

Lawrence M. Krauss 
@LKrauss1

フォロー

My earlier rumor about LIGO has been confirmed by independent sources. Stay tuned! Gravitational waves may have been discovered!! Exciting.

3,563 リツイート 2,888 いいね

7:46 - 2016年1月11日

...

2016/1/11

重力波初検出を発表するライツィLIGO所長

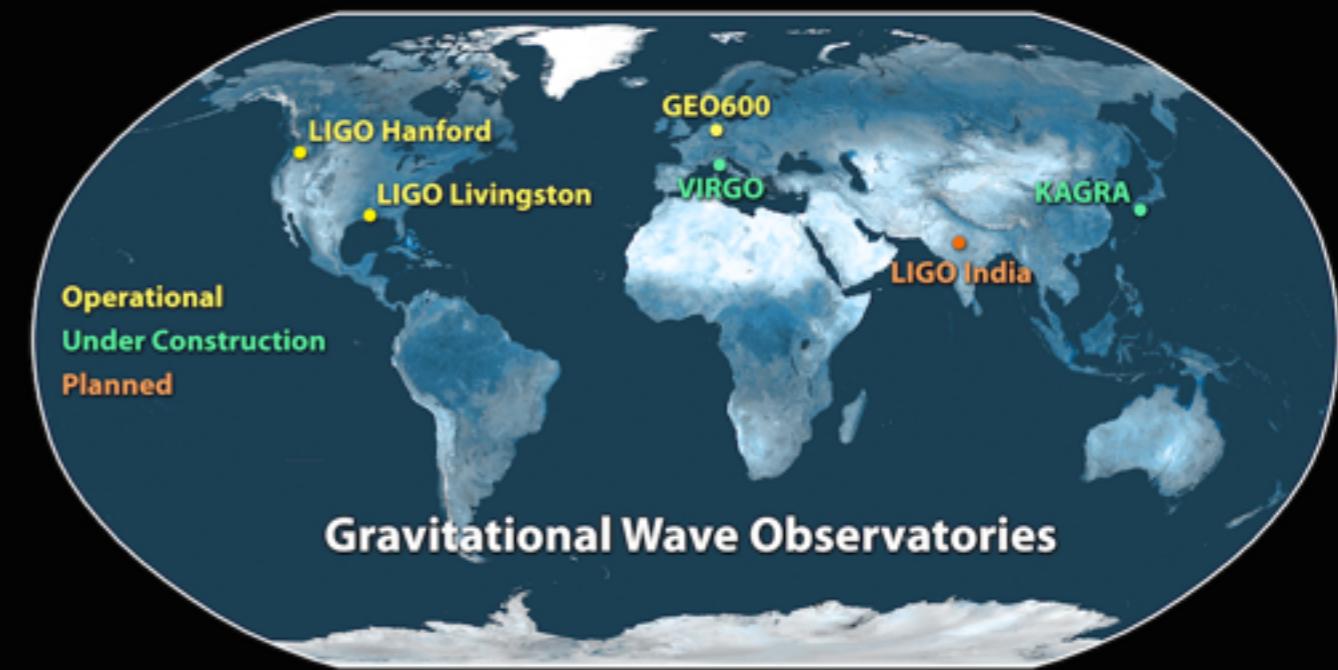
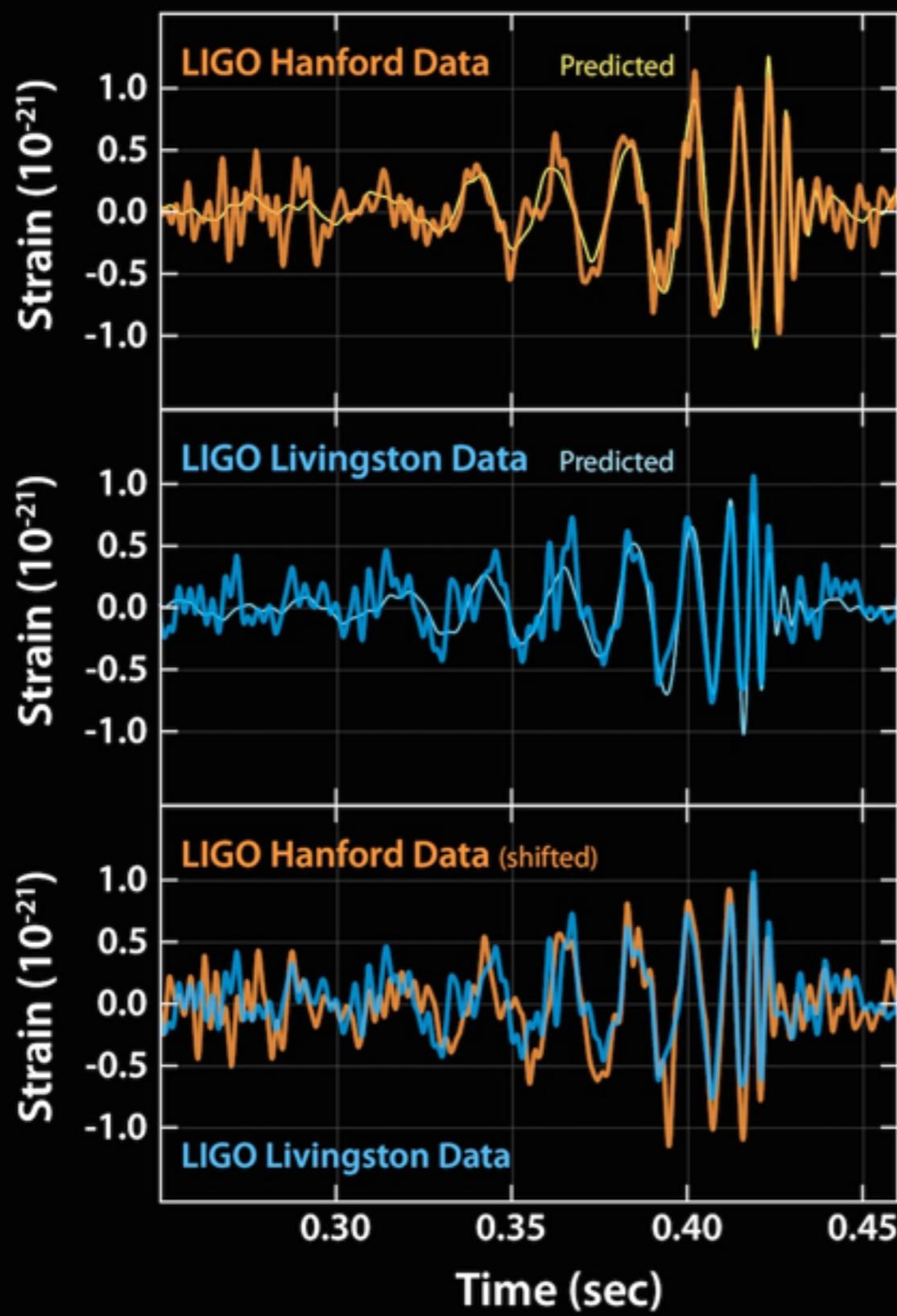
2016年2月11日



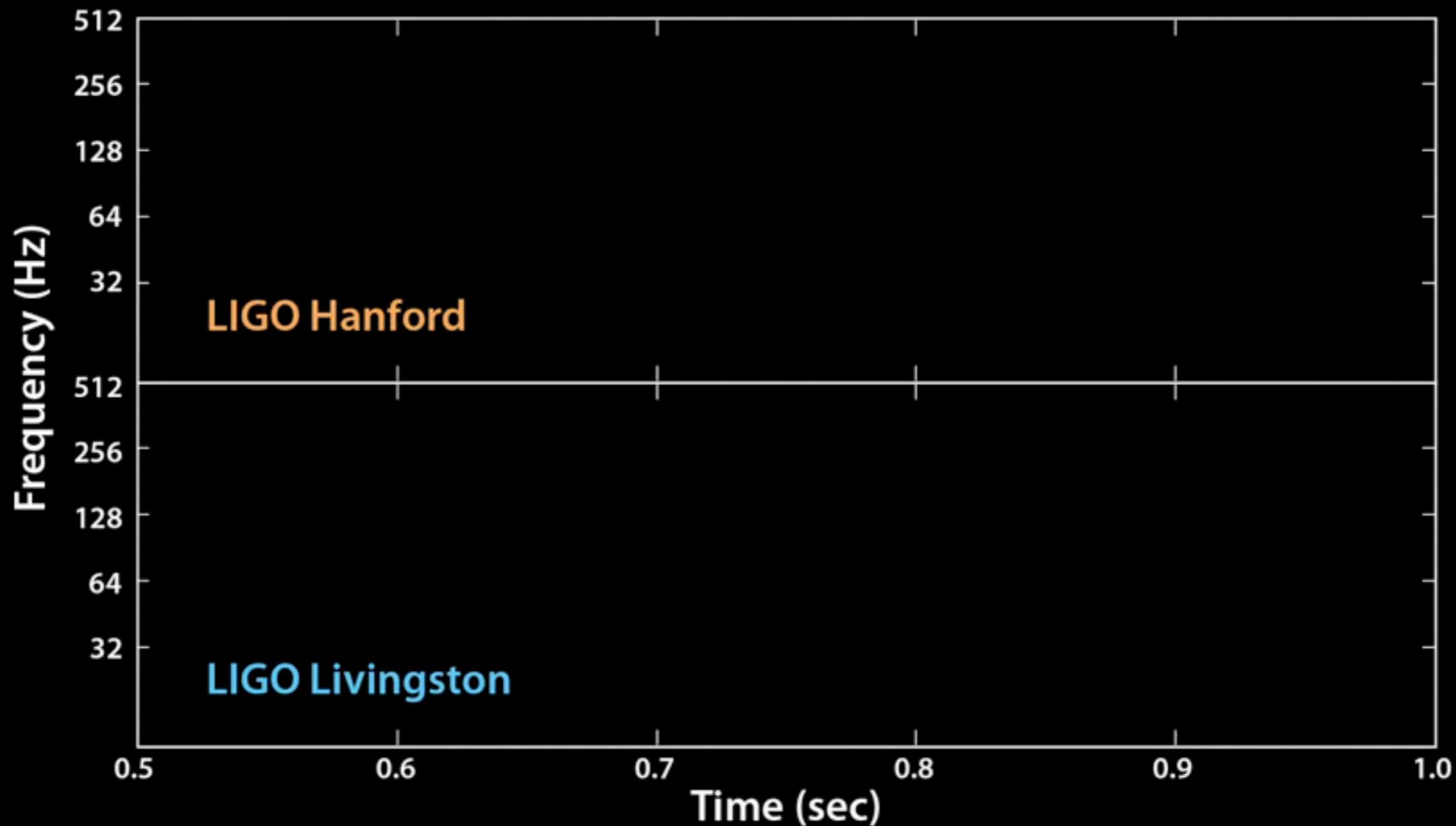
“We had detected gravitational waves. We did it.”

“我々は、重力波を検出した。やり遂げたのだ。”

2015年9月14日

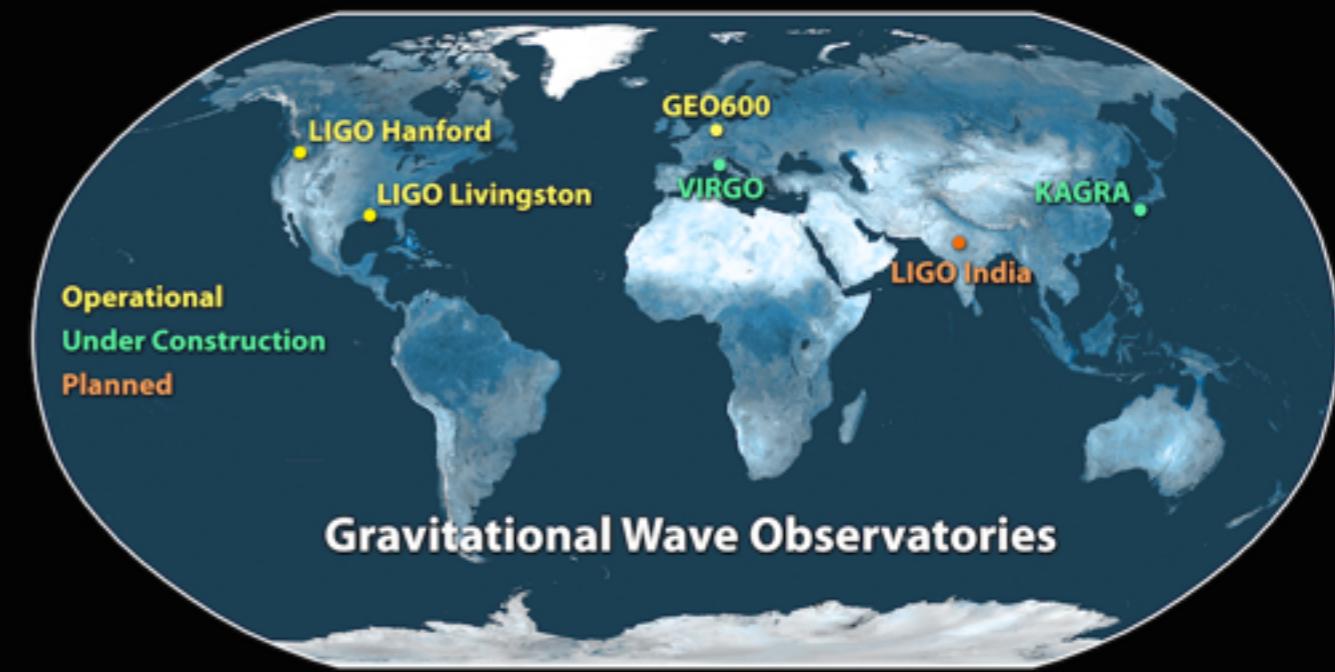
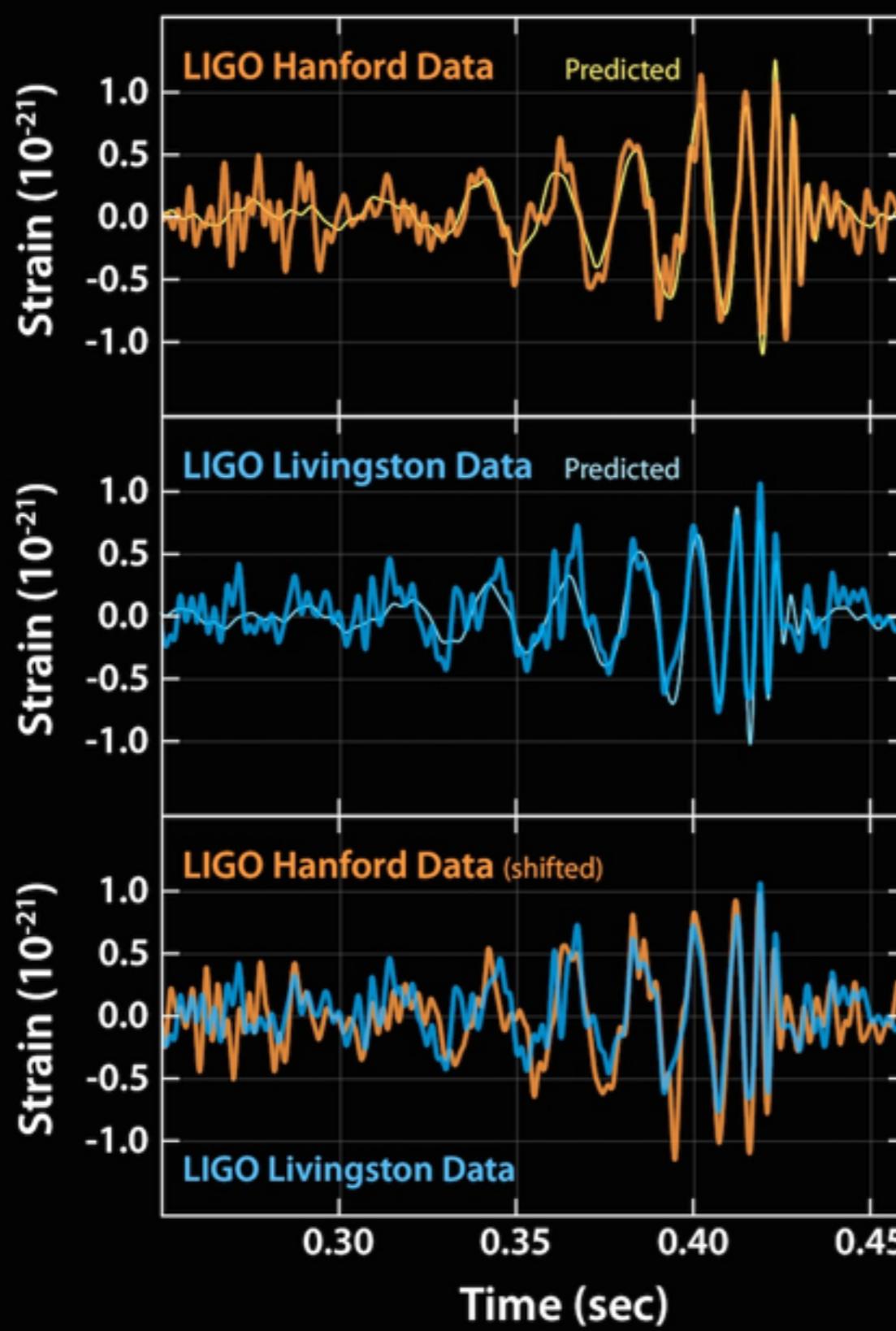


重力波波形を音にすると. . .



始め2回は実周波数、後の2回は聞えやすいように+400Hz

2015年9月14日



太陽の36倍と29倍のブラックホールが合体して、
太陽の62倍のブラックホール
になった。

3倍の質量が消失

$$E = mc^2$$

13億光年先

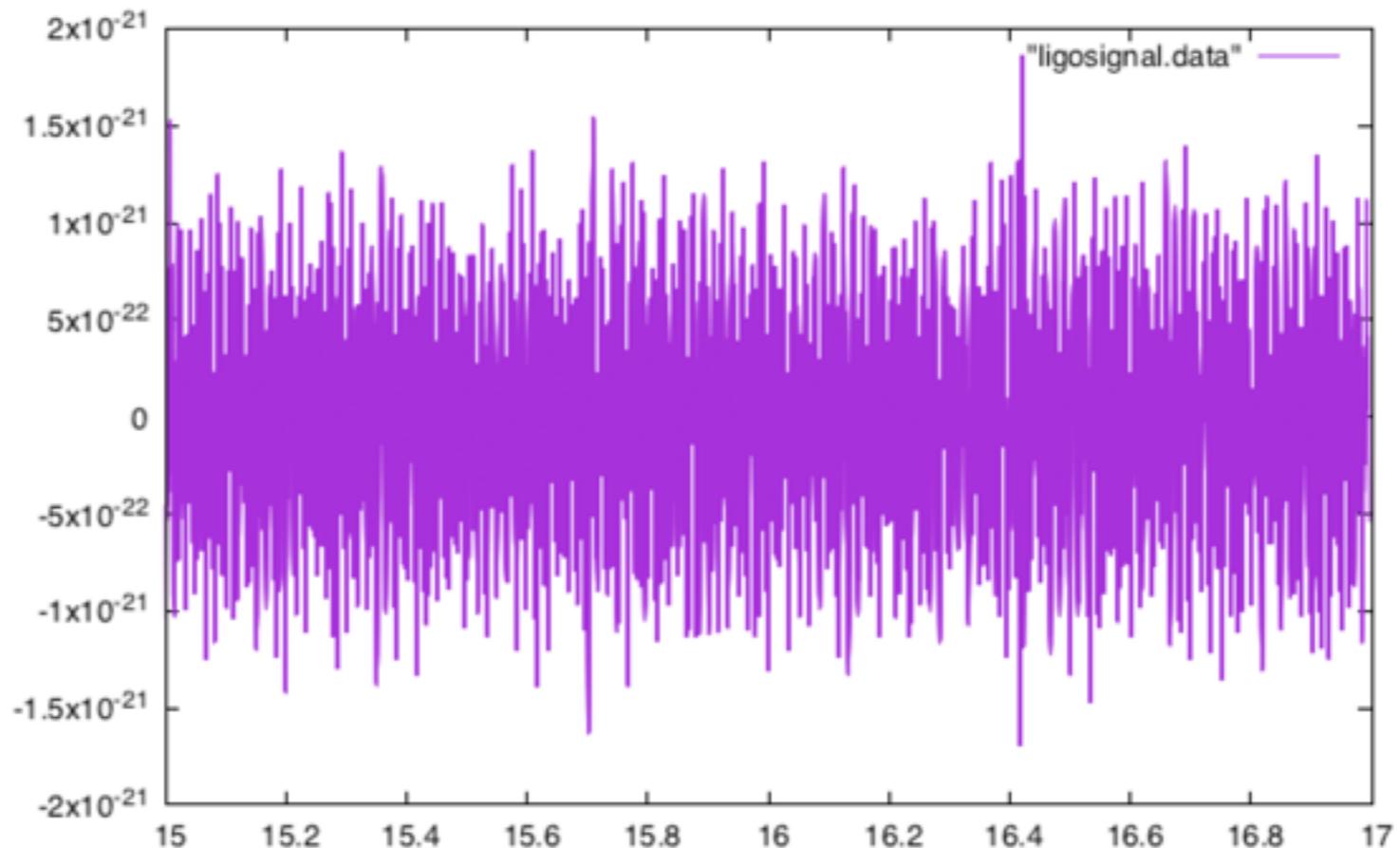


NOW WHAT??



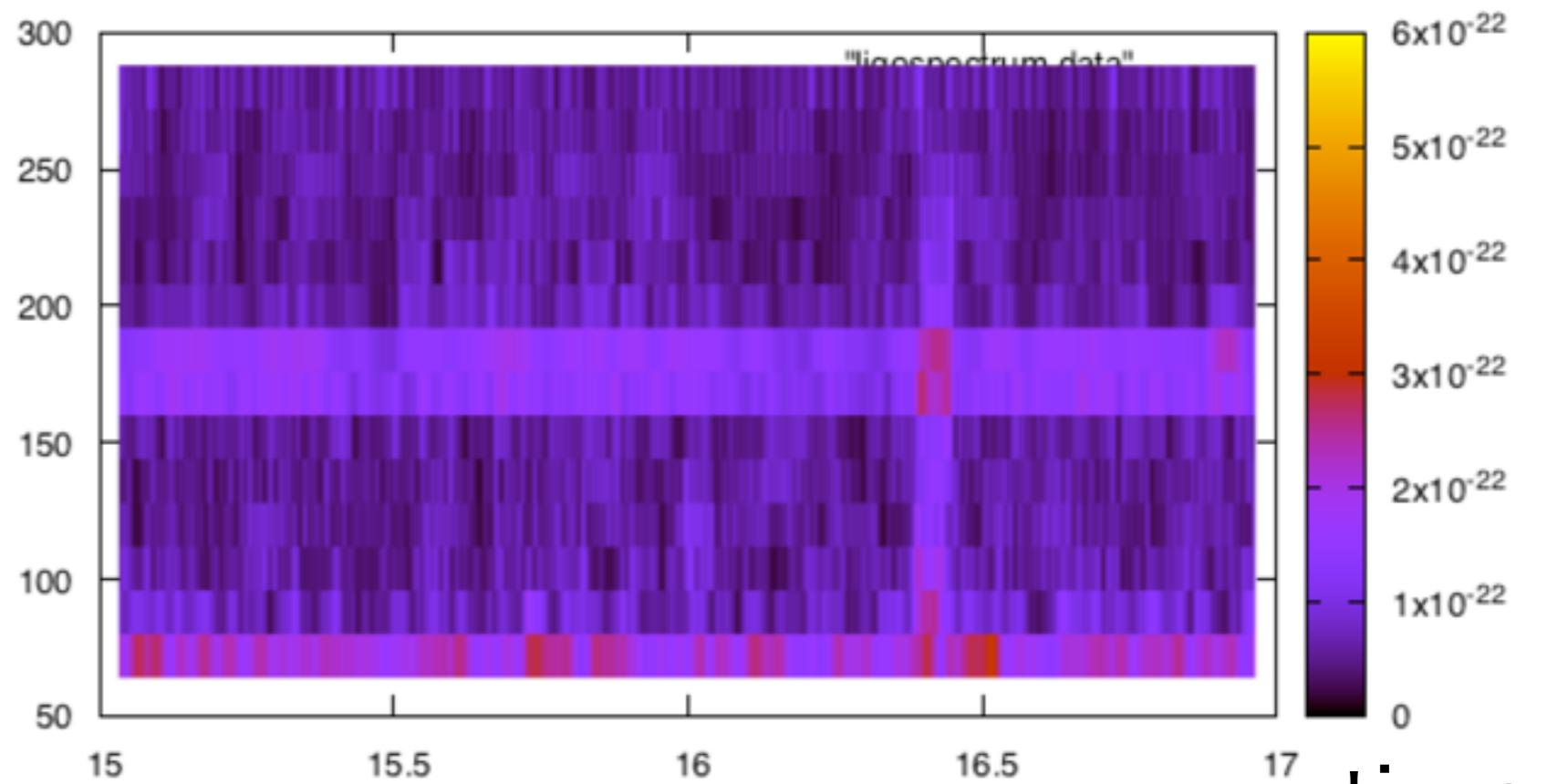
GW150914

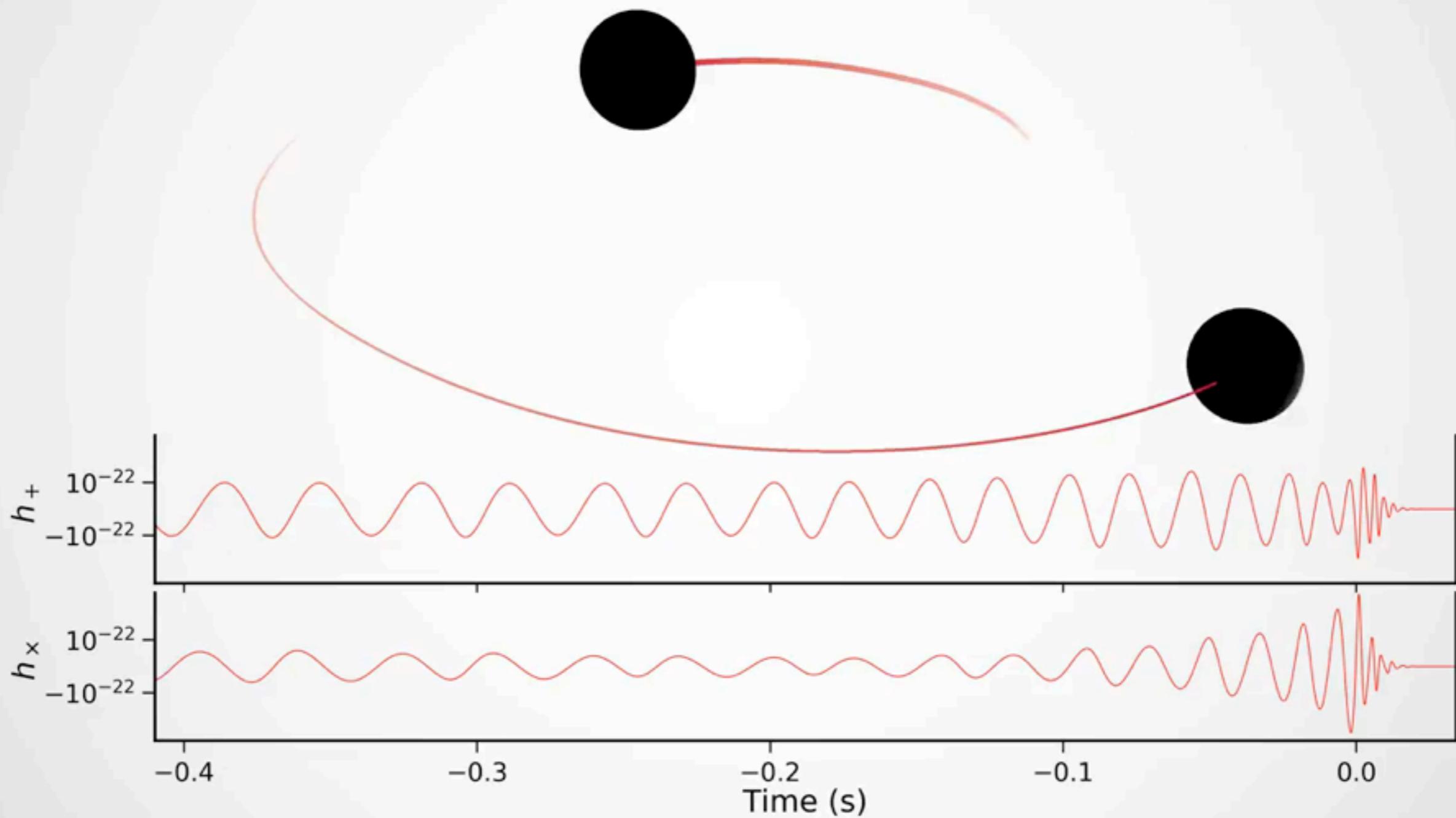
$h(t)$



freq

time





Animation of the inspiral and collision of two black holes consistent with the masses and spins of GW170104. The top part of the movie shows the black hole horizons (surfaces of "no return"). The initial two black holes orbit each other, until they merge and form one larger remnant black hole. The shown black holes are spinning, and angular momentum is exchanged among the two black holes and with the orbit. This results in a quite dramatic change in the orientation of the orbital plane, clearly visible in the movie. Furthermore, the spin-axes of the black holes change, as visible through the colored patch on each black hole horizon, which indicates the north pole.

The lower part of the movie shows the two distinct gravitational waves (called 'polarizations') that the merger is emitting into the direction of the camera. The modulations of the polarizations depend sensitively on the orientation of the orbital plane, and thus encode information about the orientation of the orbital plane and its change during the inspiral. Presently, LIGO can only measure one of the polarizations and therefore obtains only limited information about the orientation of the binary. This disadvantage will be remedied with the advent of additional gravitational wave detectors in Italy, Japan and India.

Finally, the slowed-down replay of the merger at the end of the movie makes it possible to observe the distortion of the newly formed remnant black hole, which decays quickly. Furthermore, the remnant black hole is "kicked" by the emitted gravitational waves, and moves upward. (Credit: A. Babul/H. Pfeiffer/CITA/SXS.) - See more at: <http://ligo.org/detections/GW170104.php#sthash.NZPaW2LT.dpu>

APPENDIX B: SIMULATION RANKINGS

In this appendix, we enumerate the simulations used in this work, ordered by one measure of their similarity with the data ($\ln L$, in Table III). For nonprecessing binaries, Fig. 6 provides a visual illustration of some trends in $\ln L$ versus mass ratio and the two component spins.

TABLE III. *Peak Marginalized $\ln L$ I: Consistency between simulations:* Peak value of the marginalized log likelihood $\ln L$ [Eq. (7)] evaluated using a lower frequency $f_{\text{low}} = 30$ Hz and all modes with $l \leq 2$; the simulation key, described in Table II [an asterisk (*) denotes a new simulation motivated by GW150914, and a (+) denotes one of the simulations reported in [LVC-detect](#) [1]]; the *initial* spins of the simulation (using – to denote zero, to enhance readability); the initial χ_{eff} ; the total (redshifted) mass of the best fit; and the starting frequency (in Hz) of the best fit. Though omitting information accessible to the longest simulations, this choice of low-frequency cutoff eliminates systematic biases associated with simulation duration, which differs across our archive, as seen by the last column.

$\ln L$	Key	q	$\chi_{1,x}$	$\chi_{1,y}$	$\chi_{1,z}$	$\chi_{2,x}$	$\chi_{2,y}$	$\chi_{2,z}$	χ_{eff}	M_z/M_\odot	$f_{\text{start}}(\text{Hz})$
272.2	SXS:BBH:0310(*)	1.221	...	...	...	...	...	...	0.00	73.0	15.1
272.1	D12_q1.00_a-0.25_0.25_n100(*)	1.0	...	...	0.250	...	...	-0.250	-0.00	73.2	20.5
272.1	SXS:BBH:0002[S]	1.0	...	...	...	...	...	...	0.00	73.2	10.0
271.8	D11_q0.75_a0.0_0.0_n100(*)	1.333	...	...	...	...	...	...	-0.00	72.1	23.1
271.8	SXS:BBH:0305(*+)	1.221	...	...	0.330	...	...	-0.440	-0.02	74.2	14.8
271.6	SXS:BBH:0218	1.0	...	...	-0.500	...	...	0.500	0.00	73.3	10.6
271.6	SXS:BBH:0198	1.202	...	...	...	...	...	...	0.00	73.4	12.7
271.6	SXS:BBH:0307(*)	1.228	...	...	0.320	...	...	-0.580	-0.08	70.0	17.0
271.6	GT:BBH:476	1.0	...	...	-0.200	...	...	-0.200	-0.20	67.9	24.3
271.6	S0_D10.04_q1.3333_a0.45_-0.80_n100	1.334	...	...	0.450	...	...	-0.801	-0.09	71.9	27.9
271.5	D12.00_q0.85_a0.0_0.0_n100(*)	1.176	...	...	...	...	...	...	-0.00	73.0	20.6
271.5	D12.25_q0.82_a-0.44_0.33_n100(*+)	1.22	...	...	0.330	...	...	-0.440	-0.02	72.9	20.2
271.5	SXS:BBH:0312(*)	1.203	...	...	0.390	...	...	-0.480	-0.00	73.9	14.8
271.4	SXS:BBH:0127	1.34	0.010	-0.077	-0.017	-0.061	-0.065	-0.179	-0.09	71.5	14.3
271.4	SXS:BBH:0115	1.07	0.019	0.013	-0.204	0.243	-0.067	0.291	0.04	74.1	13.8
271.3	SXS:BBH:0213	1.0	...	...	-0.800	...	...	0.800	0.00	73.2	11.7
271.3	UD_D10.01_q1.00_a0.4_n100	1.0	...	...	0.400	...	...	-0.400	-0.00	73.4	26.7
271.2	D12_q1.00_a-0.25_0.00_n100(*)	1.0	...	...	...	...	...	-0.250	-0.12	69.4	21.8
271.2	SXS:BBH:0222	1.0	...	...	-0.300	...	...	...	-0.15	69.1	12.3
271.2	SXS:BBH:0217	1.0	...	...	-0.600	...	...	0.600	0.00	73.2	11.9



Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger

B. P. Abbott *et al.*^{*}

(LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration)

(Received 21 January 2016; published 11 February 2016)

On September 14, 2015 at 09:50:45 UTC the two detectors of the Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory simultaneously observed a transient gravitational-wave signal. The signal sweeps upwards in frequency from 35 to 250 Hz with a peak gravitational-wave strain of 1.0×10^{-21} . It matches the waveform predicted by general relativity for the inspiral and merger of a pair of black holes and the ringdown of the resulting single black hole. The signal was observed with a matched-filter signal-to-noise ratio of 24 and a false alarm rate estimated to be less than 1 event per 203 000 years, equivalent to a significance greater than 5.1σ . The source lies at a luminosity distance of 410^{+160}_{-180} Mpc corresponding to a redshift $z = 0.09^{+0.03}_{-0.04}$. In the source frame, the initial black hole masses are $36^{+5}_{-4} M_{\odot}$ and $29^{+4}_{-4} M_{\odot}$, and the final black hole mass is $62^{+4}_{-4} M_{\odot}$, with $3.0^{+0.5}_{-0.5} M_{\odot}c^2$ radiated in gravitational waves. All uncertainties define 90% credible intervals. These observations demonstrate the existence of binary stellar-mass black hole systems. This is the first direct detection of gravitational waves and the first observation of a binary black hole merger.

DOI: 10.1103/PhysRevLett.116.061102

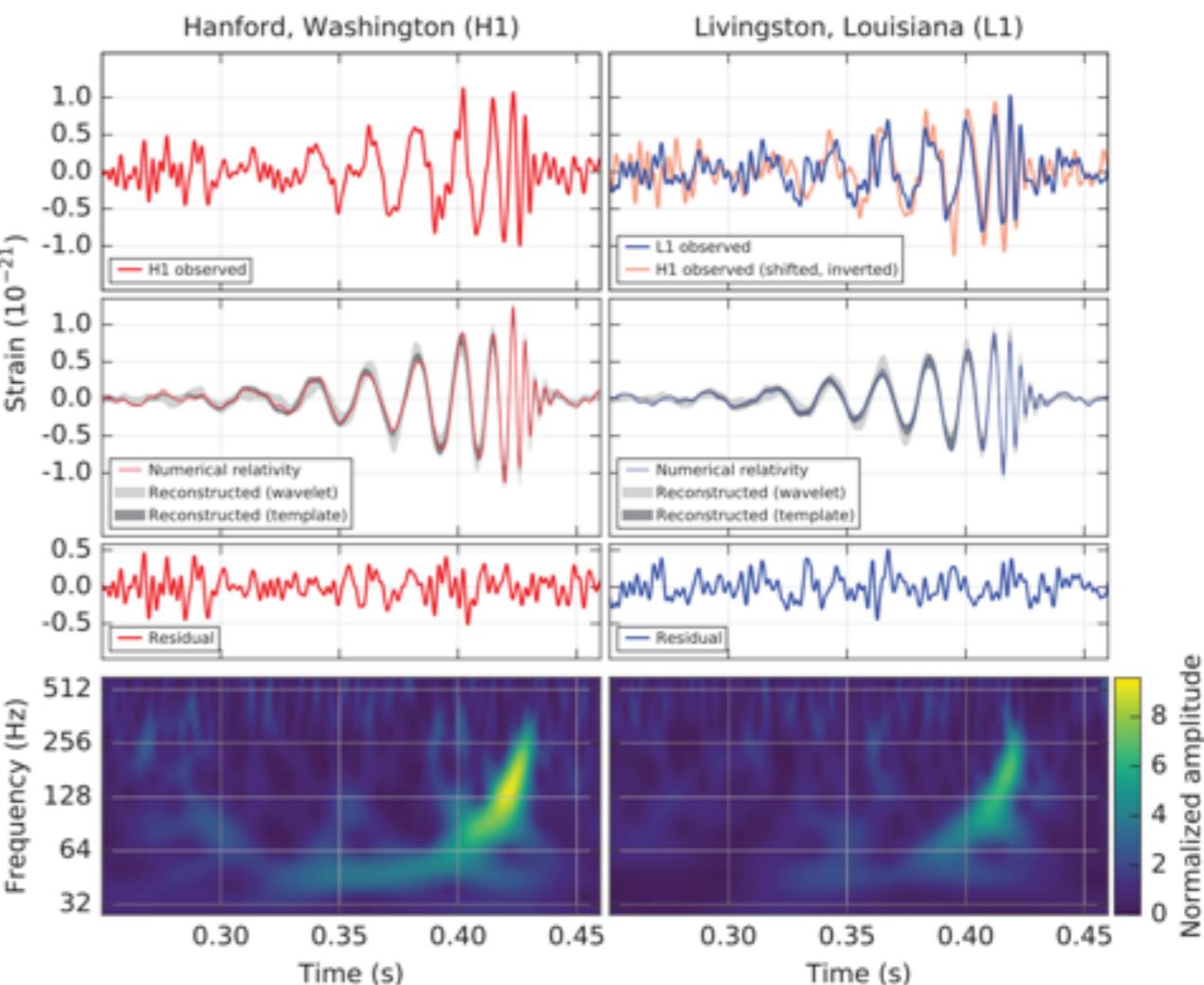


FIG. 1. The gravitational-wave event GW150914 observed by the LIGO Hanford (H1, left column panels) and Livingston (L1, right column panels) detectors. Times are shown relative to September 14, 2015 at 09:50:45 UTC. For visualization, all time series are filtered

- 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,⁹ M. Agathos,⁹ K. Agatsuma,⁹ N. Aggarwal,¹⁰ O. D. Aguilar,¹¹ L. Aiello,^{12,13} A. Ain,¹⁴ P. Ajith,¹⁵ B. Allen,¹⁶ A. Allocca,¹⁷ S. P. Altin,²⁰ S. B. Anderson,¹⁸ W. G. Anderson,¹⁹ K. Anul,¹⁴ M. A. Arain,⁵ M. C. Araya,¹ C. C. Arceneaux,²¹ J. S. Areeda,²² N. Arnaud,²³ K. G. Arun,²⁴ S. Asenzi,^{25,13} G. Ashton,²⁶ M. Asl,²⁷ S. M. Aston,²⁸ P. Ashton,²⁹ P. Aufmuth,³ C. Aulbert,³⁰ S. Babak,²⁷ P. Bacon,³⁰ M. K. M. Bader,³¹ P. T. Baker,³² F. Baldaccini,^{33,34} G. Ballardia,³⁵ S. W. Ballmer,³³ J. C. Barayoga,¹ S. E. Barclay,³⁶ B. C. Barish,¹ D. Barker,³⁷ F. Barone,³⁸ B. Barr,³⁶ L. Barsotti,³⁰ M. Barsuglia,³⁹ D. Barta,²⁰ J. Bartlett,³⁷ M. A. Barton,³⁷ I. Bassi,⁴⁰ R. Bassi,⁴⁰ A. Bassi,^{31,39} J. C. Batch,³⁷ C. Baune,⁸ V. Bavligadde,³⁴ M. Bazzan,⁴¹ B. Behrle,³⁶ M. Beijer,⁴² C. Belczynski,⁴³ A. S. Bell,³⁶ C. J. Bell,³⁶ B. K. Berger,¹ J. Bergman,¹⁷ G. Bergmann,⁴⁴ C. P. L. Berry,⁴⁵ D. Bersanetti,¹ A. Bertolini,³ J. Betzwieser,⁶ S. Bhagwat,³⁷ R. Bhadraje,⁴⁵ I. A. Bilenko,⁴⁶ G. Billingsley,¹ J. Birch,⁴⁷ R. Birney,³⁰ O. Bimholz,⁸ S. Biscans,³⁰ A. Bish,^{4,17} M. Bitossi,⁴⁸ C. Biwer,³³ M. A. Bizzarri,²³ J. K. Blackburn,¹ C. D. Blair,⁴¹ D. G. Blair,³¹ R. M. Blair,³¹ S. Bloemen,³² O. Bock,³ T. P. Bodiya,¹⁰ M. Boer,³⁷ G. Bogaert,³⁷ C. Bogan,⁴⁹ A. Bobe,⁵⁰ P. Bojtos,³⁴ C. Bond,⁴¹ F. Bondi,³¹ R. Boenand,⁷ H. A. Boom,⁹ R. Bork,¹ V. Bouchi,^{36,39} S. Bose,¹⁸ Y. Bouffanais,³⁰ A. Bozzi,³⁴ C. Bradacchia,³⁷ P. R. Brady,³⁶ V. B. Braginsky,⁴² M. Brancusi,³⁷ M. Briskmann,⁸ V. Brisson,²⁵ P. Brockill,³⁶ A. F. Brooks,¹ D. A. Brown,³⁰ D. D. Brown,⁴⁵ N. M. Brown,³⁰ C. C. Buchanan,² A. Buikema,¹⁰ T. Bulik,⁴⁴ H. J. Bulten,^{41,39} A. Buzzarino,^{36,42} D. Buskulic,⁷ C. Buy,⁴⁰ R. L. Byer,⁴⁹ M. Cabero,⁸ L. Cadoret,⁴⁷ G. Cagnoli,^{44,39} C. Cahillane,¹ J. Calderon Bustillo,^{36,63} T. Callister,¹ E. Calorei,³⁷ J. B. Camp,⁴¹ K. C. Cannon,³⁷ J. Cao,³⁰ C. D. Capone,³⁰ E. Capocasa,³⁰ F. Carbognani,³⁴ S. Caride,⁷¹ J. Casanave Diaz,³³ C. Castrini,^{33,37} S. Castell,³¹ M. Cavaglià,²¹ F. Cavalier,³⁷ R. Cavalieri,³⁴ G. Cella,¹⁹ C. B. Cepeda,¹ L. Cerboni Baiardi,^{37,38} G. Cerretani,^{38,39} E. Cesarini,²¹ R. Chakrabarty,³ T. Chalermsongsak,¹ S. J. Chamberlain,⁷² M. Chan,³⁹ S. Chao,³⁷ P. Charlton,⁷² E. Chassande-Mottin,³⁰ H. Y. Chen,⁷³ Y. Chen,⁷⁶ C. Cheng,⁷³ A. Chincarini,⁴⁷ A. Chiummo,³⁴ H. S. Cho,⁷⁷ M. Cho,⁶² J. H. Chow,³⁹ N. Christensen,⁷⁸ Q. Chu,³¹ S. Chua,³² S. Chung,⁴⁹ G. Ciani,³⁷ F. Cleva,³⁷ E. Coccia,^{37,38,39} P.-F. Cohadon,⁴⁰ A. Colla,^{37,38} C. G. Collette,⁴⁰ L. Cominsky,³¹ M. Conastacio Jr.,¹¹ A. Conti,^{37,38} L. Conti,⁴² D. Cook,³⁷ T. R. Corbitt,⁷ N. Cornish,³¹ A. Conti,³⁷ S. Cortese,³⁶ C. A. Costa,¹¹ M. W. Coughlin,³⁷ S. B. Coughlin,⁴² J.-P. Coulon,³⁷ S. T. Countryman,⁷⁹ P. Couvares,¹ E. E. Cowan,⁶³ D. M. Coward,³¹ M. J. Cowart,⁶ D. C. Coyne,¹ R. Coyne,³⁷ K. Craig,³⁶ J. D. E. Creighton,¹⁶ T. D. Creighton,³⁷ J. Cripe,³⁷ S. G. Crowder,³⁴ A. M. Cruise,³⁵ A. Cummings,³⁶ L. Cunningham,³⁶ E. Cuoco,³⁷ T. Dal Canton,⁸ S. L. Danilishin,³⁶ S. D'Antonio,¹³ K. Danzmann,^{17,8} N. S. Darman,³⁵ C. F. Da Silva Costa,³ V. Dattilo,³⁴ I. Dove,⁴⁸ H. P. Deveaux,³¹ M. Dietz,³³ G. S. Davies,³⁶ E. J. Dow,³⁶ R. Day,³⁴ S. De,³⁵ D. DeBra,⁴⁹ G. Debrasci,³⁶ J. Degallaix,³⁵ M. De Laurenti,^{47,8} S. Deligios,³² W. Del Pozzo,⁴³ T. Denker,³⁷ T. Dent,⁸ H. Dereli,³⁷ V. Dergachev,³⁷ R. T. DeRosa,⁶ R. Di Rosa,^{30,4} R. DeSalvo,³⁷ S. Dhurandhar,³⁴ M. C. Diaz,³¹ L. Di Fiore,⁴ M. Di Giovanni,^{39,28} A. Di Lieto,^{38,19} S. Di Pace,^{36,18} I. Di Palma,^{26,8} A. Di Virgilio,¹⁹ G. Dojcinovski,³⁹ V. Dolique,⁴⁵ F. Donovan,³⁷ K. L. Dooley,³¹ S. Doranav,⁴³ R. Douglas,³⁶ T. P. Downes,¹⁶ M. Drago,³⁹ R. W. P. Drever,¹ J. C. Driggers,³⁷ Z. Du,³⁹ M. Ducout,³⁷ S. E. Dwyer,³⁷ T. B. Edo,³⁶ M. C. Edwards,⁷⁸ A. Effler,³⁷ H.-B. Eggemeier,⁸ P. Ehlers,¹ J. Eichholz,³¹ S. S. Eikenberry,³ W. Engels,⁷⁶ R. C. Esick,³⁷ T. Etzel,³⁷ M. Evans,³⁷ T. M. Evans,³⁷ R. Everett,³⁷ M. Fauchon,³⁷ P. Favata,³⁷ H. Fazio,³⁷ S. Fairhurst,⁹¹ X. Fan,⁷⁰ Q. Fang,⁵¹ S. Farinon,⁴⁷ B. Far,³⁷ W. M. Far,⁴⁵ M. Favata,³⁹ M. Fays,⁹¹ H. Fehrmann,⁸ M. M. Fejer,⁴⁰ D. Feldbaum,² L. Ferrante,^{18,19} E. C. Ferreira,¹⁷ F. Ferrini,³⁴ F. Fidecaro,^{18,19} L. S. Finn,³² L. Fiori,³⁴ D. Fiorucci,³⁶ R. P. Fisher,³⁵ R. Flaminio,^{45,10} M. Fletcher,³⁶ H. Feng,⁴⁹ J. D. Fournier,³³ S. Franco,³³ S. Frasca,⁵ F. Frasconi,¹⁹ M. Frede,³ Z. Frei,³⁴ A. Freise,⁴⁵ R. Frey,³⁷ T. T. Frick,³⁷ P. Prischel,³⁹ V. V. Frolov,⁵ P. Fulda,⁵ M. Pyffe,⁶ H. A. Gabbard,³⁷ J. R. Gair,⁹¹ L. Gammaitoni,³² S. G. Gaenskar,³⁴ F. Garofli,^{61,6} A. Gatto,³⁶ G. Gaur,^{94,5}

¹LIGO, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts 02139, USA
²Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 12327-010 São José dos Campos, São Paulo, Brazil
³INFN, Gran Sasso Science Institute, 64100 L'Aquila, Italy
⁴INFN, Sezione di Roma Tor Vergata, I-00133 Roma, Italy

⁵International Centre for Astronomy and Astrophysics, Panjab University, Chandigarh 160014, India

⁶University of Wisconsin-Milwaukee, Milwaukee, Wisconsin 53201, USA

⁷Leibniz Universität Hannover, D-30337 Hannover, Germany

⁸Università di Pisa, I-56127 Pisa, Italy

⁹INFN, Sezione di Pisa, I-56127 Pisa, Italy

¹⁰Australian National University, Canberra, Australian Capital Territory 2600, Australia

¹¹The University of Mississippi, University, Mississippi 38677, USA

¹²California State University Fullerton, Fullerton, California 92634, USA

¹³LAL, Université Paris-6, CNRS/IN2P3, Université Paris-Saclay, Orsay, France

¹⁴Chennai Mathematical Institute, Chennai, India 600103

¹⁵Università di Roma Tor Vergata, I-00133 Roma, Italy

¹⁶University of Southampton, Southampton SO17 1BJ, United Kingdom

¹⁷Universität Hamburg, D-22761 Hamburg, Germany

¹⁸INFN, Sezione di Roma, I-00195 Roma, Italy

¹⁹Albert-Einstein-Institut, Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik, D-14472 Potsdam-Golm, Germany

²⁰APC, Astroparticule et Cosmologie, Université Paris-Diderot, CNRS/IN2P3, CEA/Irfu, Observatoire de Paris, Sorbonne Paris Cité, F-75205 Paris Cedex 13, France

²¹Montana State University, Bozeman, Montana 59717, USA

²²INFN, Sezione di Perugia, I-06123 Perugia, Italy

²³European Gravitational Observatory (EGO), I-56021 Cascina, Pisa, Italy

²⁴Syracuse University, Syracuse, New York 13244, USA

²⁵SUPA, University of Glasgow, Glasgow G12 8QQ, United Kingdom

²⁶LIGO Hanford Observatory, Richland, Washington 99332, USA

²⁷Wigner RCP, RMET, H-1121 Budapest, Konkoly Thege Miklós utca 29-33, Hungary

²⁸Columbia University, New York, New York 10032, USA

²⁹Stanford University, Stanford, California 94305, USA

³⁰Università di Padova, Dipartimento di Fisica e Astronomia, I-35131 Padova, Italy

³¹INFN, Sezione di Padova, I-35131 Padova, Italy

³²CERN-PAN, Dubna MP-02013, Russia

³³Astrophysical Observatory Warsaw University, 00-478 Warsaw, Poland

³⁴University of Birmingham, Birmingham B15 2TT, United Kingdom

³⁵Università degli Studi di Genova, I-16136 Genova, Italy

³⁶INFN, Sezione di Genova, I-16136 Genova, Italy

³⁷RRCAT, Indore MP-452013, India

³⁸Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia

³⁹SLAC, University of the West of Scotland, Paisley PA1 2BE, United Kingdom

⁴⁰Universität Bielefeld, Bielefeld, Westfalen 3350, Germany

⁴¹Armen, Université Côte d'Azur, CNRS, Observatoire Côte d'Azur, CS 44298, Nice cedex 4, France

⁴²MTA Eötvös University, "Lendület" Atmospheric Research Group, Budapest 1117, Hungary

⁴³Institute of Plasma Physics, CNRS, Unité de Recherche, F-13397 Marseille, France

⁴⁴Washington State University, Pullman, Washington 99164, USA

⁴⁵Southern University, Shantou, Guangdong 515063, China

⁴⁶INFN, Sezione di Roma, I-00195 Roma, Italy

⁴⁷INFN, Sezione di Trieste, I-34139 Trieste, Italy

⁴⁸INFN, Sezione di Genova, I-16136 Genova, Italy

⁴⁹INFN, Sezione di Perugia, I-06123 Perugia, Italy

⁵⁰INFN, Sezione di Roma, I-00195 Roma, Italy

⁵¹INFN, Sezione di Pisa, I-56127 Pisa, Italy

⁵²INFN, Sezione di Roma, I-00195 Roma, Italy

⁵³INFN, Sezione di Genova, I-16136 Genova, Italy

⁵⁴INFN, Sezione di Perugia, I-06123 Perugia, Italy

⁵⁵INFN, Sezione di Roma, I-00195 Roma, Italy

⁵⁶INFN, Sezione di Perugia, I-06123 Perugia, Italy

⁵⁷INFN, Sezione di Roma, I-00195 Roma, Italy

⁵⁸INFN, Sezione di Roma, I-00195 Roma, Italy

⁵⁹INFN, Sezione di Roma, I-00195 Roma, Italy

⁶⁰INFN, Sezione di Roma, I-00195 Roma, Italy

⁶¹INFN, Sezione di Roma, I-00195 Roma, Italy

⁶²INFN, Sezione di Roma, I-00195 Roma, Italy

⁶³INFN, Sezione di Roma, I-00195 Roma, Italy

⁶⁴INFN, Sezione di Roma, I-00195 Roma, Italy

⁶⁵INFN, Sezione di Roma, I-00195 Roma, Italy

⁶⁶INFN, Sezione di Roma, I-00195 Roma, Italy

⁶⁷INFN, Sezione di Roma, I-00195 Roma, Italy

⁶⁸INFN, Sezione di Roma, I-00195 Roma, Italy

⁶⁹INFN, Sezione di Roma, I-00195 Roma, Italy

⁷⁰INFN, Sezione di Roma, I-00195 Roma, Italy

⁷¹INFN, Sezione di Roma, I-00195 Roma, Italy

2016年2月、LIGOが重力波を初めて検出した、と発表した

毎日新聞 2016/2/13

「窮理」 2016/8

2017年1月センター試験 国語 小林博司「科学コミュニケーション」

第1問

の都合で本文の段落に 1 ～ 13 の番号を付してある。また、表記を一部改めている。(配点 50)

1 現代社会は科学技術に依存した社会である。近代科学の成立期とされる十六世紀、十七世紀においては、そもそも「科学」という名称で認知されるような知的活動は存在せず、伝統的な自然哲学の一環としての、一部の好事家による楽しみの側面が強かつた。しかし、十九世紀になると、科学研究は「科学者」という職業的専門家によって各種高等教育機関で営まれる知識生産へと変容し始める。既存の知識の改訂と拡大のみを生業とする集団を社会に組み込むことになったのである。さらに二十世紀になり、国民国家の競争の時代になると、科学は技術的な威力と結びつくことによって、この競争の重要な戦力としての力を発揮し始める。二度にわたる世界大戦が科学・技術の社会における位置づけを決定的にしていったのである。

2 第二次世界大戦以後、科学技術という営みの存在は膨張を続ける。^(注1) ブライスによれば、科学技術という営みは十七世紀以来、十五年で^(ア)バイソウするという速度で膨張しており、二十世紀後半の科学技術の存在はGNPの二バーセント強の投資を要求するまでになつてきているのである。現代の科学技術は、かつてのような思弁的、宇宙論的伝統に基づく自然哲学的性格を失い、A 先進国^(注2)の社会体制を維持する重要な装置となつてきている。

3 十九世紀から二十世紀前半にかけては科学という営みの規模は小さく、にもかかわらず技術と結びつき始めた科学・技術は社会の諸問題を解決する能力を持つていた。「もつと科学を」というスローガンが説得力を持ち得た所以である。しかし二十世紀後半の科学・技術は両面価値的存在になり始める。現代の科学・技術では、自然の仕組みを解明し、宇宙を説明するという営みの比重が下がり、実験室の中に天然では生じない条件を作り出し、そのもとでさまざまな人工物を作り出すなど、自然に入りし、操作する能力の開発に重点が移動している。その結果、永らく人類を脅かし苦しめてきた病や災害といった自然の脅威を制御できるようになつてきたが、同時に、科学・技術の作り出した人工物が人類にさまざまな災いをもたらし始めてもいるのである。科学・技術が恐るべき速度で生み出す新知識が、われわれの日々の生活に商品や製品として放出されてくる。い

わゆる「環境ホルモン」や地球環境問題、先端医療、情報技術などがその例である。B こうして「もつと科学を」というスローガンの説得力は低下し始め、「科学が問題ではないか」という新たな意識が社会に生まれ始めているのである。

4 しかし、科学者は依然として「もつと科学を」という発想になじんでおり、このような「科学が問題ではないか」という問い合わせを、科学に対する無知や誤解から生まれた情緒的反発とみなしがちである。ここからは、素人の一般市民への科学教育の充実や、科学啓蒙プログラムの展開という発想しか生まれないのである。

5 このような状況に一石を投じたのが科学社会学者のコリンズとビンチの『ゴレム』である。ゴレムとはユダヤの神話に登場する怪物である。人間が水と土から創り出した怪物で、魔術的力量を備え、日々その力を増加させつつ成長する。人間の命令に従い、人間の代わりに仕事をし、外敵から守ってくれる。しかしこの怪物は不器用で危険な存在でもあり、適切に制御しなければ主人を破壊する威力を持つている。コリンズとビンチは、現代では、科学が、全面的に善なる存在か全面的に悪なる存在かのどちらかのイメージに引き裂かれているという。そして、このような分裂したイメージを生んだ理由は、科学が実在と直結した無謬^(注3)の知識という神のイメージで捉えられており、科学が自らを実態以上に美化することによって過大な約束をし、それが必ずしも実現しないことが幻滅を生み出したからだという。つまり、全面的に善なる存在というイメージが科学者から振りまかれ、他方、チエルノブイリ事故や狂牛病に象徴されるような事件によって科学への幻滅が生じ、一転して全面的に悪なる存在というイメージに変わったのである。

6 コリンズとビンチの処方箋は、科学者が振りまいした当初の「実在と直結した無謬の知識という神のイメージ」を科学の実態に即した「不確実で失敗しがちな向こう見ずでへまをする巨人のイメージ」、つまり C ゴレムのイメージに取りかえることを主張したのである。そして、科学史から七つの具体的な実験をめぐる論争を取り上げ、近年の科学社会学研究に基づくケーススタディーを提示し、科学上の論争の終結がおよそ科学哲学者が想定するような論理的、方法論的決着ではなく、さまざまなヨウインが絡んで生じていることを明らかにしたのである。

7 彼らが扱ったケーススタディーの一例を挙げよう。一九六九年にウェーバーが、十二年の歳月をかけて開発した実験装置を

2017年1月センター試験 国語 小林博司「科学コミュニケーション」

(ウ)

- 3 ヤツカイ
——
① ② ③ ④ ⑤

- 4 ヤツコウ
——
① ② ③ ④ ⑤

(エ)

- 4 センコク
——
① ② ③ ④ ⑤

- 4 コクジ
——
① ② ③ ④ ⑤

- 7 ウエーバー——ジョセフ・ウェーバー(一九一九—二〇〇〇)。物理学者。
8 重力波——時空のゆがみが波となつて光速で伝わる現象。一九一六年にアインシュタインがその存在を予言していた。
9 重力波の存在は明確に否定された——ウェーバーによる検出の事実は証明されなかつたが、二〇一六年、アメリカの研究チームが直接検出に成功したと発表した。

10

- コリンズとビンチは、このようなケーススタディーをもとに、「もつと科学を」路線を批判するのである。民主主義国家の

用いて、重力波の測定に成功したと発表した。これをきっかけに、追試をする研究者があらわれ、重力波の存在をめぐって論争となつたのである。この論争において、実験はどのような役割を果たしていたかという点が興味深い。追試実験から、ウェーバーの結果を否定するようなデータを手に入れた科学者は、それを発表するかいなかという選択の際に(ウ)ヤツカイな問題を抱え込むのである。否定的な結果を発表することは、ウェーバーの実験が誤りであり、このような大きな値の重力波は存在しないという主張をすることになる。しかし、実は批判者の追試実験の方に不備があり、本当はウェーバーの検出した重力波が存在するということが明らかになれば、この追試実験の結果によって彼は自らの実験能力の低さを公表することになる。

8

- 学生実験の場合には、実験をする前におおよそどのような結果になるかがわかつており、それと食い違えば実験の失敗がセンエコクされる。しかし現実の科学では必ずしもそうはことが進まない。重力波の場合、どのような結果になれば実験は成功といえるかがわからないのである。重力波が検出されれば、実験は成功なのか、それとも重力波が検出されなければ、実験は成功なのか。しかしまさに争点は、重力波が存在するかどうかであり、そのための実験なのである。何が実験の成功といえ

る結果なのかを、前もって知ることはできない。重力波が存在するかどうかを知るために、「優れた検出装置を作らなければならぬ。しかし、その装置を使って適切な結果を手に入れなければ、装置が優れたものであつたかどうかはわからない。しかし、優れた装置がなければ、何が適切な結果かということはわからない……」。コリンズとビンチはこのような循環を「実験家の悪循環」と呼んでいる。

9

- 重力波の論争に関しては、このような悪循環が生じ、その存在を完全に否定する実験的研究は不可能であるにもかかわらず(存在・非存在の可能性がある)、結局、有力科学者の否定的発言をきっかけにして、科学者の意見が雪崩を打つて否定論に傾き、それ以後、重力波の存在は明確に否定されたのであつた。つまり、論理的には重力波の存在もしくは非存在を実験によつて決着をつけられていなかつたが、科学者共同体の判断は、非存在の方向で収束したということである。

タディーを提示し、科学上の論争の絆縫かおよそ科学哲学者が想定するような論理的方法論的決着ではなく、さまざまな三ウイインが絡んで生じていることを明らかにしたのである。

7

- 彼らが扱つたケーススタディーの一例を挙げよう。一九六九年にウェーバーが、十二年の歳月をかけて開発した実験装置を

2017年1月大阪工業大学 物理

物理

I 空所を埋め、問い合わせよ。(配点 60)

2015年9月14日、重力波が観測された。この重力波は、13億光年のかなたで2つのブラックホールが互いの周りを回転しながら衝突・合体したときに、放出されたものだという。以下では2つのブラックホールを、質量 m_1, m_2 [kg] の2つの質点（以下、星1, 星2と呼ぶ）とみなし、万有引力の下でどのような運動をするかを力学的観点から調べてみよう。

(1) 星1, 星2の位置ベクトルを \vec{r}_1, \vec{r}_2 [m], 速度を \vec{v}_1, \vec{v}_2 [m/s] とする。以下で、物理量 X の微小な時間 Δt [s] の間の変化を ΔX と書き表すことにする。この書き方では、位置ベクトル \vec{r}_1 の変化は、速度ベクトル \vec{v}_1 を用いて、 $\Delta \vec{r}_1 = \vec{v}_1 \Delta t$ となる。この式は、以下のように書いててもよい。

$$\vec{v}_1 = \frac{\Delta \vec{r}_1}{\Delta t}$$

星1の速度の変化 $\Delta \vec{v}_1$ [m/s] と、星2から星1にはたらく万有引力 \vec{F} [N] の間には、

$$m_1 \Delta \vec{v}_1 = \vec{F} \Delta t \quad ①$$

という関係がある。式①は ア の変化が イ に等しいことを表している。一方、星1から星2にはたらく力は、 ウ の法則により $-\vec{F}$ となるので、次の関係式が成り立つ。

$$m_2 \Delta \vec{v}_2 = -\vec{F} \Delta t \quad ②$$

式①, ②より、

$$m_1 \Delta \vec{v}_1 + m_2 \Delta \vec{v}_2 = \Delta(m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2) = 0 \quad ③$$

1) 式③の表す物理的内容を簡潔に述べよ。

星1, 星2の重心の位置ベクトル \vec{R} [m], 速度 \vec{V} [m/s], 加速度 \vec{A} [m/s²] は、次のように表される。

$$\vec{R} = \frac{m_1 \vec{r}_1 + m_2 \vec{r}_2}{m_1 + m_2}, \vec{V} = \frac{\Delta \vec{R}}{\Delta t} = \frac{m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2}{m_1 + m_2}, \vec{A} = \frac{\Delta \vec{V}}{\Delta t}$$

2) 問1) の結果を踏まえ、重心がどのような運動をするか簡潔に述べよ。

(2) 星1から見た星2の相対位置を表すベクトルを \vec{r} [m], 相対速度を \vec{v} [m/s] とすると、

$$\vec{r} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1, \vec{v} = \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} = \vec{v}_2 - \vec{v}_1$$

となる。この式より

$$\Delta \vec{v} = -(\text{□エ}) \times \vec{F} \Delta t \quad ④$$

が得られる。式④は、

$$\mu \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = -\vec{F}, \text{ ただし } \mu = \frac{1}{\text{□エ}} \quad ⑤$$

と書き直すことができる。

式⑤は、星1を原点とする座標系で、質量 μ [kg] の質点（以下、質点 μ と呼ぶ）が、常に原点に向かう力 $-\vec{F}$ （万有引力）を受けて運動しているときの運動方程式と見なすことができる。以下では、質点 μ が星1を中心とする半径 ℓ [m] の円周上を、角速度 ω で等速円運動する場合を考えよう。2つの質点の間にはたらく万有引力は、お互いの位置関係のみによって決まり、質点の速度には無関係である。したがって、どのような座標系から見ても、その大きさは万有引力定数を G [N·m²/kg²] として $G \frac{m_1 m_2}{\ell^2}$ である。また、無限の遠方を基準とした万有引力による位置エネルギーは $-G \frac{m_1 m_2}{\ell}$ である。

3) 質点 μ の円運動について、中心方向の運動方程式を書き、角速度 ω [rad/s] を求めよ。ただし、 μ はそのまま用い、 エ の値を代入する必要はない。

問3) の結果は、円運動の周期の2乗が半径 ℓ の オ 乗に比例することを示している。これは、 カ 法則に相当する。

4) 質点 μ の力学的エネルギー E [J] を求め、 ℓ との関係を解答欄のグラフに描け。

5) 重力波の放出により力学的エネルギーが失われると、半径 ℓ 、角速度 ω および質点 μ の速さはどのように変化するか、解答欄からそれぞれ正しいものを選び丸で囲め。

(3) (2) では相対運動に着目し、静止した星1の周りを星2が円運動すると見る立場で考察した。現実には星1, 星2は互いの周りを回って加速度運動しているので、このような見方は許されないはずだが、星2の質量を μ に置きかえることで、矛盾が解消されている。

この運動を元の座標系から見るときは、星1, 星2が、共通の角振動数 ω [rad/s] で、それぞれ半径 ℓ_1, ℓ_2 [m] の等速円運動をしていると考える（図1参照）。大きさ $G \frac{m_1 m_2}{\ell^2}$ の万有引力を向心力として円運動するから、円運動の中心は、星1, 星2を結ぶ線分上にある。更に、星1, 星2の運動方程式を用いて計算すると、 $\ell_1 = \frac{m_2}{m_1 + m_2} \ell, \ell_2 = \frac{m_1}{m_1 + m_2} \ell$ となり、全体の力学的エネルギーが、先に求めた E と一致することが確認できる。これによって、相対運動に着目した考え方が正当化されることがわかる。

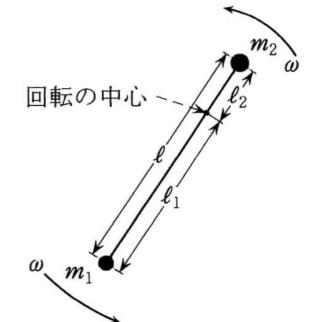


図1 互いの周りを回転する星1と星2

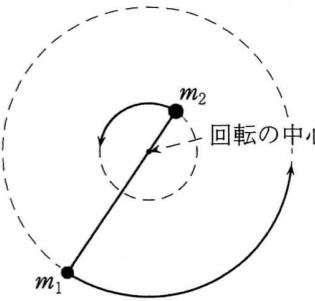
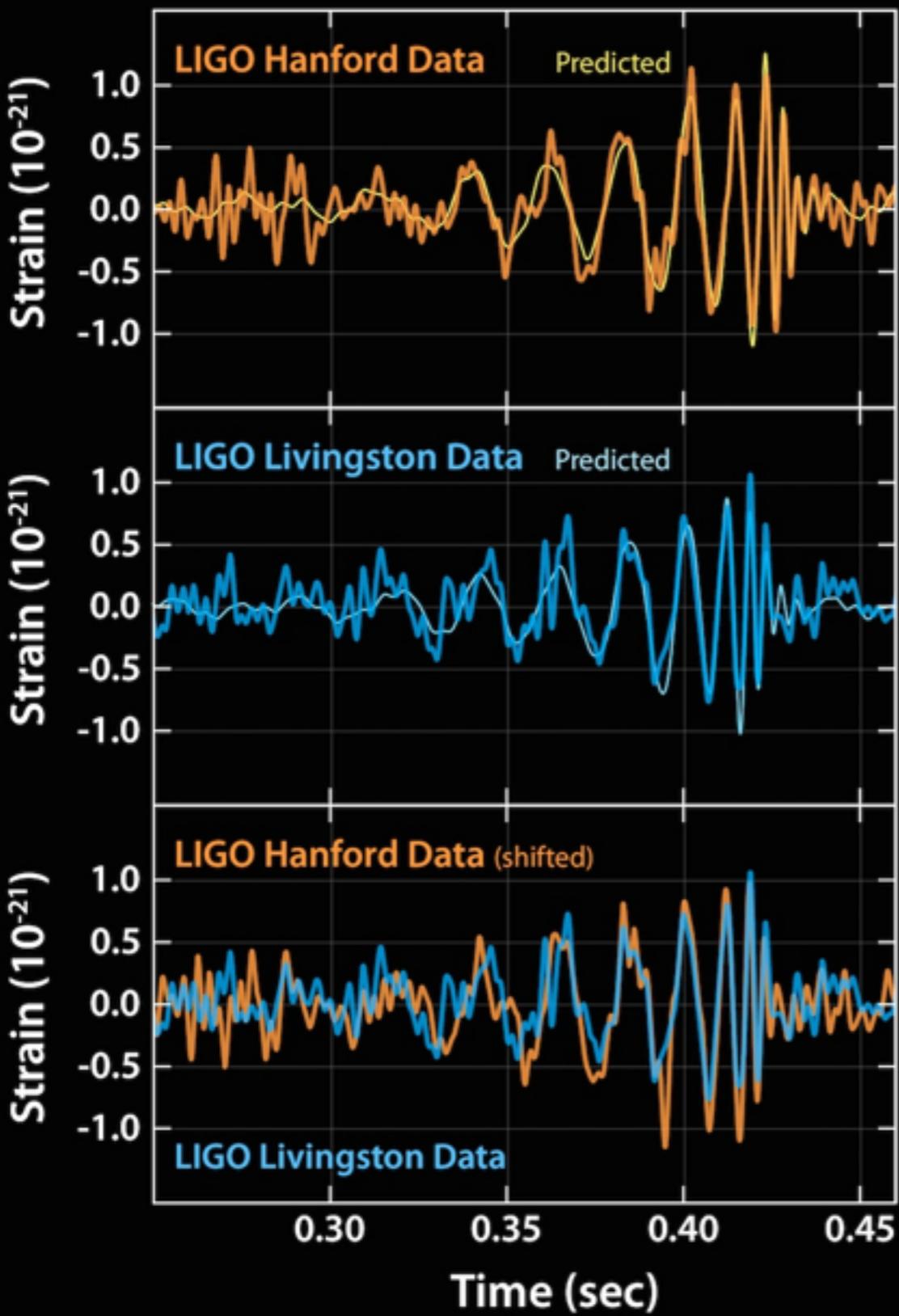


図2 力学的エネルギーが保存するときの軌道

6) 図2に、力学的エネルギーが保存するときの星1, 星2の円軌道の一部を実線で描いた。重力波を放出して力学的エネルギーが失われていくとき、軌道がどのように変わるかを示す概略図を解答欄に描き込め。

GW150914



GW150914: FACTSHEET

BACKGROUND IMAGES: TIME-FREQUENCY TRACE (TOP) AND TIME-SERIES (BOTTOM) IN THE TWO LIGO DETECTORS; SIMULATION OF BLACK HOLE HORIZONS (MIDDLE-TOP), BEST FIT WAVEFORM (MIDDLE-BOTTOM)

first direct detection of gravitational waves (GW) and first direct observation of a black hole binary

observed by	LIGO L1, H1	duration from 30 Hz	~ 200 ms
source type	black hole (BH) binary	# cycles from 30 Hz	~10
date	14 Sept 2015	peak GW strain	1×10^{-21}
time	09:50:45 UTC	peak displacement of interferometers arms	$\pm 0.002 \text{ fm}$
likely distance	0.75 to 1.9 Gly 230 to 570 Mpc	frequency/wavelength at peak GW strain	150 Hz, 2000 km
redshift	0.054 to 0.136	peak speed of BHs	~ 0.6 c
signal-to-noise ratio	24	peak GW luminosity	$3.6 \times 10^{56} \text{ erg s}^{-1}$
false alarm prob.	< 1 in 5 million	radiated GW energy	$2.5\text{-}3.5 M_{\odot}$
false alarm rate	< 1 in 200,000 yr	remnant ringdown freq.	~ 250 Hz
Source Masses M_{\odot}		remnant damping time	~ 4 ms
total mass	60 to 70	remnant size, area	180 km, $3.5 \times 10^5 \text{ km}^2$
primary BH	32 to 41	consistent with general relativity?	passes all tests performed
secondary BH	25 to 33	graviton mass bound	< $1.2 \times 10^{-22} \text{ eV}$
remnant BH	58 to 67	coalescence rate of binary black holes	2 to 400 $\text{Gpc}^{-3} \text{ yr}^{-1}$
mass ratio	0.6 to 1	online trigger latency	~ 3 min
primary BH spin	< 0.7	# offline analysis pipelines	5
secondary BH spin	< 0.9	CPU hours consumed	~ 50 million (=20,000 PCs run for 100 days)
remnant BH spin	0.57 to 0.72	papers on Feb 11, 2016	13
signal arrival time delay	arrived in L1 7 ms before H1	# researchers	~ 1000, 80 institutions in 15 countries
likely sky position	Southern Hemisphere		
likely orientation resolved to	face-on/off ~600 sq. deg.		

Detector noise introduces errors in measurement. Parameter ranges correspond to 90% credible bounds.

Acronyms: L1=LIGO Livingston, H1=LIGO Hanford; Gly=giga lightyear= $9.46 \times 10^{12} \text{ km}$; Mpc=mega parsec=3.2 million lightyear, Gpc= 10^3 Mpc , fm=femtometer= 10^{-15} m , M_{\odot} =1 solar mass= $2 \times 10^{30} \text{ kg}$

GW151226

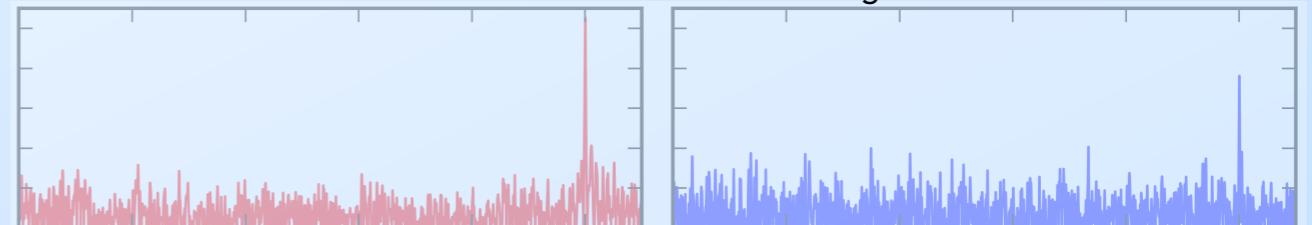
14Msun + 7.5 Msun
のBHが合体して 21 Msun
(1 Msun分の質量が消失)

15億光年先
(440 ± 190 Mpc)
($z=0.05$ — 0.13)

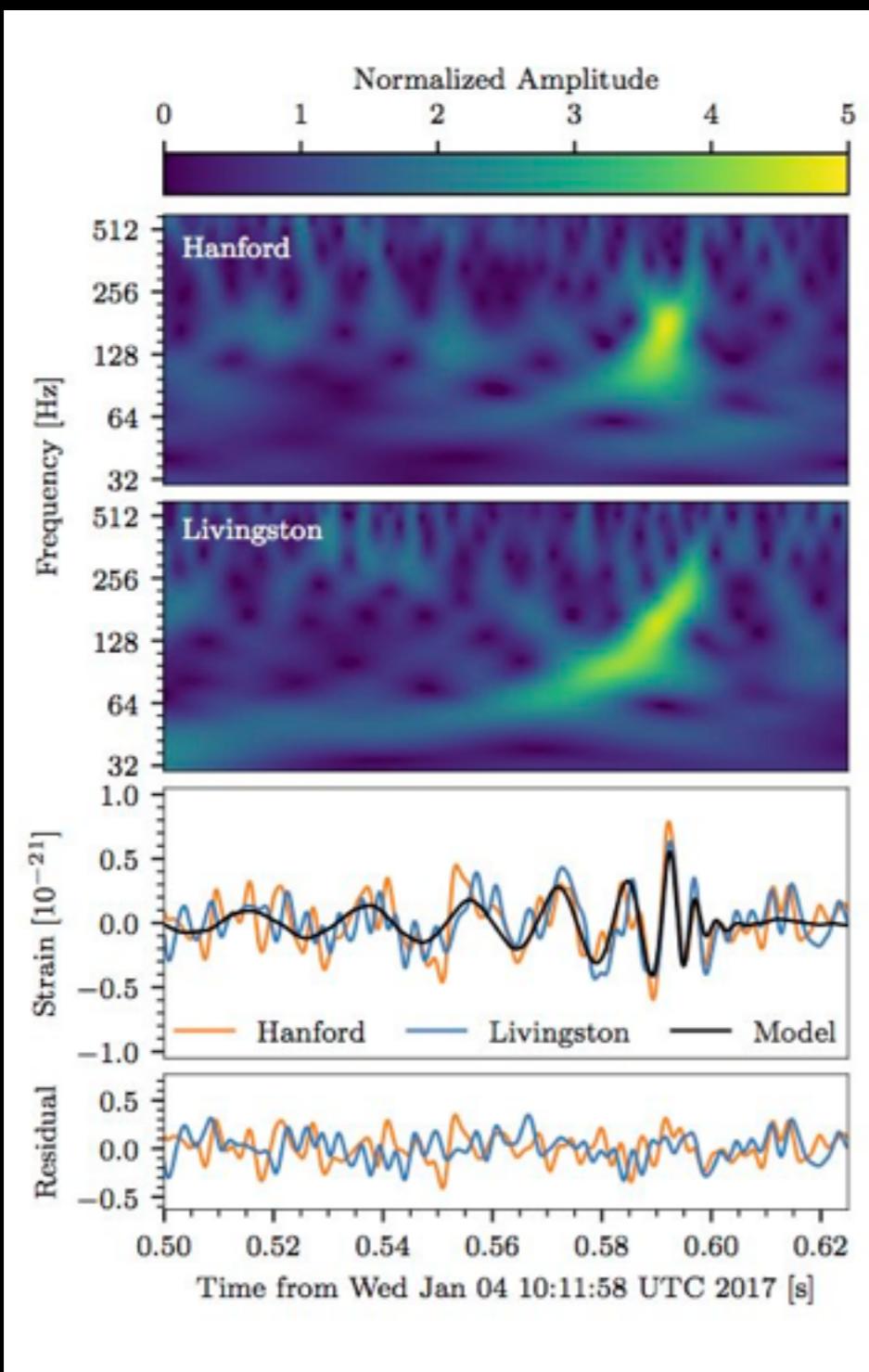


observed by	LIGO L1, H1	duration from 35 Hz	~ 1 s
source type	black hole (BH) binary	# cycles from 35 Hz	~ 55
date	26 Dec 2015	signal arrival time delay	arrived in H1 1 ms after L1
time	03:38:53 UTC		
distance	250 to 620 Mpc	peak GW strain	$\sim 3.4 \times 10^{-22}$
redshift	0.05 to 0.13	peak displacement of interferometers arms	$\sim \pm 0.7$ am
signal-to-noise ratio	13	frequency/wavelength at peak GW strain	420 Hz, 710 km
false alarm prob.	~ 1 in 10 million	peak speed of BHs	~ 0.6 c
Source Masses M_\odot		peak GW luminosity	2 to 4×10^{56} erg s $^{-1}$
total mass	20 to 28	radiated GW energy	0.8 – 1.1 M_\odot
primary BH	11 to 23	remnant ringdown freq.	~ 750 Hz
secondary BH	5 to 10	remnant damping time	0.00 – ~ 1.3 ms
remnant BH	19 to 27	remnant size, area	60 km, 3.5×10^4 km 2
(Reconstructed (template))		online trigger latency	~ 67 s
mass ratio	> 0.28	# offline analysis pipelines	2
spin of one of the black holes	> 0.2		
remnant BH spin	0.7 to 0.8		
resolved to	~850 sq. deg.		

Parameter ranges correspond to 90% credible bounds. Acronyms: L1/H1=LIGO Livingston/Hanford; Mpc=mega parsec=3.2 million lightyear, am=attometer= 10^{-18} m, M_\odot =1 solar mass= 2×10^{30} kg



GW170104



GW170104: FACTSHEET

Background Images: time-frequency trace (top), H1 and L1 time series and maximum-likelihood binary black hole model (middle top), residuals between data and best-fit model (middle bottom), reconstructed waveforms from wavelet and binary black hole analyses (bottom)

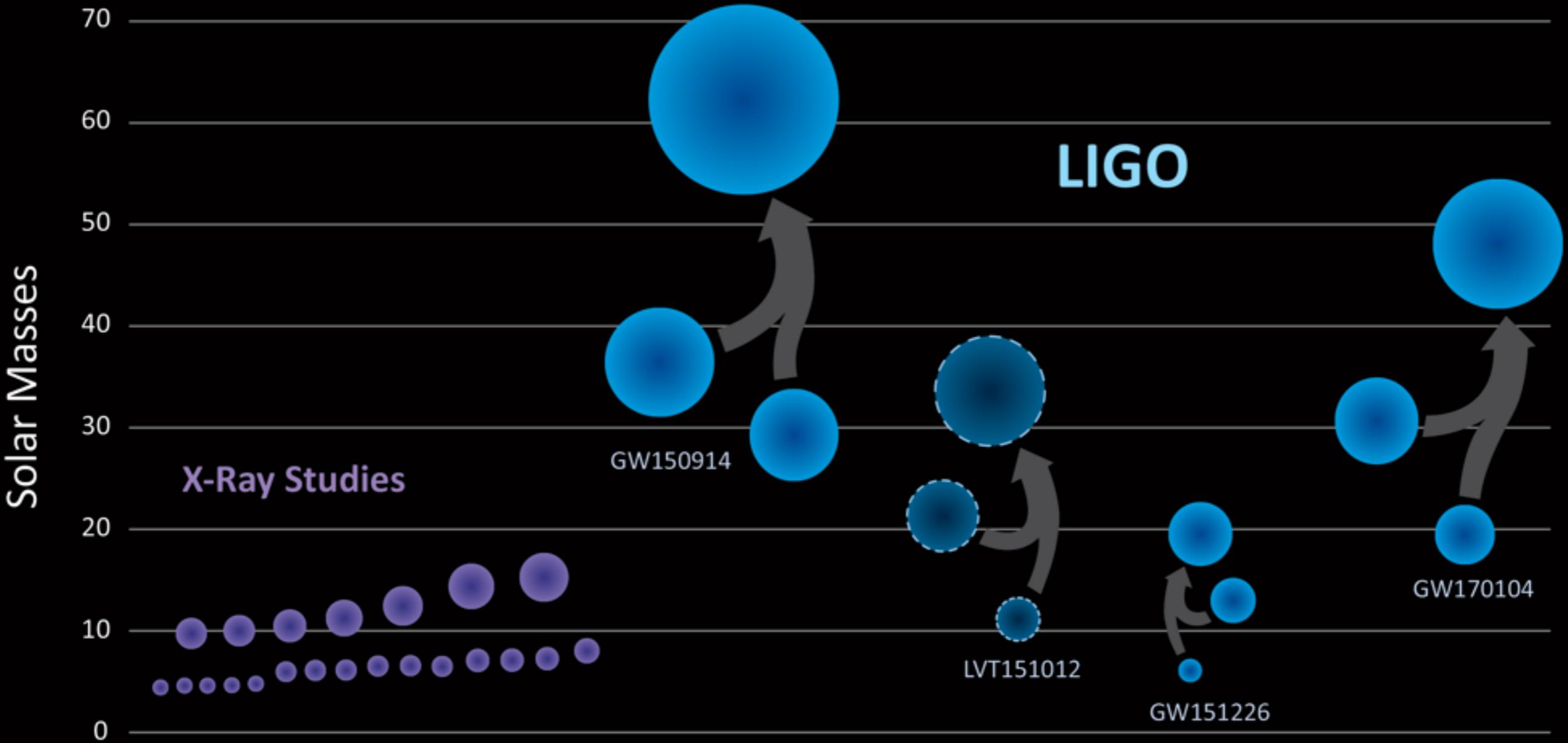
observed by	LIGO L1, H1	duration from 30 Hz	~ 0.25 to 0.31 s
source type	black hole (BH) binary	# of cycles from 30 Hz	~ 14 to 16
date	04 Jan 2017	signal arrival time delay	arrived at H1 3 ms before L1
time	10:11:58.6 UTC	credible region sky area	1200 sq. deg.
signal-to-noise ratio	13	peak GW strain	$\sim 5 \times 10^{-22}$
false alarm rate	< 1 in 70,000 years	peak displacement of interferometer arm	$\sim \pm 1$ am
probability of astrophysical origin	> 0.99997	frequency at peak GW strain	160 to 199 Hz
distance	1.6 to 4.3 billion light-years	wavelength at peak GW strain	1510 to 1880 km
redshift	0.10 to 0.25	peak GW luminosity	1.8 to 3.8×10^{56} erg s $^{-1}$
total mass	46 to 57 M $_{\odot}$	radiated GW energy	1.3 to 2.6 M $_{\odot}$
primary BH mass	25 to 40 M $_{\odot}$	remnant ringdown freq.	297 to 373 Hz
secondary BH mass	13 to 25 M $_{\odot}$	remnant damping time	2.5 to 3.2 ms
mass ratio	0.36 to 0.94	consistent with general relativity?	passes all tests performed
remnant BH mass	44 to 54 M $_{\odot}$	graviton mass combined bound	$\leq 7.7 \times 10^{-23}$ eV/c 2
remnant BH spin	0.39 to 0.7	evidence for dispersion of GWs	none
remnant size (effective radius)	123 to 150 km		
remnant area	1.9 to 2.8×10^5 km 2		
effective spin parameter	-0.42 to 0.09		
effective precession spin parameter	unconstrained		

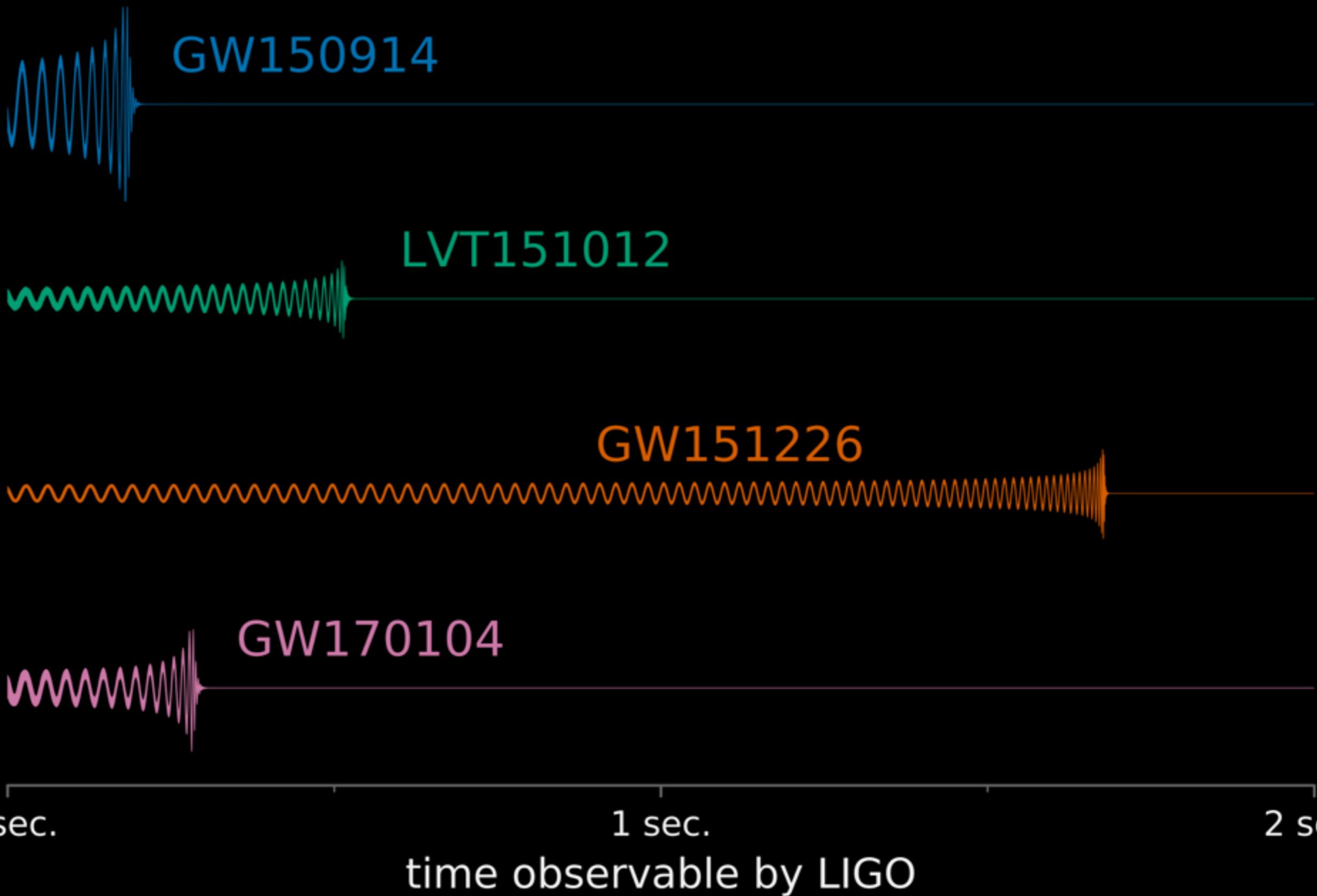
Parameter ranges correspond to 90% credible intervals.

Acronyms:

L1/H1=LIGO Livingston/Hanford, am=attometer= 10^{-18} m, M $_{\odot}$ =1 solar mass= 2×10^{30} kg

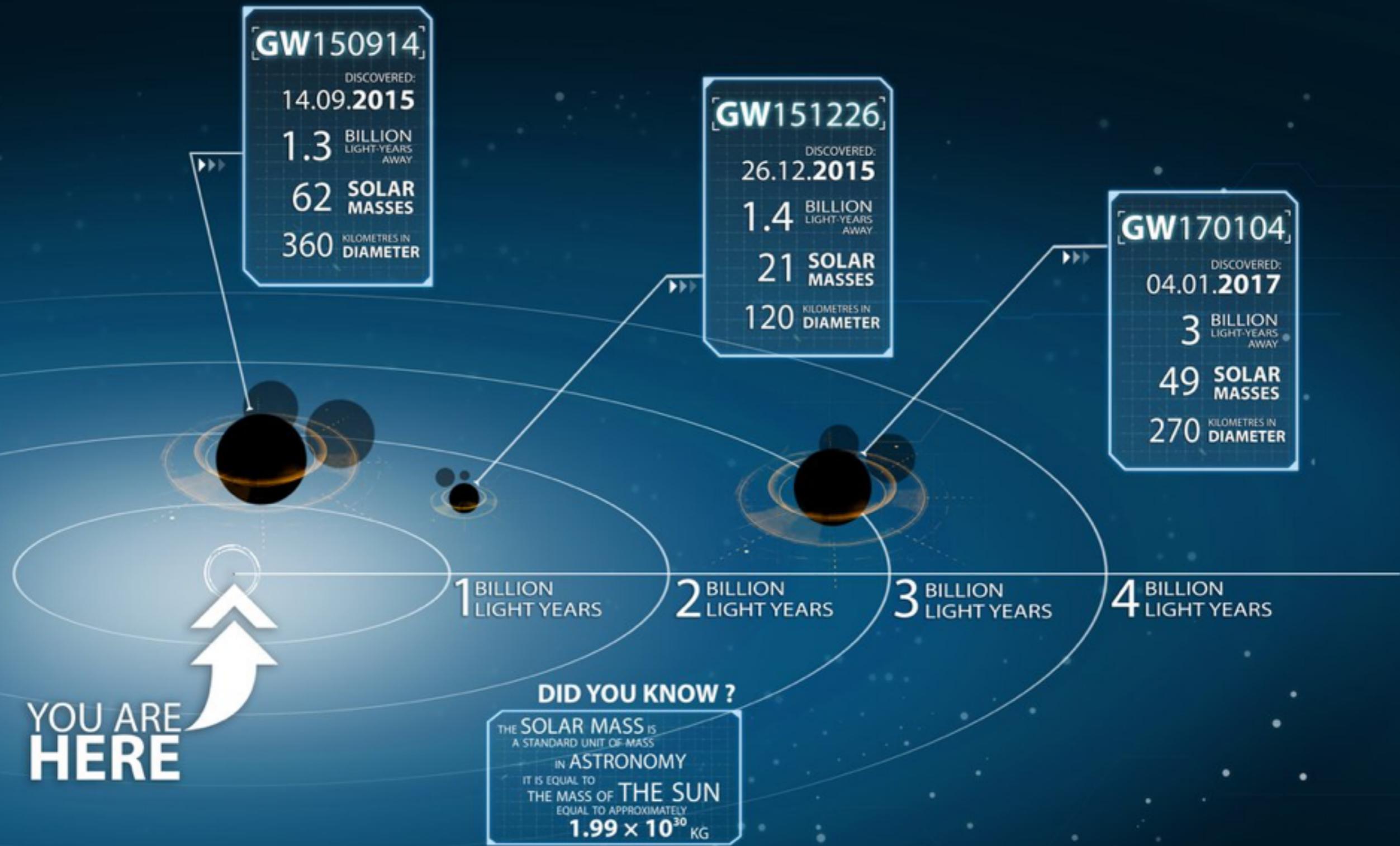
Black Holes of Known Mass

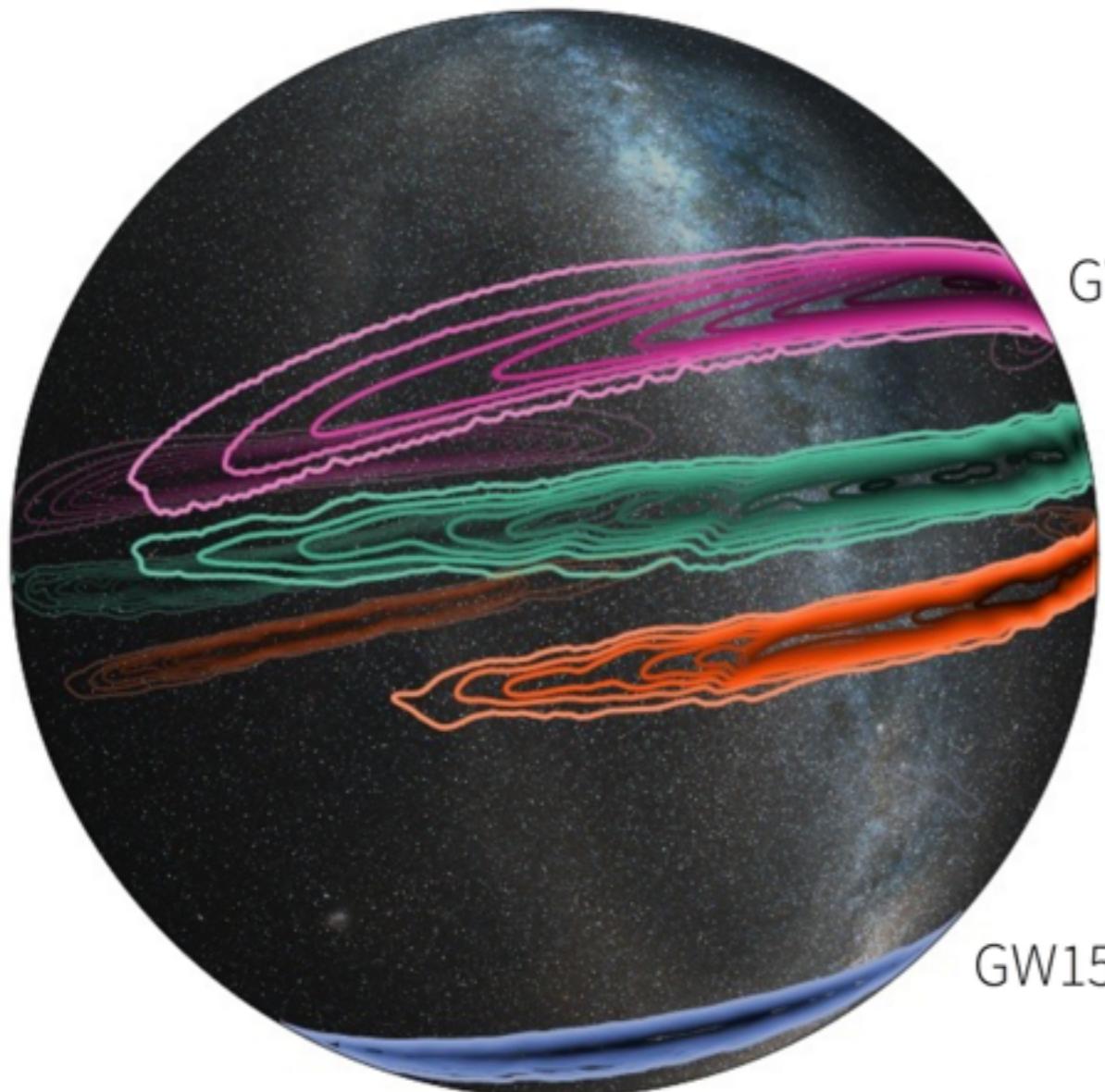




Comparison of gravitational-wave signal templates from recent LIGO observations. This figure shows reconstructions of the three confident and one candidate (LVT151012) gravitational wave signals detected by LIGO to date, including the most recent detection GW170104. Each row shows the signal arriving at the Hanford detector as a function of time. The thickness of the curves indicates the 90% confidence interval on the model parameters. Only the portion of each signal that LIGO was sensitive to is shown here (the final seconds leading up to the black hole merger). [Credit: LIGO/B. Farr (U. Chicago)] - See more at: <http://ligo.org/detections/GW170104.php#sthash.QTJlckcl.dpuf>

LIGO'S GRAVITATIONAL-WAVE DETECTIONS





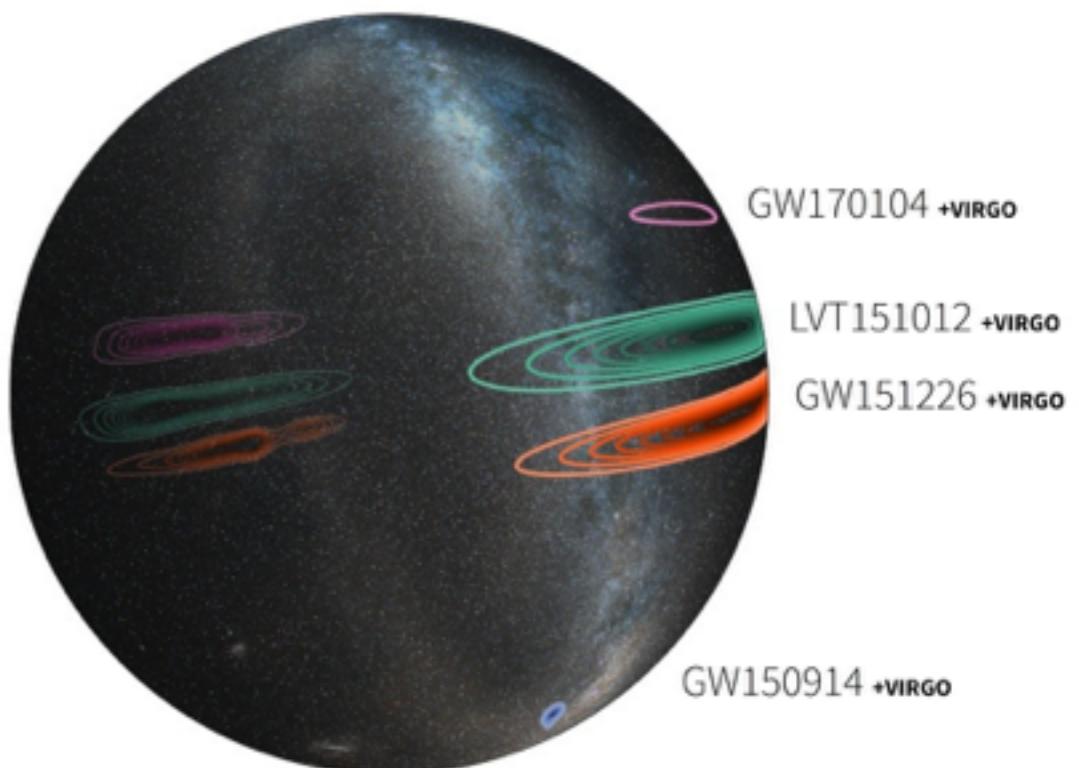
GW170104

LVT151012

GW151226

GW150914

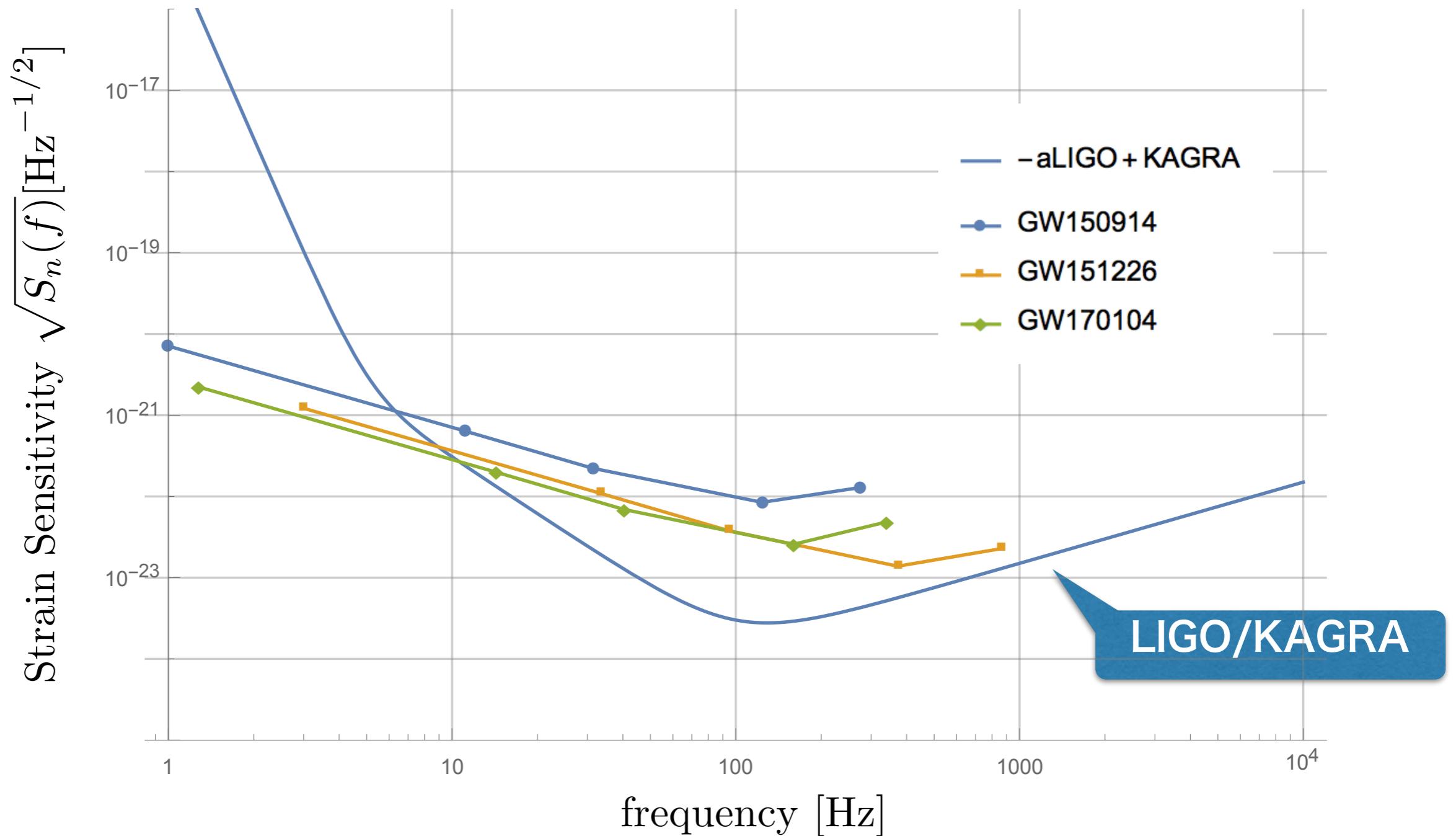
Sky Map of LIGO's Black-Hole Mergers. This three-dimensional projection of the Milky Way galaxy onto a transparent globe shows the probable locations of the three confirmed LIGO black-hole merger events—GW150914 (blue), GW151226 (orange), and the most recent detection GW170104 (magenta)—and a fourth possible detection, at lower significance (LVT151012, green). The outer contour for each represents the 90 percent confidence region; the innermost contour signifies the 10 percent confidence region. [Image credit: LIGO/Caltech/MIT/Leo Singer (Milky Way image: Axel Mellinger)] - See more at: <http://ligo.org/detections/GW170104.php#sthash.pwWdVLL4.dpuf>



Forecasting LIGO Detections in the Three-Detector Era. This map illustrates how the addition of the Virgo detector, scheduled to come online this summer, could improve the localization of sources of gravitational waves. The map shows the estimated locations of the four black-hole merger events detected by LIGO to date (including one event seen at lower significance), after including hypothetical Virgo data. Outer contours represent the 90 percent confidence region; innermost contours signify the 10 percent confidence region. [Image credit: LIGO/Caltech/MIT/Leo Singer (Milky Way image: Axel Mellinger)] - See more at: <http://ligo.org/detections/GW170104.php#sthash.NZPaW2LT.dpuf>

1. Gravitational Wave >> Expected Events

Observed BH-BH binary mergers



		M1+M2=Mf, Mdiff/Mtotal a_final	Mpc z	SNR	deg^2
GW150914	PRL116, 061102 (2016/2/11)	36.2+29.1=62.3+3.0 4.59% 0.68	410Mpc 0.09	24	600
LVT151012	(2016/2/11)	23+13=35+1.5 2.78% 0.66			
GW151226	PRL116, 241103 (2016/6/15)	14.2+7.5=20.8+0.9 4.15% 0.74	440Mpc 0.09	13	850
GW170104	PRL118, 221101 (2017/6/1)	31.2+19.4=48.7+1.9 3.75% 0.64	880Mpc 0.18	13	1300

<https://losc.ligo.org/events/GW150914/>

<https://losc.ligo.org/events/LVT151012/>

<https://losc.ligo.org/events/GW151226/>

<https://losc.ligo.org/events/GW170104/>

contents

1. 重力波とは

Einsteinが残した100年越しの宿題

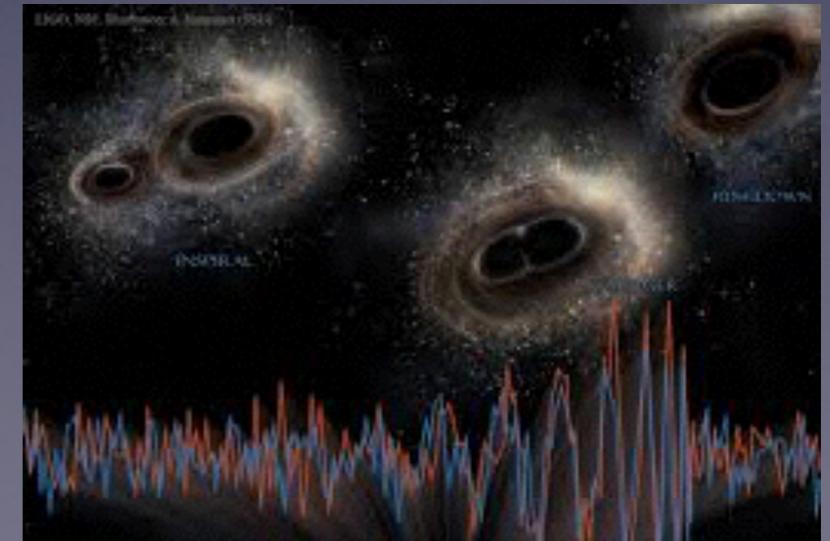
2. 直接観測された重力波

LIGOグループが発見した3つの重力波イベント

3. 将来の重力波観測

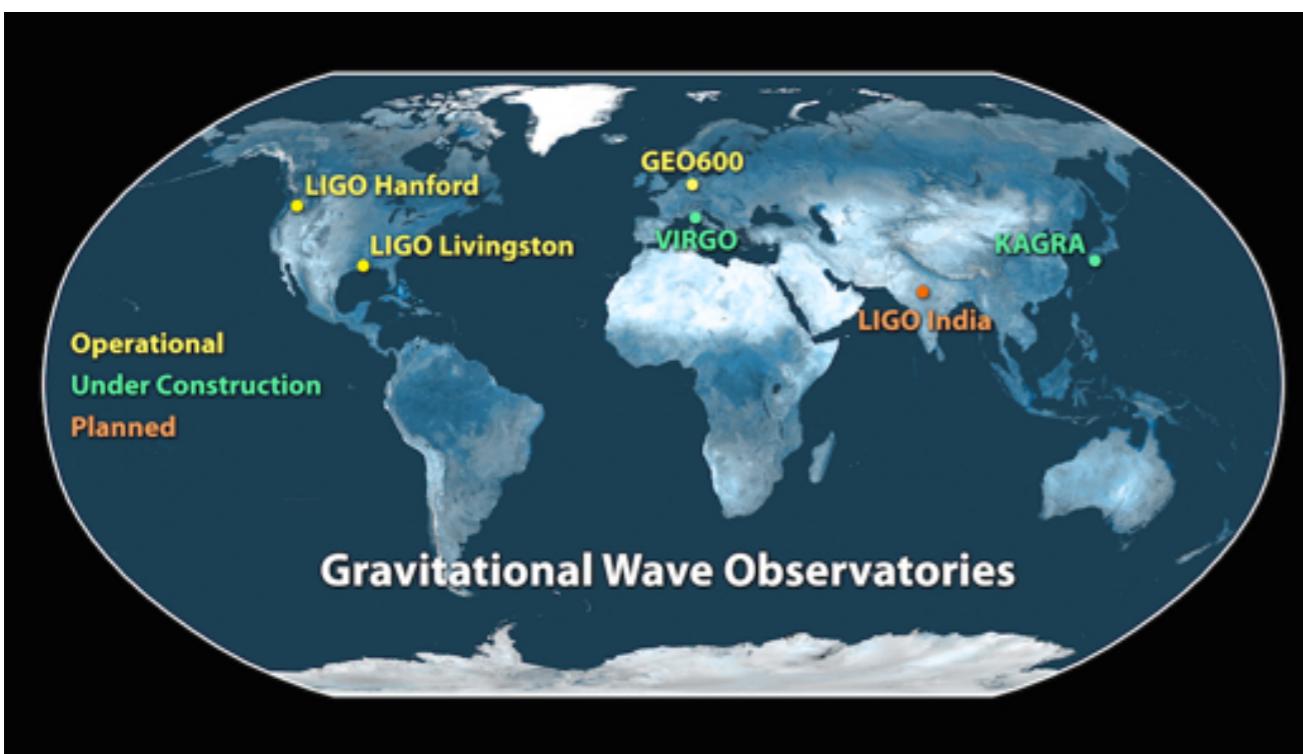
日本のKAGRA

宇宙空間での重力波観測

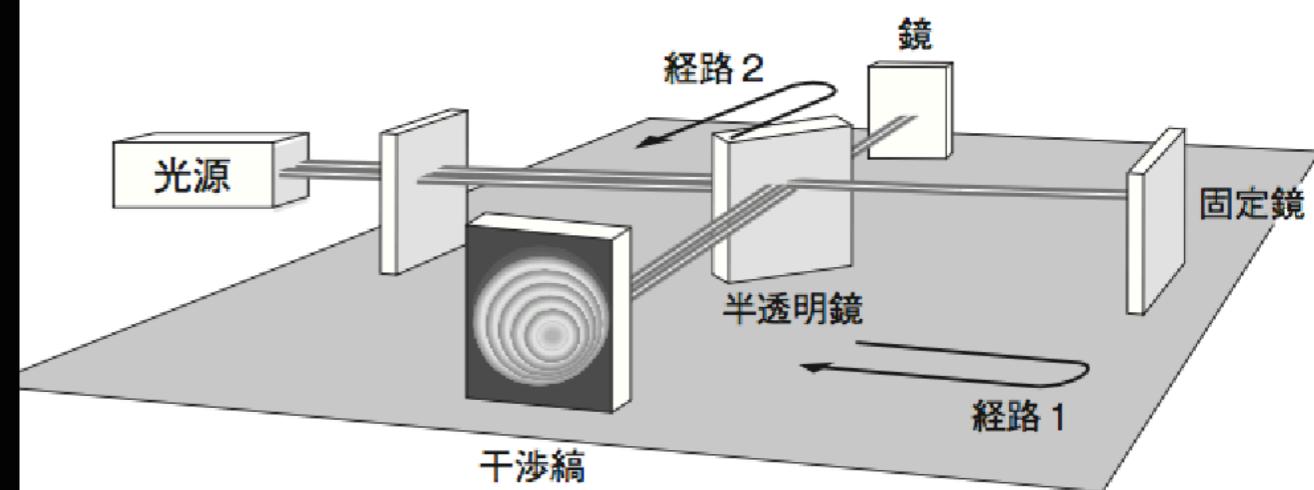


LIGO (ライゴ：レーザー干渉計重力波天文台)

Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory (1992年予算承認)



<https://mediaassets.caltech.edu/gwave>



KAGRA (かぐら：大型低温重力波望遠鏡)

Kamioka Gravitational wave detector, (Large-scale Cryogenic Gravitational wave Telescope)

大型低温重力波望遠鏡



望遠鏡の大きさ：基線長 3km

望遠鏡を神岡鉱山内に建設

鏡をマイナス250度 (20K) まで
冷却

熱雑音を小さくするため

鏡の材質としてサファイア
光学特性に優れ、低温に冷却すると熱伝導や機械的損失が少なくなる

天文学検定



受験のご案内



公式テキスト



天文学クイズ

[ホーム](#) > 2014年度 第4回天文学検定 解答速報

解答速報



2014年度 第4回天文学検定 解答速報

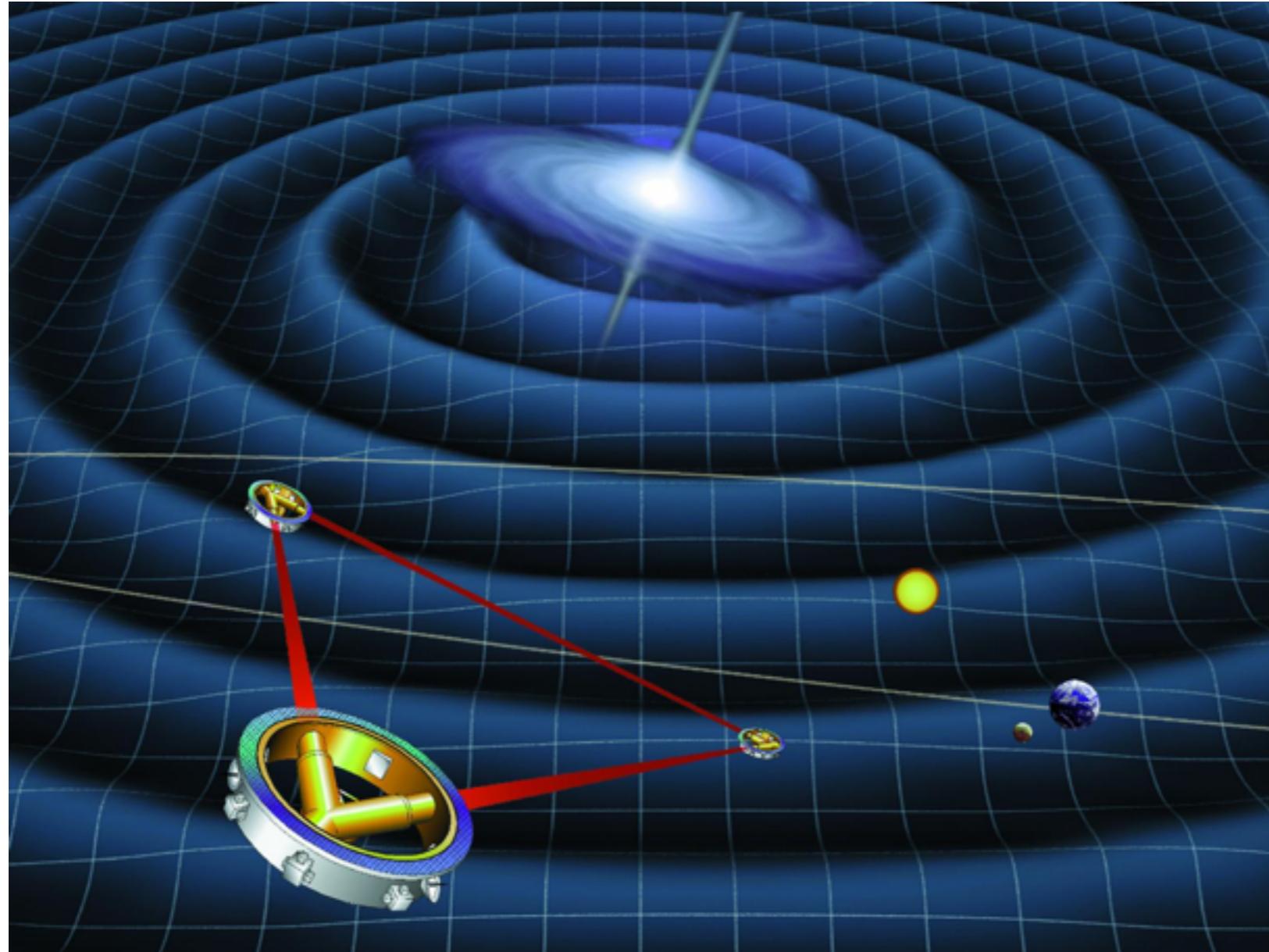
1級

問題と解答

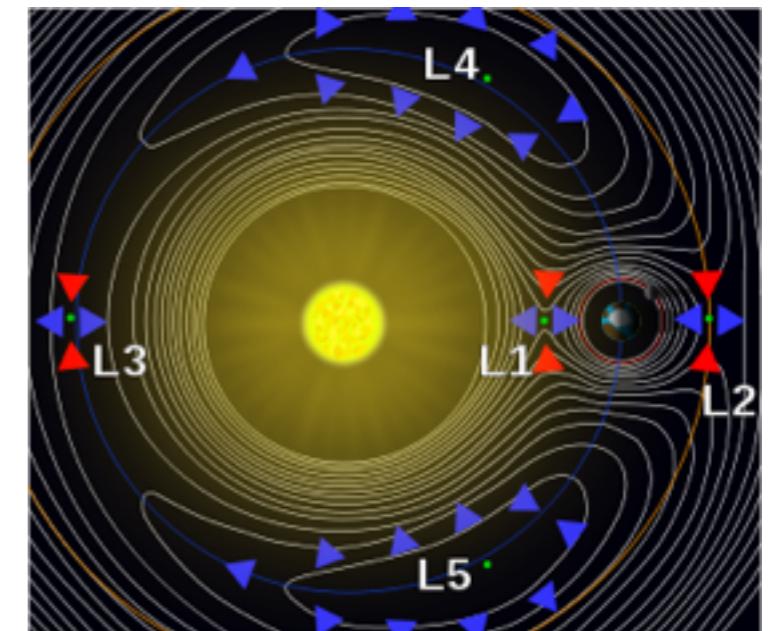
2014年6月、日本が岐阜県に建設している重力波干渉計KAGRA（かぐら）のトンネルが貫通し、マスコミに公開された。KAGRAは、一边が3kmもあるレーザー干渉計だが、岐阜県神岡鉱山跡の山中にわざわざ建設した理由は何か。

- ①近くにはスーパーカミオカンデというニュートリノ観測装置があり、実験装置の調整にニュートリノを使うから
- ②山の中だと地面の振動が少なく、干渉計装置のゆれを押さえることができるから
- ③山の中だと温度調整が少なくて済むので、レーザー光源のメンテナンスに都合がよいから
- ④強力なレーザー光の発生や、真空ポンプの稼働で、騒音が激しいから

Laser Interferometer Space Antenna



2034年に打ち上げ予定
250万kmの腕の長さ
地球の公転軌道のL4
低周波数帯 (mHzからHz帯)



重力波波形のデータ解析

SETI@home, Einstein@home の 日本版をつくりたい。

The screenshot shows the main page of the SETI@home website. At the top, the title "SETI@home" is displayed over a background image of a colorful nebula. Below the title is a navigation bar with links for "SETI HOME", "プロジェクト", "Science", "計算", and "コミュニティ". A sidebar on the left contains a section titled "What is SETI@home?" which describes the project as a scientific experiment based at UC Berkeley that uses Internet-connected computers to search for extraterrestrial intelligence. The text also mentions that participants can run a free program to analyze radio telescope data.

<http://setiathome.berkeley.edu>

The screenshot shows the main page of the Einstein@Home website. At the top, there is a logo for "einstein @ home" and a navigation menu with links for "HOME", "NEWS", "科学", "コミュニティ", and "ヘルプ". Below the menu, a large heading asks "Einstein@Home とは何ですか？". A text block explains that Einstein@Home is a program that uses your computer's idle time to search for gravitational waves from spinning isolated compact objects (among which are pulsars) using data from the LIGO gravitational wave detector. A link "Learn more" is provided at the end of the text.

<https://einsteinathome.org/ja/home>

The screenshot shows a news article titled "Home Computers Discover Gamma-ray Pulsars" from the Einstein@Home website. The article discusses how volunteers found four new pulsars using data from NASA's Fermi Gamma-ray Space Telescope. It highlights the combination of globally distributed computing power and innovative analysis methods. The text states that scientists from the Max Planck Institutes for Gravitational Physics and Radio Astronomy, along with international colleagues, discovered four gamma-ray pulsars using the Einstein@Home project. The discoveries include volunteers from Australia, Canada, France, Germany, Japan, and the USA. Below the text is a circular map of the sky showing the locations of the four discovered pulsars: PSR J0554+3107, PSR J1522-5735, PSR J1932+1926, and PSR J1422-6138. Each pulsar is represented by a small inset image with its name and a color-coded intensity map.

https://www.aei.mpg.de/972495/einsteinathome_gammapsrs2013

重力波天文学で何がわかる？

対応する天体の姿

→ 天体物理学

ブラックホールの存在する強い重力場

→ 一般相対性理論の検証

中性子星連星合体のふるまい

→ 原子核の状態方程式

イベント頻度・統計

→ 星形成モデル・銀河中心ブラックホール
宇宙論パラメータ

背景重力波の存在

→ 星形成モデル・宇宙初期モデル

重力波天文学で何がわかる？

とんでもないこと？ → 世の中、実は5次元。。。とか

第7章 高次元時空とタイムマシン



ブレーンワールド型 タイムマシン1

～膜宇宙に生じる近道～

ブレーンワールド（膜宇宙）モデルによれば、我々の住む4次元空間は高次元の中を漂う膜のようなものである。重力だけが高次元の中を伝わり、他の力や物質は膜に閉じ込められている。膜の上にいるものは、膜以外の世界を知る由もない。地球の表面に住むだけでは地球の丸みを感じることができないように、我々も4次元空間に閉じ込められているのである。

ランドールとサンドラムによって提案されたモデルのように、4次元の暗い並んでおらずに見えない暗いにブラックホールなどの強い重

考るのが自然だろう。

っている場合、重力の伝わる力は余剩次元を伝播できるかも速く2点間を結んで伝わるから重力が重力波として伝わる距離を光速で伝わって届いた重力波が伝わることも可能

を望遠鏡で見るよりも、重

バン宇宙モデルの問題点の1が解決できる可能性が指摘さ

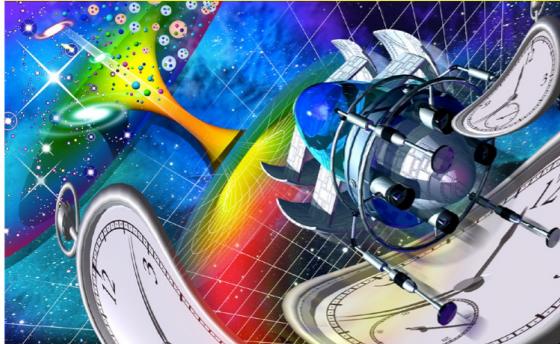
を通った重力波信号によって、

報が伝えられるかもしれない

絵と文章でわかりやすい！

図解雑学 タイムマシンと 時空の科学

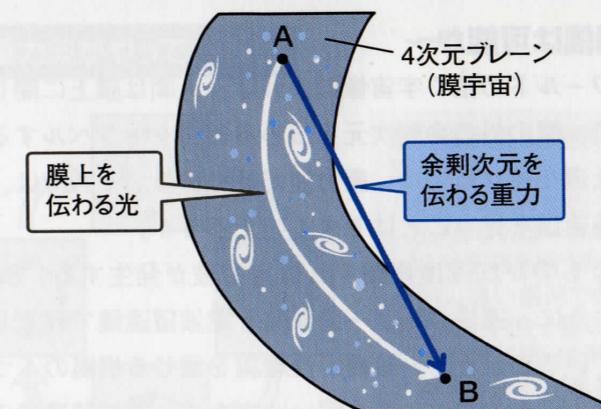
大阪工業大学准教授 真貝寿明著



タイムマシンに関する最新の物理学研究を紹介し、タイムトラベルの可能性と問題点をやさしく解説します。物理や宇宙の不思議な世界へご招待！

ナツメ社

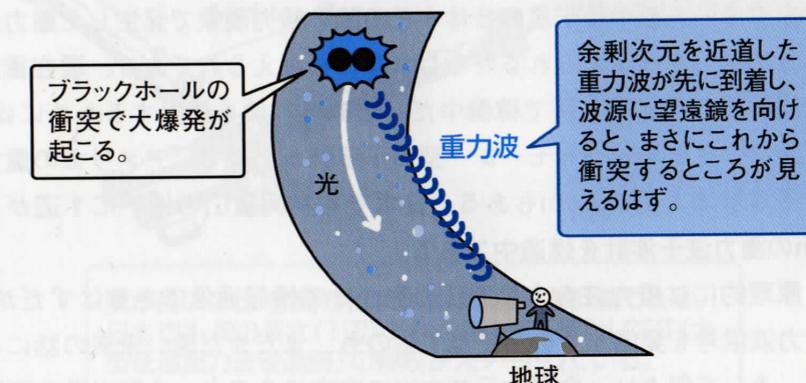
余剩次元を通って近道をする



重力は余剩次元を通ることで、膜上を通る光よりも速く伝わることができる。



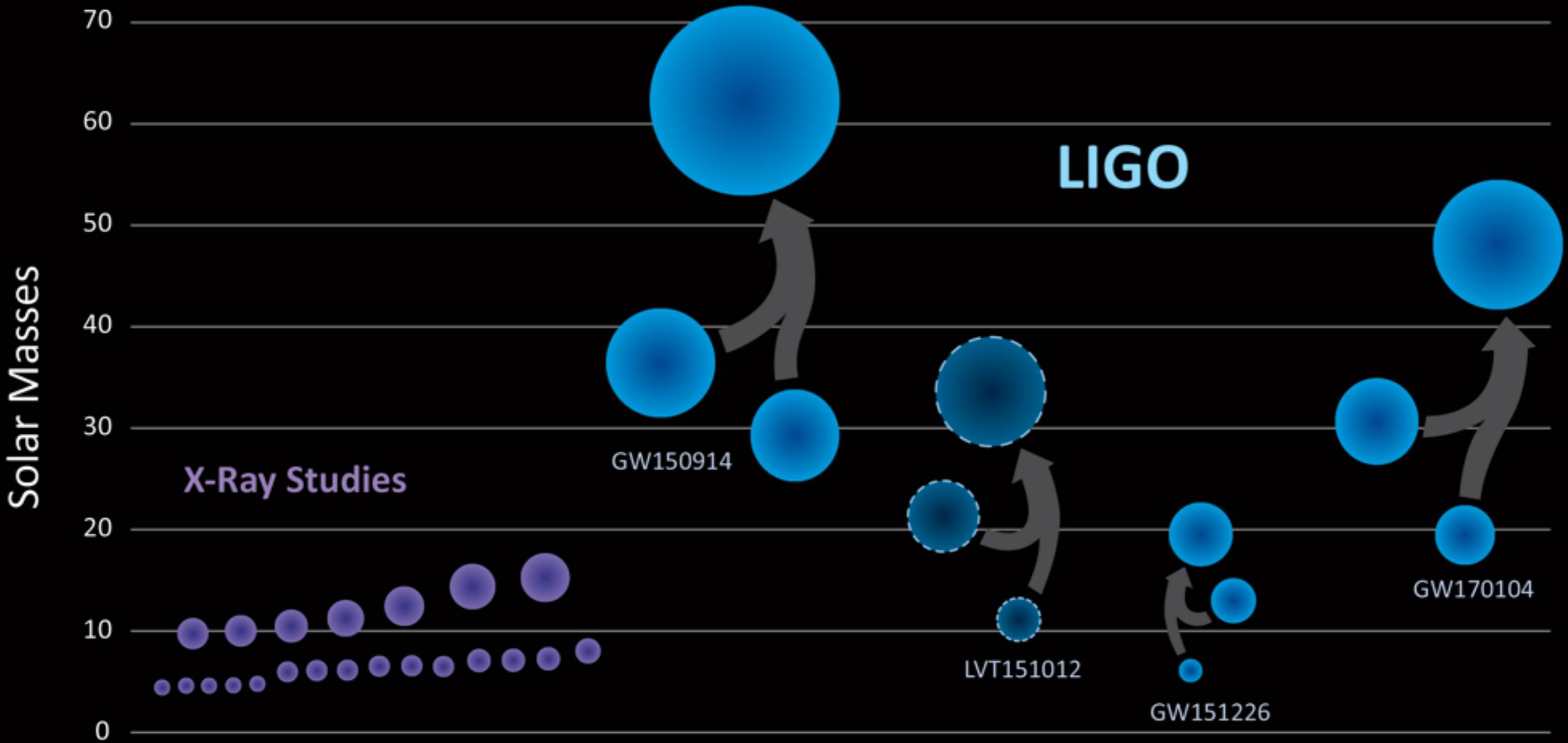
重力波信号を使えば、光速を超えた速度での情報伝達が可能になり、因果律を破って未来からの情報が伝えられる??



207

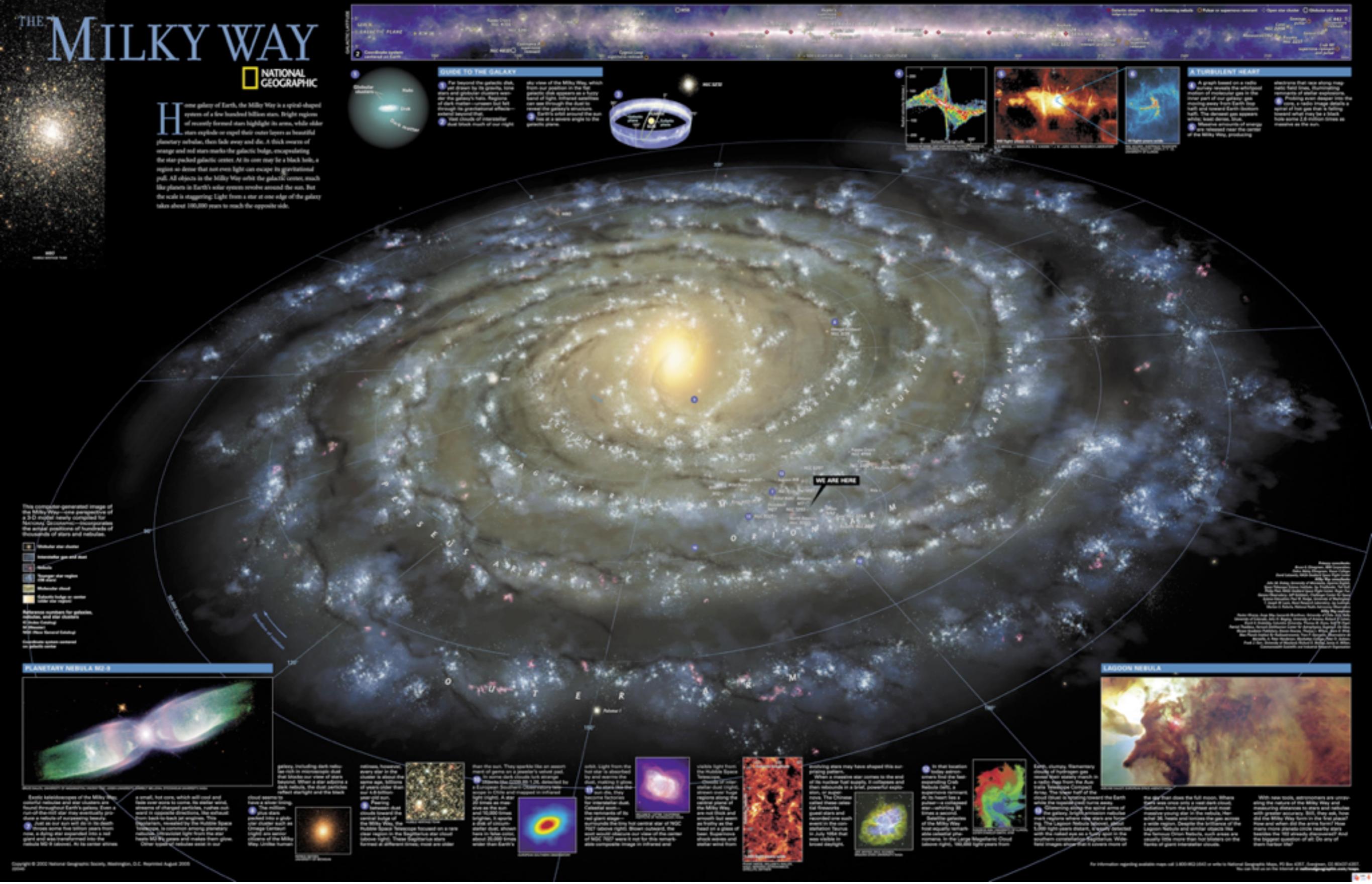
Black Holes of Known Mass

why not more?



天の川銀河 (our Galaxy)

THE MILKY WAY



<http://shop.nationalgeographic.com/ngs/product/maps/wall-maps/space-maps/the-milky-way-map%2C-laminated>

<http://ernstgraphics.wordpress.com/page/2/>

Model of SMBH (super-massive black-hole)

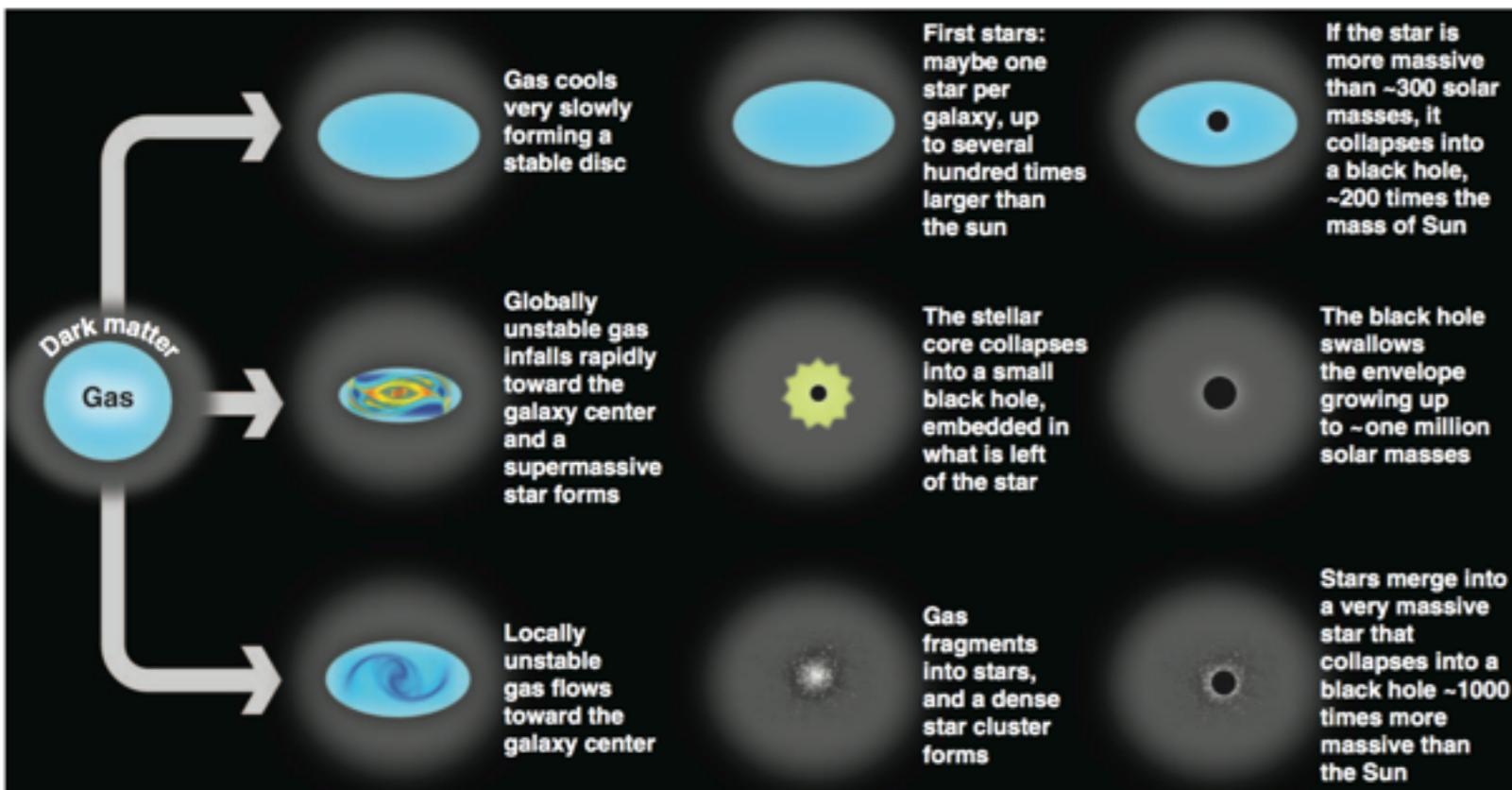


Fig. 1. Illustration showing three pathways to MBH formation that can occur in a distant galaxy (56). The starting point is a primeval galaxy, composed of a dark matter halo and a central condensation of gas. Most of this gas will eventually form stars and contribute to making galaxies as we know them. However, part of this gas has also gone into making a MBH, probably following one of these routes.

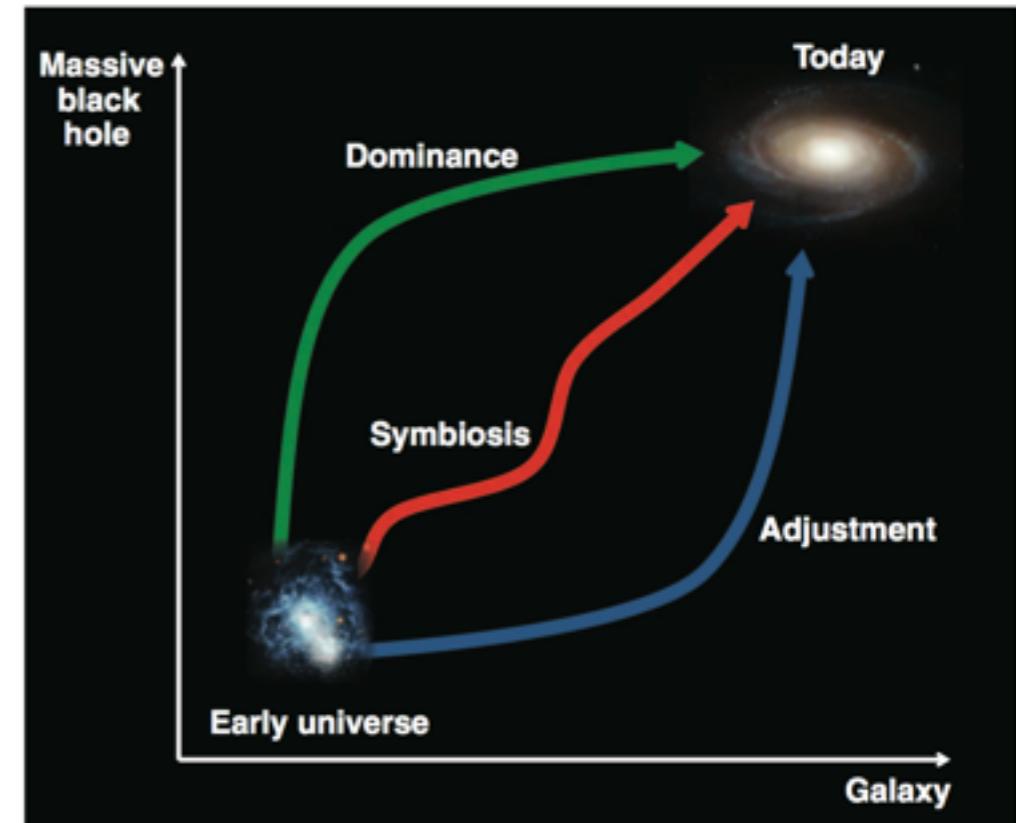


Fig. 3. Possible routes to MBH and galaxy coevolution, starting from black holes forming in distant galaxies in the early universe. [Image credits: NASA, European Space Agency (ESA), A. Aloisi (Space Telescope Science Institute and ESA, Baltimore, MD), and The Hubble Heritage Team (Space Telescope Science Institute/Association of Universities for Research in Astronomy)]

REVIEW

The Formation and Evolution of Massive Black Holes

M. Volonteri^{1,2}

The past 10 years have witnessed a change of perspective in the way astrophysicists think about massive black holes (MBHs), which are now considered to have a major role in the evolution of galaxies. This appreciation was driven by the realization that black holes of millions of solar masses and above reside in the center of most galaxies, including the Milky Way. MBHs also powered active galactic nuclei known to exist just a few hundred million years after the Big Bang. Here, I summarize the current ideas on the evolution of MBHs through cosmic history, from their formation about 13 billion years ago to their growth within their host galaxies.

Volonteri, Science 337 (2012) 544

現在進行中の研究（1） BH連星合体から銀河中心SMBHの形成シナリオを決める

- ★BH連星合体が繰り返されて、 SMBHが形成されると考える
- ★1つの銀河にいくつBH連星合体があるかを数える
- ★宇宙にいくつ銀河があるかを数える
- ★LIGOやKAGRAの検出器感度で、1年にいくつ観測できるのか予想する

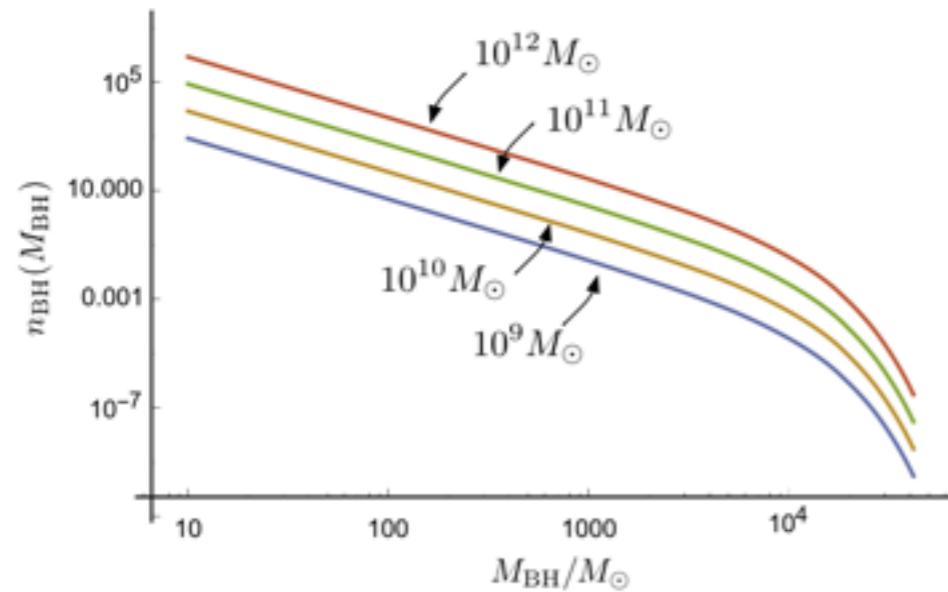


Figure 5. Number density of BHs per galaxy as a function of BH mass for different total mass of galaxies $M_{\text{galaxy}} = 10^9 M_{\odot}, \dots, 10^{12} M_{\odot}$.

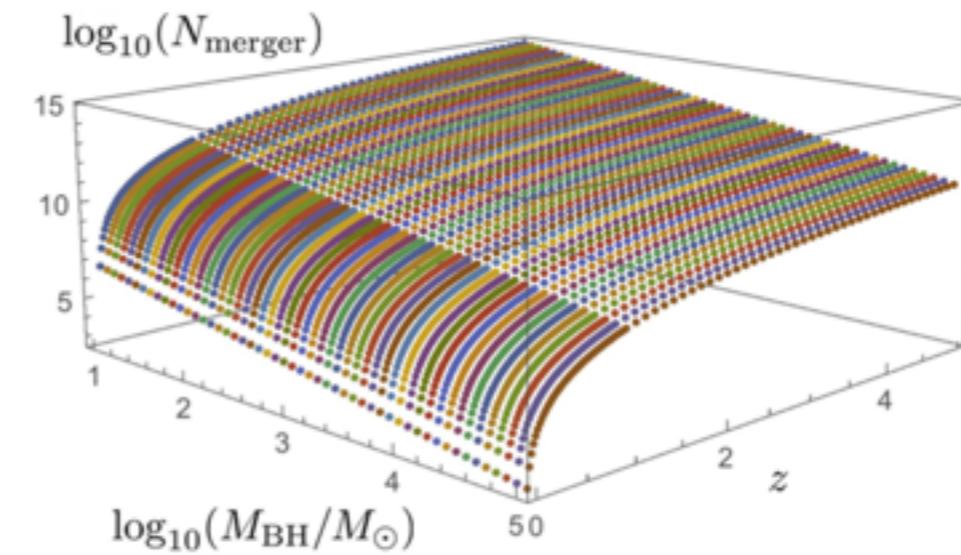


Figure 6. Cumulative distribution function of the number of BH mergers $N_{\text{merger}} (M_{\text{BH}})$ as a function of the redshift z . N_{merger} is expressed with binned one, of which we binned 20 for one order in M_{BH} .

Signal-to-Noise Ratio (SNR)

Let the true signal $h(t)$, the function of time, is detected as a signal, $s(t)$, which also includes the unknown noise, $n(t)$:

$$s(t) = h(t) + n(t). \quad (17)$$

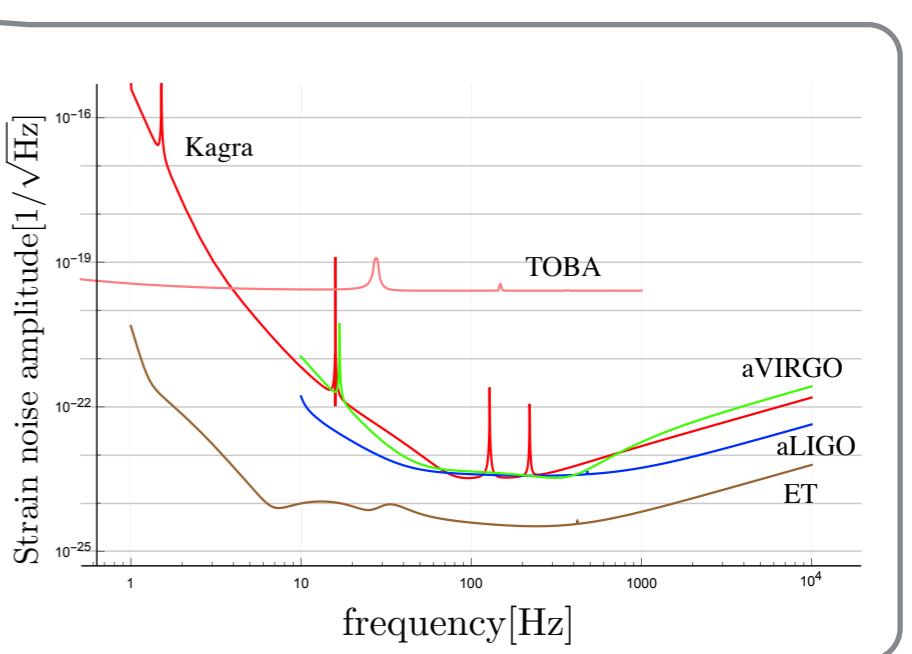
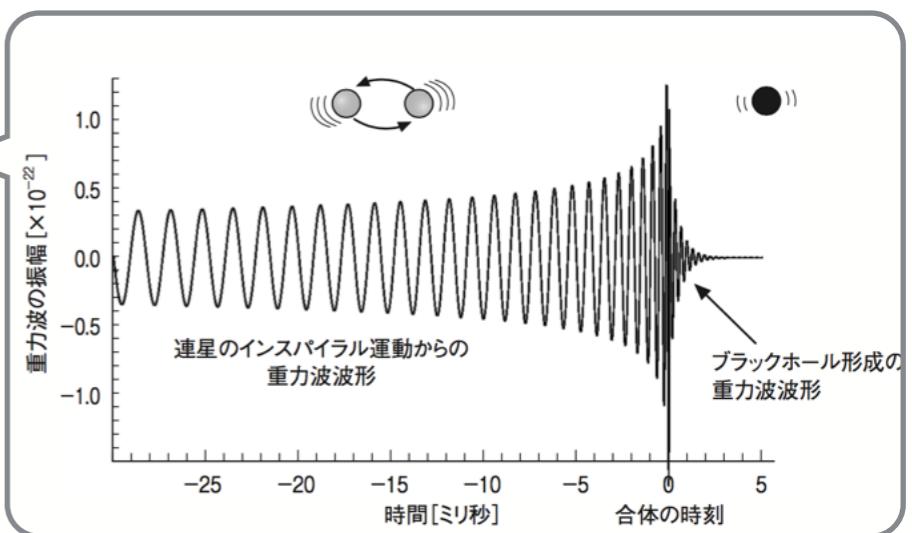
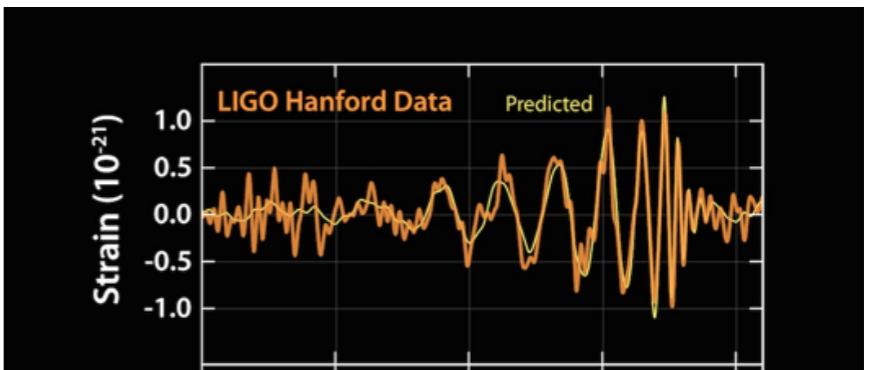
The standard procedure for the detection is judged by the optimal signal-to-noise ratio (SNR), ρ , which is given by

$$\rho = 2 \left[\int_0^\infty \frac{\tilde{h}(f) \tilde{h}^*(f)}{S_n(f)} df \right]^{1/2}, \quad (18)$$

where $\tilde{h}(f)$ is the Fourier-transformed quantity of the wave,

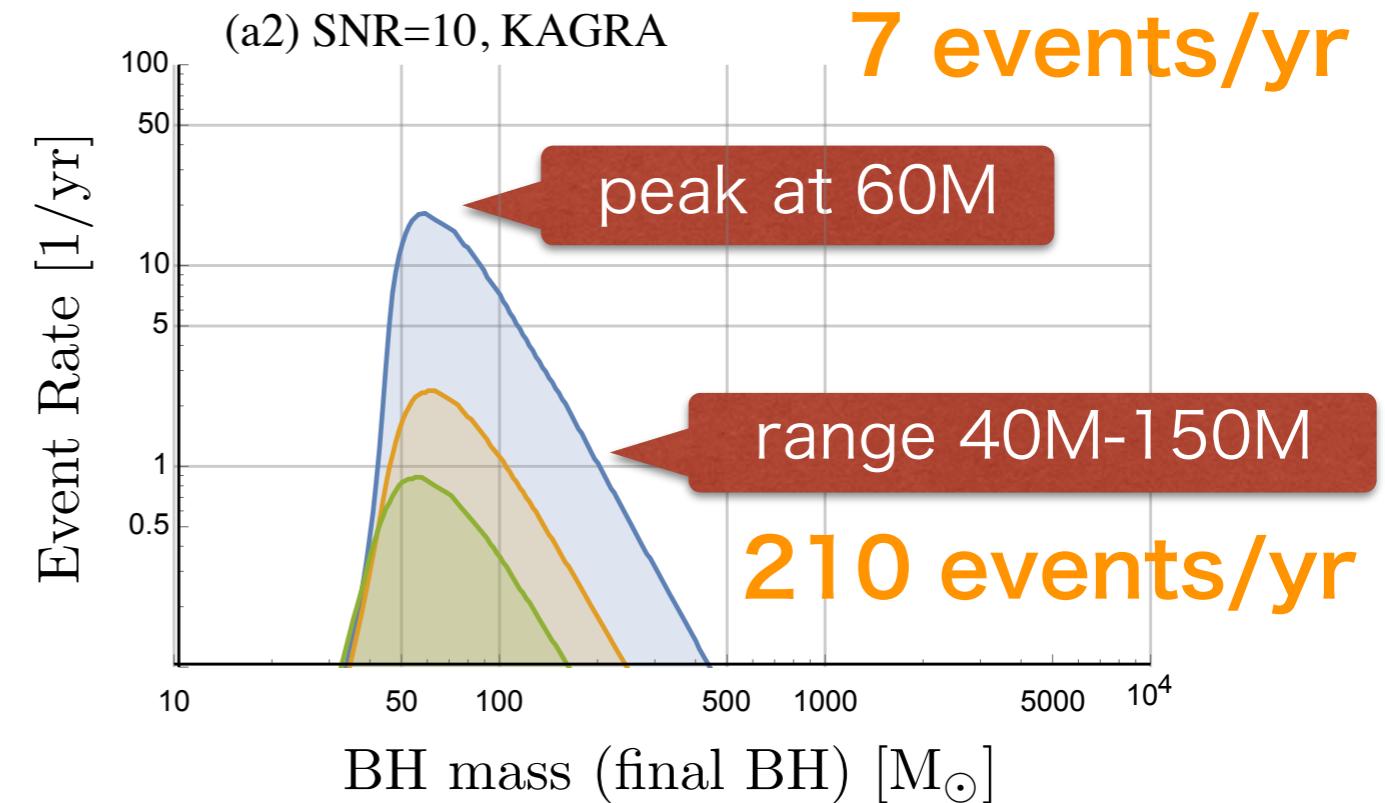
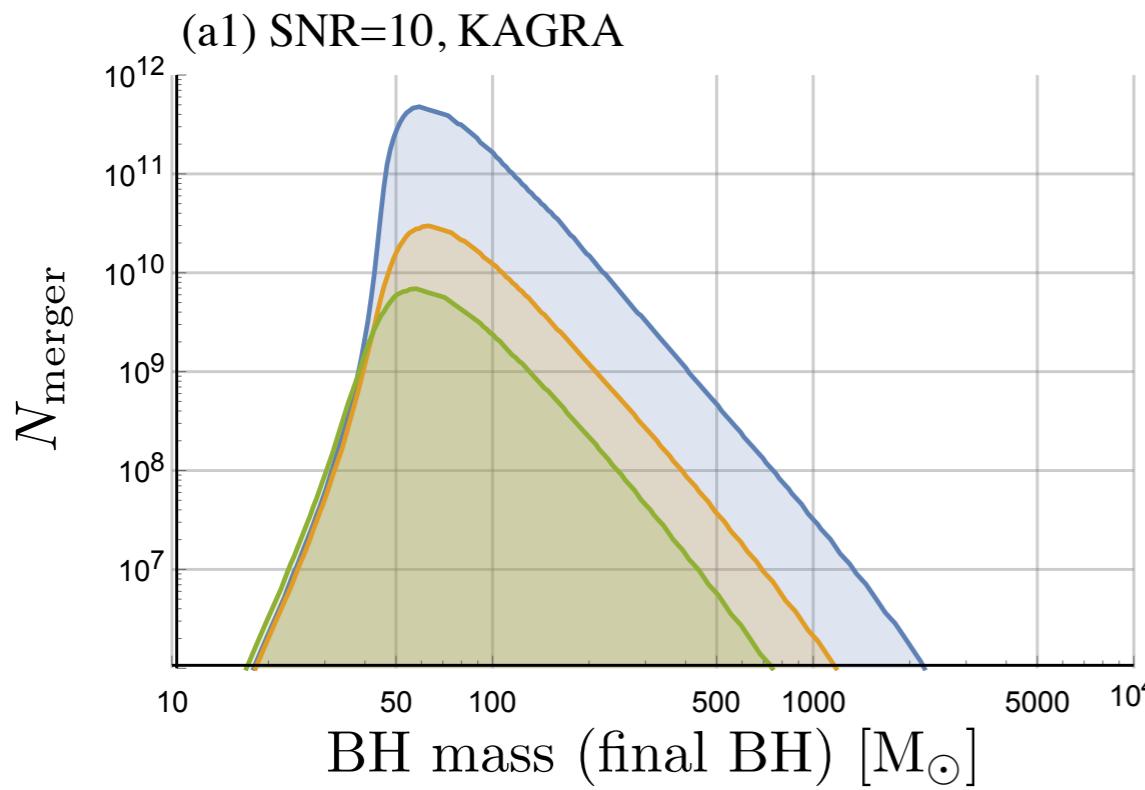
$$\tilde{h}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{2\pi i f t} h(t) dt, \quad (19)$$

and $S_n(f)$ the (one-sided) power spectral density of strain noise of the detector, as we showed in Fig. 1.



現在進行中の研究（1） BH連星合体から銀河中心SMBHの形成シナリオを決める

- ★BH連星合体が繰り返されて、 SMBHが形成されると考える
- ★1つの銀河にいくつBH連星合体があるかを数える
- ★宇宙にいくつ銀河があるかを数える
- ★LIGOやKAGRAの検出器感度で、 1年にいくつ観測できるのか予想する



THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 835:276 (8pp), 2017 February 1

© 2017. The American Astronomical Society. All rights reserved.

doi:10.3847/1538-4357/835/2/276

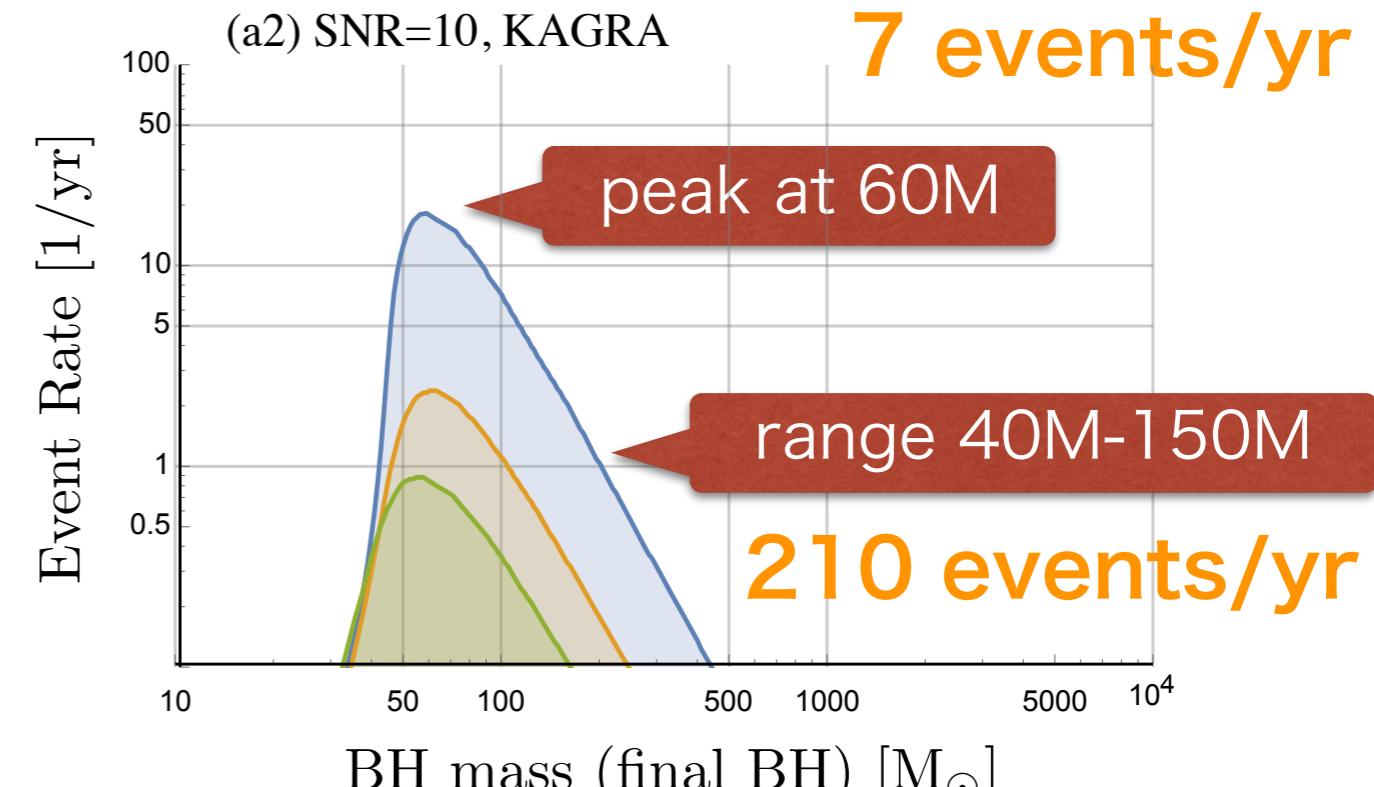


Gravitational Waves from Merging Intermediate-mass Black Holes. II. Event Rates at Ground-based Detectors

Hisao Shinkai¹, Nobuyuki Kanda², and Toshikazu Ebisuzaki³

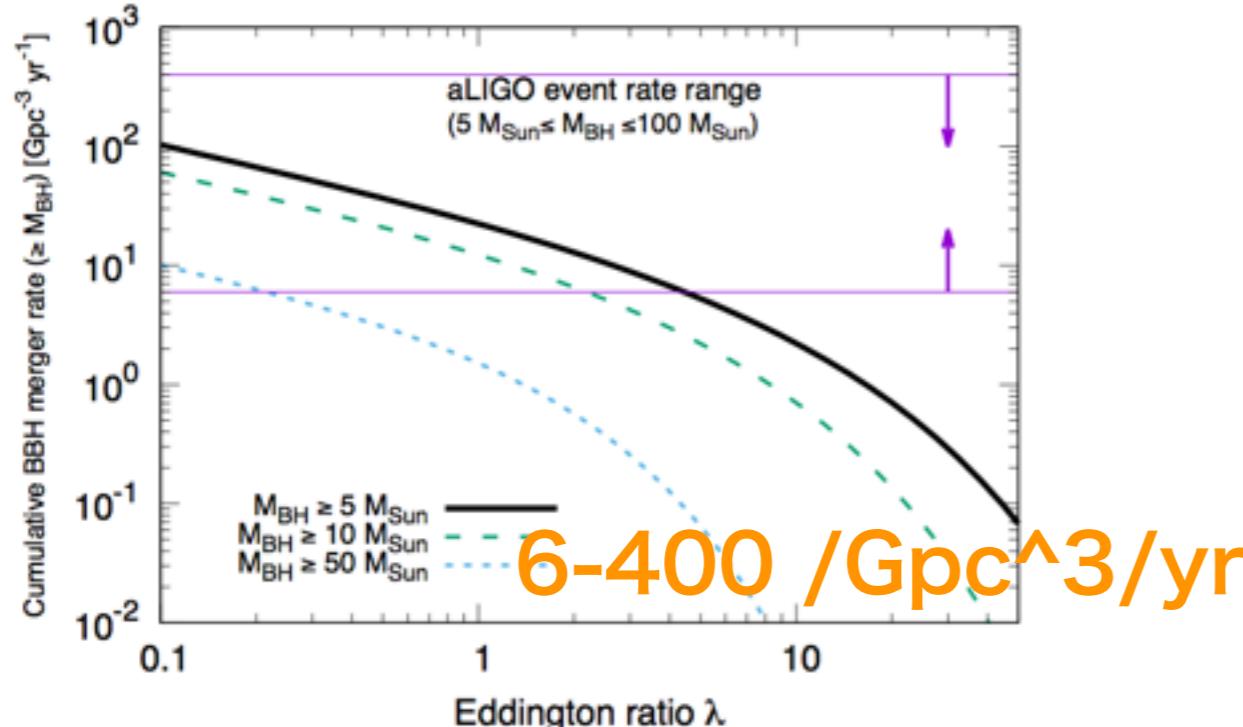
Event Rates at bKAGRA/aLIGO

Mass distribution	PyCBC	GstLAL	$R/(Gpc^{-3} yr^{-1})$	Combined
Event based				
GW150914	$3.2^{+8.3}_{-2.7}$	$3.6^{+9.1}_{-3.0}$	$3.4^{+8.8}_{-2.8}$	
LVT151012	$9.2^{+30.3}_{-8.5}$	$9.2^{+31.4}_{-8.5}$	$9.1^{+31.0}_{-8.5}$	
GW151226	35^{+92}_{-29}	37^{+94}_{-31}	36^{+95}_{-30}	
All	53^{+100}_{-40}	56^{+105}_{-42}	55^{+103}_{-41}	
Astrophysical				
Flat in log mass	31^{+43}_{-21}	29^{+43}_{-21}	31^{+42}_{-21}	
Power law (-2.35)	100^{+136}_{-69}	94^{+137}_{-66}	97^{+135}_{-67}	

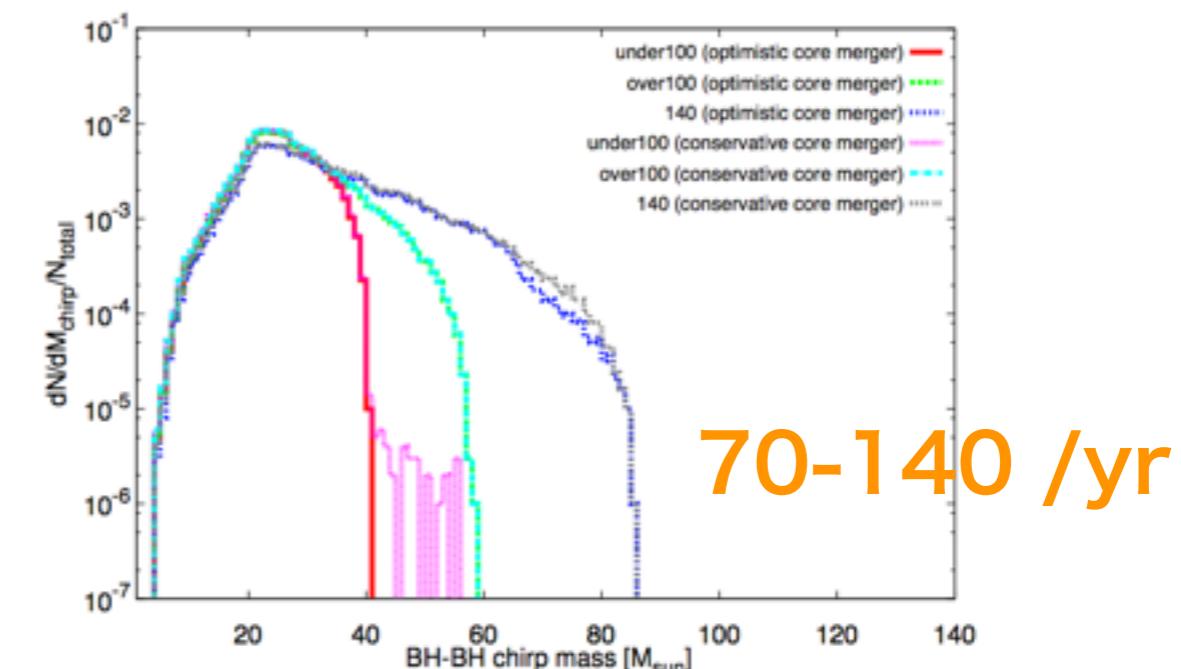


LIGO group PRX6(2016)041015

Inoue+ MNRAS461(2016)4329



Kinugawa+ MNRAS456(2015)1093

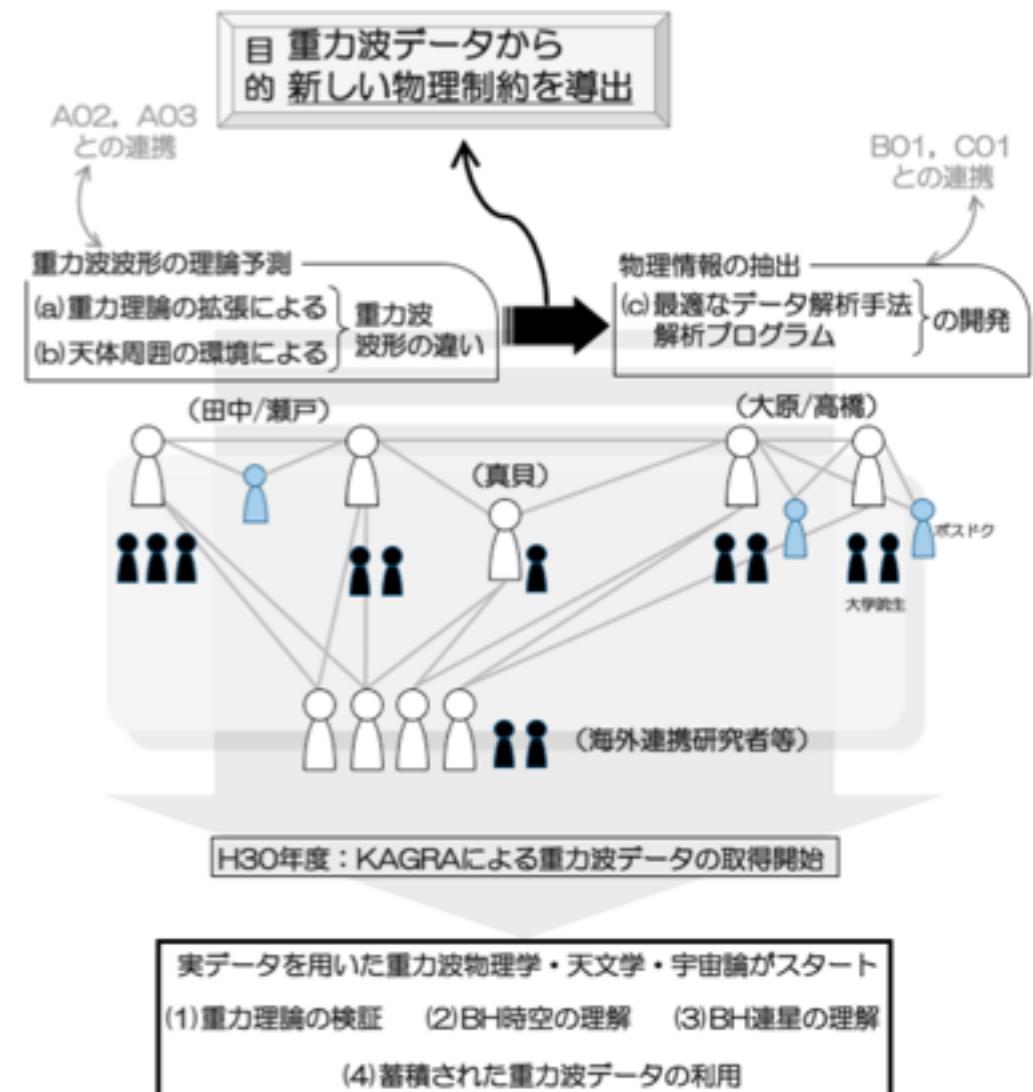
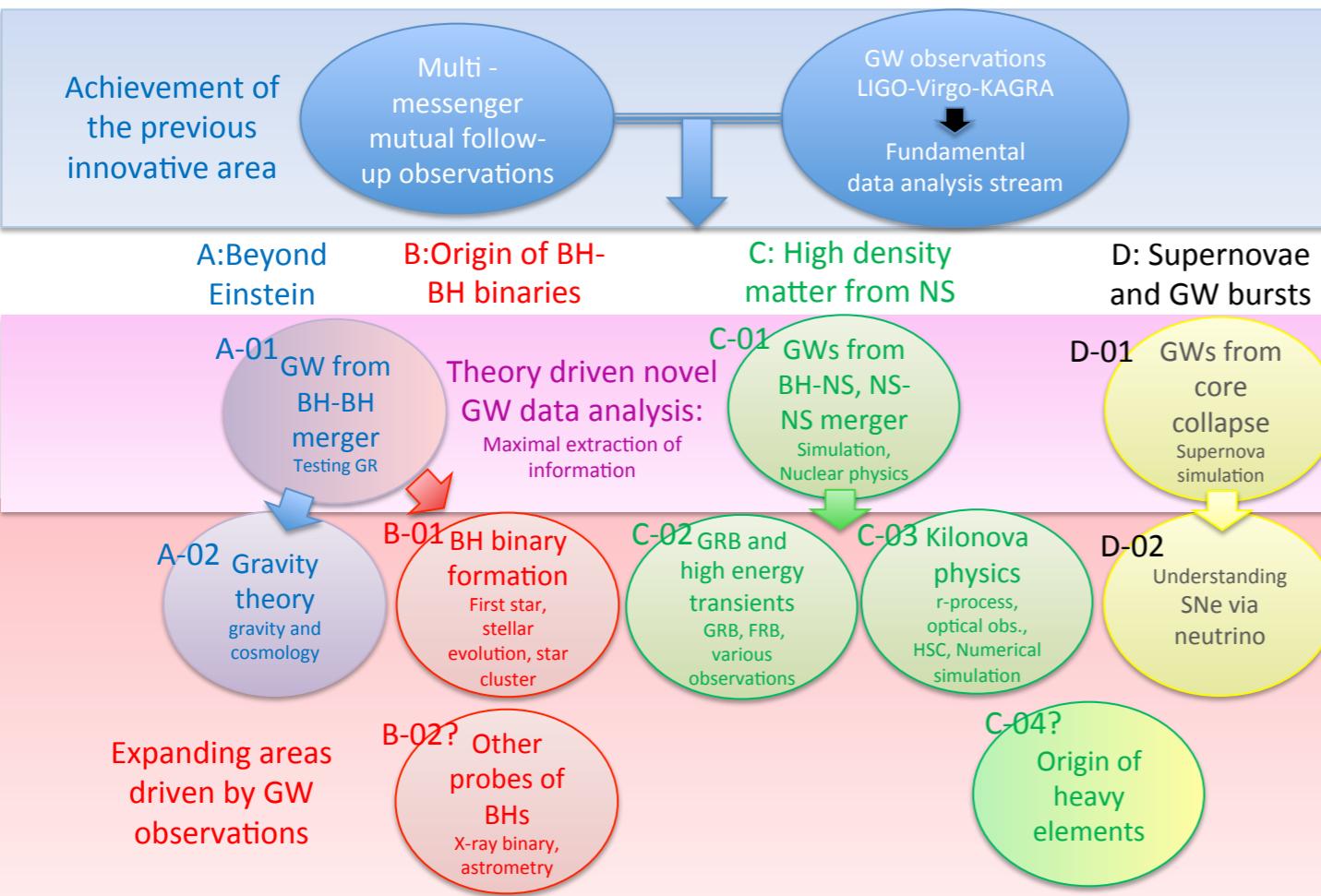


現在進行中の研究 (2)

重力波観測から一般相対性理論を検証する

2018年度 新学術「重力波創世記」(A01研究分担)採択

Gravitational wave physics/astronomy : Genesis



KAGRA観測開始: 天文学と物理学の融合研究

- A01 重力理論の検証
- A02 重力理論と宇宙論
- B01 ブラックホール連星の進化
- C01 中性子星連星の進化
- C02 重力波源天体の高エネルギー放射観測
- C03 重力波源天体の光赤外線観測
- D01 超新星爆発と重力波
- D02 超新星爆発のニュートリノ観測

H29年度

理論・解析手法の開発

重力波データ解析コードの開発

- (a) 重力理論の拡張による重力波波形の違い
- (b) 天体周囲環境による重力波波形の違い
- (c) それぞれの効果に対する最適な解析手法の検討

H30年度

KAGRAによる重力波データの取得開始

- (d) KAGALIの基本設計
- 応用アプリケーションの開発
- (e) 実装試験のための並列計算機環境の構築
- 実データを用いた重力波物理学・天文学・宇宙論がスタート
- (1) 重力理論の検証
- (2) BH時空の理解
- (3) BH連星の理解
- (4) 蓄積された重力波データの利用
- (5) 計算機環境の維持・データストレージの管理

H31年度
以降

現在進行中の研究 (2) 重力波観測から一般相対性理論を検証する

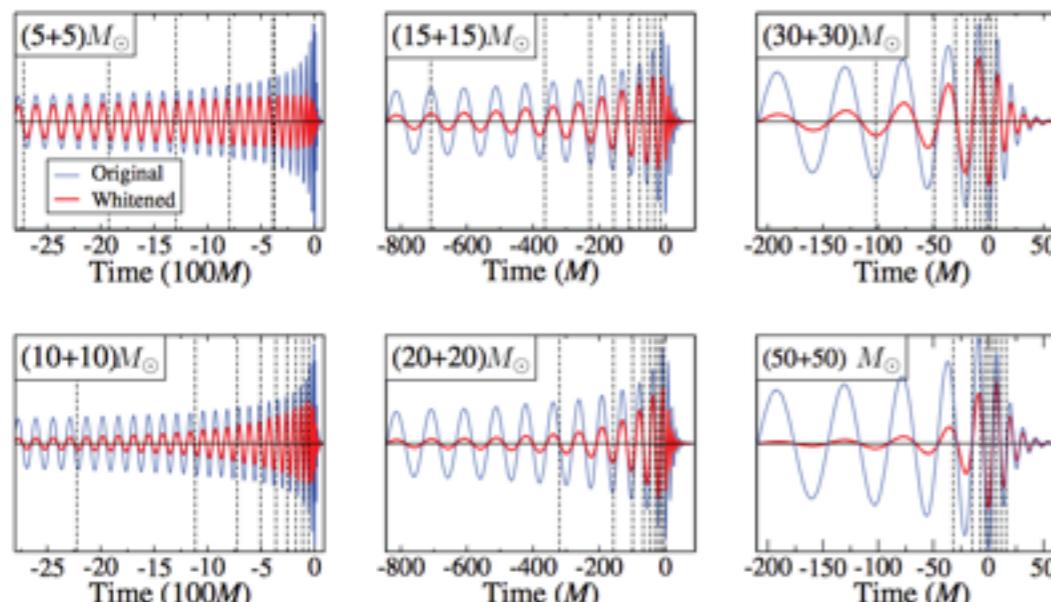
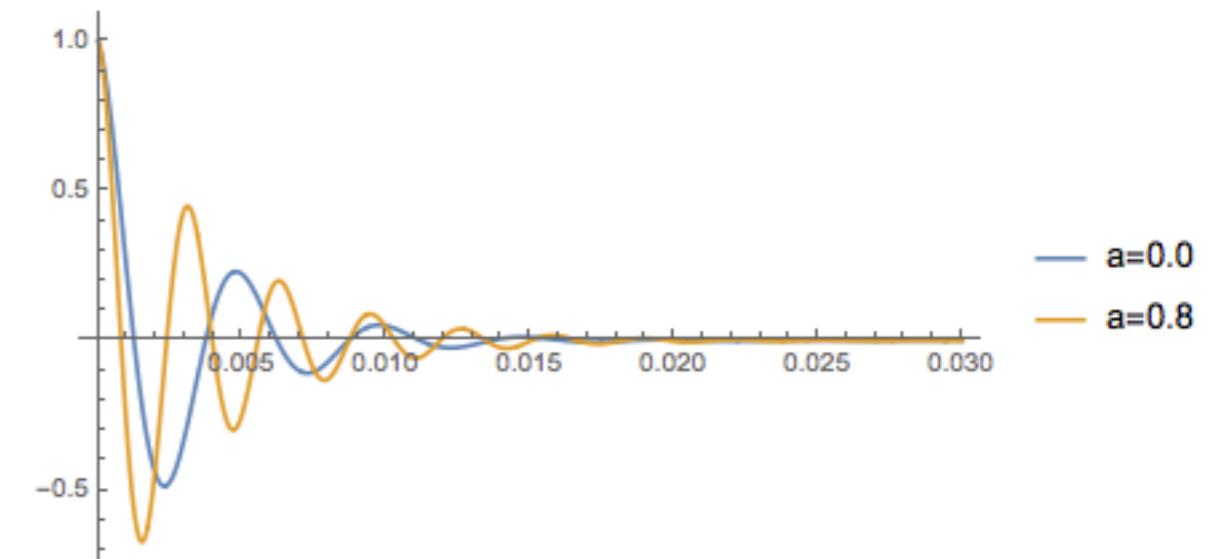
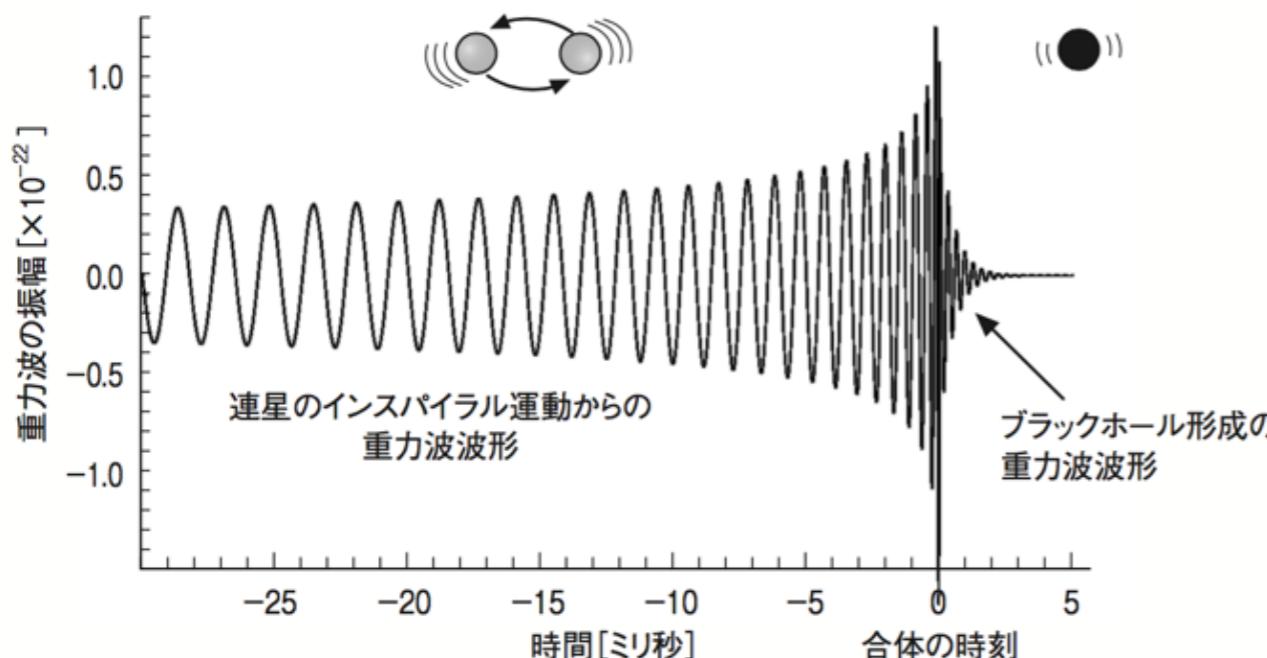


FIG. 4 (color online). Distribution of GW signal power. In each panel, we plot a hybrid waveform (a Tpn waveform stitched to the Goddard waveform) in both its original form (blue, lighter curve) and its whitened form (red, darker curve) [40]. We show waveforms from six binary systems with total masses $10M_{\odot}$, $20M_{\odot}$, $30M_{\odot}$, $40M_{\odot}$, $60M_{\odot}$, and $100M_{\odot}$. The vertical lines divide the waveforms into segments, where each segment contributes 10% of the total signal power.

重力波波形のテンプレート (TaylorF2)
Pan+, PRD77 (08) 024014

- ★ BH形成におけるリングダウン波形から、周波数と減衰率、モードの重なり率を得る
- ★ BHの質量M、回転パラメータaのほかに、理論の整合性を調べる

PHYSICAL REVIEW D

VOLUME 56, NUMBER 2

15 JULY 1997

Gravitational waves in Brans-Dicke theory: Analysis by test particles around a Kerr black hole

Motoyuki Saito*

Department of Physics, Waseda University, Shinjuku-ku, Tokyo 169, Japan

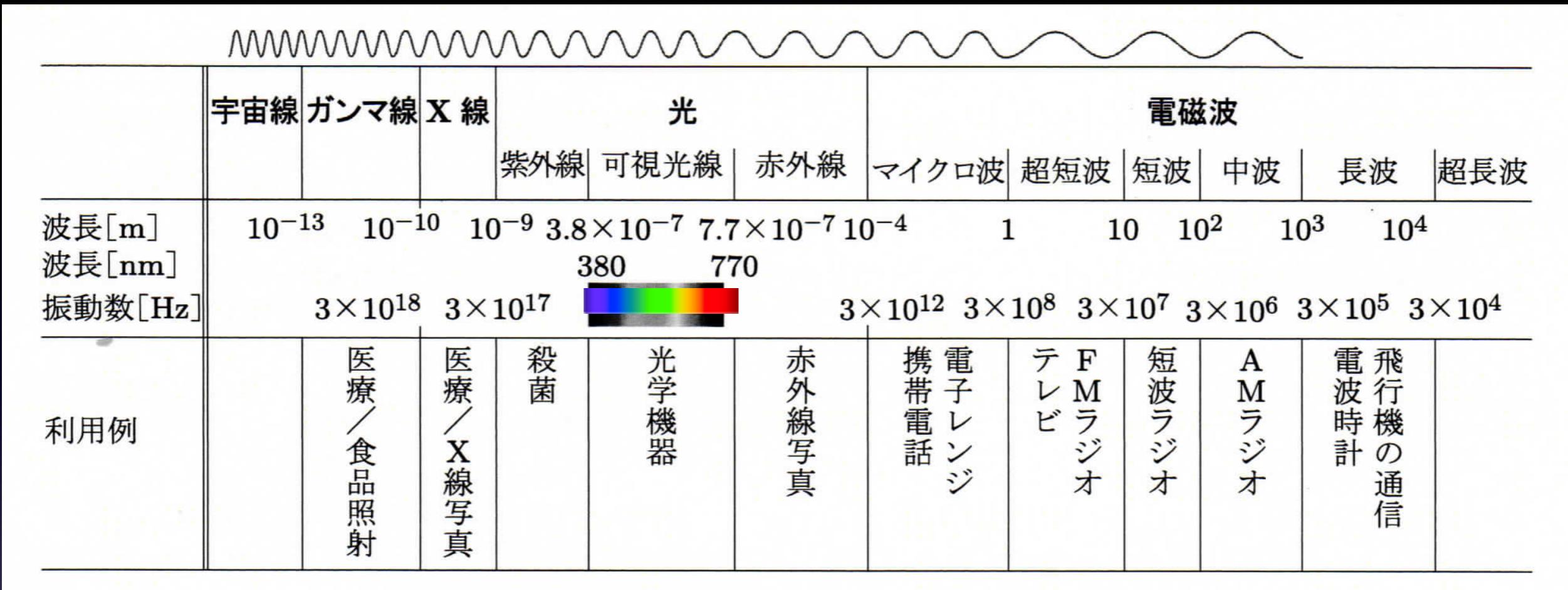
Hisa-aki Shinkai†

Department of Physics, Washington University, St. Louis, Missouri 63130-4899

Kei-ichi Maeda‡

Department of Physics, Waseda University, Shinjuku-ku, Tokyo 169, Japan

(Received 18 December 1996)



ガンマ線 可視光 電波
X線 赤外 重力波

「重力波天文学」をよろしくお願いします。