

相対性理論

アインシュタインはどこまで正しいのか

1. 序論

2. 特殊相対性理論

時間の進み方は観測者によって異なる

$E=mc^2$, 原子核反応, 星の一生

干渉計

GPS

3. 一般相対性理論

時間の進み方は重力によって異なる

ブラックホール, 重力波

光格子時計

真貝寿明（しんかい ひさあき）

大阪工業大学 情報科学部 教授

武庫川女子大学 非常勤講師

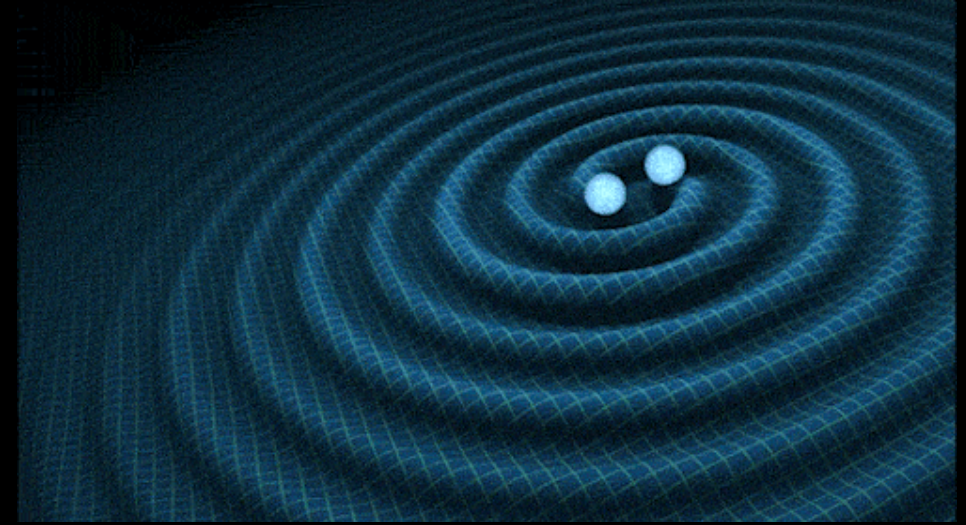
理化学研究所 客員研究員



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

重力波

Gravitational Wave



- アインシュタインは、電磁波との類推から重力波の存在を予言した。しかし、後に重力波は存在しないかも、という論文を書きかけた。
- 1968年、ウェーバーによる重力波検出は幻とされた。
- 1974年、連星中性子星の発見によって、重力波の存在が間接的に証明された。
- 100年経った2015年、ブラックホールが連星を形成して合体することが、重力波によって確認された。

IMAGINE THAT SPACE IS A GIANT SHEET OF RUBBER...

THINGS THAT HAVE MASS CAUSE THAT RUBBER SHEET TO BEND, LIKE A BOWLING BALL ON A TRAMPOLINE.

THE MORE MASS, THE MORE THAT SPACE GETS BENT AND DISTORTED BY GRAVITY.

JORGE CHAM © 2016

FOR EXAMPLE, THE REASON THE EARTH GOES AROUND THE SUN IS THAT THE SUN IS VERY MASSIVE, CAUSING A BIG DISTORTION OF THE SPACE AROUND IT.

IF YOU JUST TRY TO MOVE IN A STRAIGHT LINE AROUND SUCH A BIG DISTORTION, YOU WILL FIND YOURSELF ACTUALLY MOVING IN A CIRCLE.

THAT'S HOW ORBITS WORK: THERE'S NO ACTUAL FORCE PULLING THE PLANETS AROUND, JUST A BENDING OF THE SPACE.

GRAVITATIONAL WAVES ARE PRODUCED WHENEVER MASSES ACCELERATE, CHANGING THE DISTORTION OF SPACE.

EVERYTHING WITH MASS AND/OR ENERGY CAN MAKE GRAVITATIONAL WAVES.

IF YOU AND I STARTED TO DANCE AROUND EACH OTHER, WE WOULD ALSO CAUSE RIPPLES IN THE FABRIC OF SPACE AND TIME.

BUT THESE WOULD BE EXTREMELY SMALL, PRACTICALLY UNDETECTABLE.

重力＝時空のゆがみ

質点が加速度運動 ＝ 重力波発生

大質量の天体が激しく加速度運動
＝ 観測できる重力波が発生

THE EFFECT OF A GW IS SO MINUSCULE AND EASILY CONFUSED WITH RANDOM NOISE, YOU NEED A SMART DATA ANALYSIS TECHNIQUE.

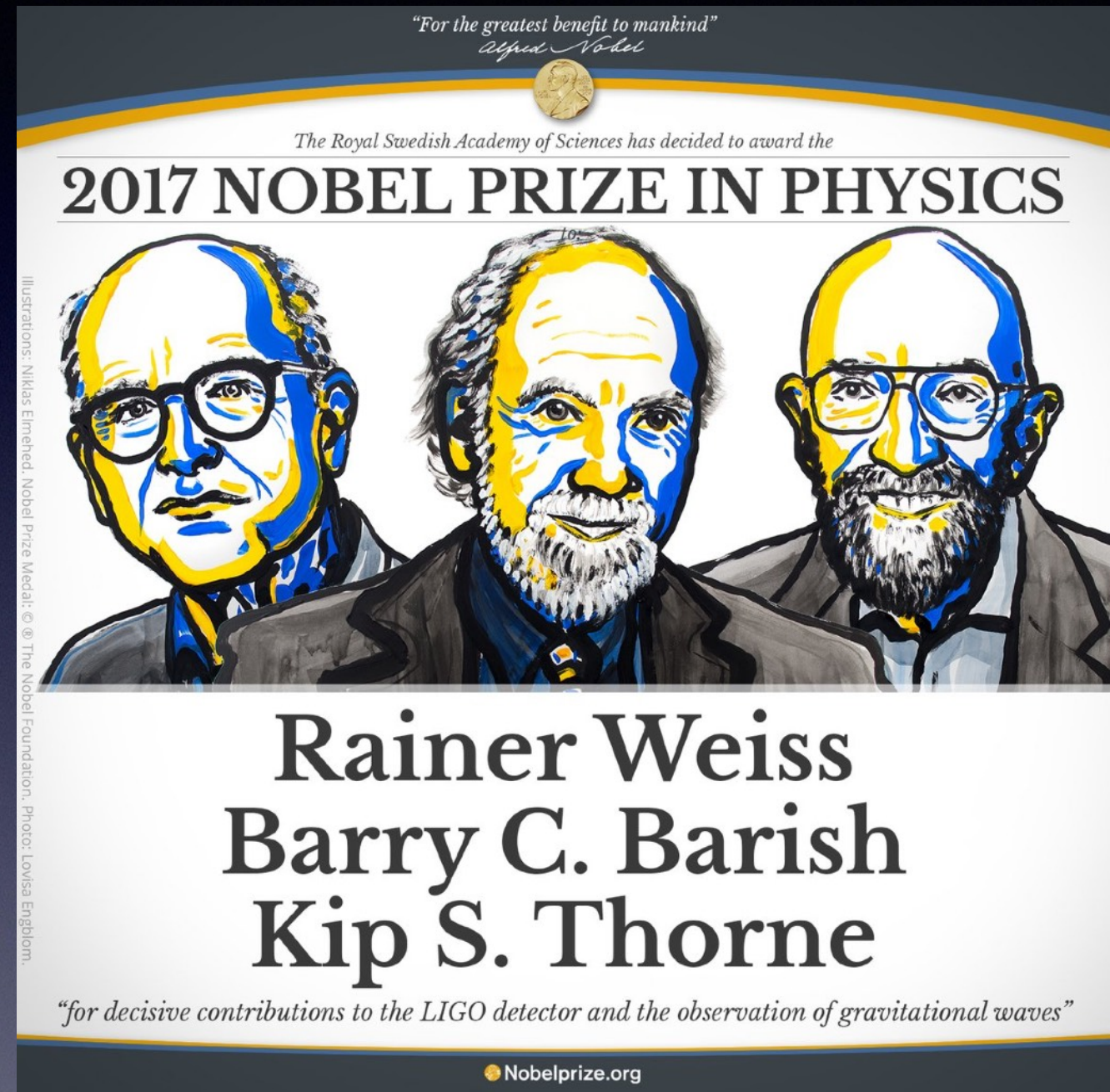
SCIENTISTS HOPE TO IDENTIFY THE PATTERNS OF GRAVITATIONAL WAVES BY COMPARING THE WIGGLES THEY MEASURE IN THE EXPERIMENT TO THE WIGGLES THEY EXPECT FROM GRAVITATIONAL WAVES.

IT'S LIKE TRYING TO IDENTIFY A SONG BEING HUMMED AT A NOISY PARTY. A VERY VERY NOISY PARTY.

First Detection (2015 Sep 14)

2017 Nobel Prize

2016年2月, LIGOが重力波を初めて検出した,
と発表 GW150914



2017年10月, LIGO/Virgo
中性子星連星合体観測を発表
GW170817

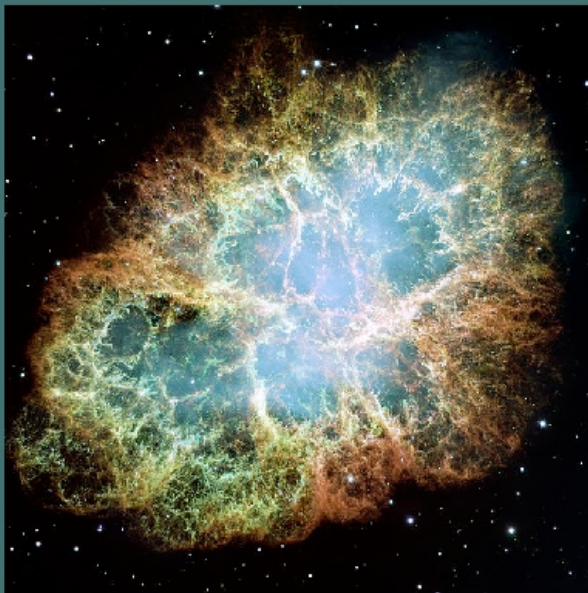
2017年10月, ノーベル財団が, 重力波検出
に貢献した3名をノーベル物理学賞として顕彰

重力波の波源 (GW sources)

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

supernovae

超新星爆発 (写真出典: NASA)

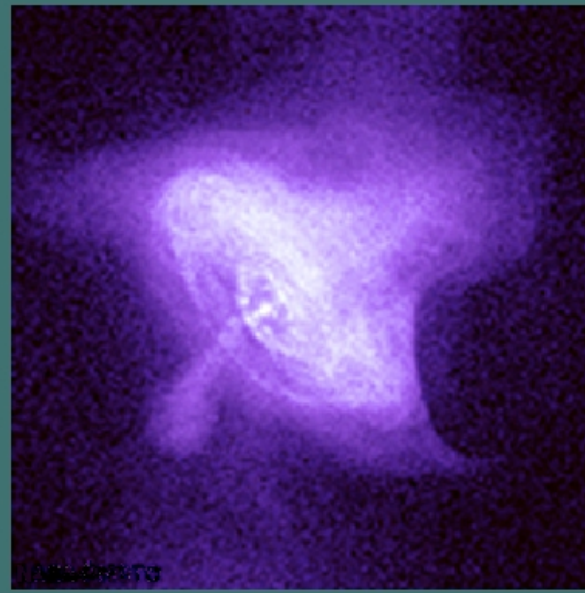


予測が難しい

hard to predict

pulsars

パルサー (写真出典: NASA)

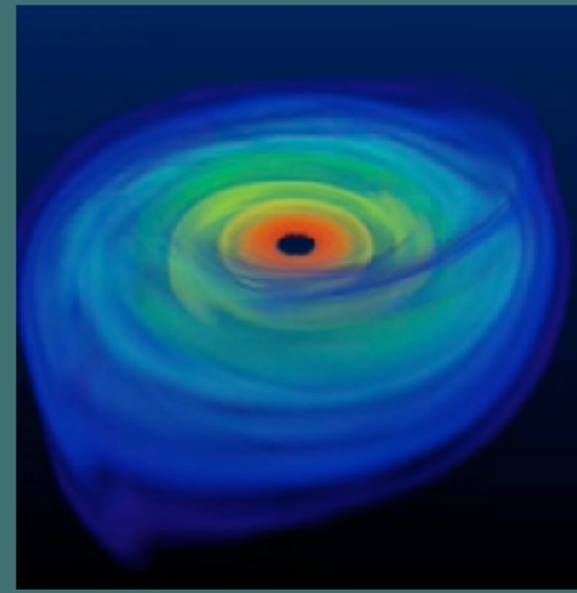


振幅が小さい

too small amplitude

black hole

ブラックホール
(想像図)

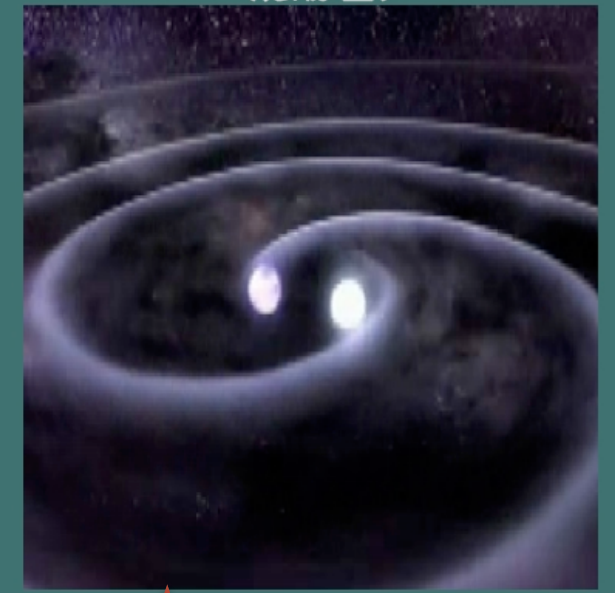


振幅が小さい

too small amplitude

binary neutron stars

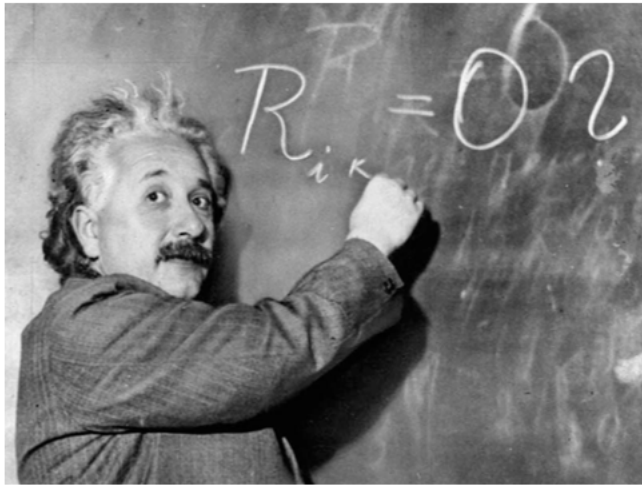
連星中性子星合体
(想像図)



連星合体を
ターゲットに

binary coalescence

What we can learn from GW? (重力波観測によって解明できること)



Test of GR at strong gravity region.

一般相対性理論は正しいか？

強い重力場で重力理論の検証ができる



Test of BH no-hair theory

ブラックホール合体後のふるまいは？

no hair になるか.

(質量, 角運動量, 電荷の3物理量のみか?)

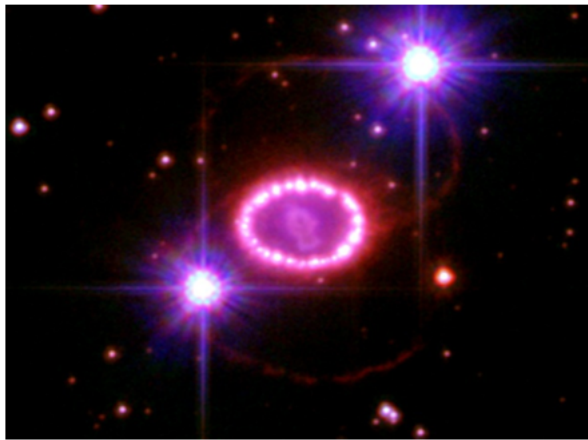


Sources of Gamma-ray bursts

ガンマ線バースト現象の起源は？

加速メカニズムは？

What we can learn from GW? (重力波観測によって解明できること)



Mechanism of Supernovae

超新星爆発のメカニズムは？

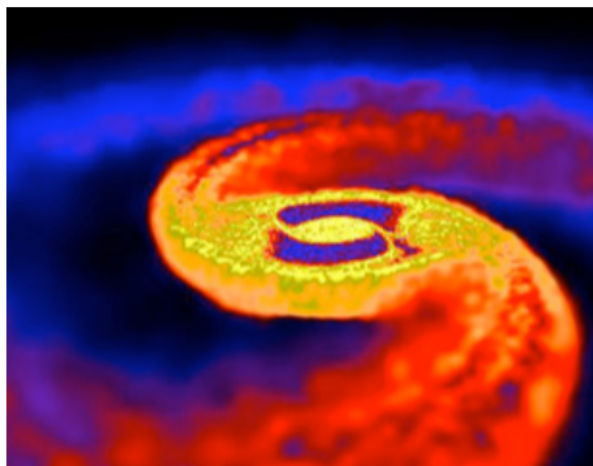
ブラックホールと中性子星の質量差？



Equation of State of nuclear matter

中性子星の最大質量は？

高密度物質の状態方程式は？



Origin of heavy elements

重元素の起源？

r-processは十分に発生するか？

Neutron Star Mass-Radius diagram: Equation of State

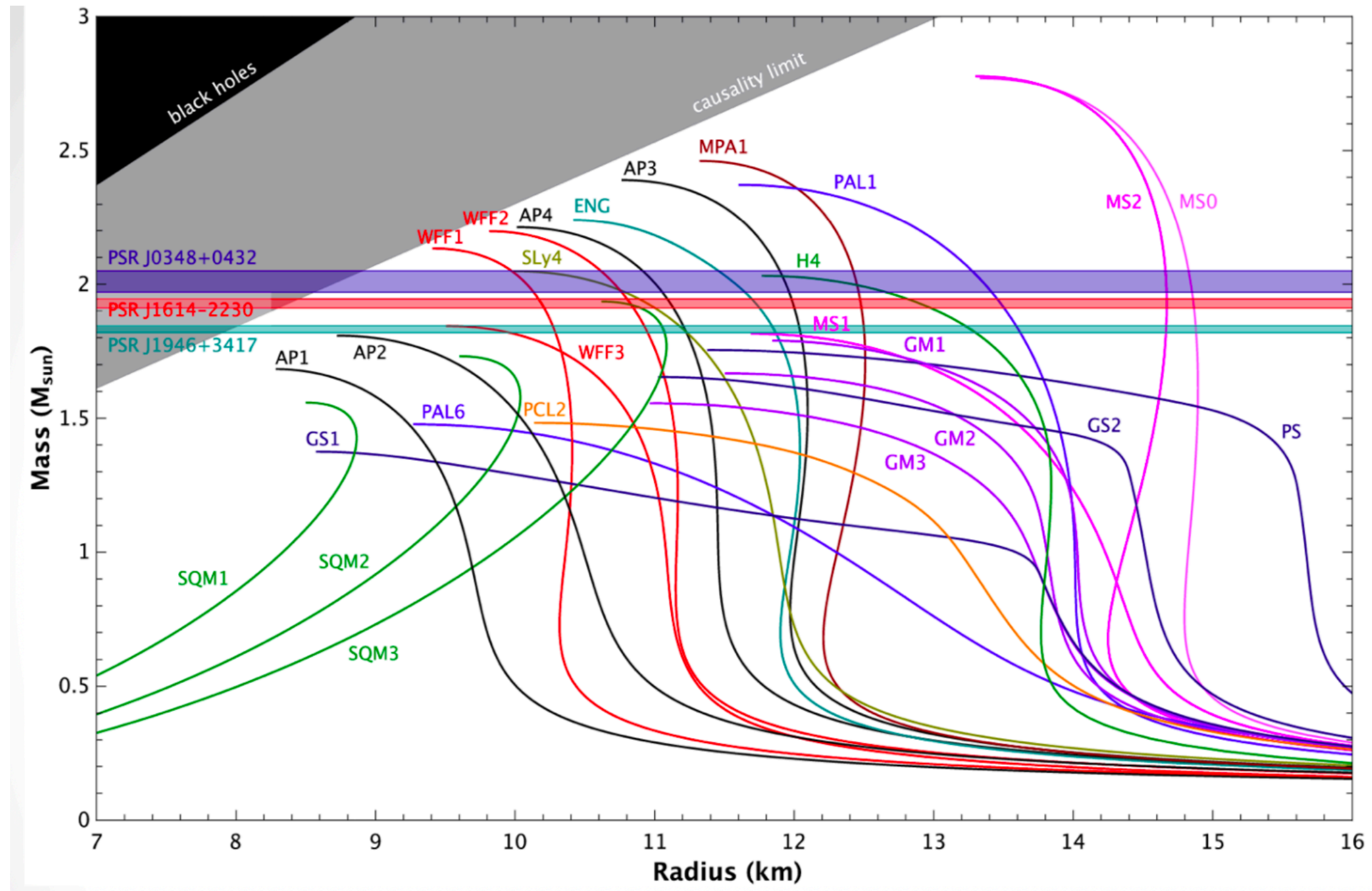


Figure created by Norbert Wex.

EOSs tabulated in Lattimer & Prakash (2001) and provided by the authors.

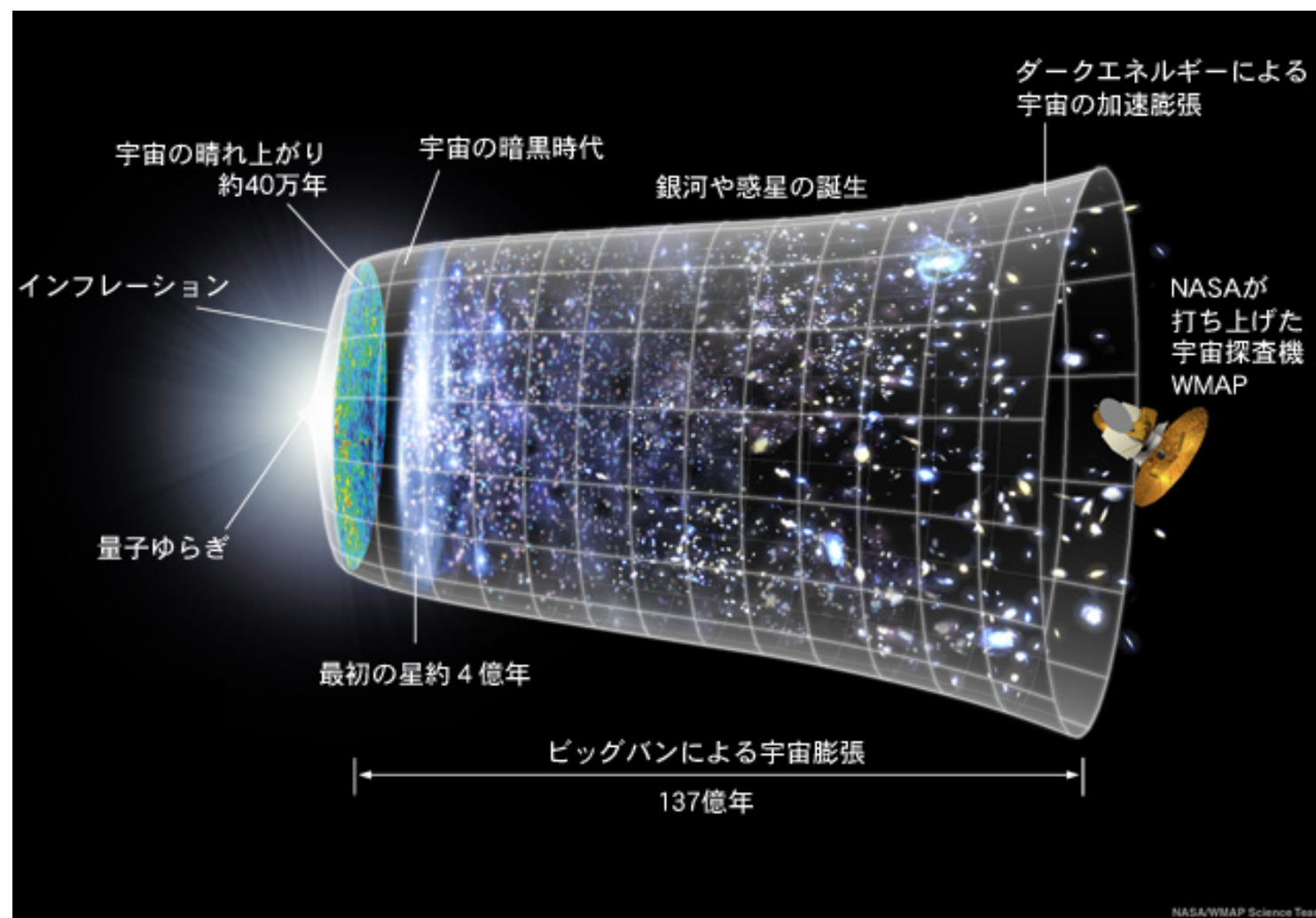
What we can learn from GW? (重力波観測によって解明できること)



Origin of Supermassive Blackholes

銀河中心の超巨大ブラックホールの起源は？

合体成長か，初期にできていたか？



Cosmological Parameters

宇宙の膨張速度の測定

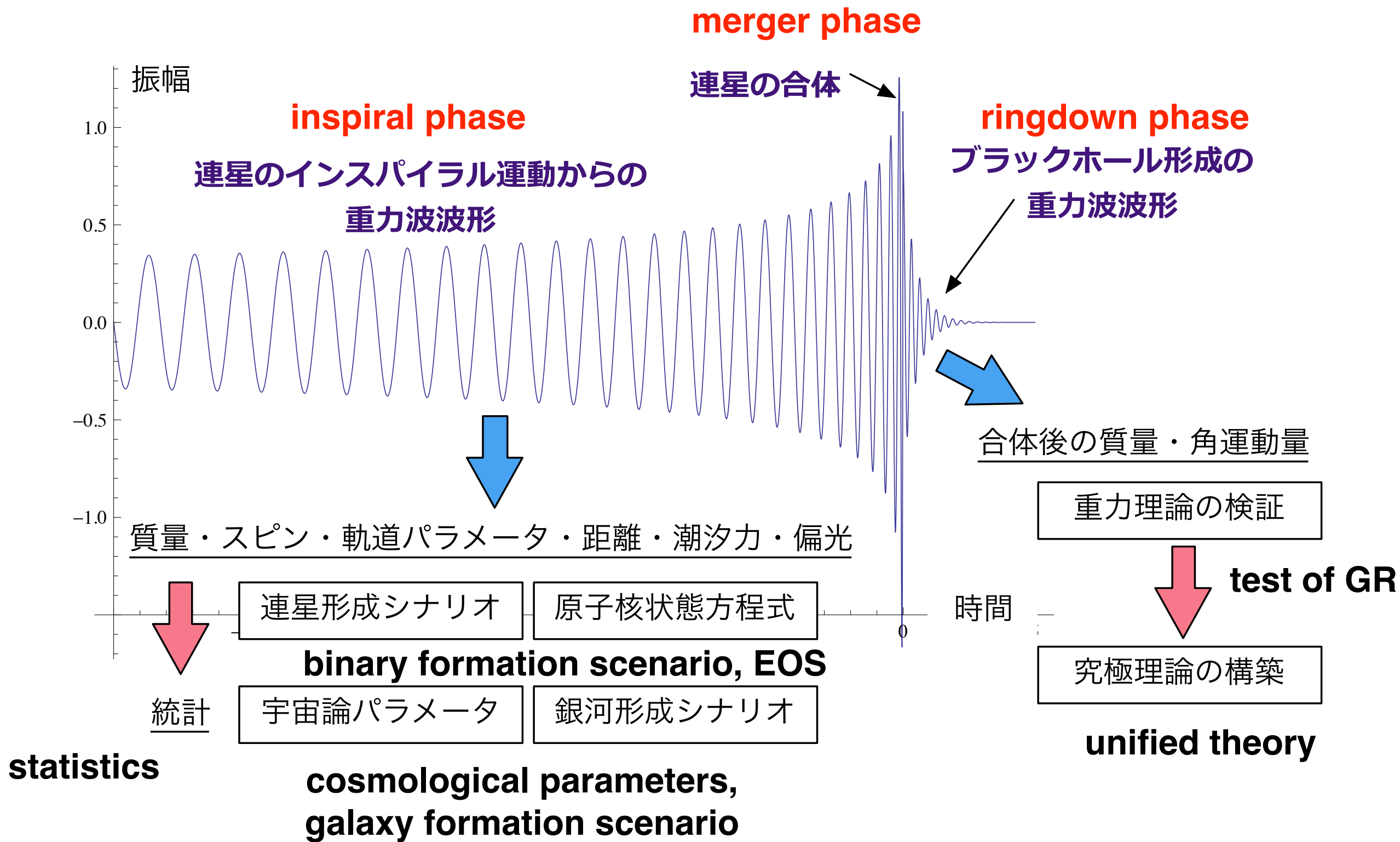
Stellar formation scenario

星形成モデルの特定

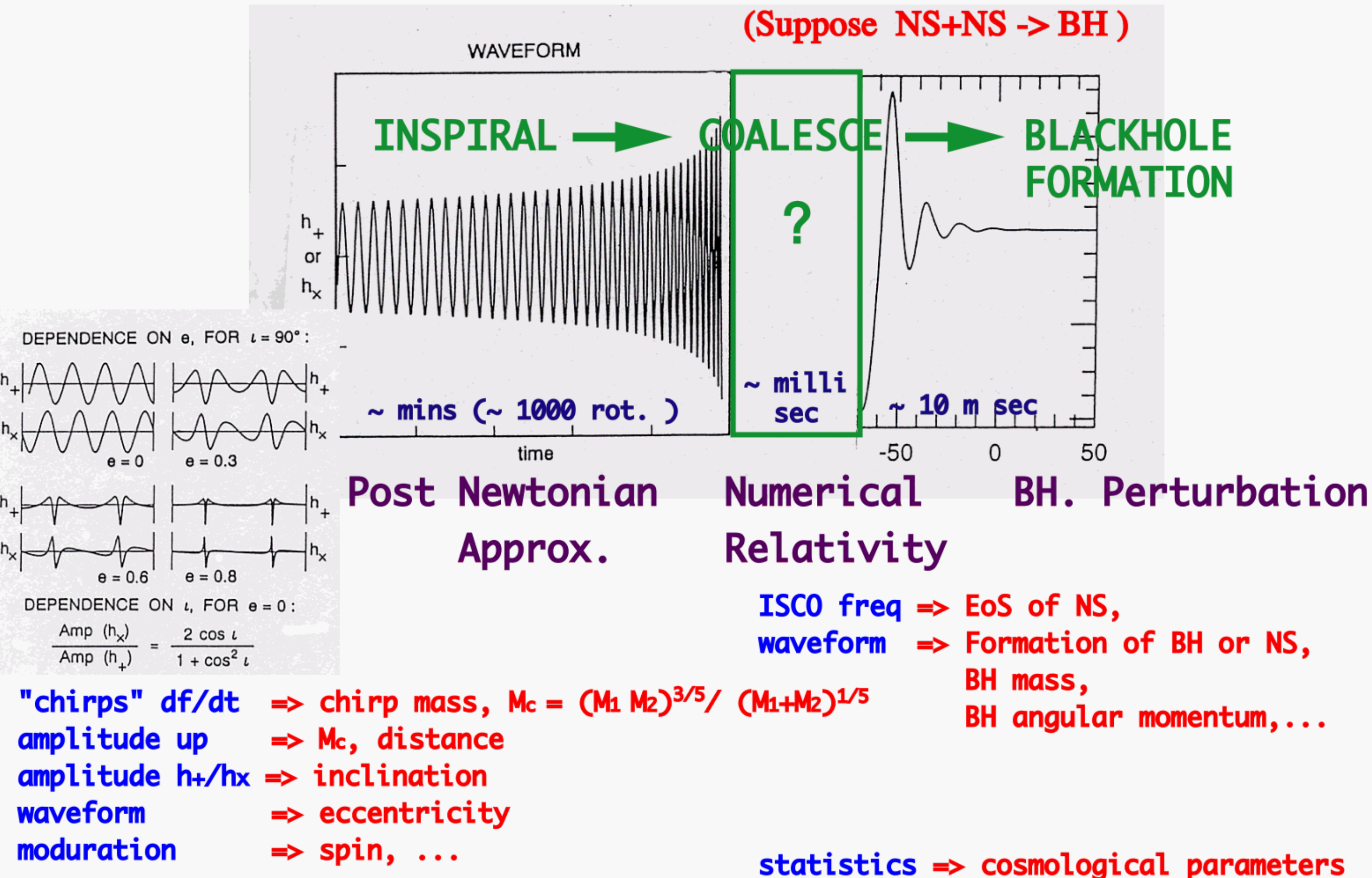
Early Universe before CMB

CMB以前の初期宇宙の解明

What we can learn from GW? (重力波観測によって解明できること)



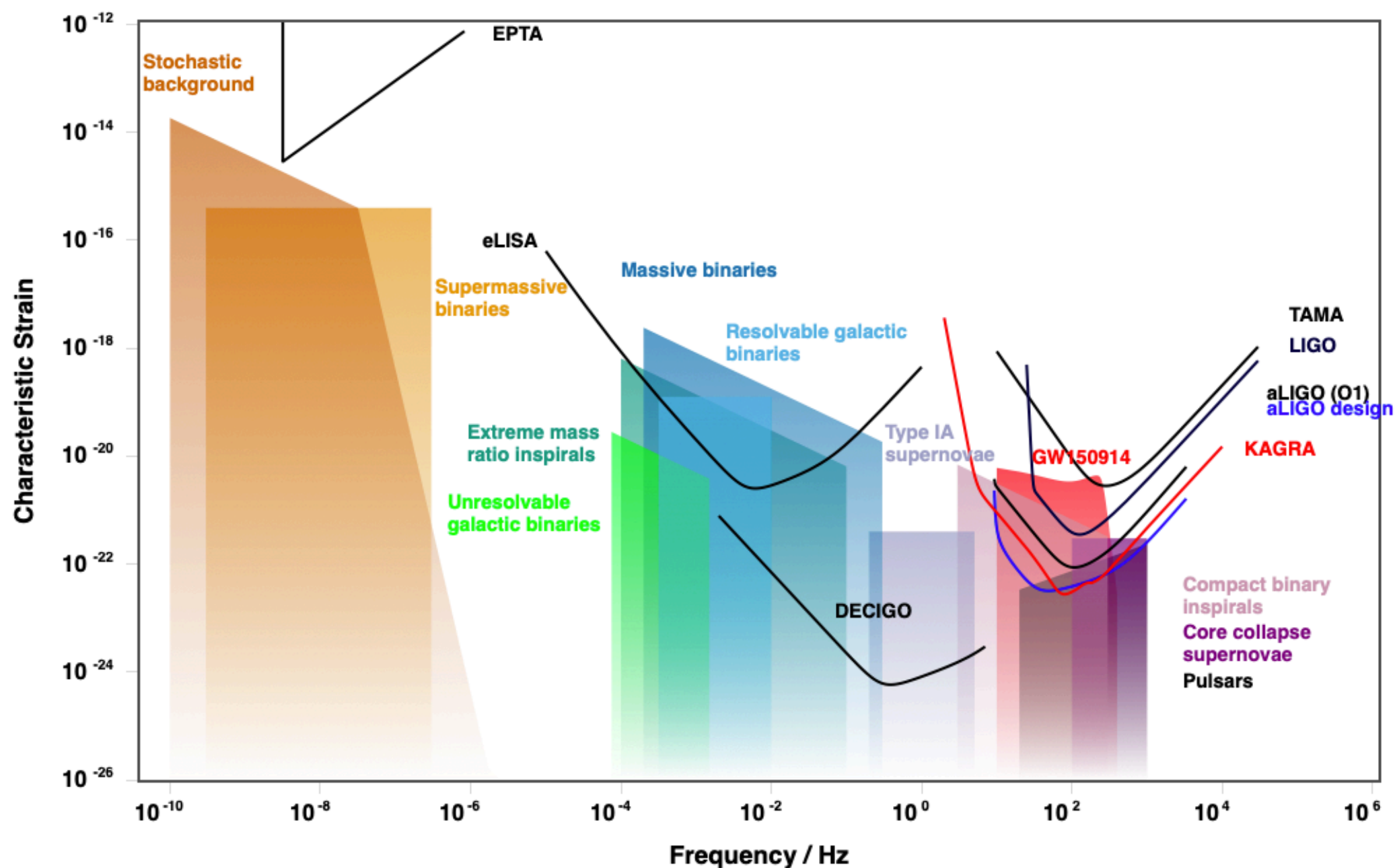
What can we learn from gravitational waveform?



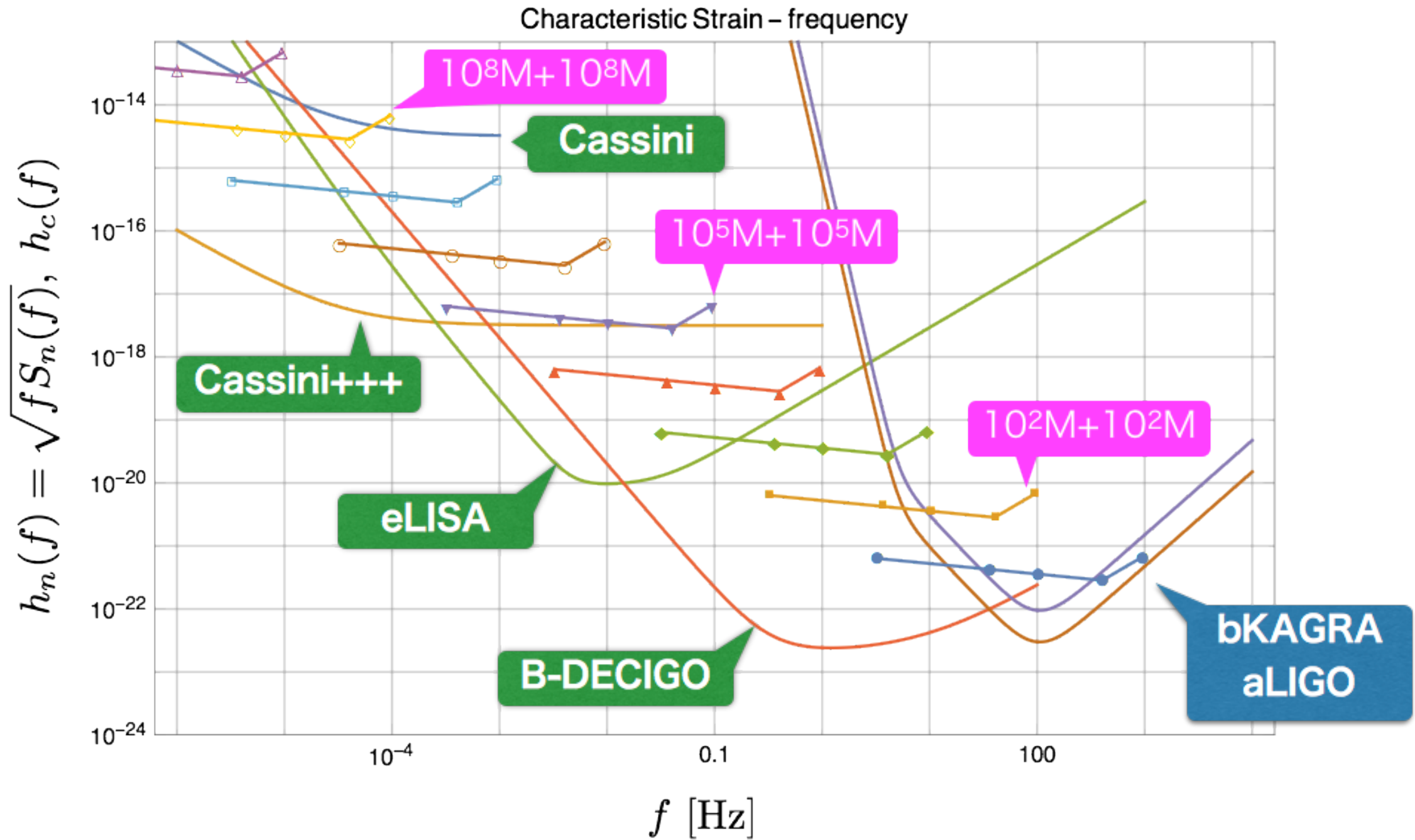
GW observatory plans in space

<http://gwplotter.com>

Gravitational Wave Detectors and Sources



GW observatory plans in space



Discoveries end in an illusion (1968/70)



Joseph Weber

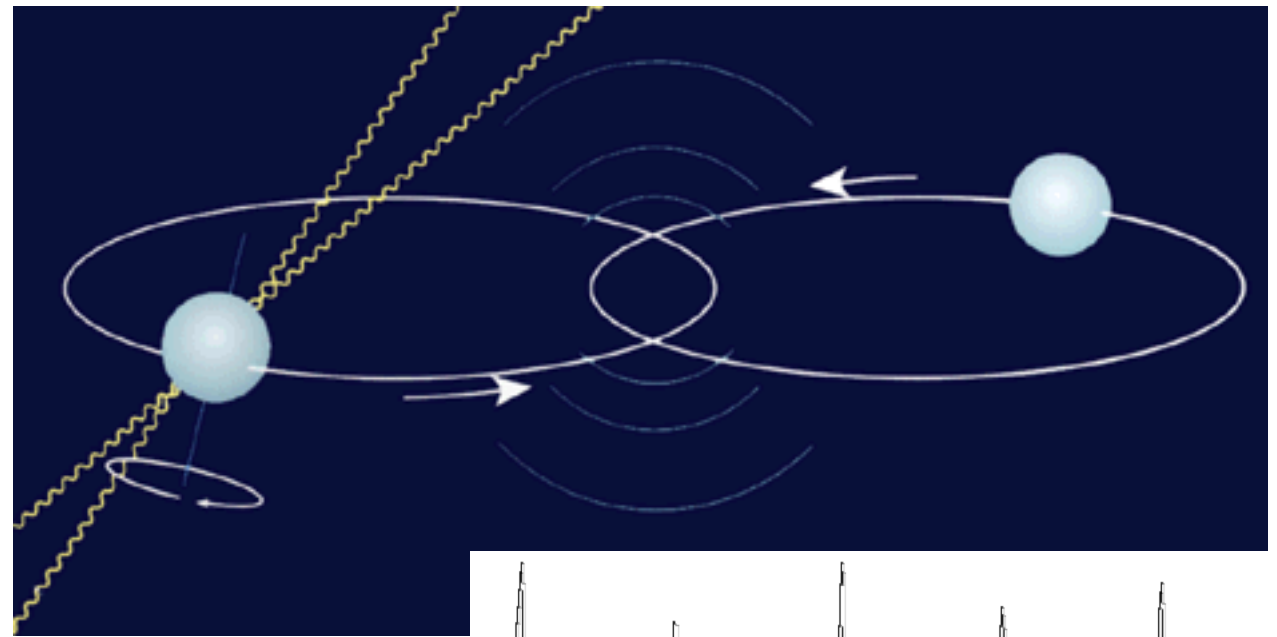
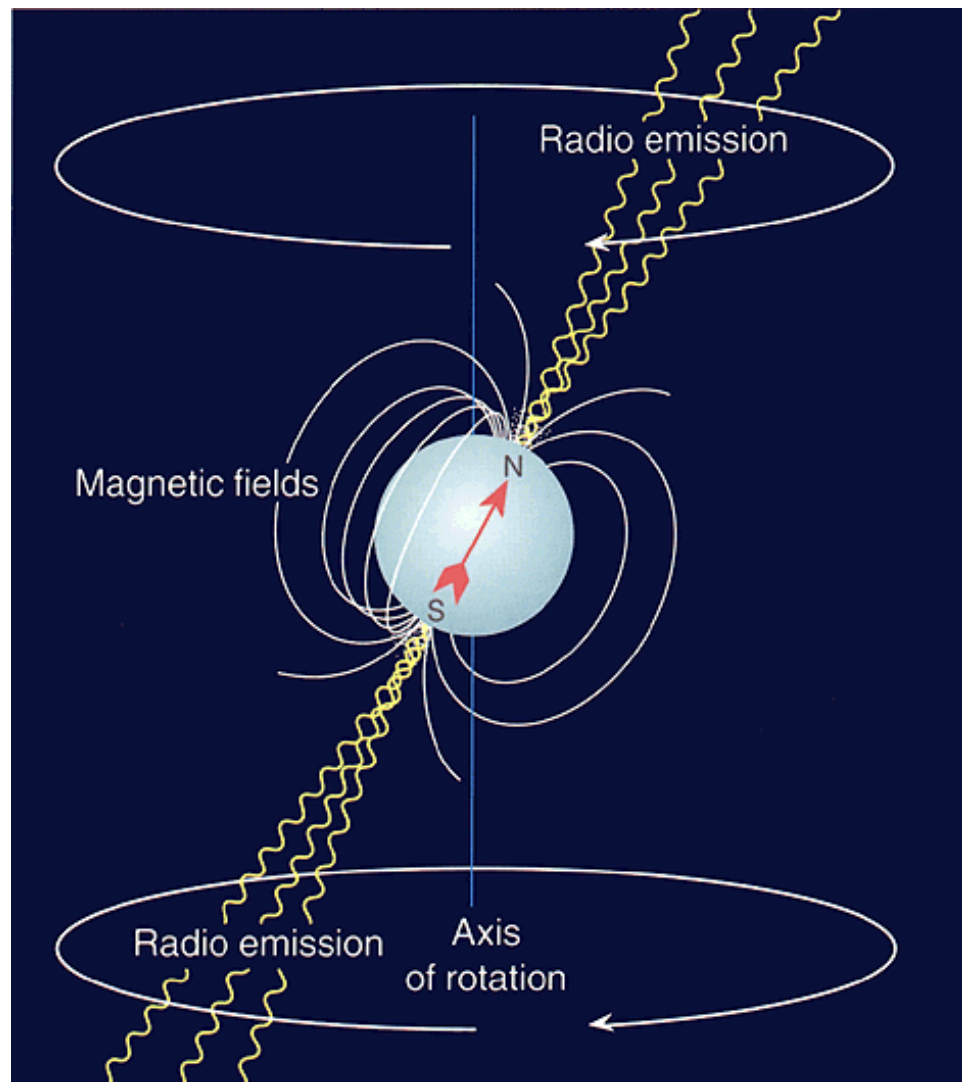
Joseph Weber (**pictured**), a physicist at the University of Maryland in College Park, believed that gravitational waves were real. In 1969, he announced that he had found them with a detector of his own invention: an aluminium cylinder, about 2 metres long and 1 metre in diameter, that ‘rang’ when 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」

と発表したか、他のグループで追試されず

Discovery of Binary Neutron Stars (1974)



Arecibo, Puerto Rico



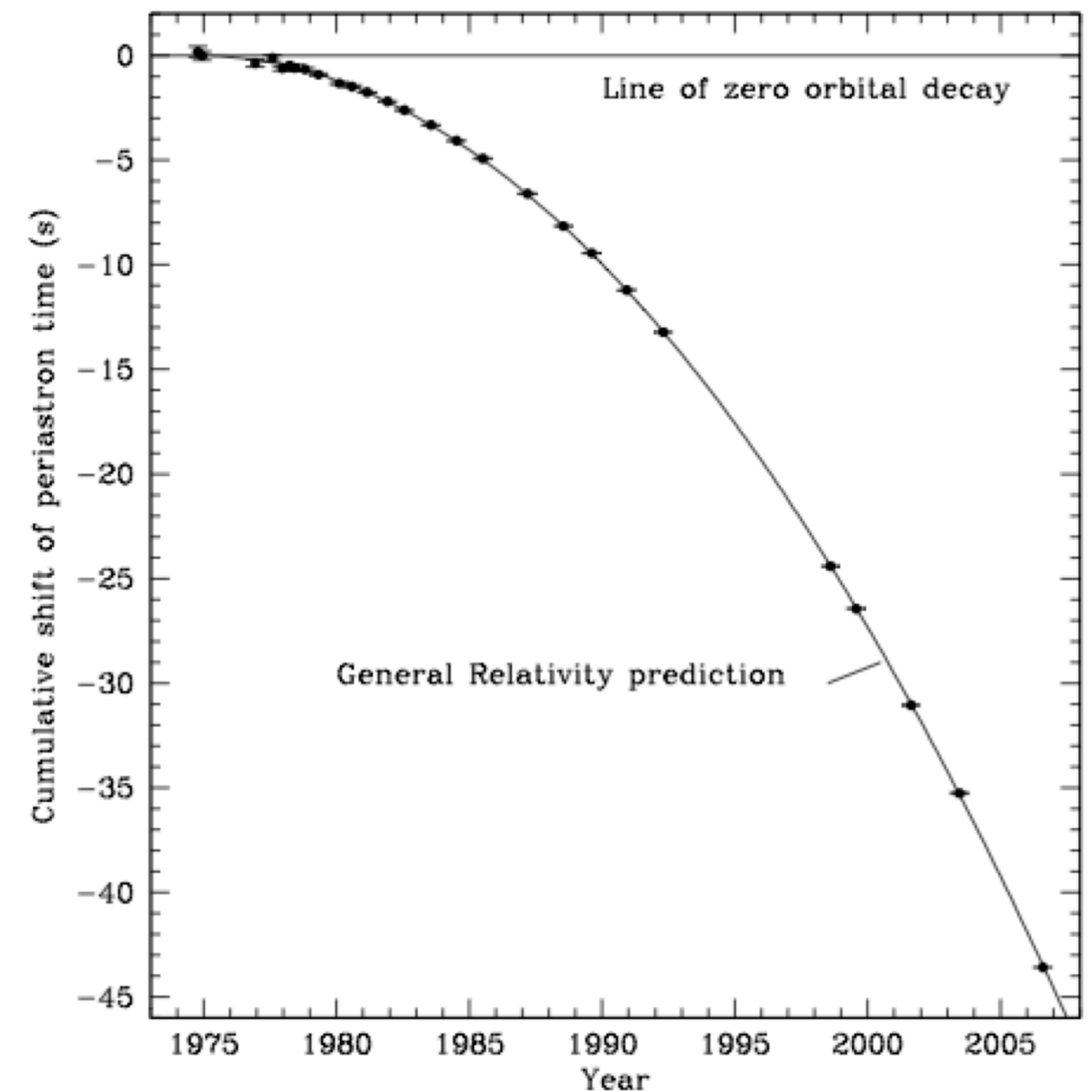
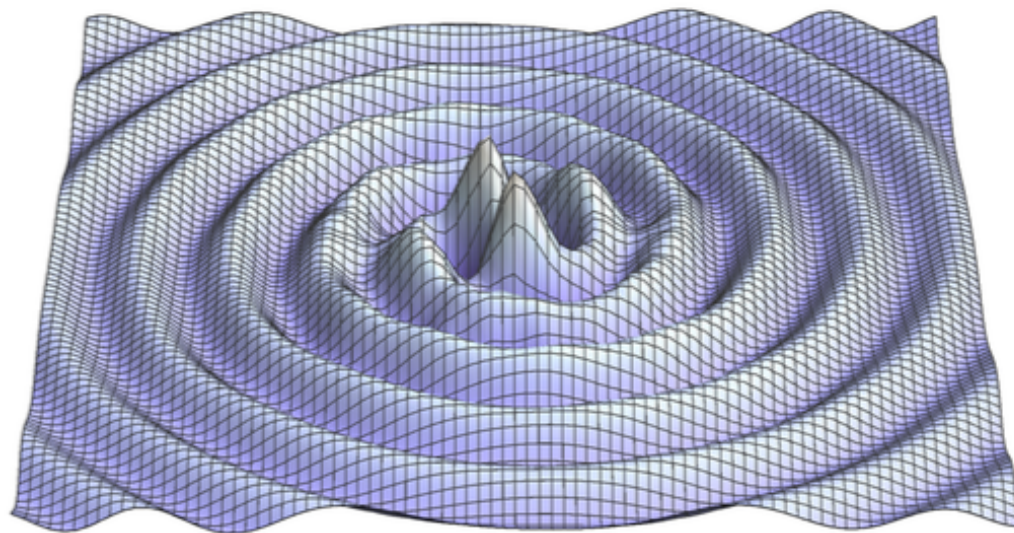
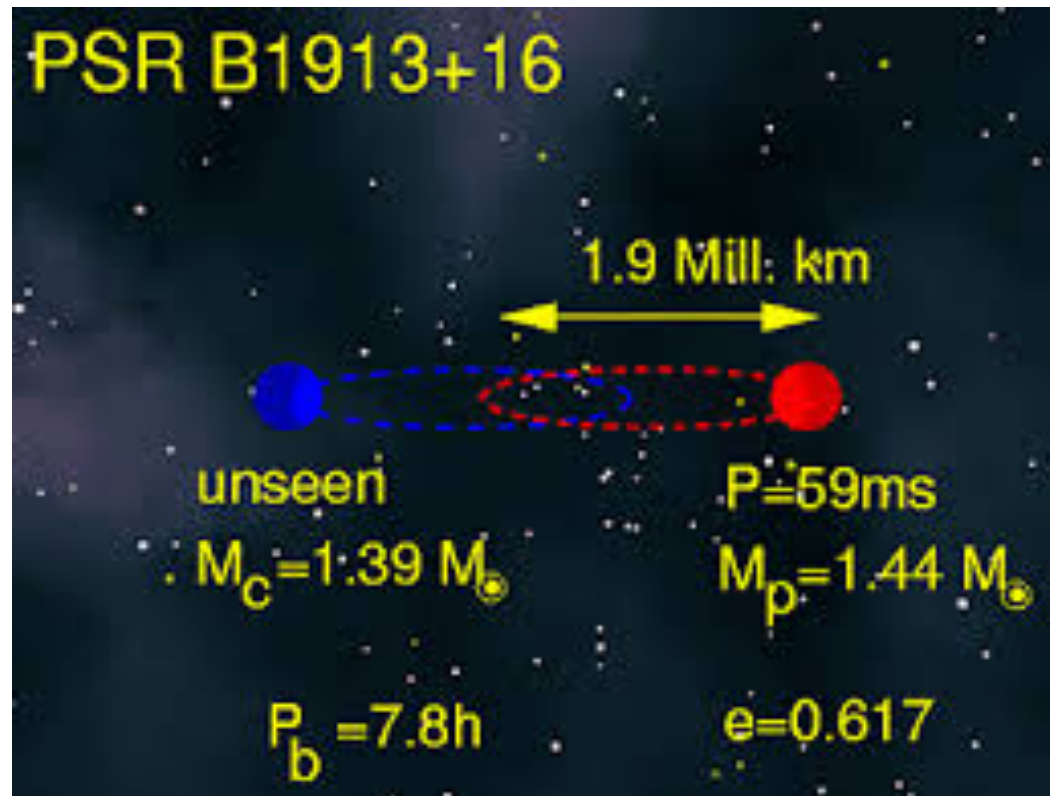
Pulsar = Neutron Star

radius 10 km

mass 1.4 Msun

http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1993/illpres/discovery.html

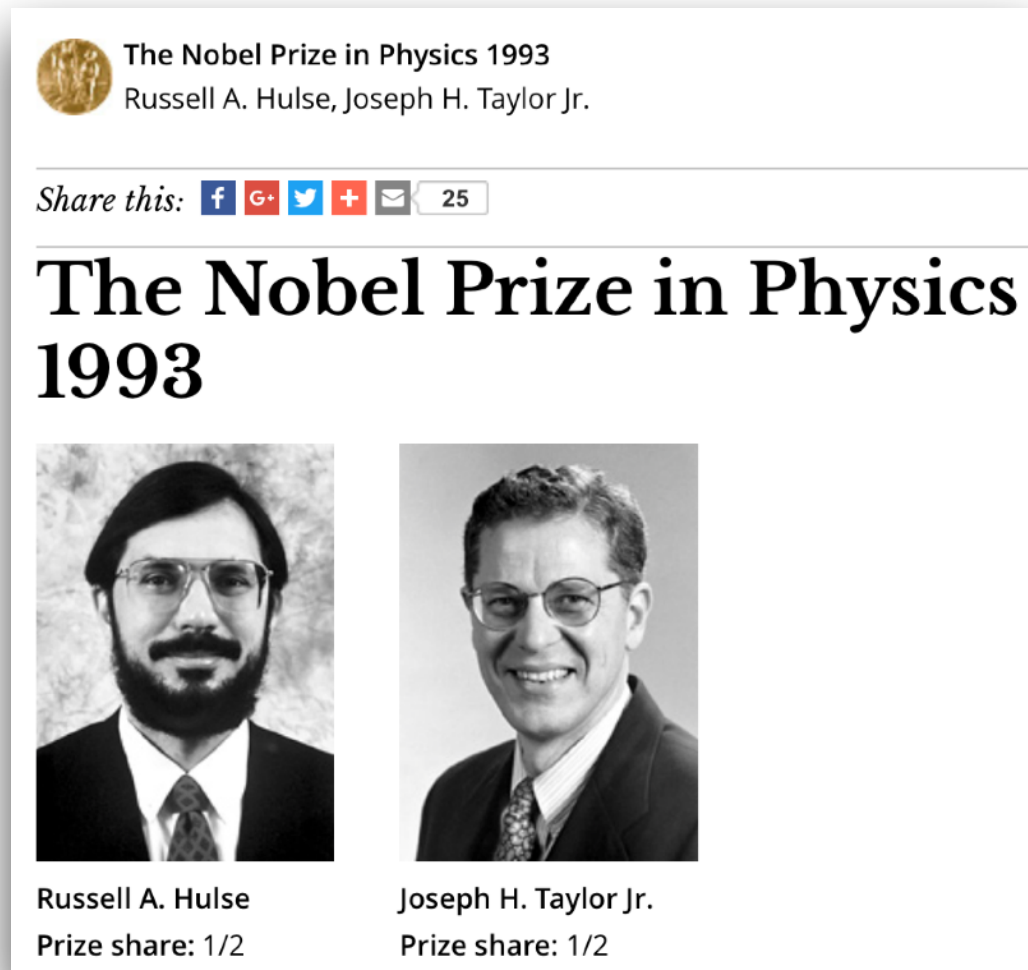
Discovery of Binary Neutron Stars (1974)



Period reduction by losing energy by GW.
 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。

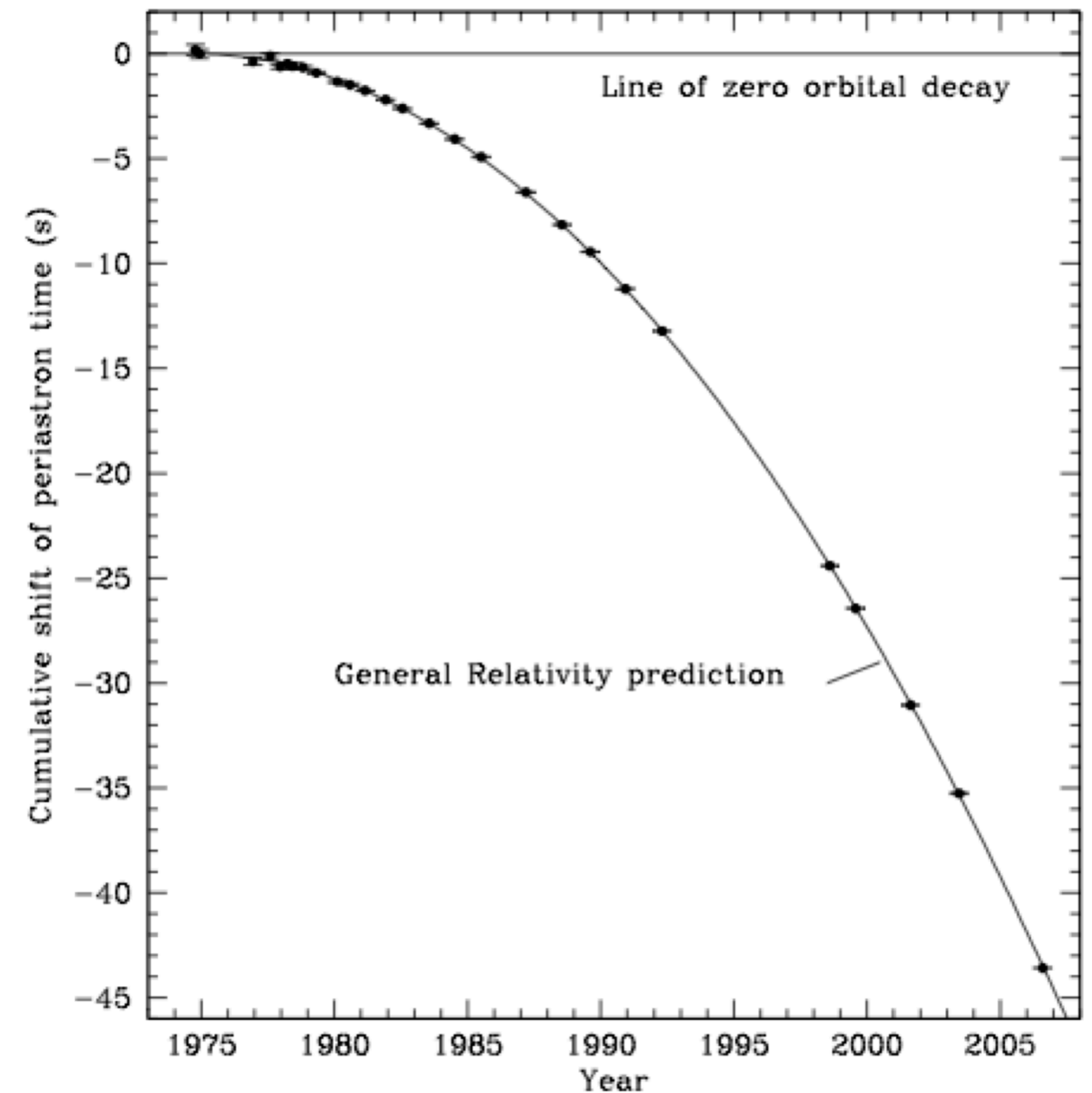
∃ Grav. Wave, indirect proof

Discovery of Binary Neutron Stars (1974)



"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"



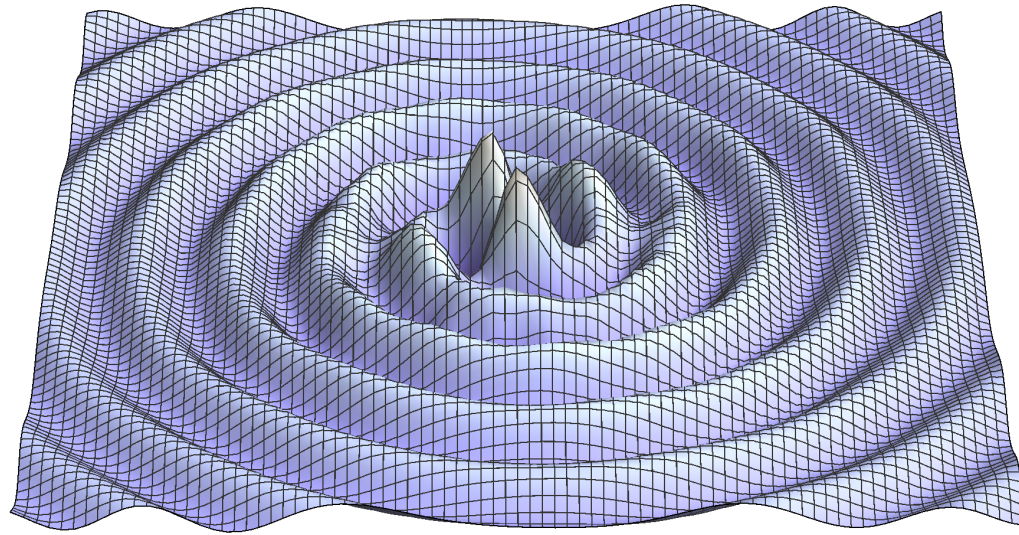
Period reduction by losing energy by GW.
重力波を放出してエネルギーを失うので，星が近づいてゆく。

≡ Grav. Wave, indirect proof

重力波の存在は連星パルサーの発見で、
間接的に確かめられていた。

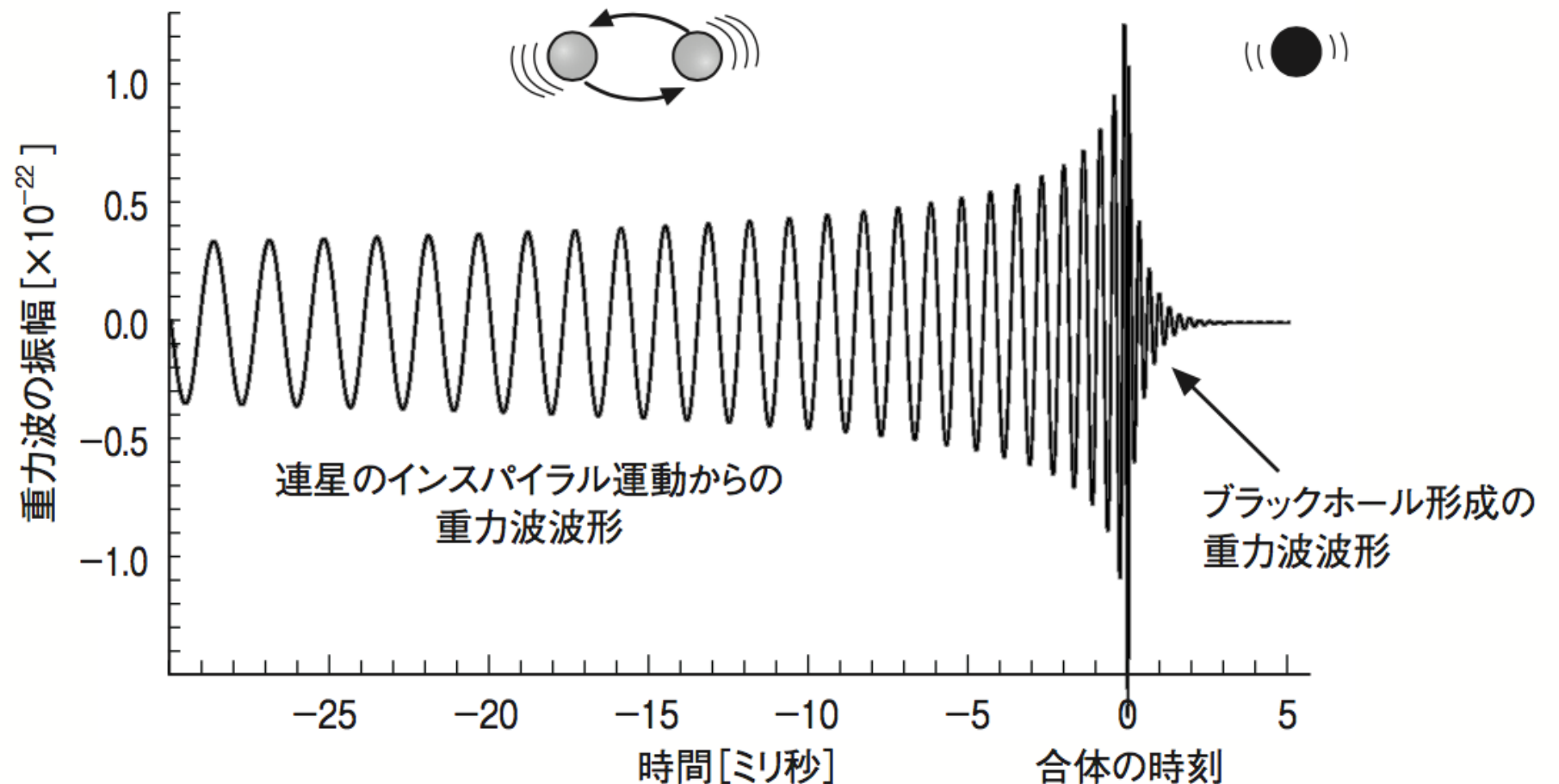
重力波の直接観測をしたい！

連星中性子星
連星ブラックホール

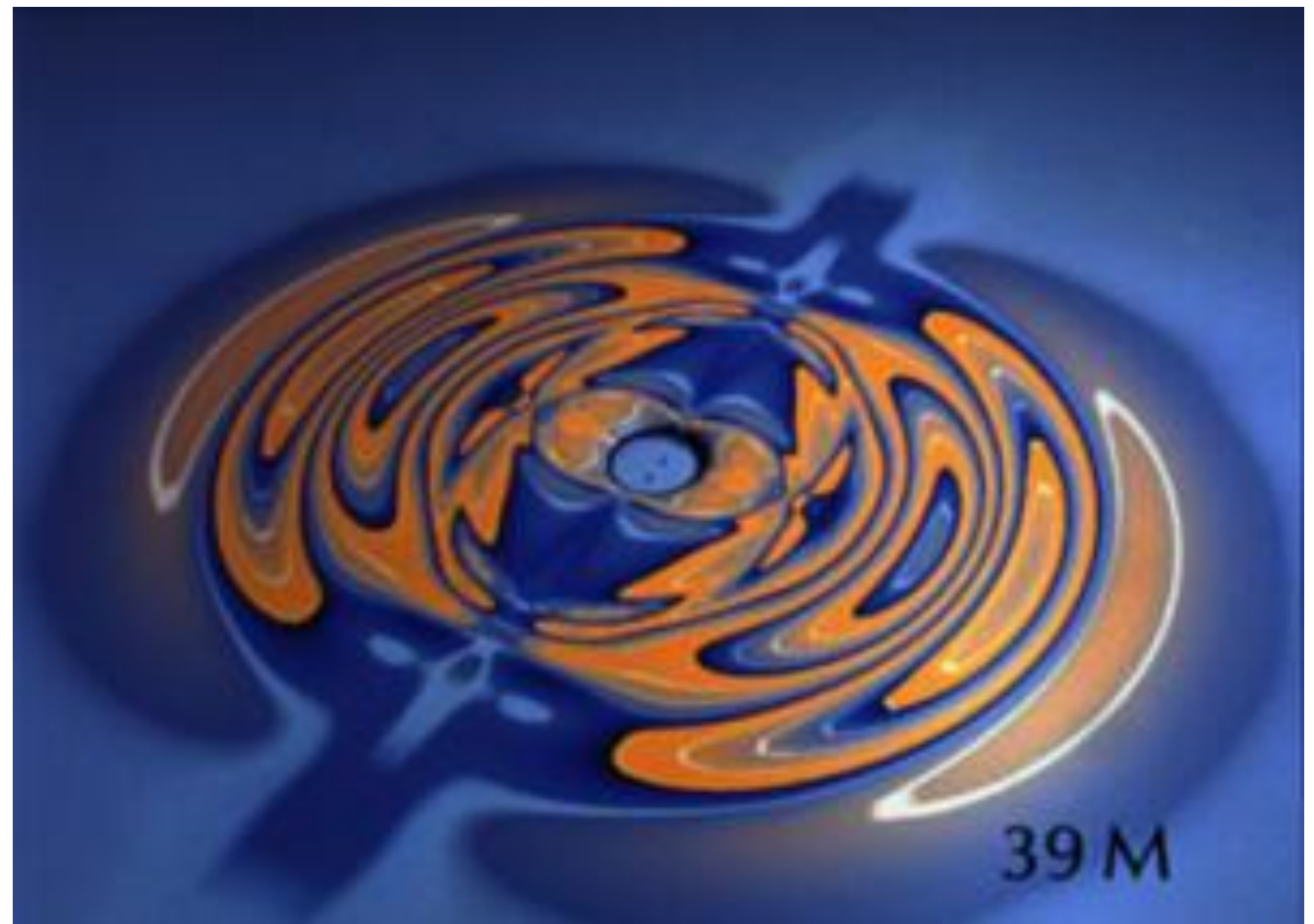


Inspiral

Merger Ringdown

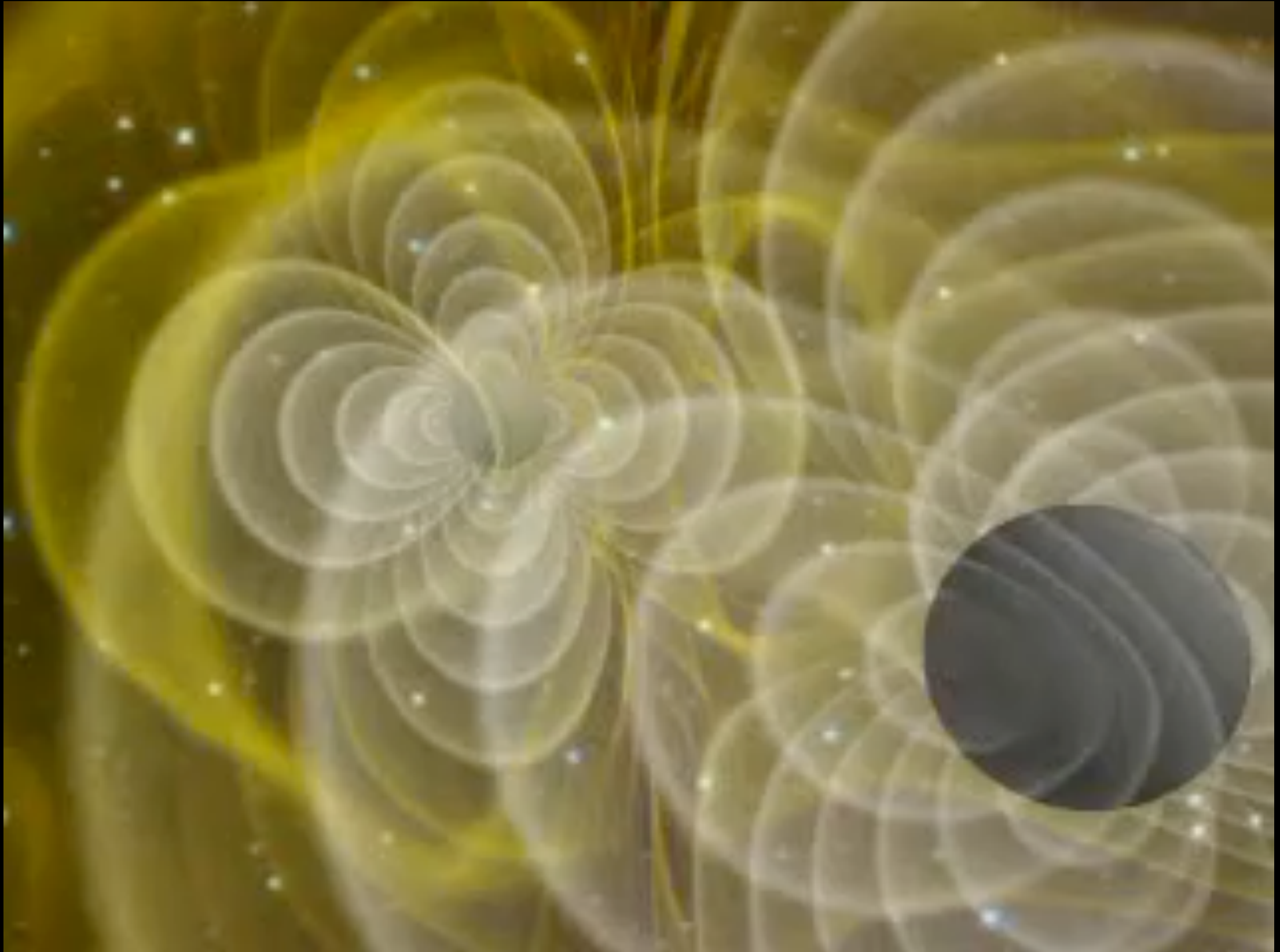


Grand Challenge for Black hole simulation (1990s)

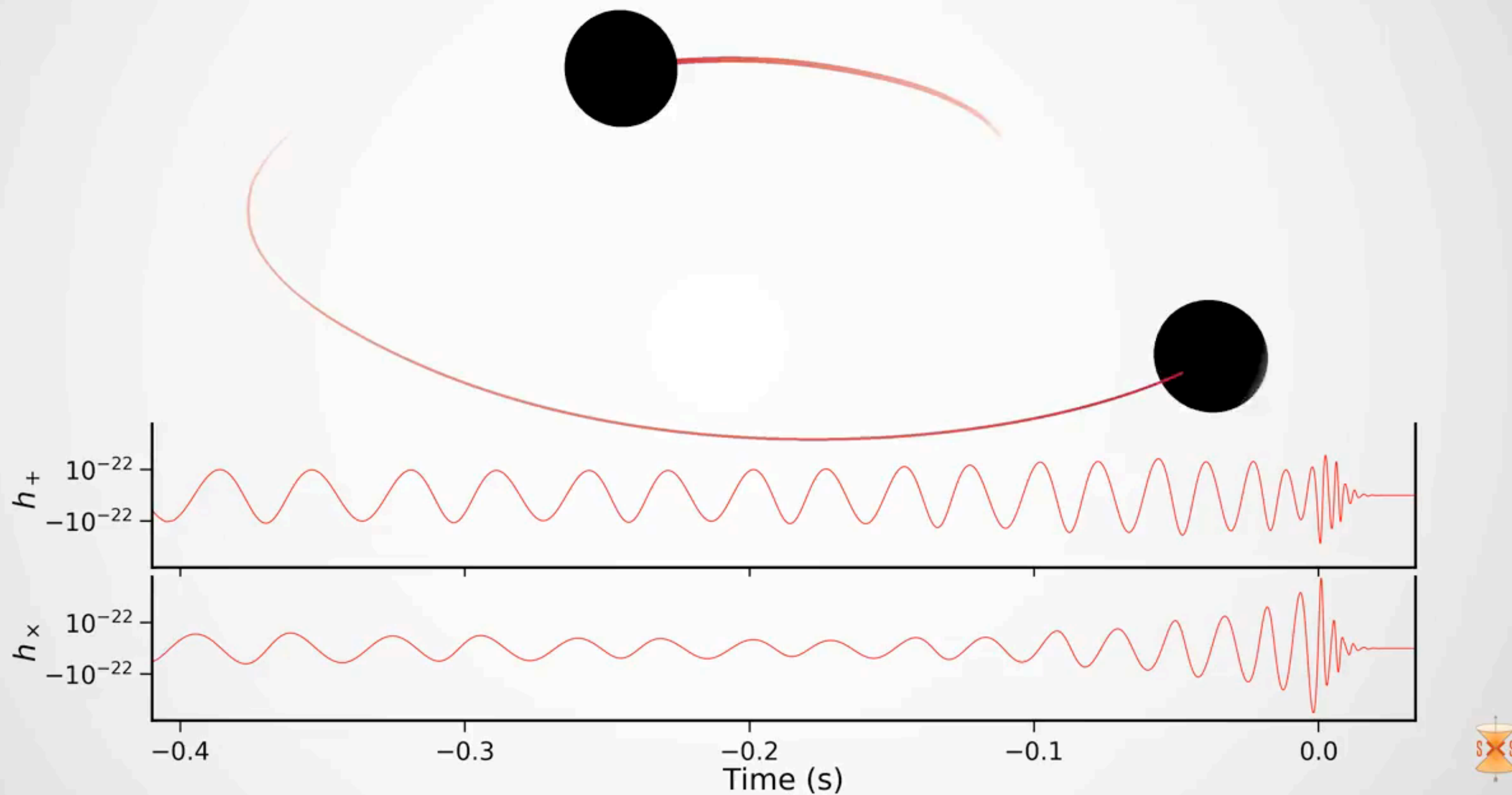


2つのブラックホールの合体と重力波放出
(90年代, NCSAグループ)

ブラックホールの合体シミュレーション



NCSA-AEI group (1998)



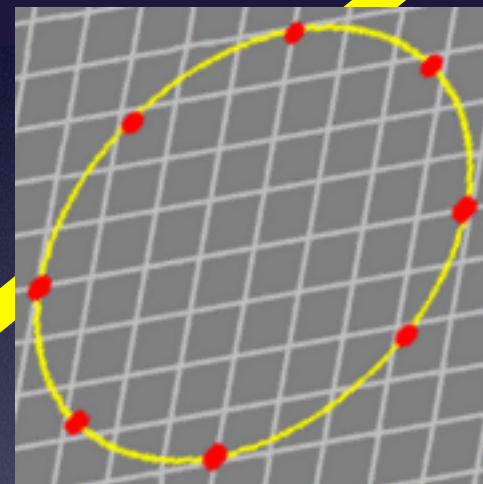
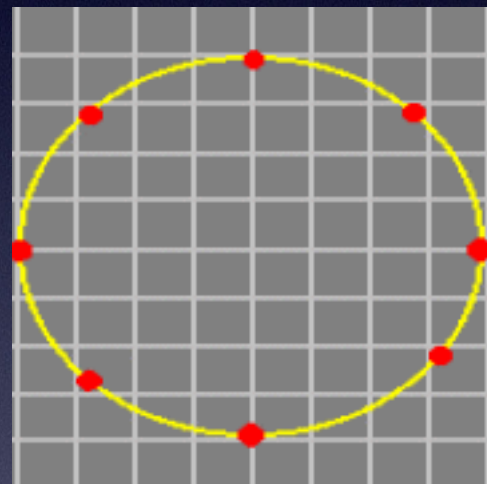
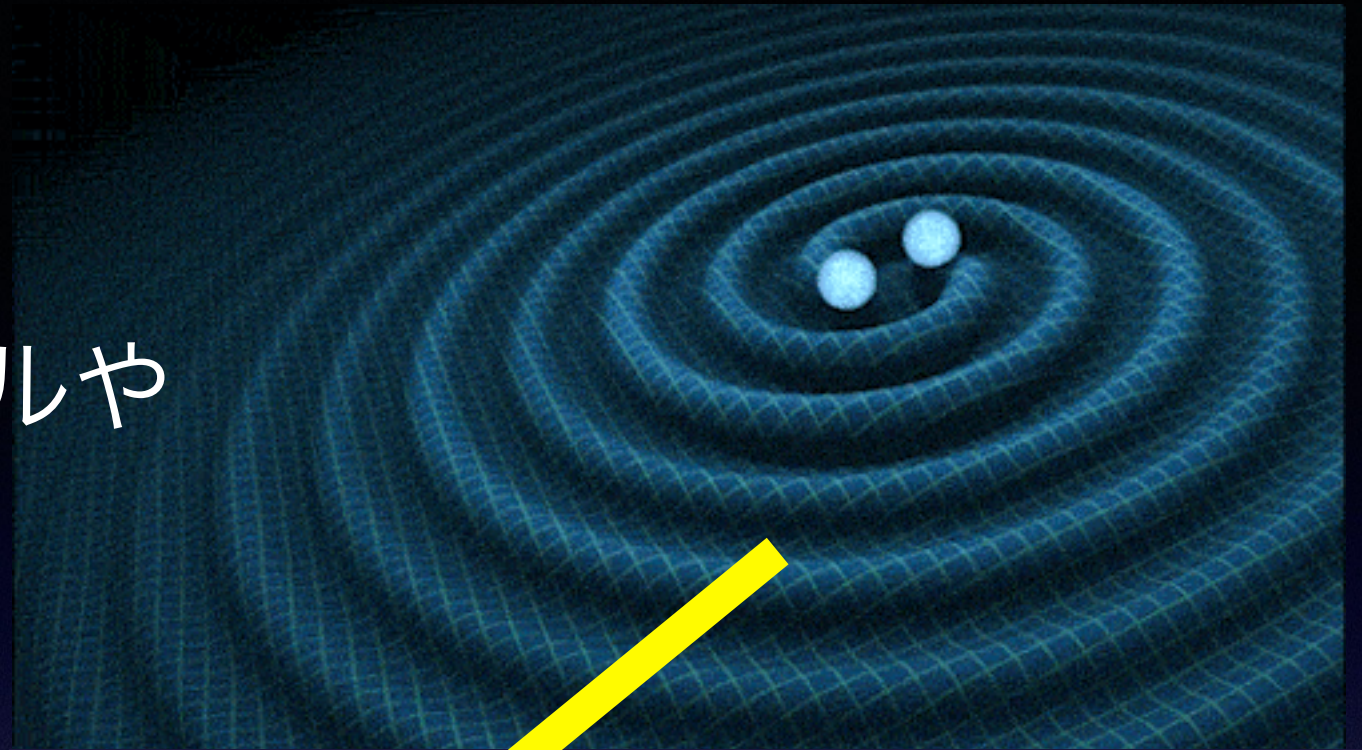
Animation of the inspiral and collision of two black holes consistent with the masses and spins of GW170104. The top part of the movie shows the black hole horizons (surfaces of "no return"). The initial two black holes orbit each other, until they merge and form one larger remnant black hole. The shown 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.dpuf>

重力波の発生と伝播

連星ブラックホールや
連星中性子星



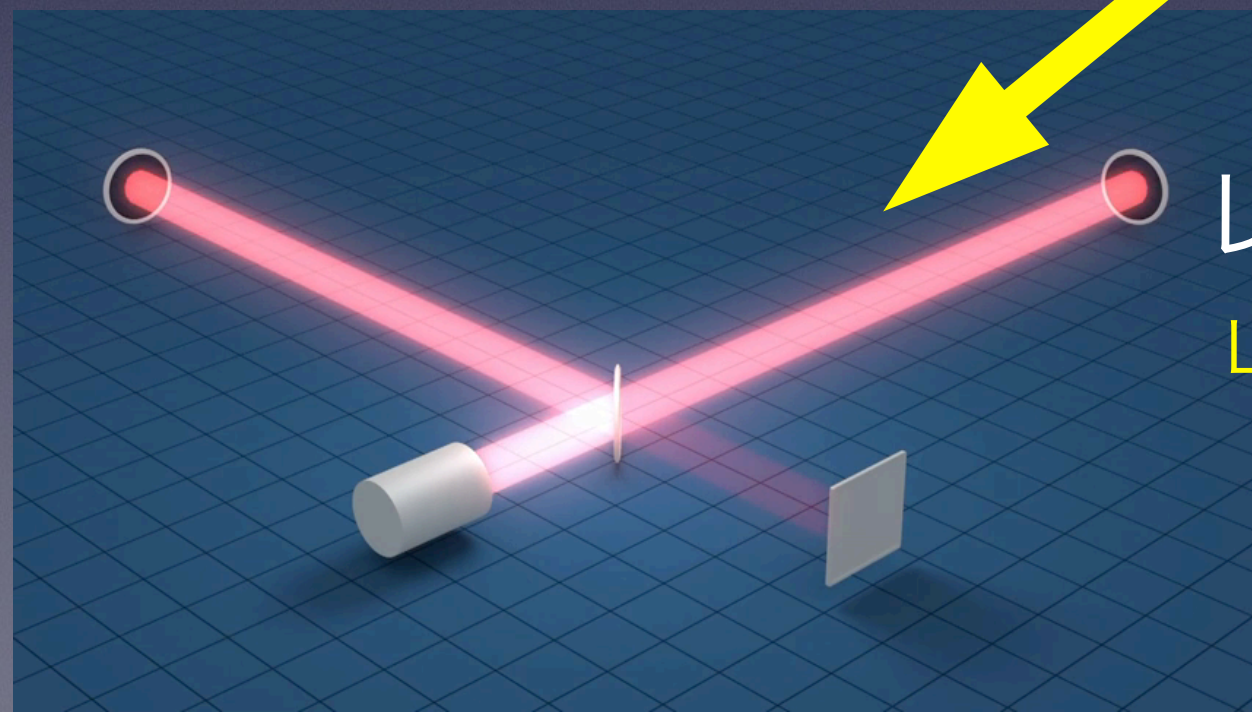
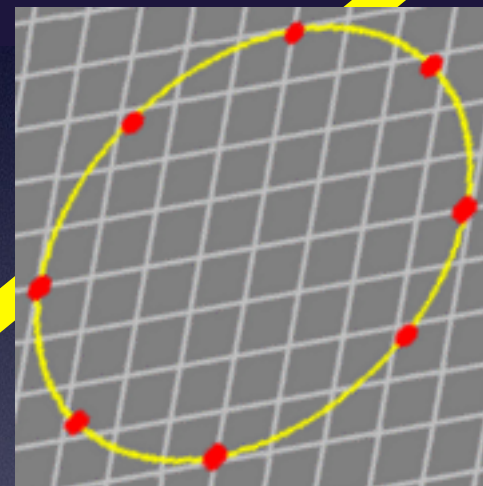
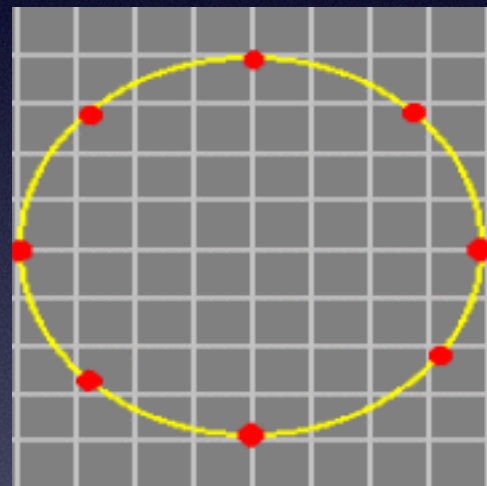
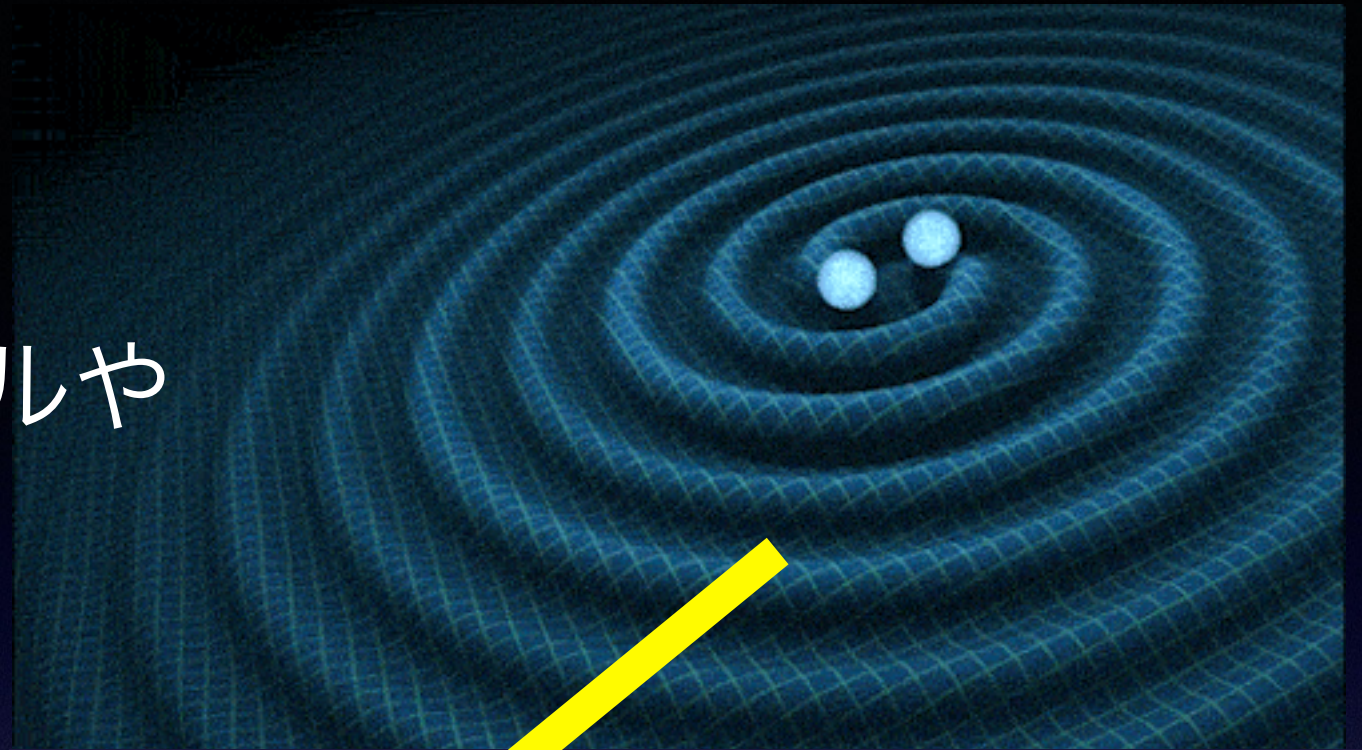
レーザー干渉計

LIGO=Laser Interferometer

Gravitational-Wave Observatory

重力波の発生と伝播

連星ブラックホールや
連星中性子星



レーザー干渉計

LIGO=Laser Interferometer

Gravitational-Wave Observatory

課題 3.10. 【重力波干渉計のしくみ】

図 44 は、干渉計と呼ばれる装置である。光源 A から発せられたレーザー光は、ビームスプリッター B にて x 方向と y 方向に分離される。それぞれの光は、B から距離 L_1 の位置にある鏡 M_x 、距離 L_2 にある M_y でそれぞれ反射し、元の B に戻って再び合成されて検出器 D に到達する。

ブラックホールなどの巨大な質量をもつ天体が運動することによって、重力波が発生し、宇宙空間を伝わることが知られている。重力波が通過することによって、鏡 M_x までの距離が $L(1+h)$ [m] になり、同時に鏡 M_y までの距離が $L(1-h)$ [m] になったとする。検出器 D では、光の到達時間に差が生じ、干渉によって光の強度が変化する。

装置全体は真空中に設置されているとする。光速を c とすると、鏡 M_x で反射する光は、往復する時間が ア だけ余計にかかることになるので、検出器での波 S_x として

$$S_x = A \sin \left\{ 2\pi\nu \left(t - \text{ア} \right) \right\}$$

となるでしょう。ここで、 A は光の振幅、 ν はレーザー光の振動数である。鏡 M_y で反射する光も同様にして S_y とすると、検出器 D での光は、重ね合わせの原理から、 $S_x + S_y$ となる。三角関数の和の公式

$$\sin A + \sin B = 2 \sin \left(\frac{A+B}{2} \right) \cos \left(\frac{A-B}{2} \right)$$

を用いると、

$$S_x + S_y = 2A \sin \left\{ 2\pi\nu \left(t - \frac{2L}{c} \right) \right\} \cos \left(\text{イ} \right)$$

となる。時間を含まない部分は振幅とみなせるので、 h の大きさによって検出器 D の明るさが変化することがわかる。初めに検出器 D で最大の輝度だった合成波が、打ち消しあって暗くなる条件は、整数 n を用いて イ = ウ $\times \pi$ のときである。

問 重力波はとても弱く、振幅 h の値は、とても小さい。 $L = 3 \times 10^3$ m の干渉計をつくり、波長 $\lambda = c/\nu = 1.0 \times 10^{-6}$ m のレーザー光線を用いるとき、検出器 D で、最大輝度から初めて暗くなるほどの変化をおよぼす h の大きさはいくらか。

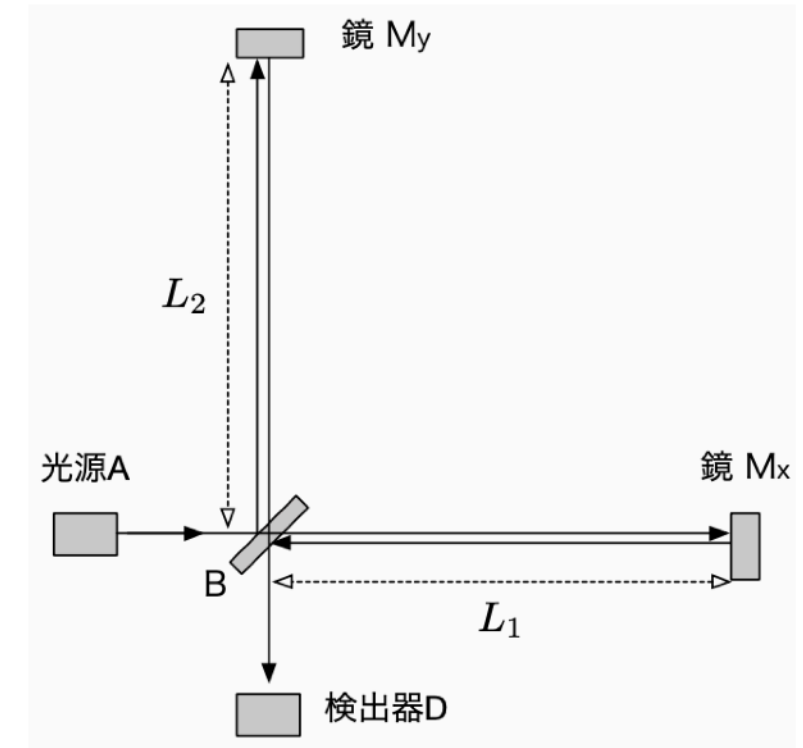


図 24: 干渉計の構造。

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 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-

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

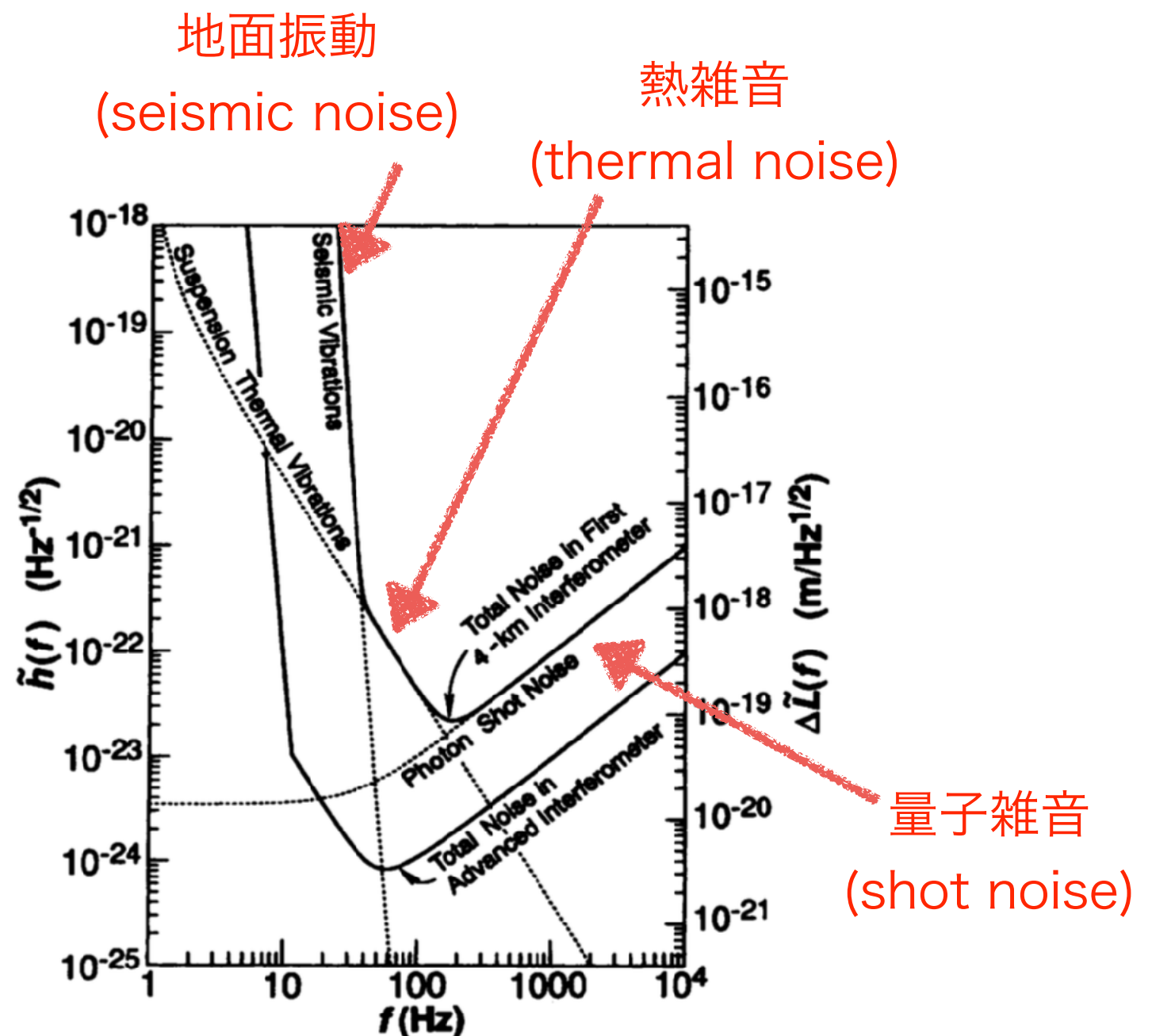


Fig. 7. The expected total noise in each of LIGO's first 4-km interferometers (upper solid curve) and in a more advanced interferometer (lower solid curve). The dashed curves show various contributions to the first interferometer's noise.

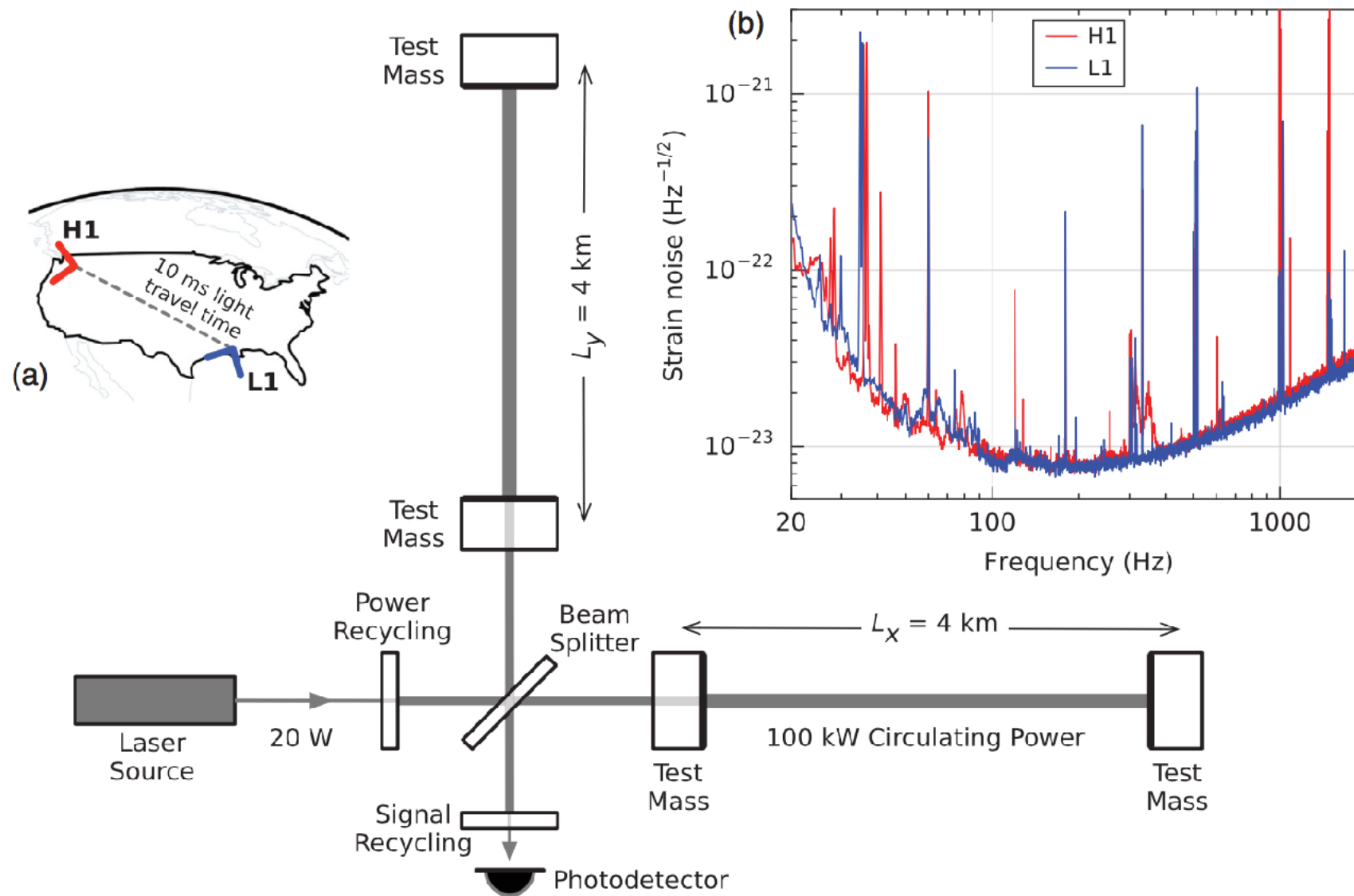
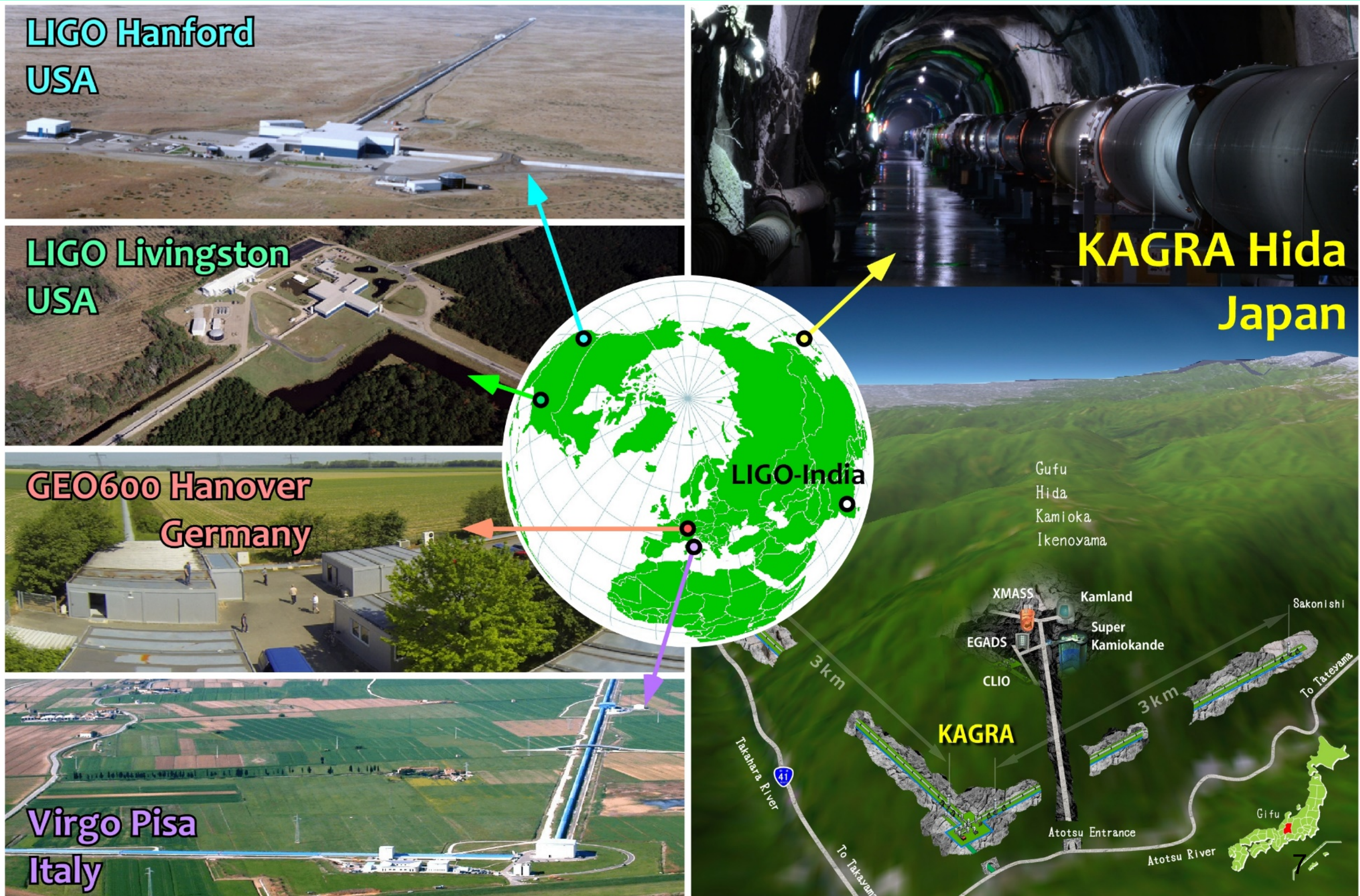


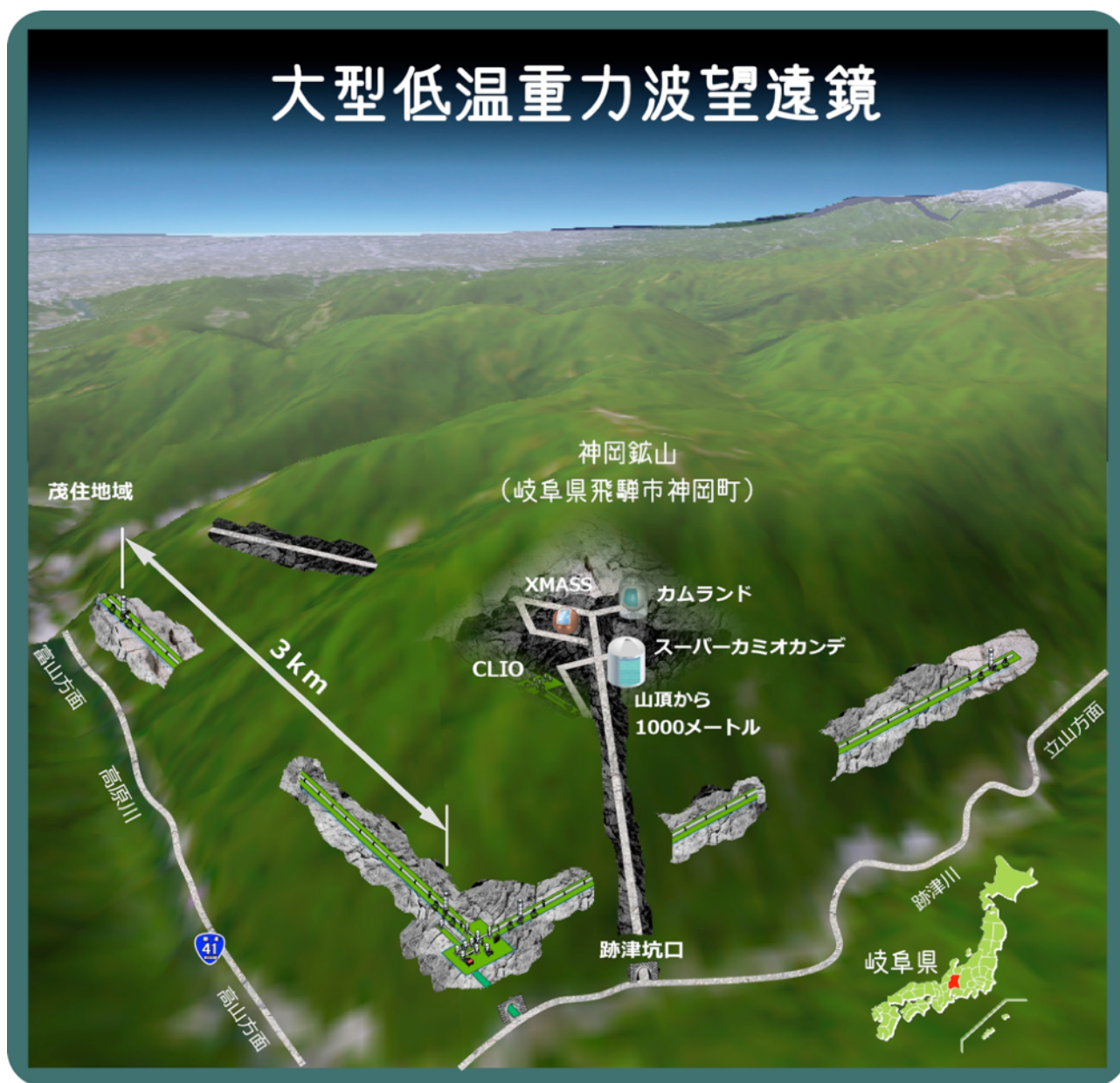
FIG. 3. Simplified diagram of an Advanced LIGO detector (not to scale). A gravitational wave propagating orthogonally to the detector plane and linearly polarized parallel to the 4-km optical cavities will have the effect of lengthening one 4-km arm and shortening the other during one half-cycle of the wave; these length changes are reversed during the other half-cycle. The output photodetector records these differential cavity length variations. While a detector's directional response is maximal for this case, it is still significant for most other angles of incidence or polarizations (gravitational waves propagate freely through the Earth). *Inset (a)*: Location and orientation of the LIGO detectors at Hanford, WA (H1) and Livingston, LA (L1). *Inset (b)*: The instrument noise for each detector near the time of the signal detection; this is an amplitude spectral density, expressed in terms of equivalent gravitational-wave strain amplitude. The sensitivity is limited by photon shot noise at frequencies above 150 Hz, and by a superposition of other noise sources at lower frequencies [47]. Narrow-band features include calibration lines (33–38, 330, and 1080 Hz), vibrational modes of suspension fibers (500 Hz and harmonics), and 60 Hz electric power grid harmonics.

3. Detectors

LIGO, Virgo, KAGRA



KAGRA (かぐら : 大型低温重力波望遠鏡)



KAGRA (かぐら：大型低温重力波望遠鏡)

Kamioka Gravitational wave detector

大型低温重力波望遠鏡



神岡鉱山
(岐阜県飛騨市神岡町)



望遠鏡の大きさ：基線長 3km

望遠鏡を神岡鉱山内に建設

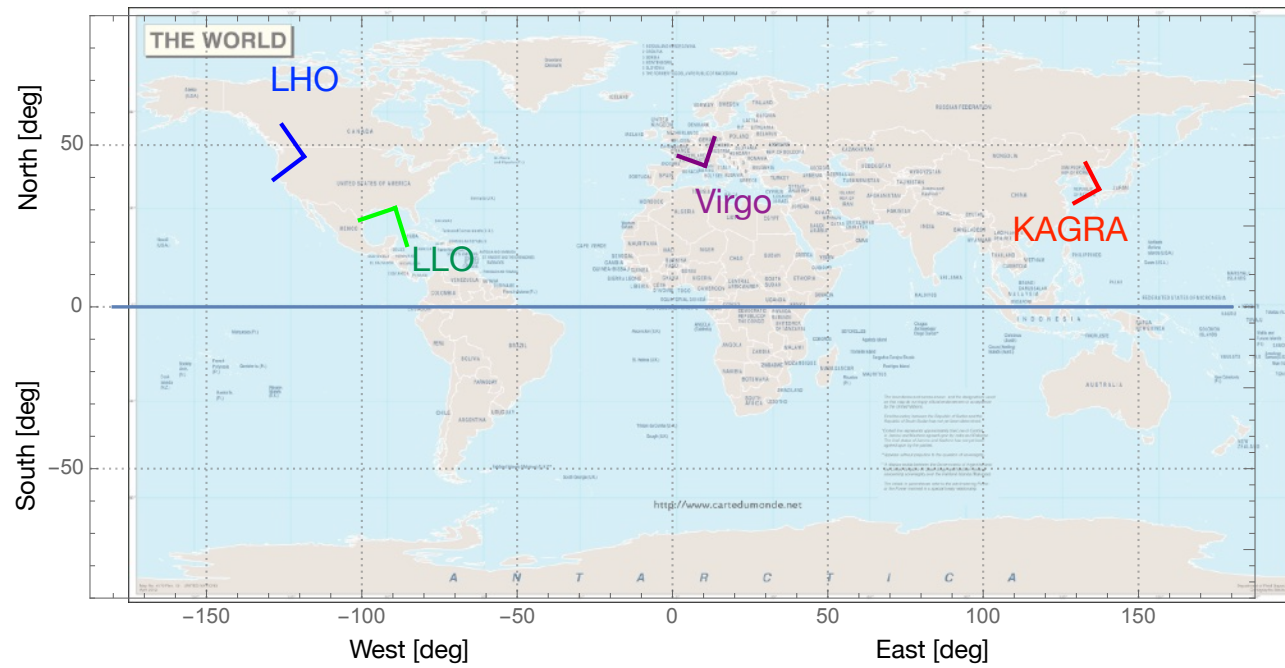
鏡をマイナス250度 (20K) まで
冷却

熱雑音を小さくするため

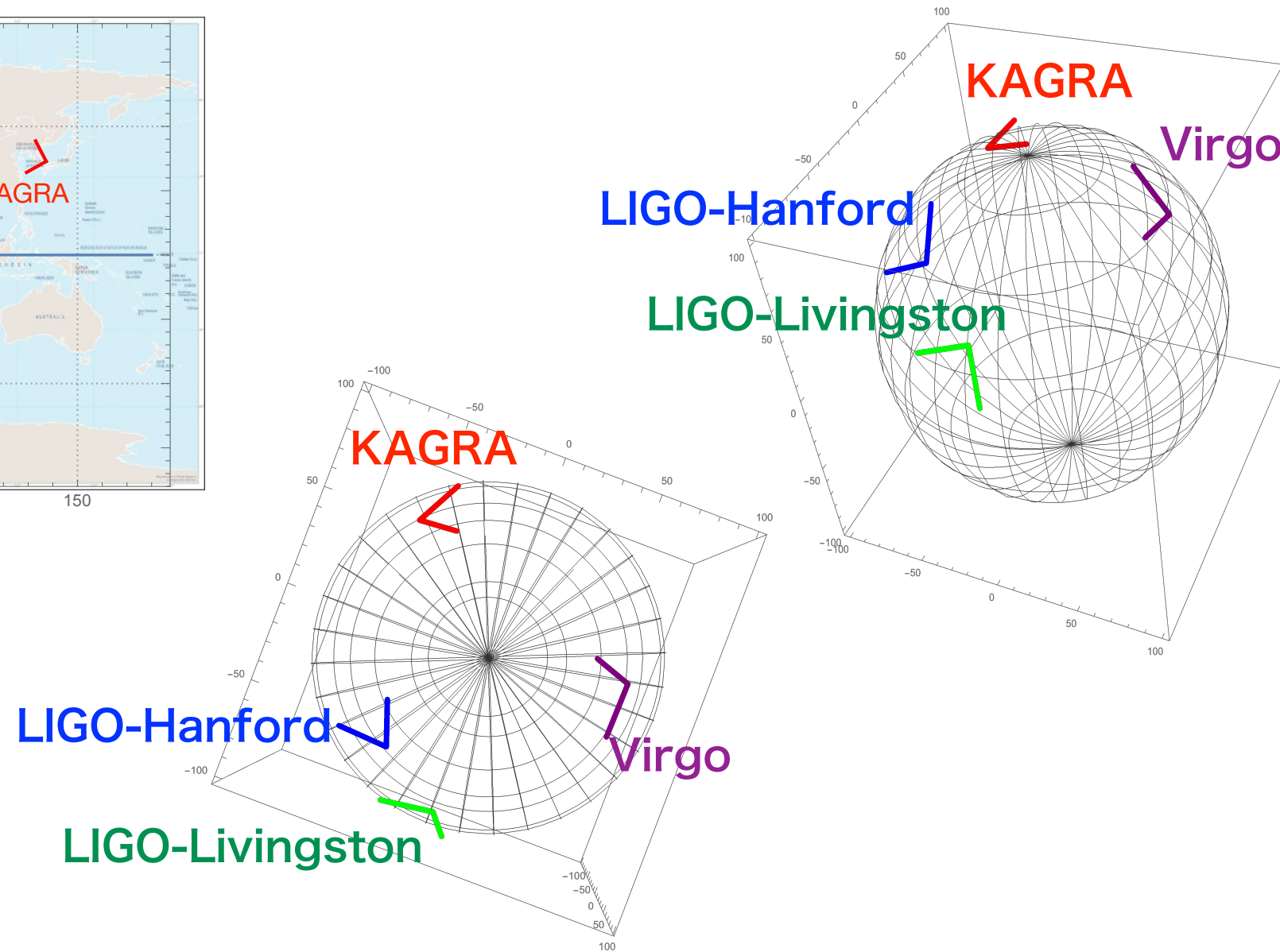
鏡の材質としてサファイア

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

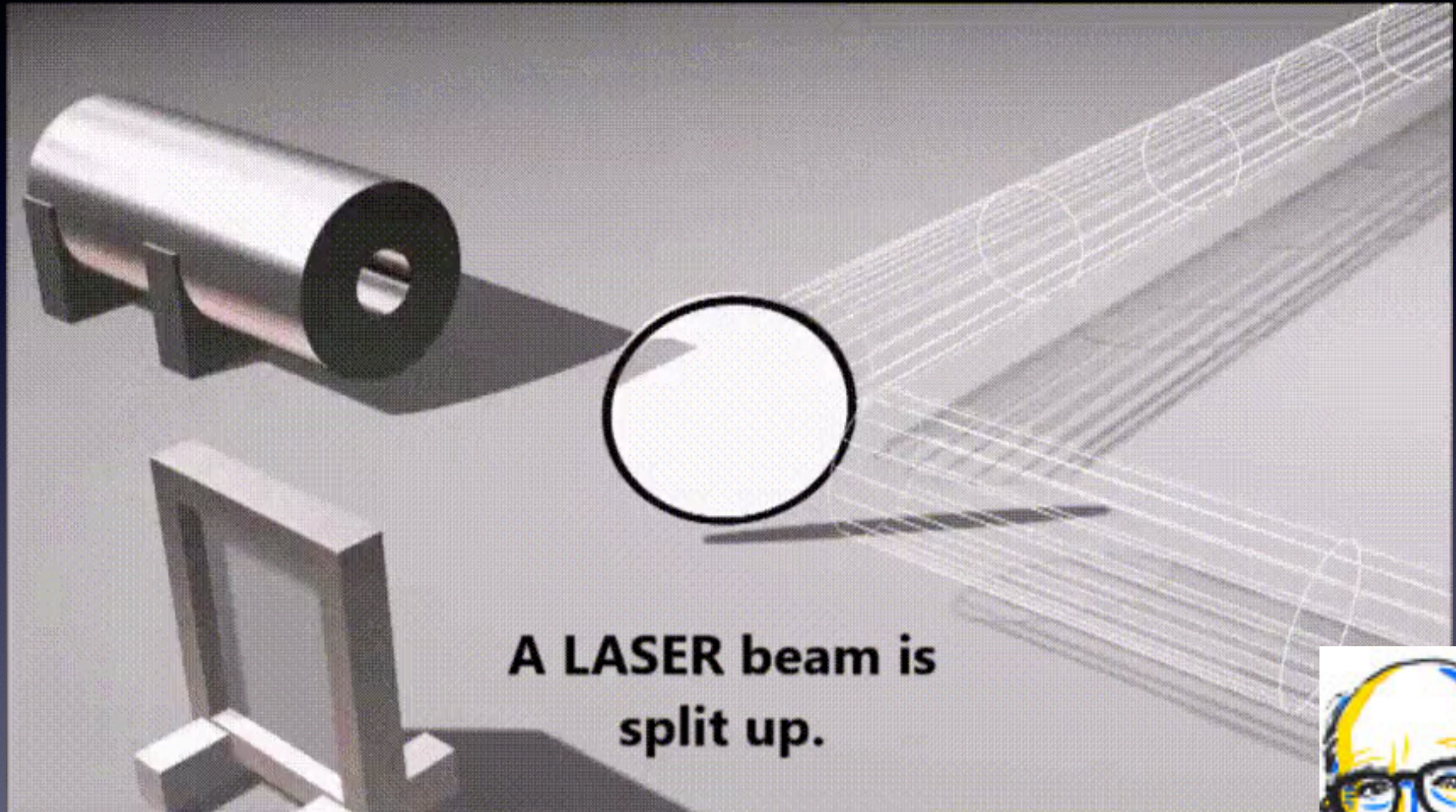
Fourth 2nd generation detector on the Earth



more precise GW source localization
 more certain GW source parameters
 more chances to hunt GW events
 more information of GW polarization
 more ideas for GW researches
 more man power



レーザー干渉計による重力波検出のしくみ



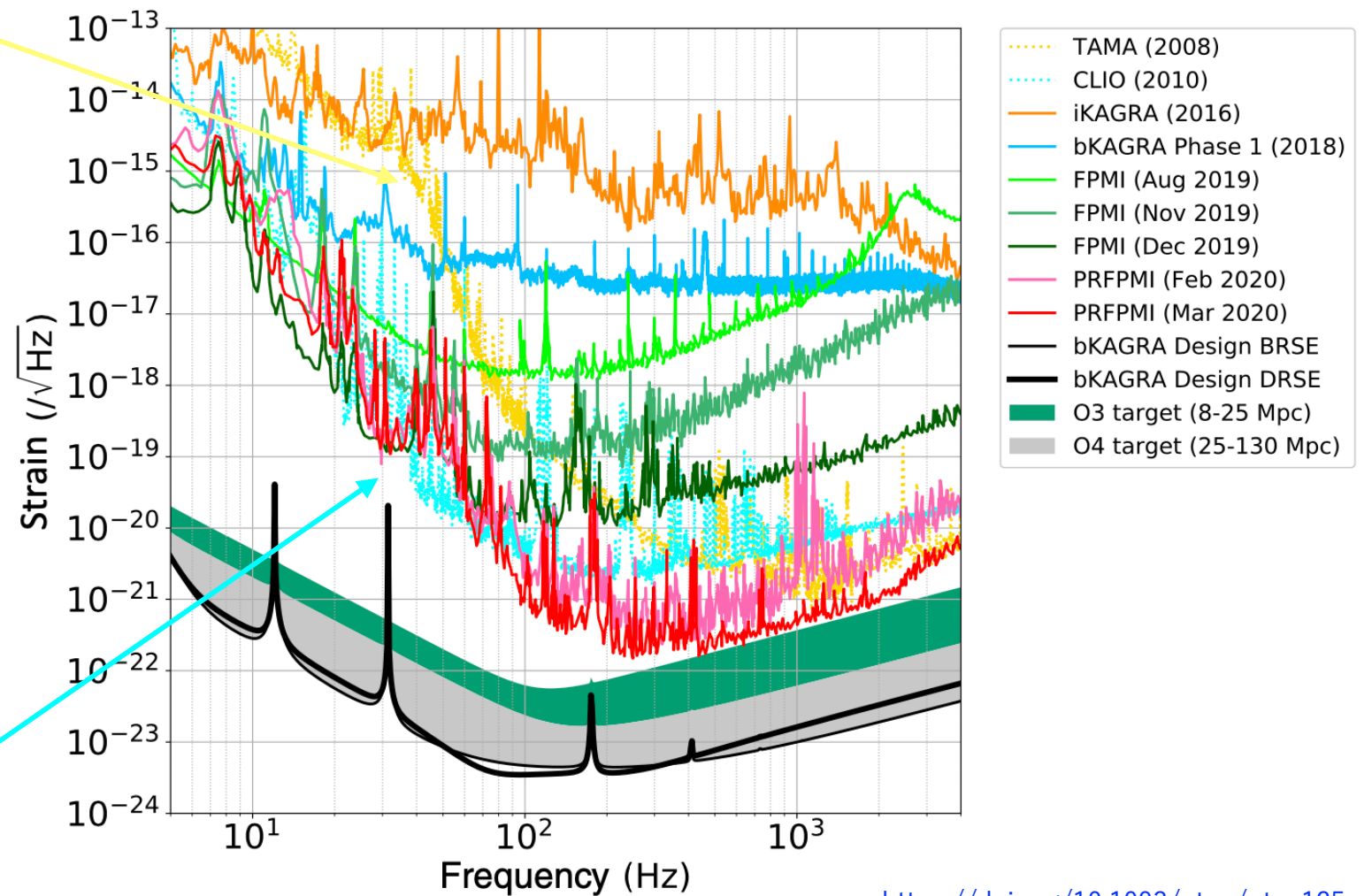
KAGRA (Kamioka Gravitational-Wave Observatory)



TAMA 300 m (NAOJ, Tokyo area, 2008)



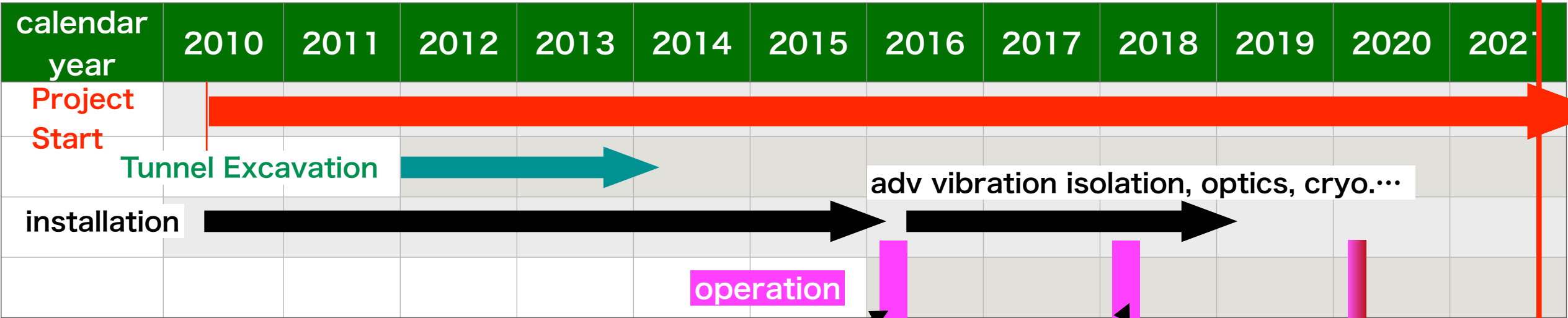
CLIO 20 m (Kamioka, 2010)



<https://doi.org/10.1093/ptep/ptaa125>

[arXiv: 2005.05574](https://arxiv.org/abs/2005.05574)

Brief History of KAGRA



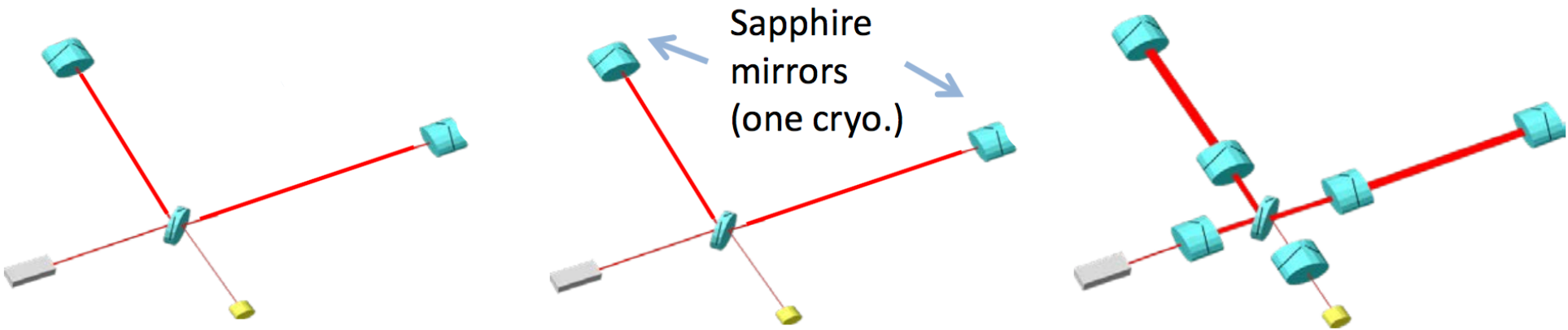
iKAGRA = initial KAGRA
bKAGRA = baseline KAGRA

iKAGRA

bKAGRA
phase-1

bKAGRA
phase-2

O3



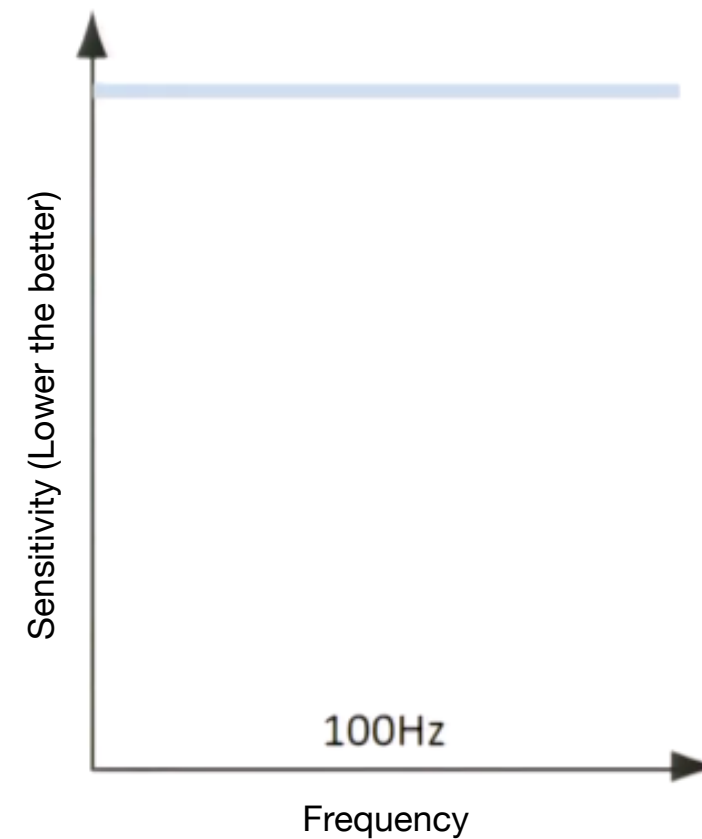
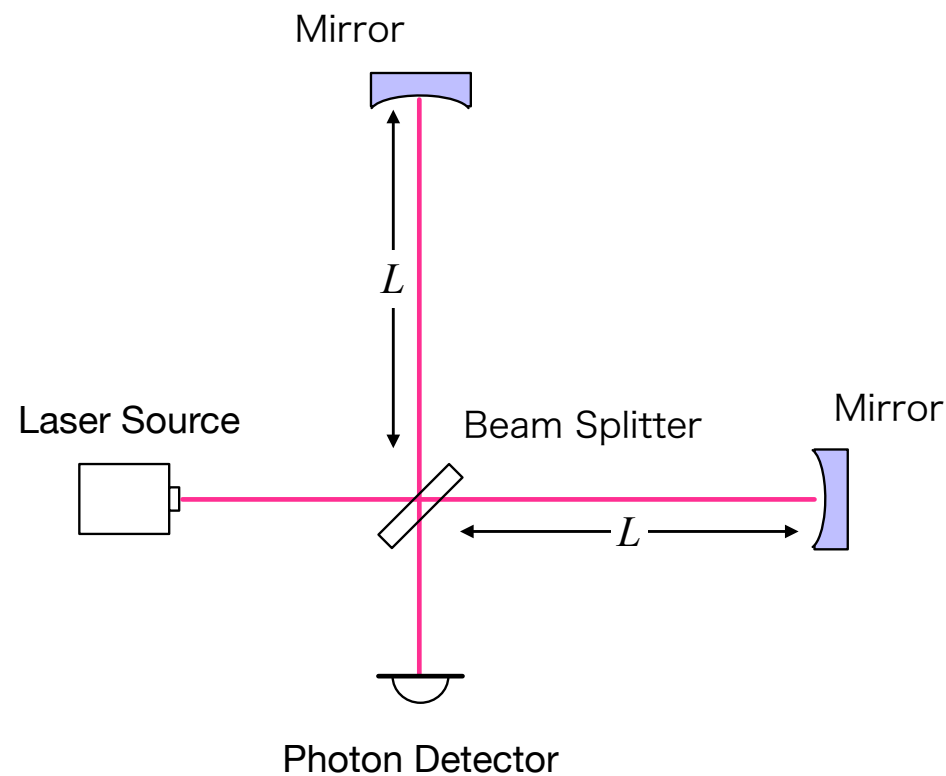
[arXiv:1712.00148]

[arXiv:1901.03569]

Basic Idea of the Interferometer

“Michelson” interferometer

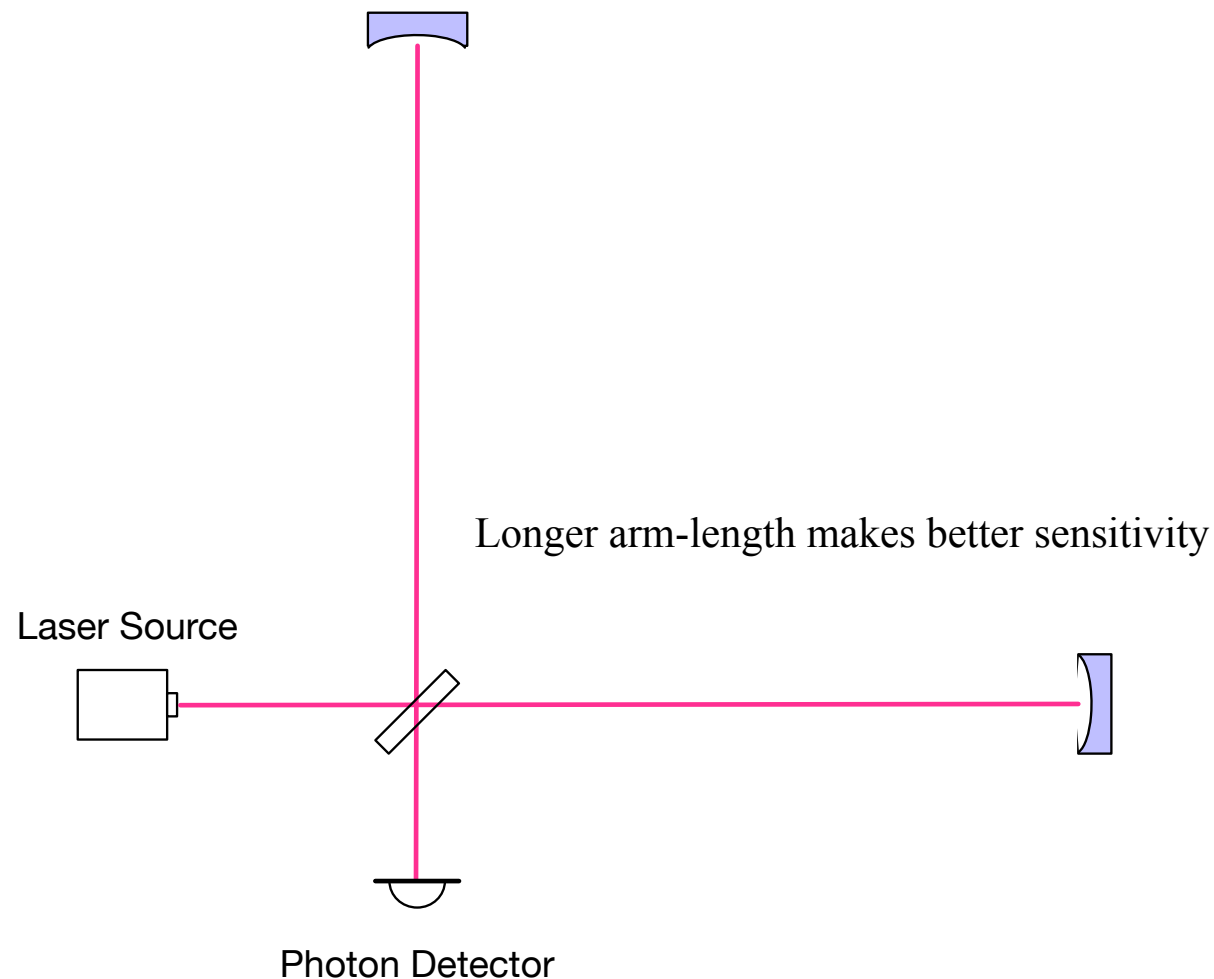
Longer arm-length makes better sensitivity



長い腕が欲しい. 750km位の長さ

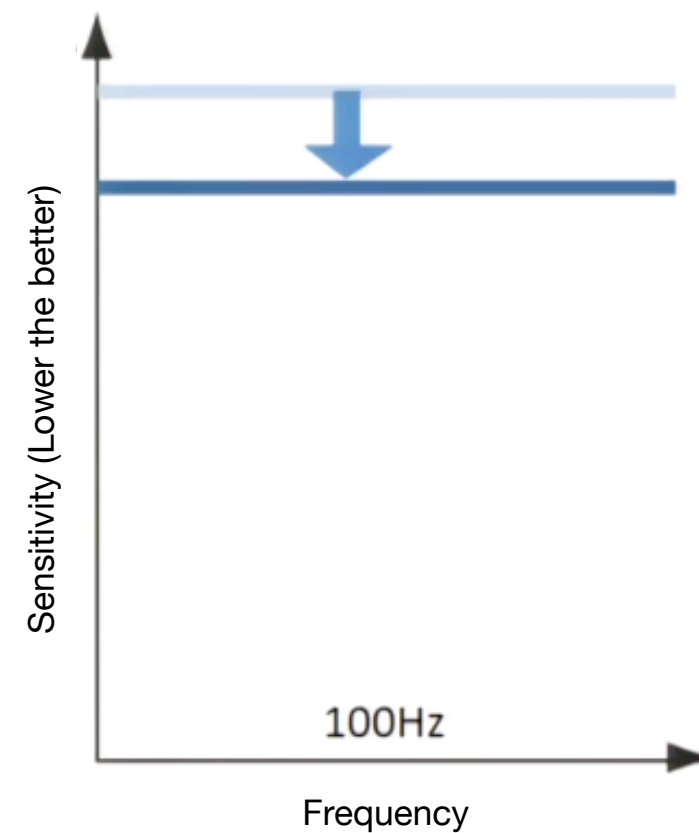
Basic Idea of the Interferometer

“Michelson” interferometer



Longer arm-length makes better sensitivity

Best sensitivity for 100 Hz is $L = 750$ km



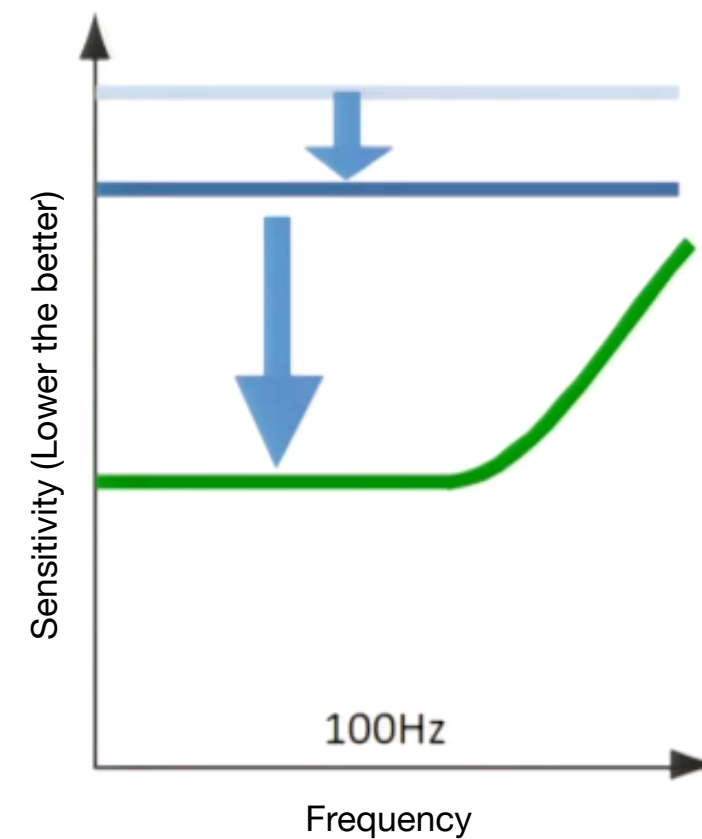
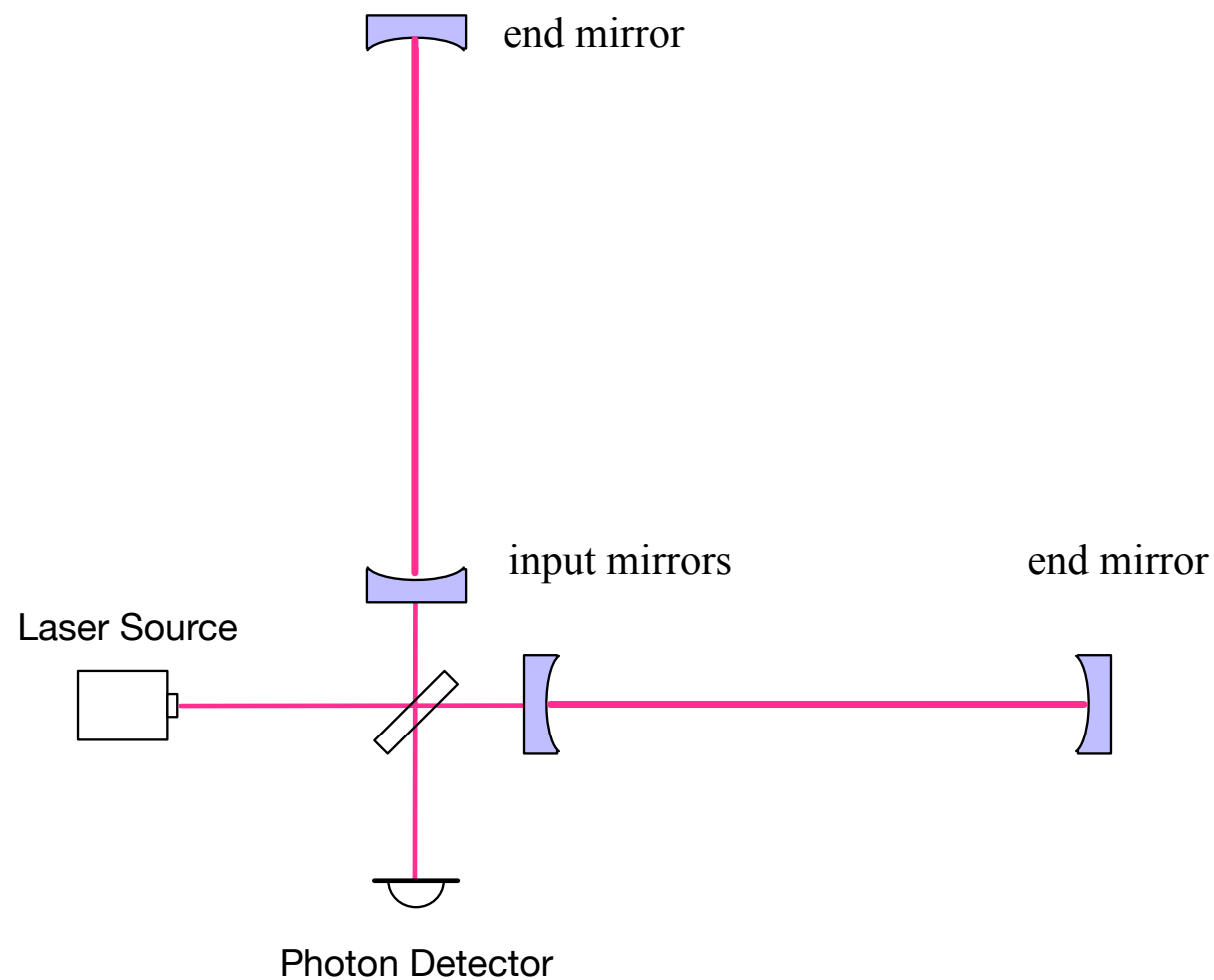
長い腕が欲しい. 750km位の長さ

Basic Idea of the Interferometer

“Fabry-Pérot Michelson” interferometer

Longer arm-length makes better sensitivity

Best sensitivity for 100 Hz is $L = 750$ km



Not so good for high freq.
due to GW cancellation.

長い腕が欲しい. 750km位の長さ

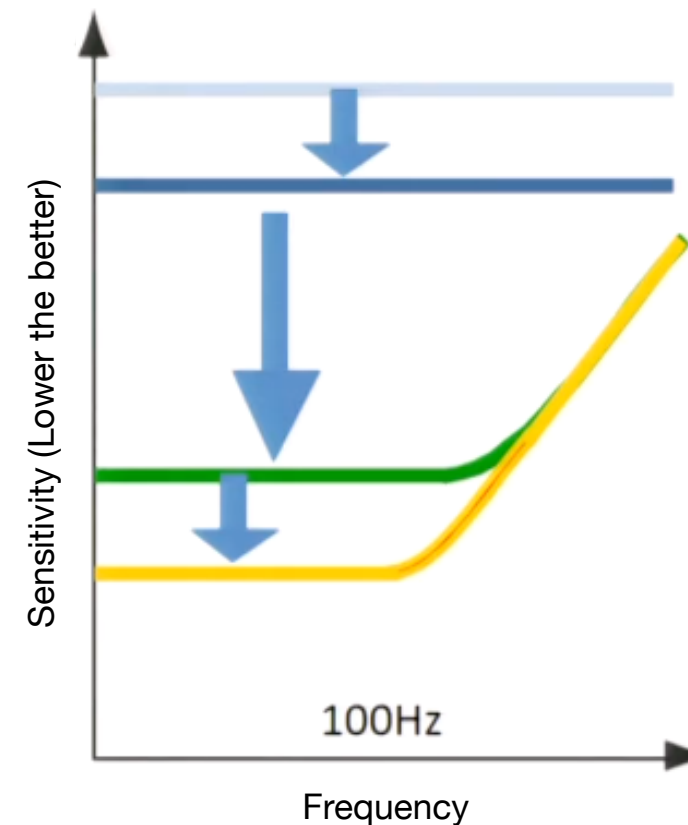
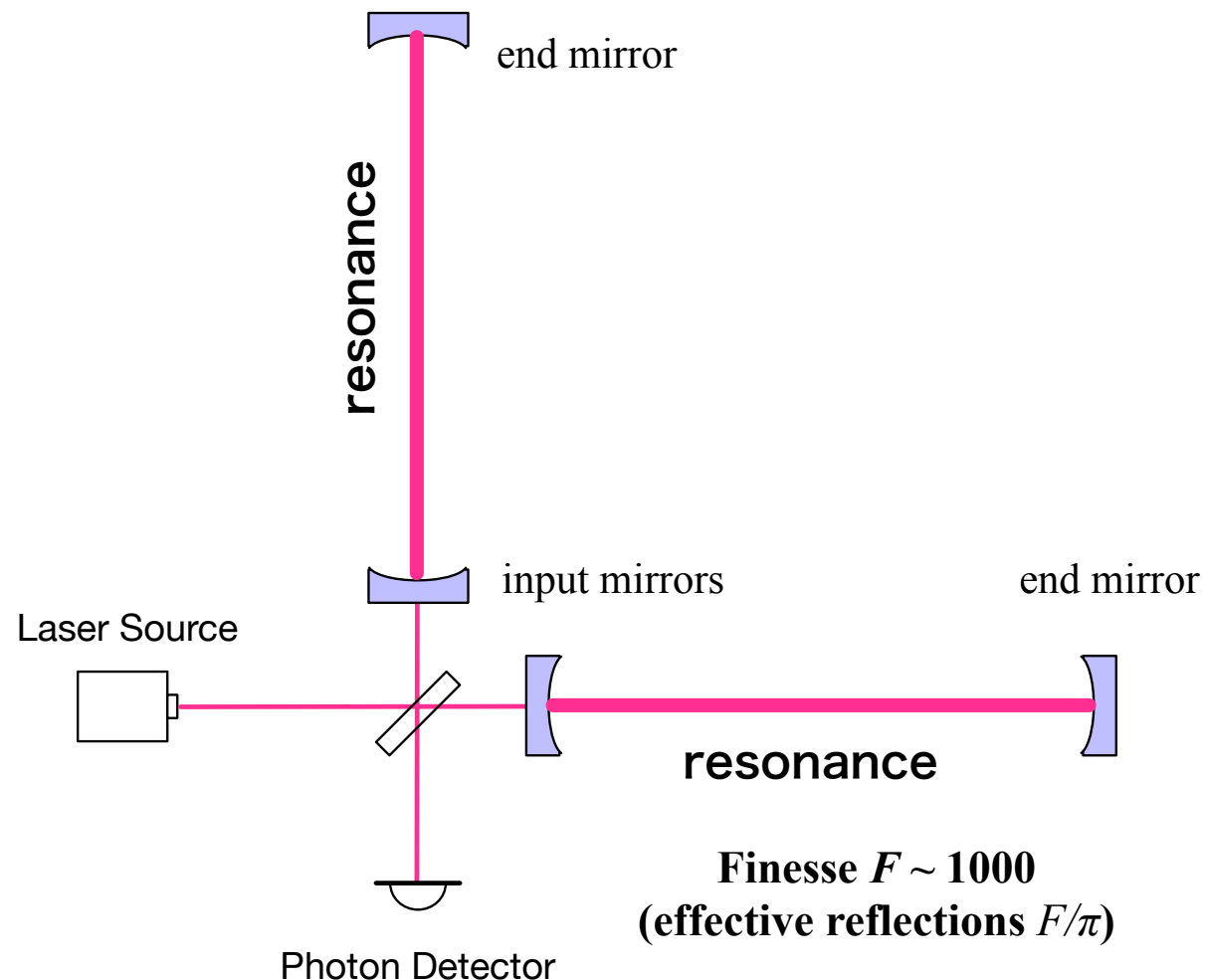
▶ 300回往復させよう

Basic Idea of the Interferometer

“Fabry-Pérot Michelson” interferometer

Longer arm-length makes better sensitivity

Best sensitivity for 100 Hz is $L = 750$ km



Not so good for high freq.
due to GW cancellation.

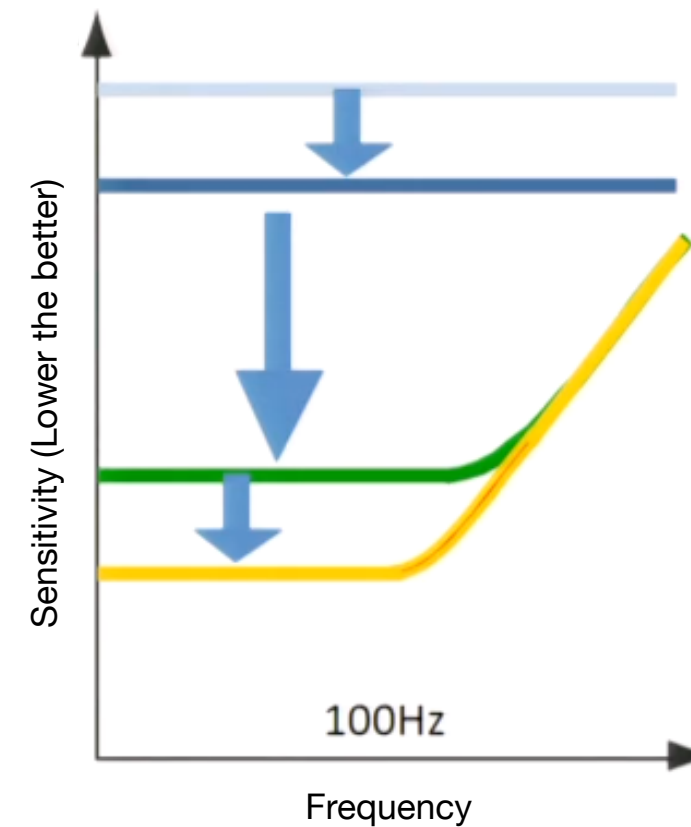
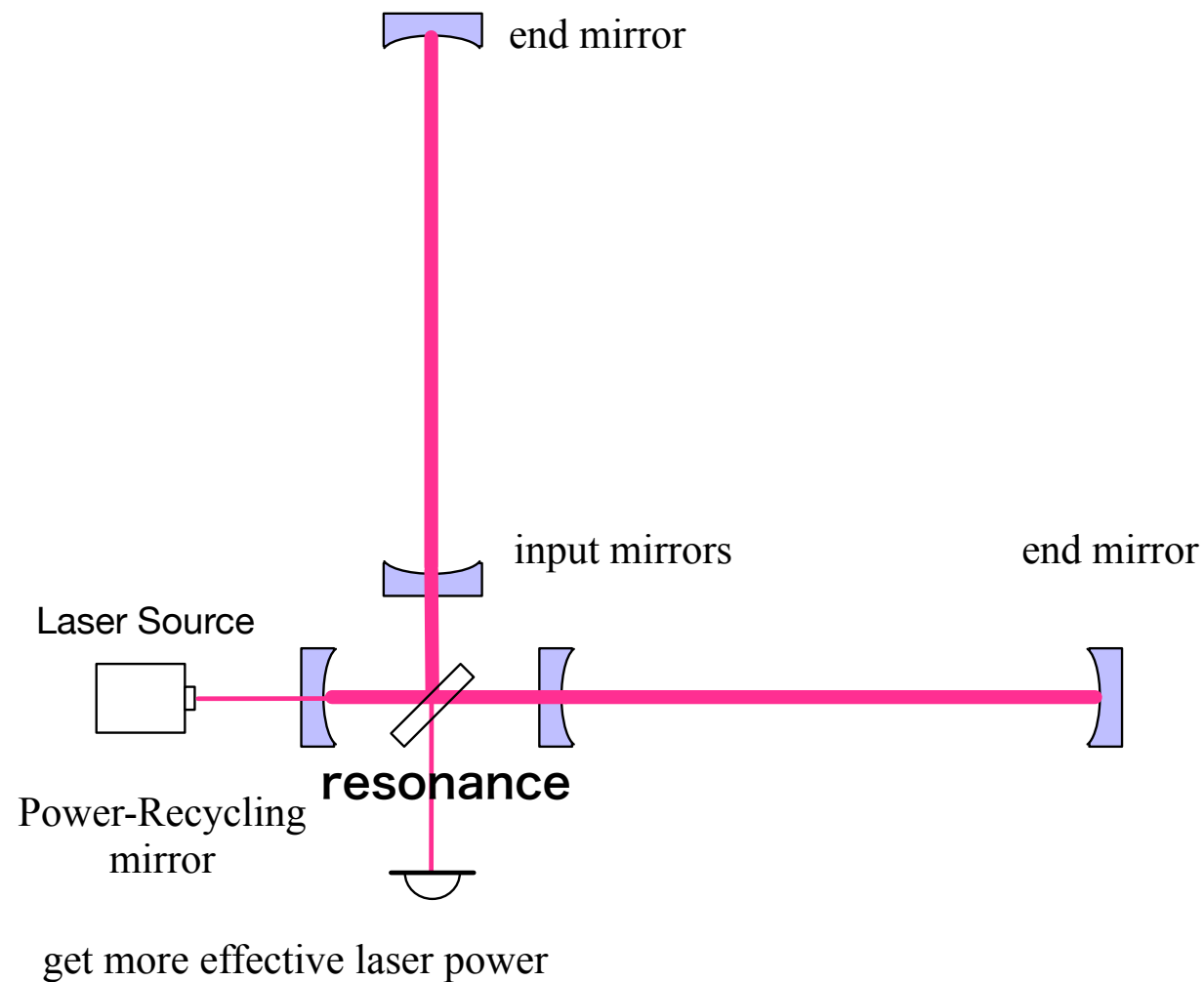
High finesse introduces
optical losses at mirrors

長い腕が欲しい. 750km位の長さ

▶ 300回往復させよう

Basic Idea of the Interferometer

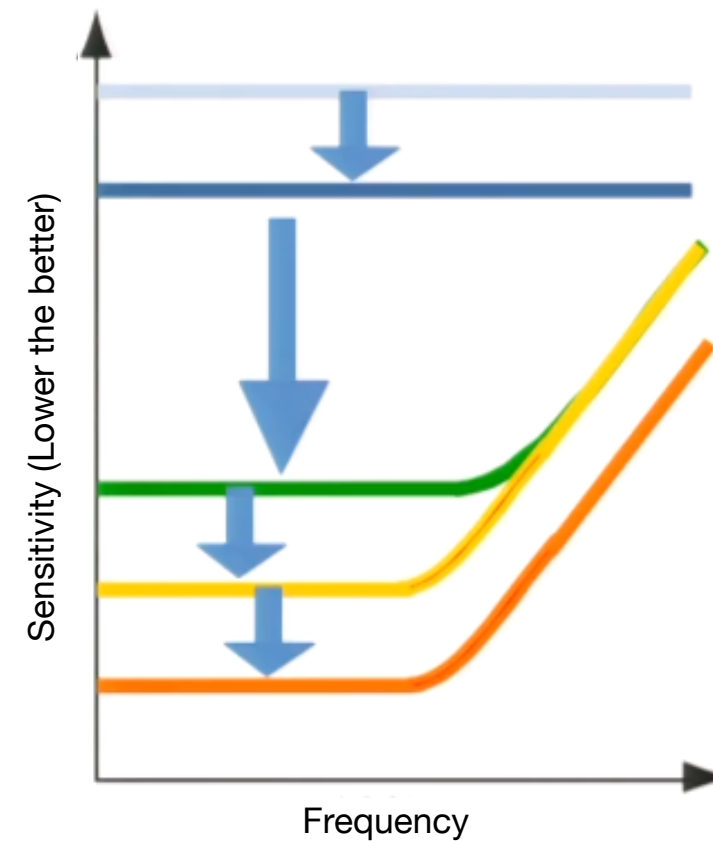
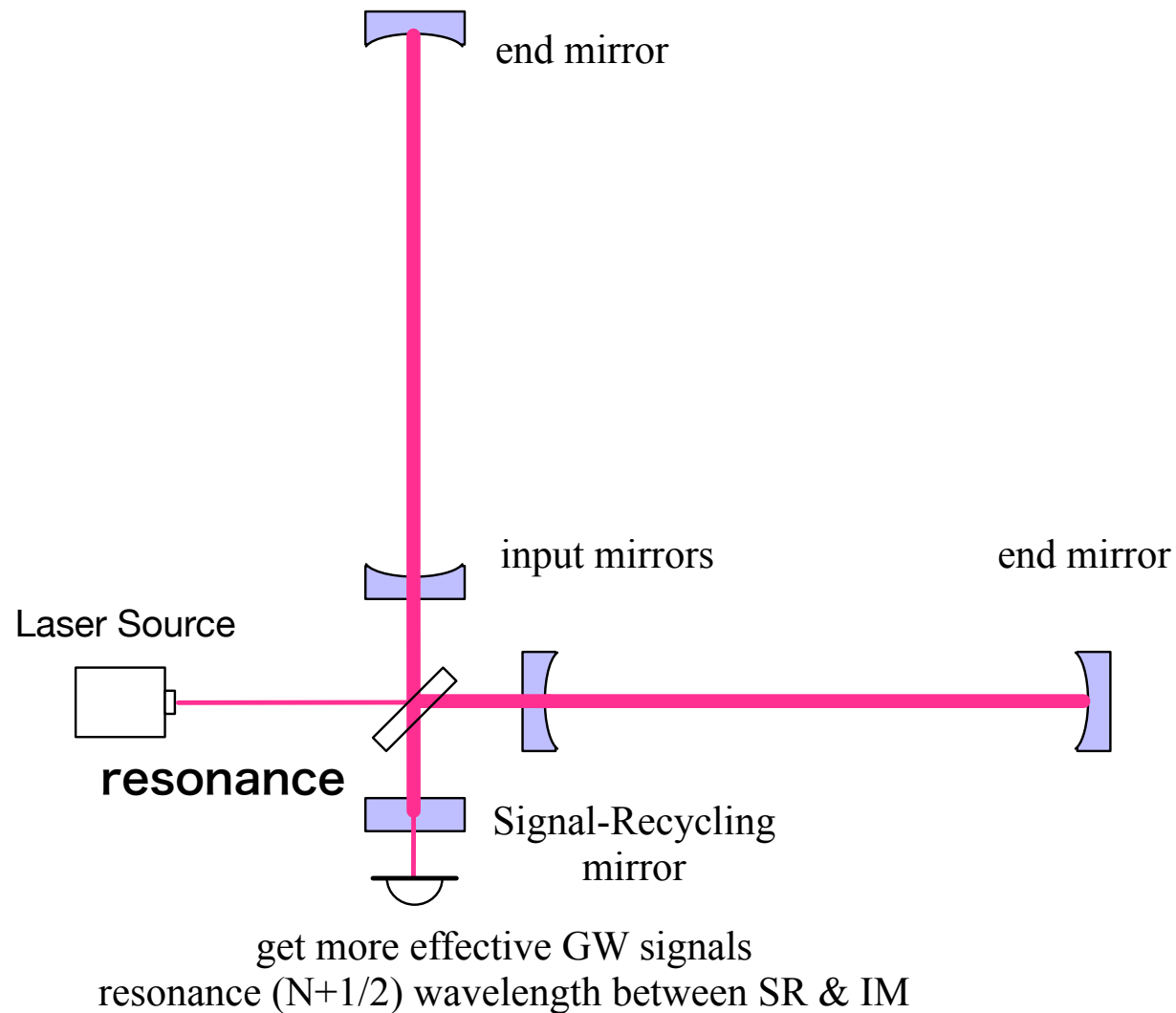
“Power-Recycled” Fabry-Pérot Michelson interferometer (TAMA300, initial LIGO, Virgo)



強いレーザーが欲しい。 ▶ 100回共鳴させよう

Basic Idea of the Interferometer

“**Signal-Recycled**” Fabry-Pérot Michelson interferometer (GEO600)



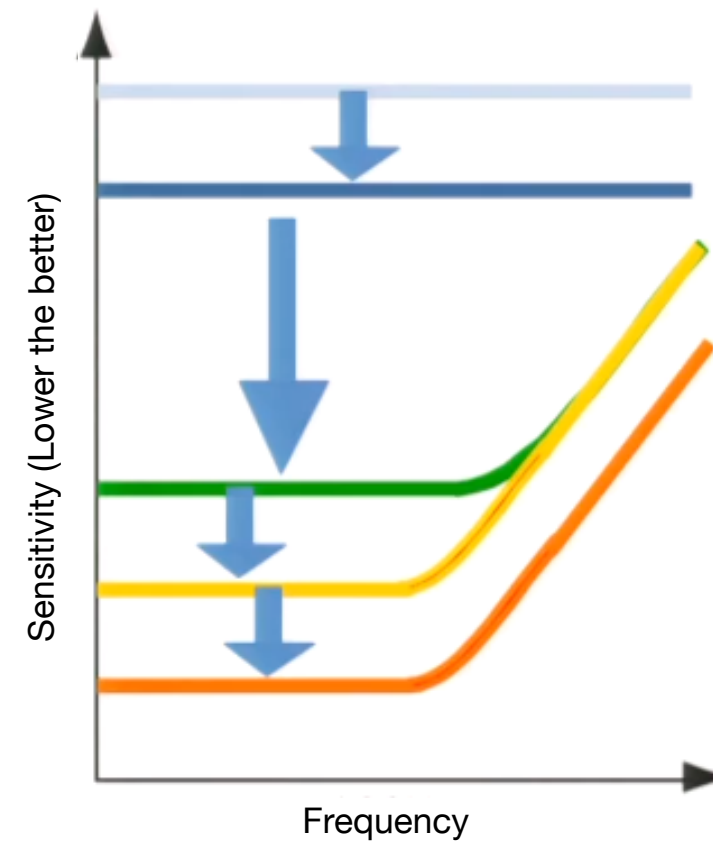
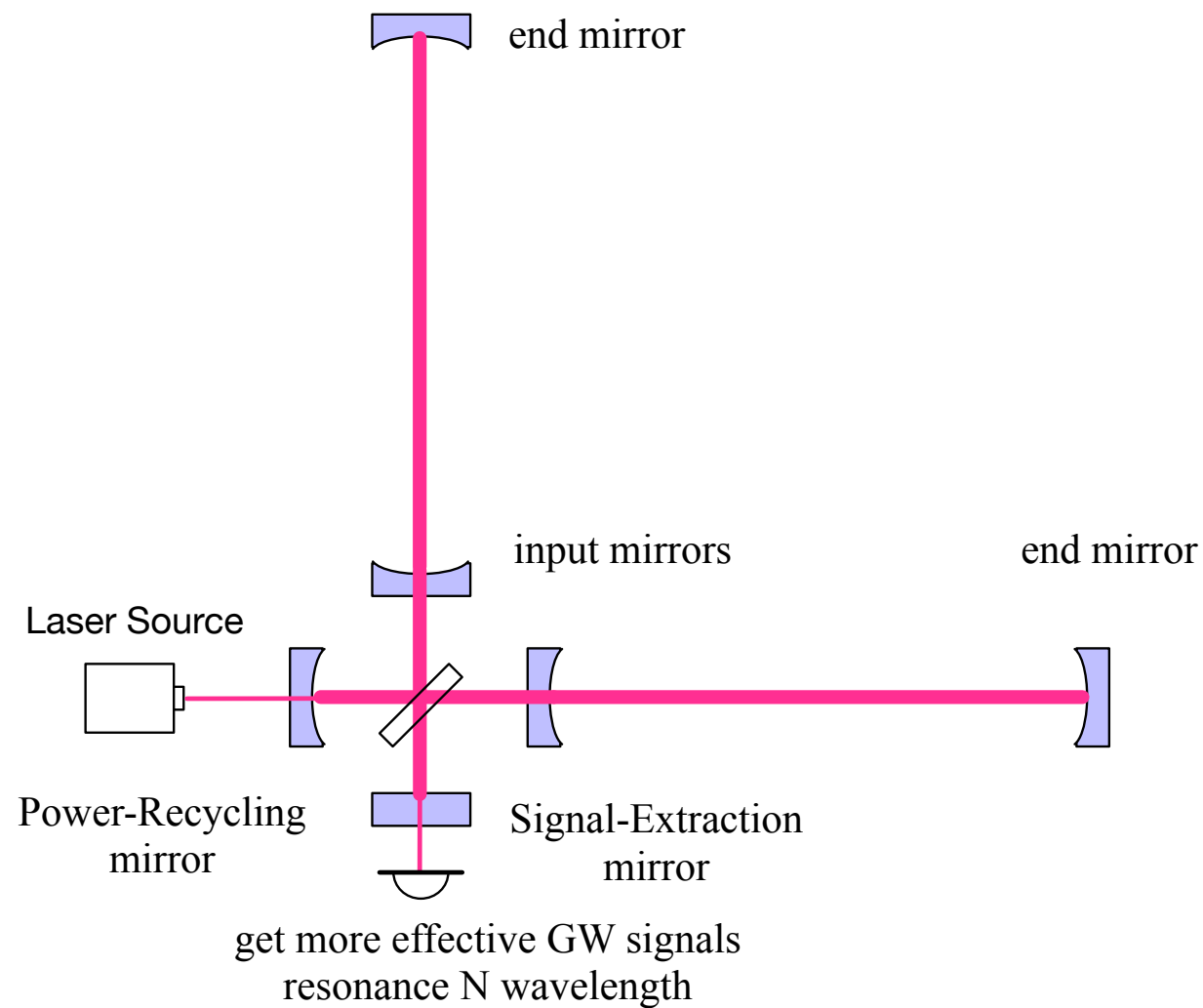
get more finesse
with SR mirror

信号がまだ弱い

► 信号も共鳴させよう

Basic Idea of the Interferometer

“**Resonant Side-band Extraction**” interferometer (KAGRA, Advanced LIGO, Advanced Virgo)

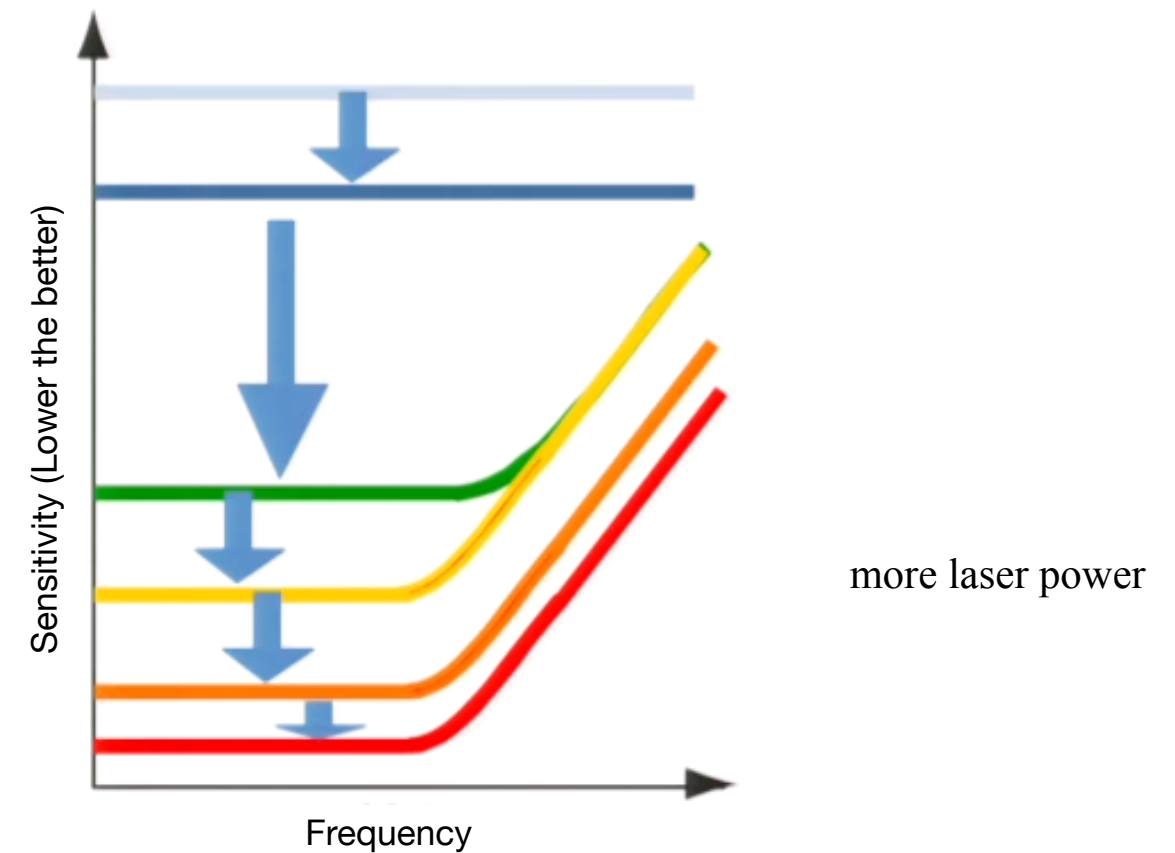
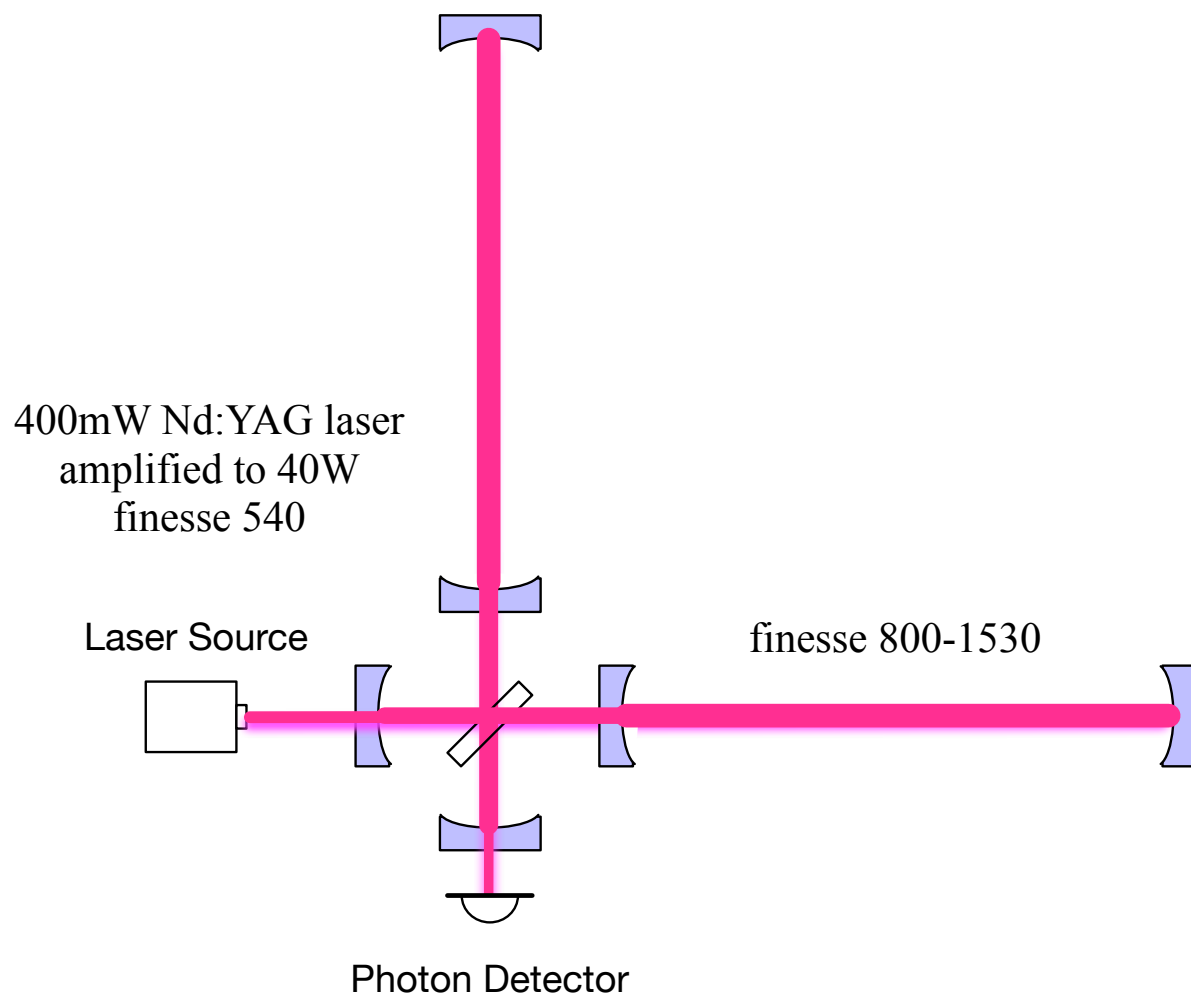


keep at relative low finesse
with SE mirror

for optical losses
for GW cancellation

Basic Idea of the Interferometer

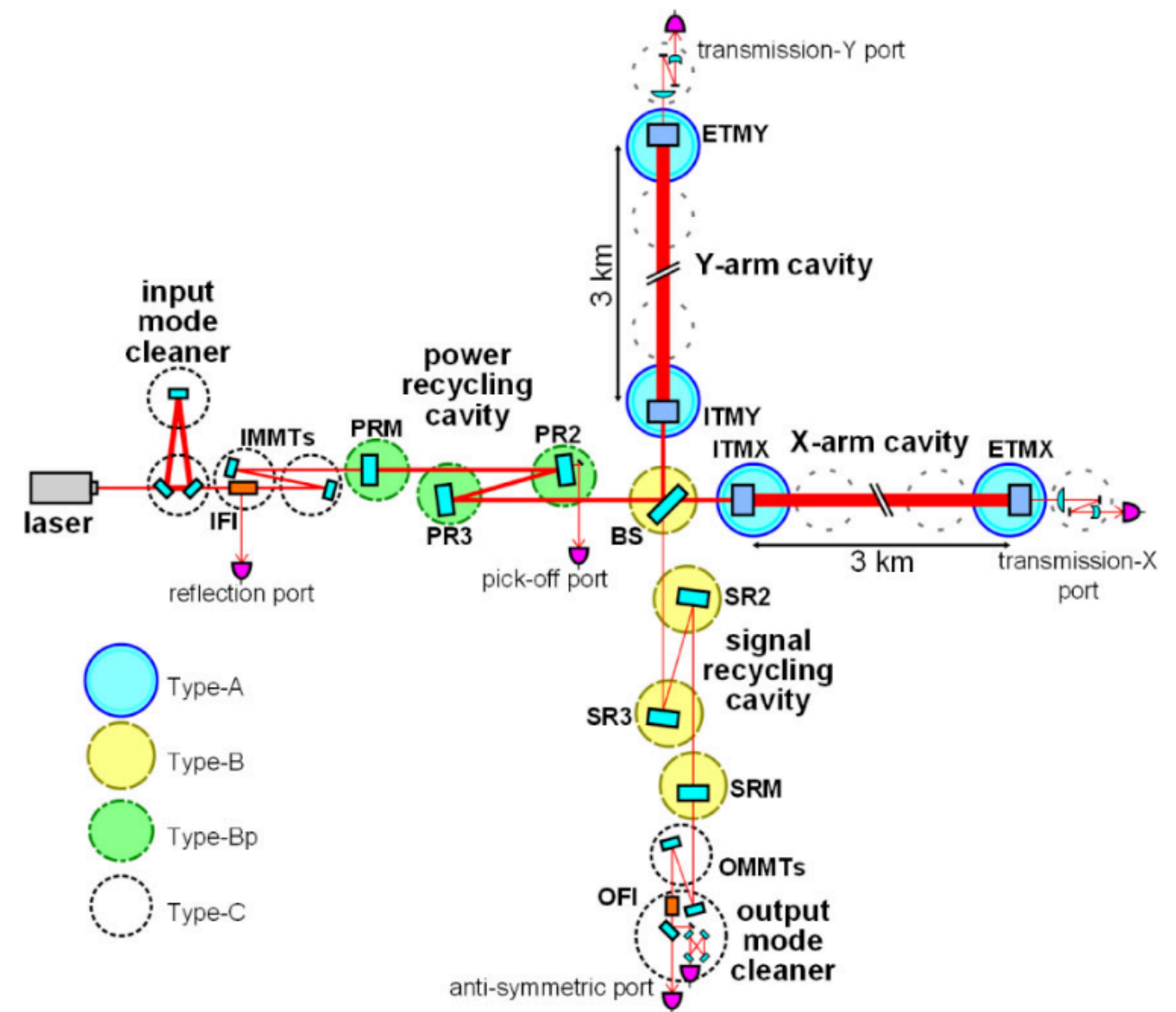
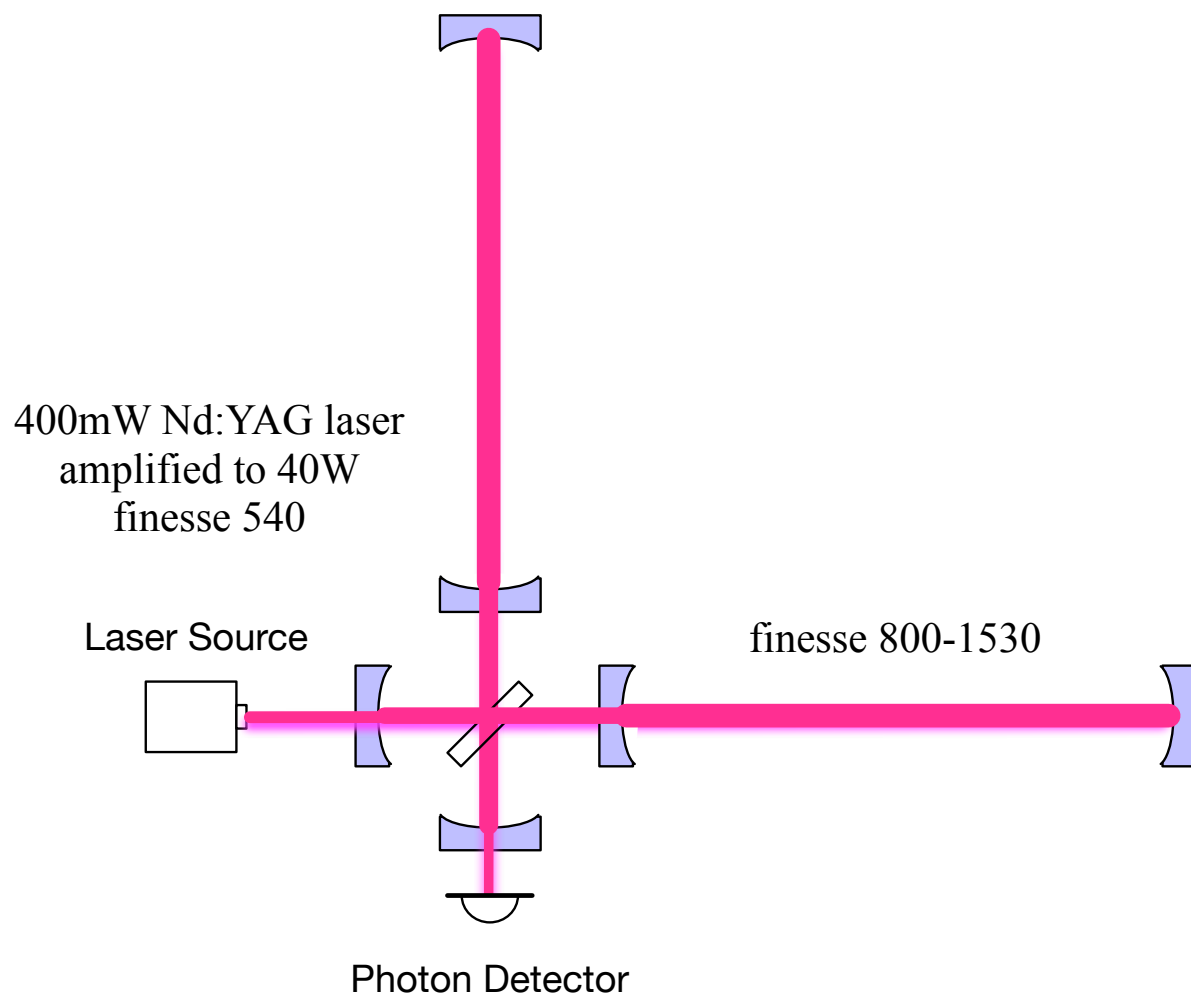
“**Resonant Side-band Extraction**” interferometer (KAGRA, Advanced LIGO, Advanced Virgo)



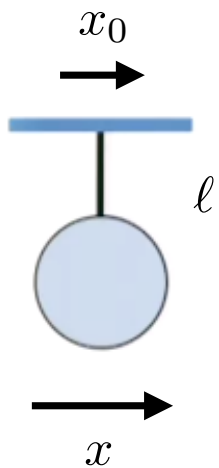
レーザーがまだ弱い ▶ 強いレーザーを開発

Basic Idea of the Interferometer

“Resonant Side-band Extraction” interferometer



Basic Idea of Suspension System

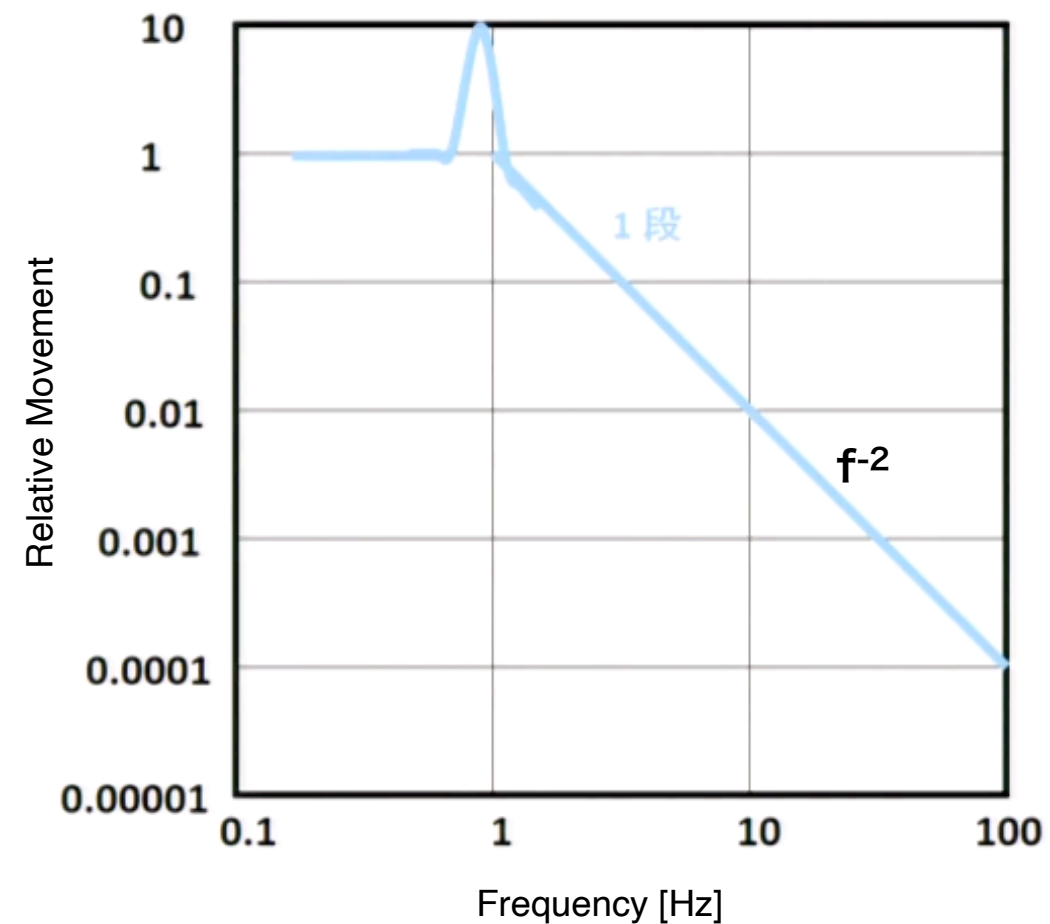


$$M\ddot{x} = -\frac{Mg}{\ell}(x - x_0)$$

$$x/x_0 = \frac{f_0^2}{f_0^2 - f^2}, \text{ where } f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{\ell}}$$

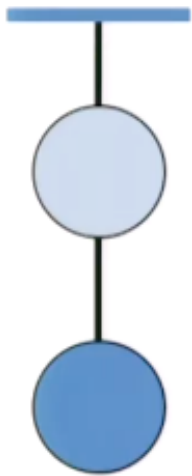
$$\delta x_{\text{seis}} \sim \left(\frac{1\text{Hz}}{f}\right)^2 \times 10^{-7} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}}$$

$$\text{For } 100 \text{ Hz, } \delta x_{\text{seis}} \sim 10^{-11} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}}.$$



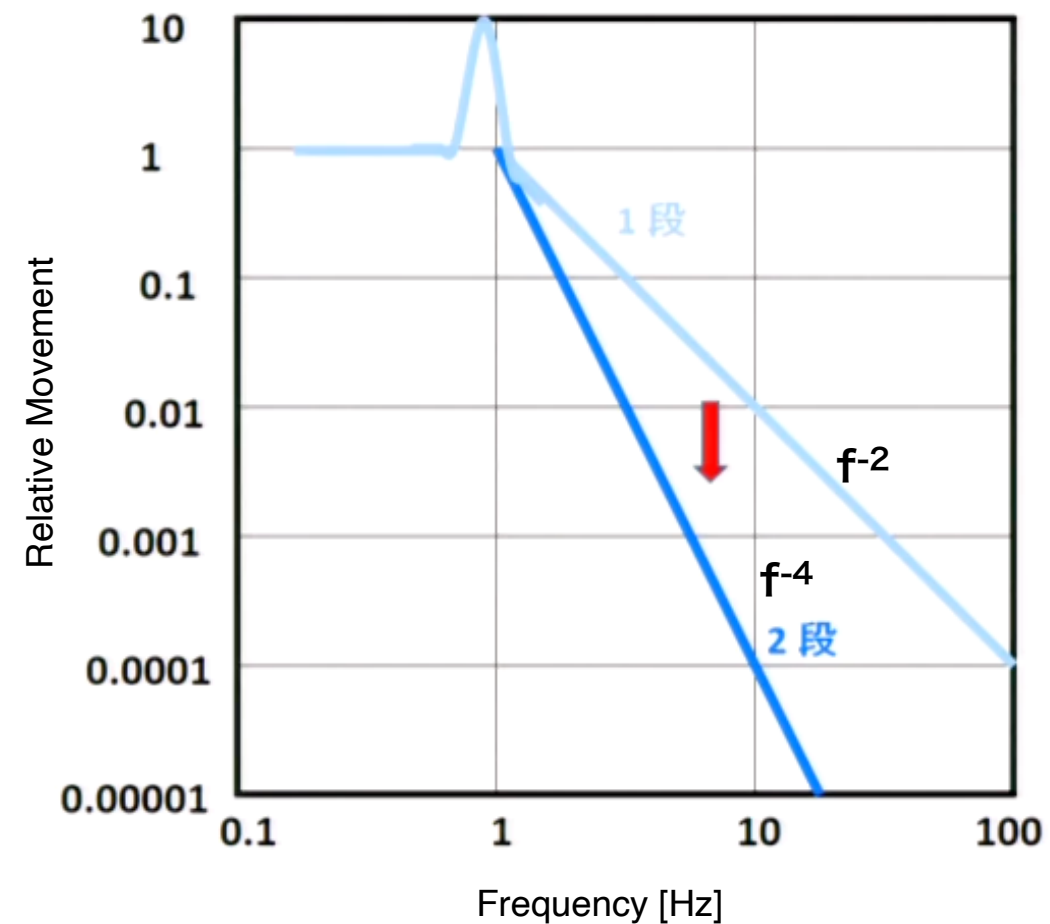
鏡が地面振動で揺れたら困る ▶ 吊り下げよう

Basic Idea of Suspension System



$$M\ddot{x} = -\frac{Mg}{\ell}(x - x_0)$$

$$x/x_0 = \frac{f_0^2}{f_0^2 - f^2}, \text{ where } f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{\ell}}$$



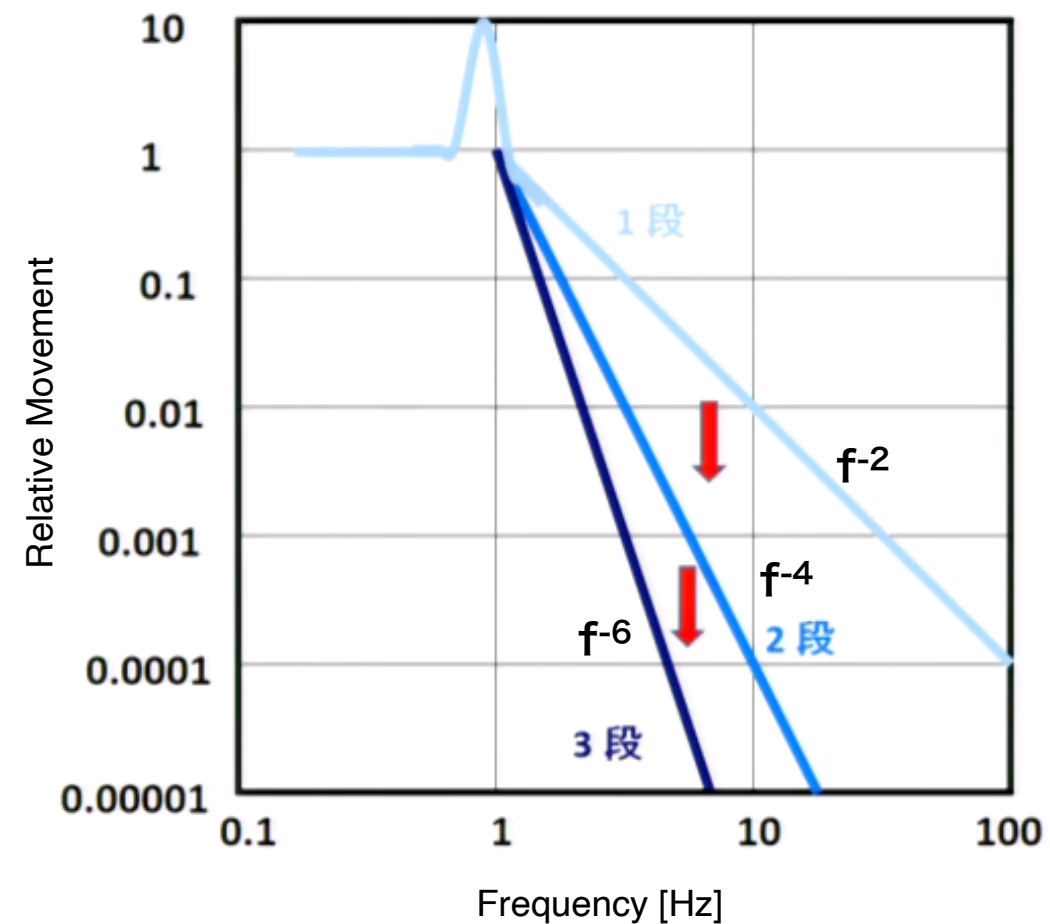
高周波振動抑えたい ▶ 2 段にしよう

Basic Idea of Suspension System



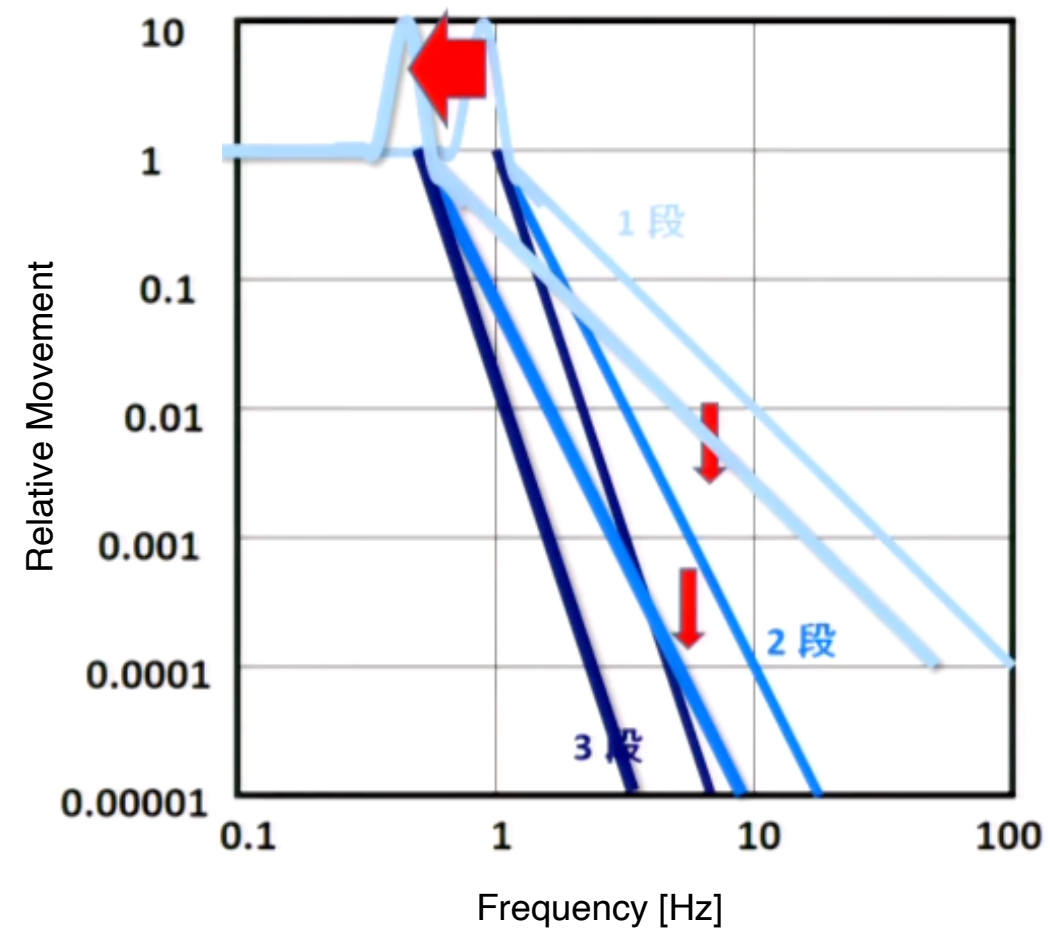
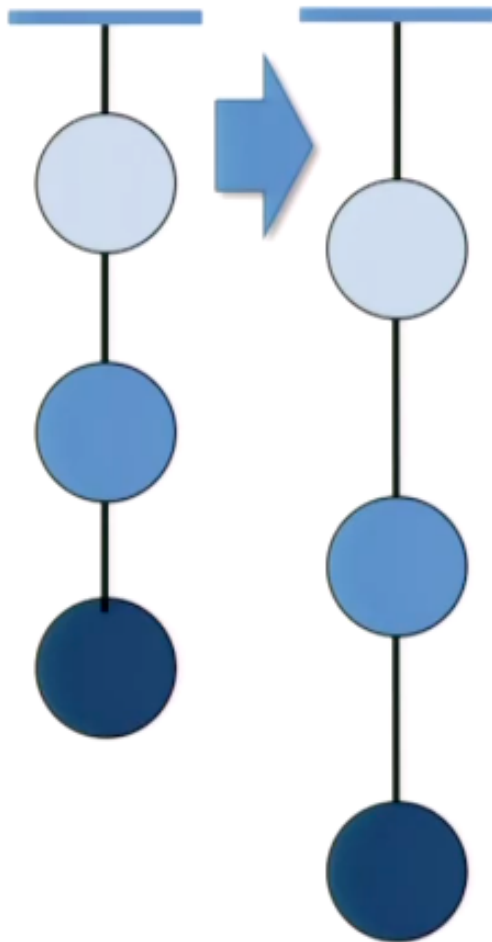
$$M\ddot{x} = -\frac{Mg}{\ell}(x - x_0)$$

$$x/x_0 = \frac{f_0^2}{f_0^2 - f^2}, \text{ where } f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{\ell}}$$



高周波振動抑えたい ▶ 2 段にしよう ▶ 3 段にしよう ▶ 4 段にしよう

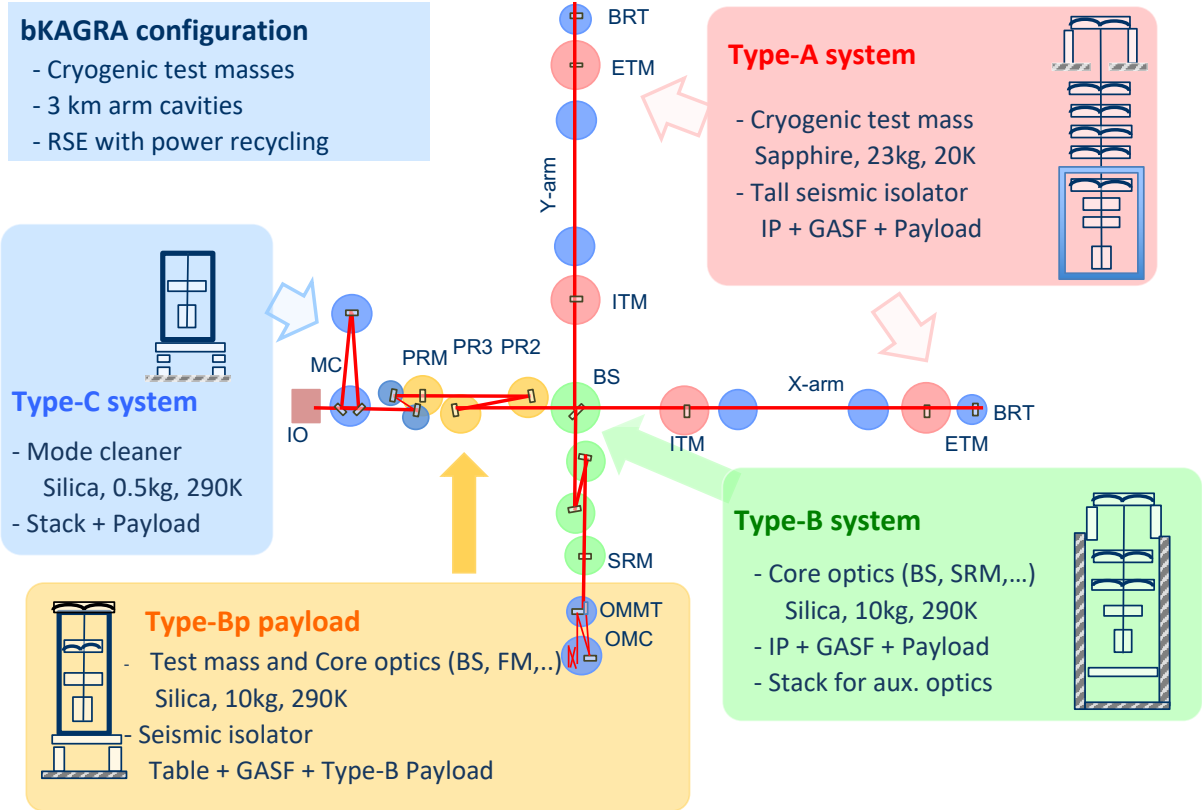
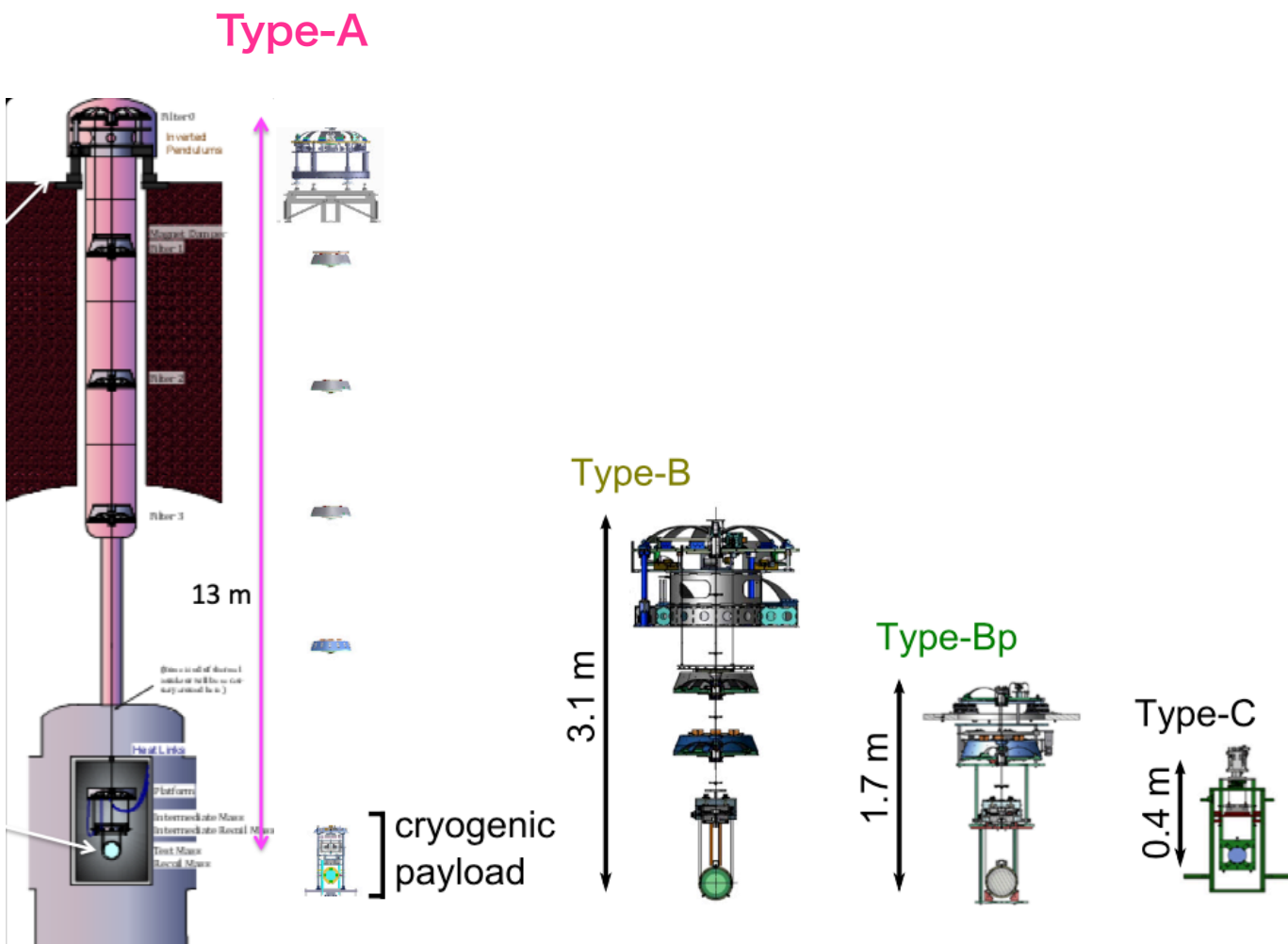
Basic Idea of Suspension System



低周波振動抑えたい

▶ ひもを長くしよう

Basic Idea of Suspension System



as the configuration of April 2020 (O3GK)

Class. Quantum Grav. **36** (2019) 165008

高さ13.5m
トンネルの2層目から吊り下げる

KAGRA (かぐら：大型低温重力波望遠鏡) 干渉計の工夫



鏡が熱振動で揺れたら困る

▶ 温度を下げよう

20K (マイナス250度)

低温で耐えられる素材は？

▶ 人工サファイア

22.8 kg

diameter 22cm

thickness 15cm

低温にする装置は？

対流 x

放射 x

伝導 ○

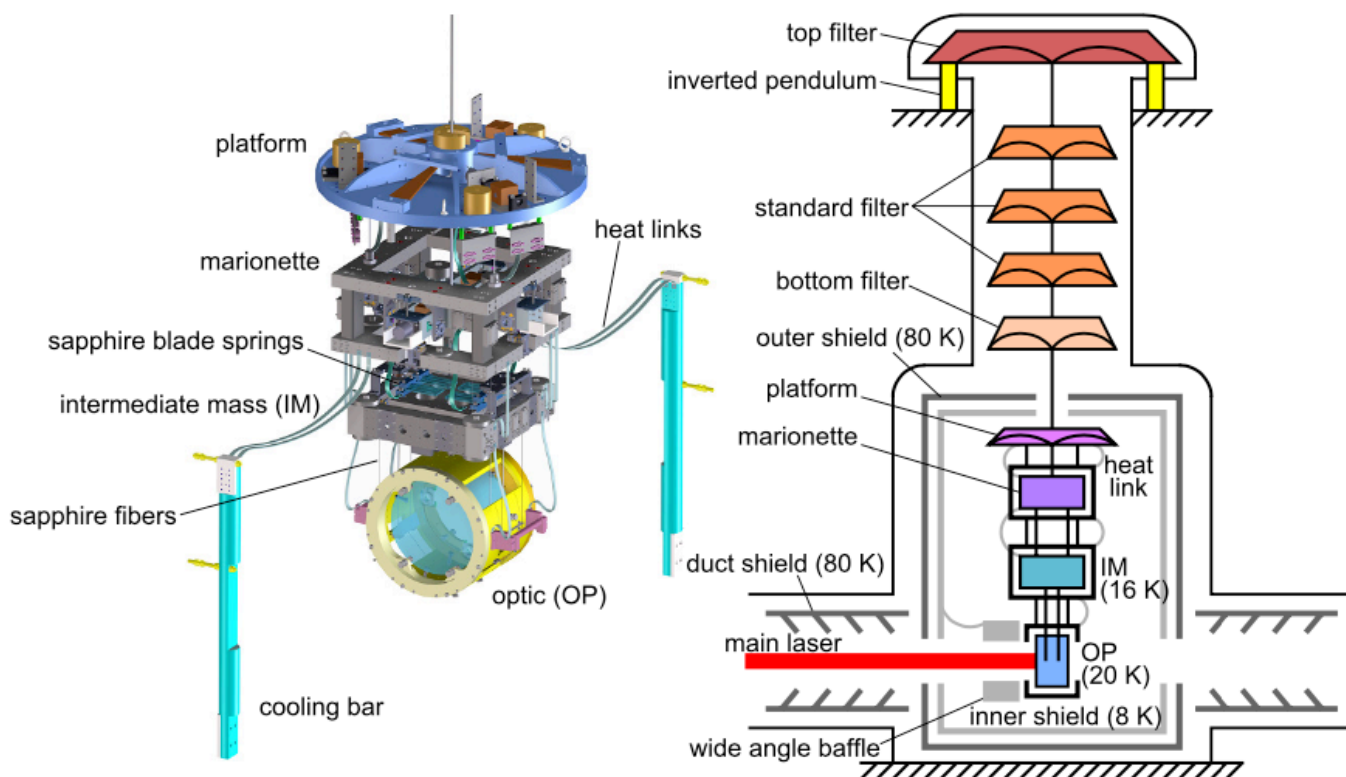
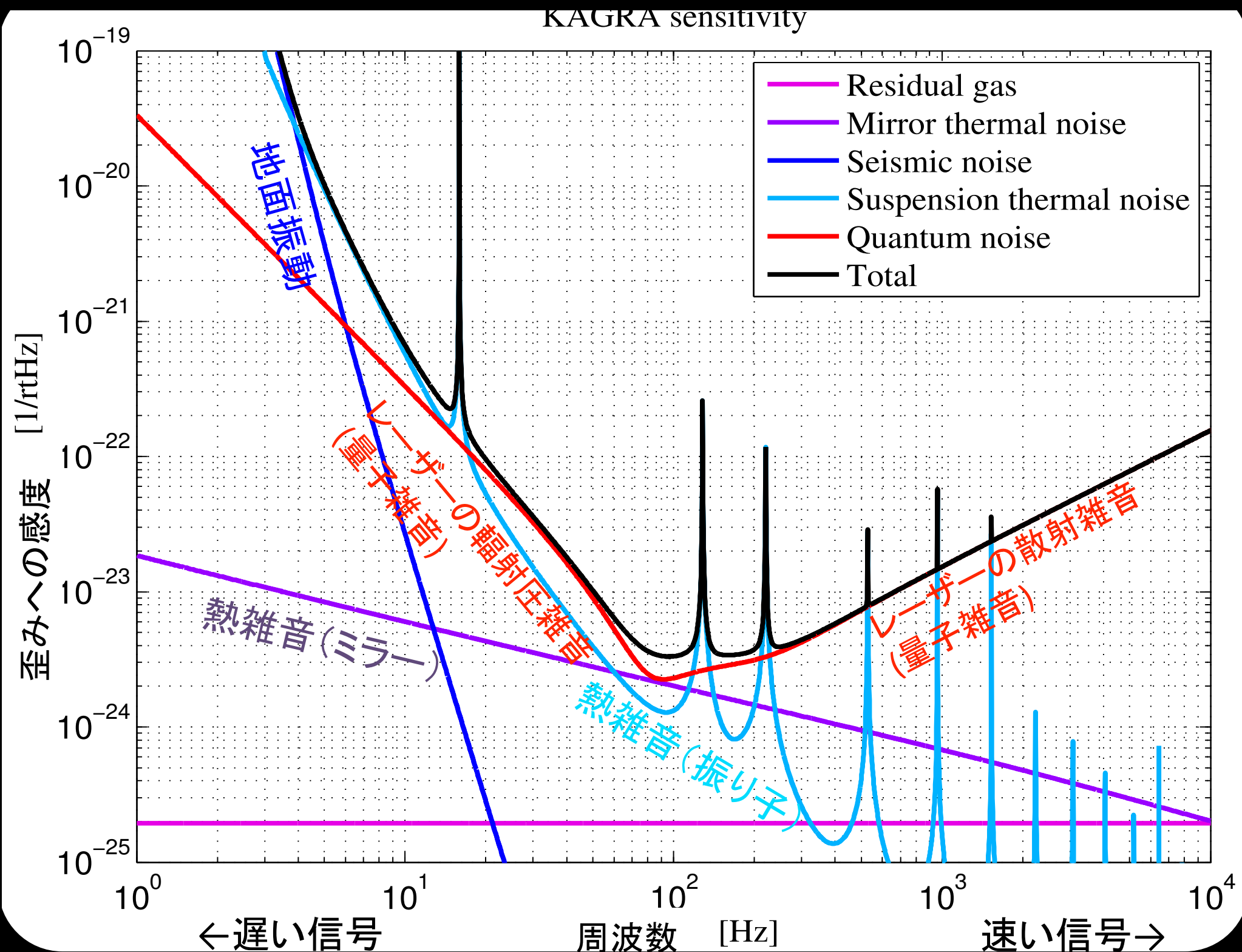


Figure 3. The CAD drawing of the cryogenic payload under Type-A (left) and the schematic of the cryogenic suspension system of sapphire test masses (right). Suspension stages outside of the outer shield are at room temperature.

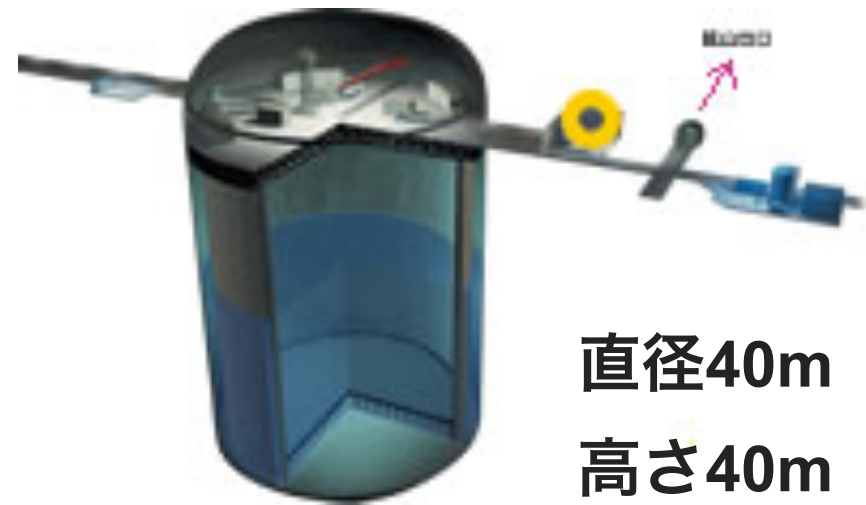
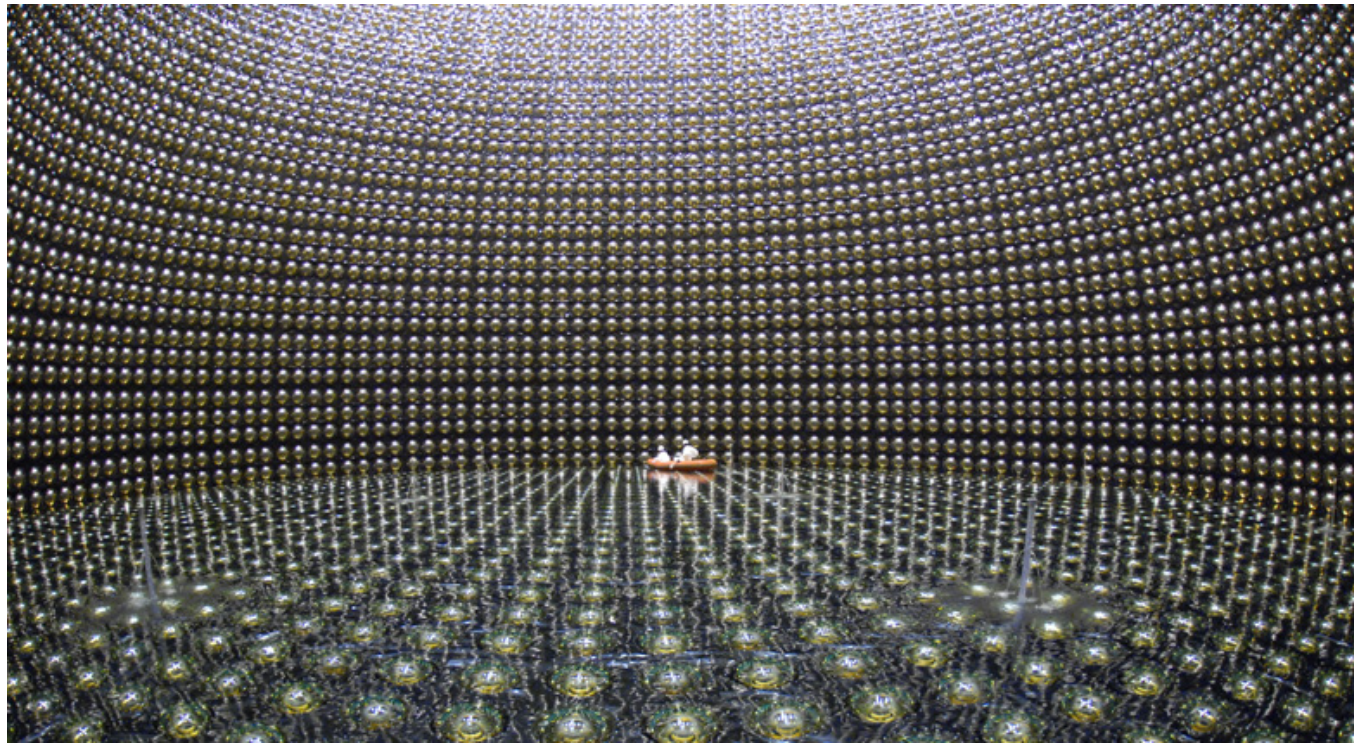
KAGRA sensitivity curve



スーパー・カミオカンデ (ニュートリノ観測装置)

Super-Kamiokande

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



直径40m

高さ40m

岐阜県・神岡の鉱山跡の空洞に巨大な水槽をつくり、
宇宙から飛来するニュートリノを観測する。



ノーベル物理学賞を受賞

小柴昌俊 (2002年)

梶田隆章 (2015年)



天文学宇宙検定

[受験のご案内](#)[公式テキスト](#)[天文学宇宙クイズ](#)[ホーム](#) > 2014年度 第4回天文学宇宙検定 解答速報

解答速報



2014年度 第4回天文学宇宙検定 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、一辺が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

大型低温重力波望遠鏡



KAGRA (かぐら：大型低温重力波望遠鏡)



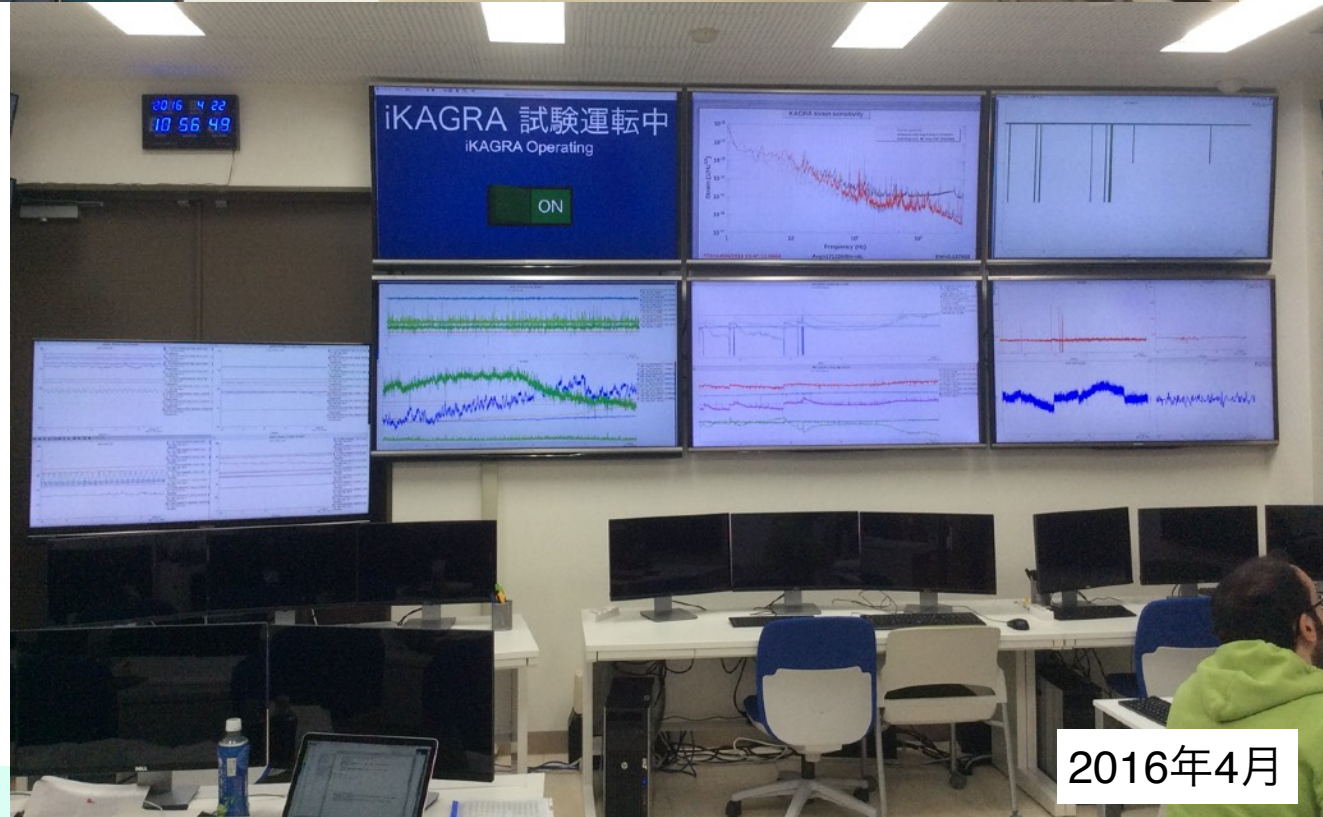
KAGRA (かぐら：大型低温重力波望遠鏡)

2018年8月



KAGRA (かぐら : 大型低温重力波望遠鏡)

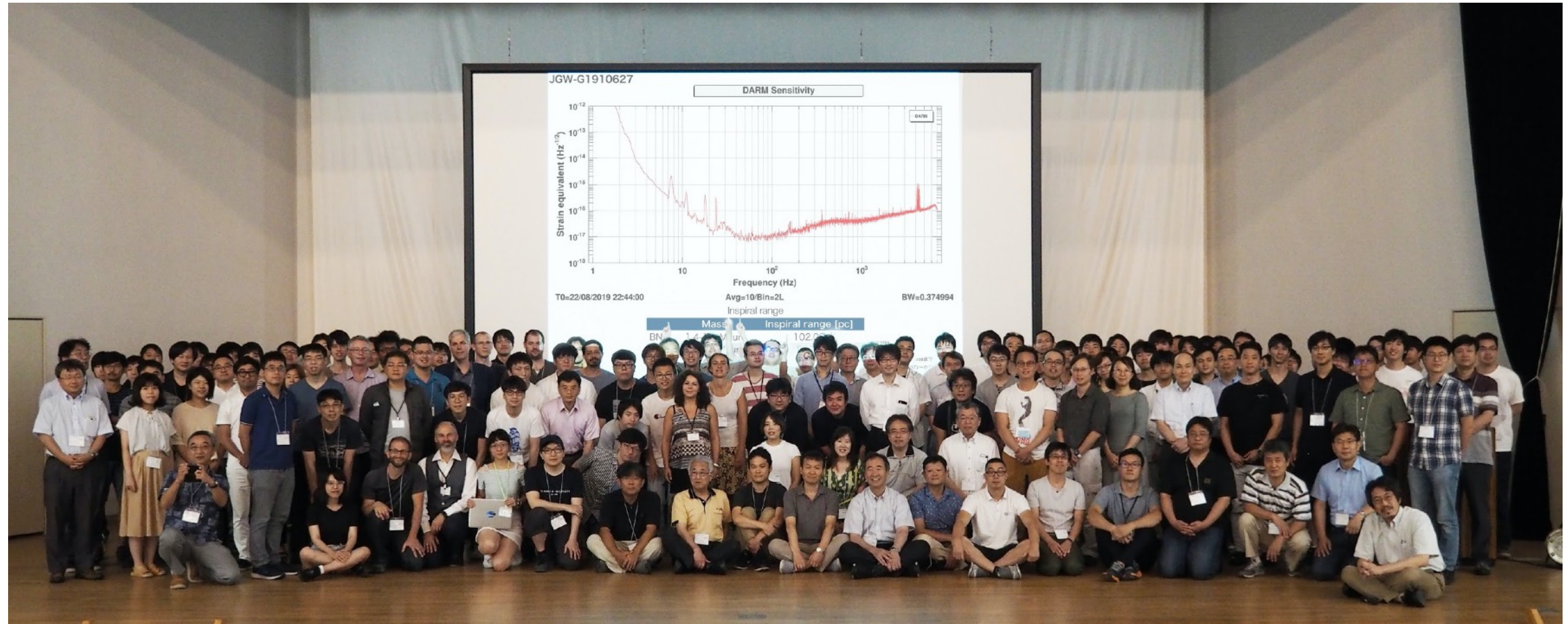
2018年8月



2016年4月

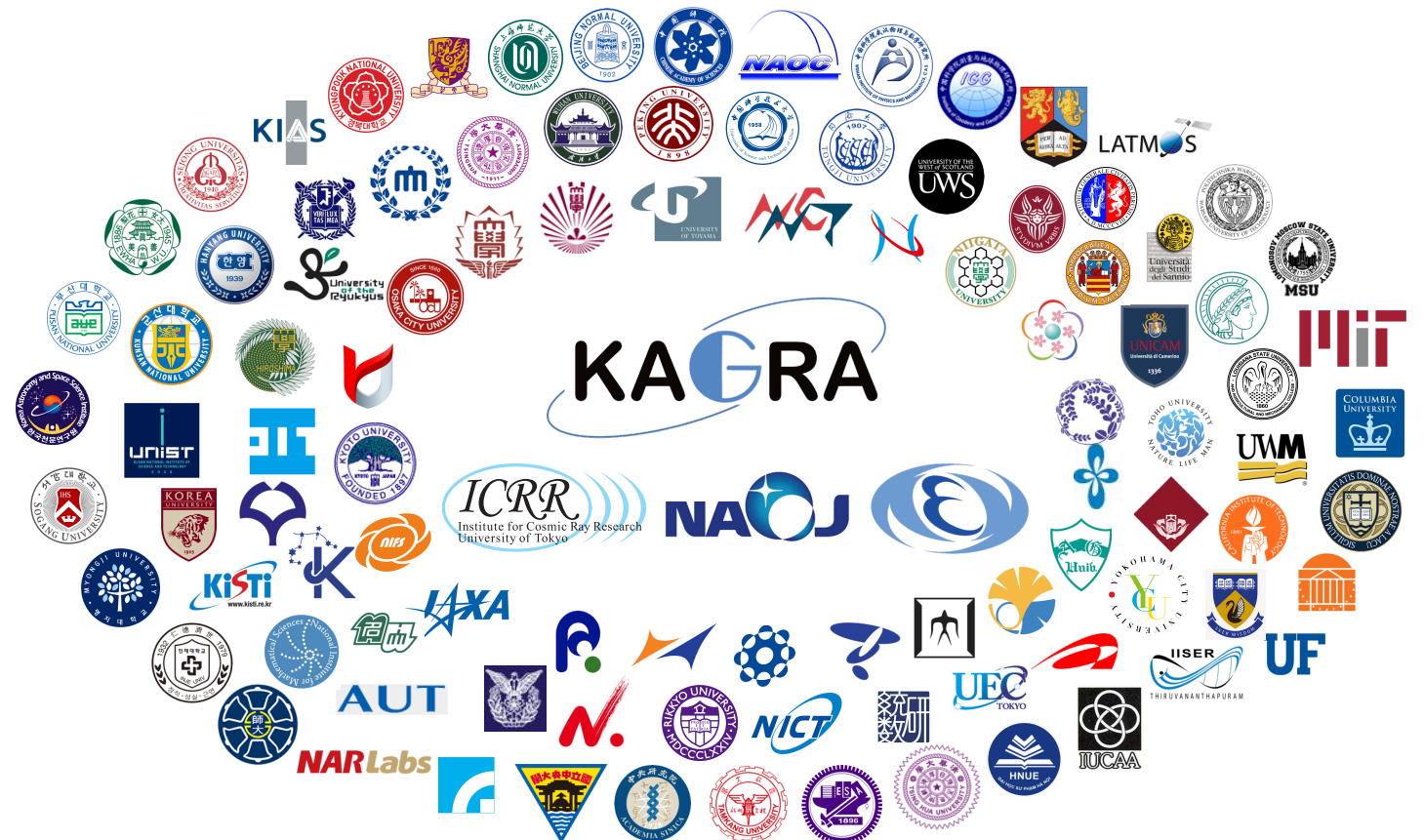


KAGRA (かぐら : 大型低温重力波望遠鏡)

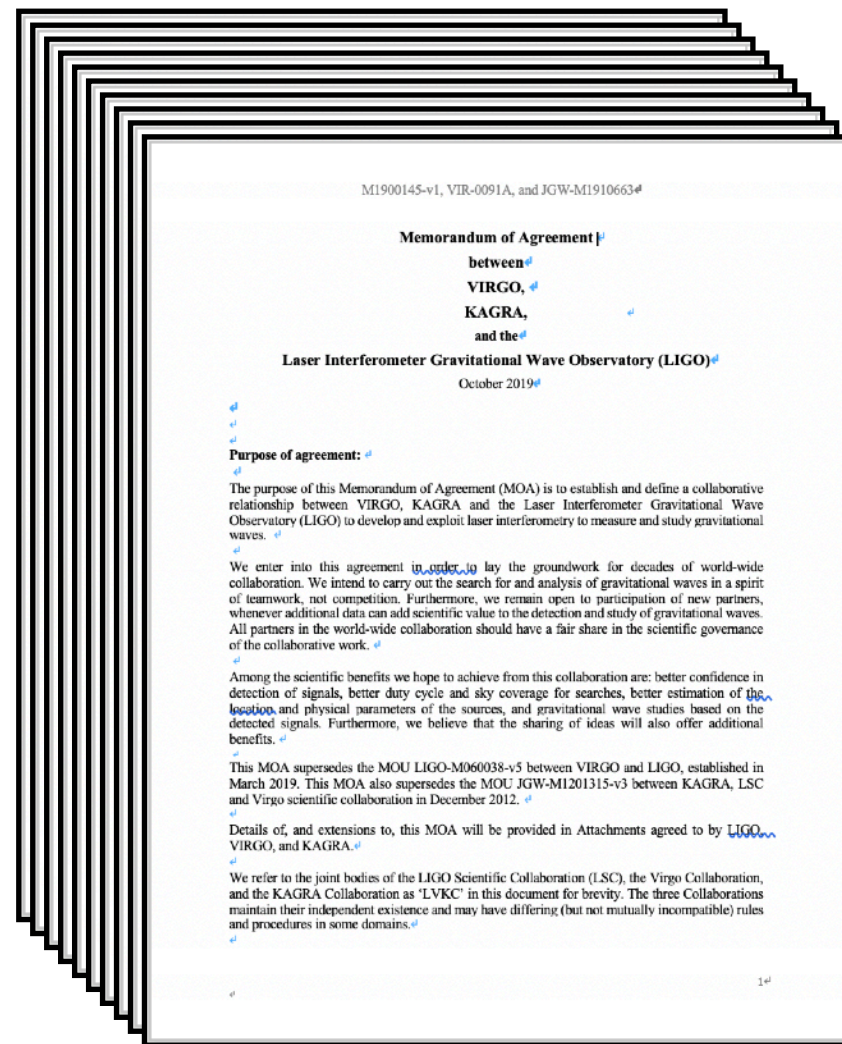


KAGRA

360 members
200 authors
110 groups
14 regions



KAGRA (かぐら：大型低温重力波望遠鏡)



2019年10月, アメリカ・ヨーロッパとの研究協定に調印

International GW network (国際重力波観測ネットワーク)

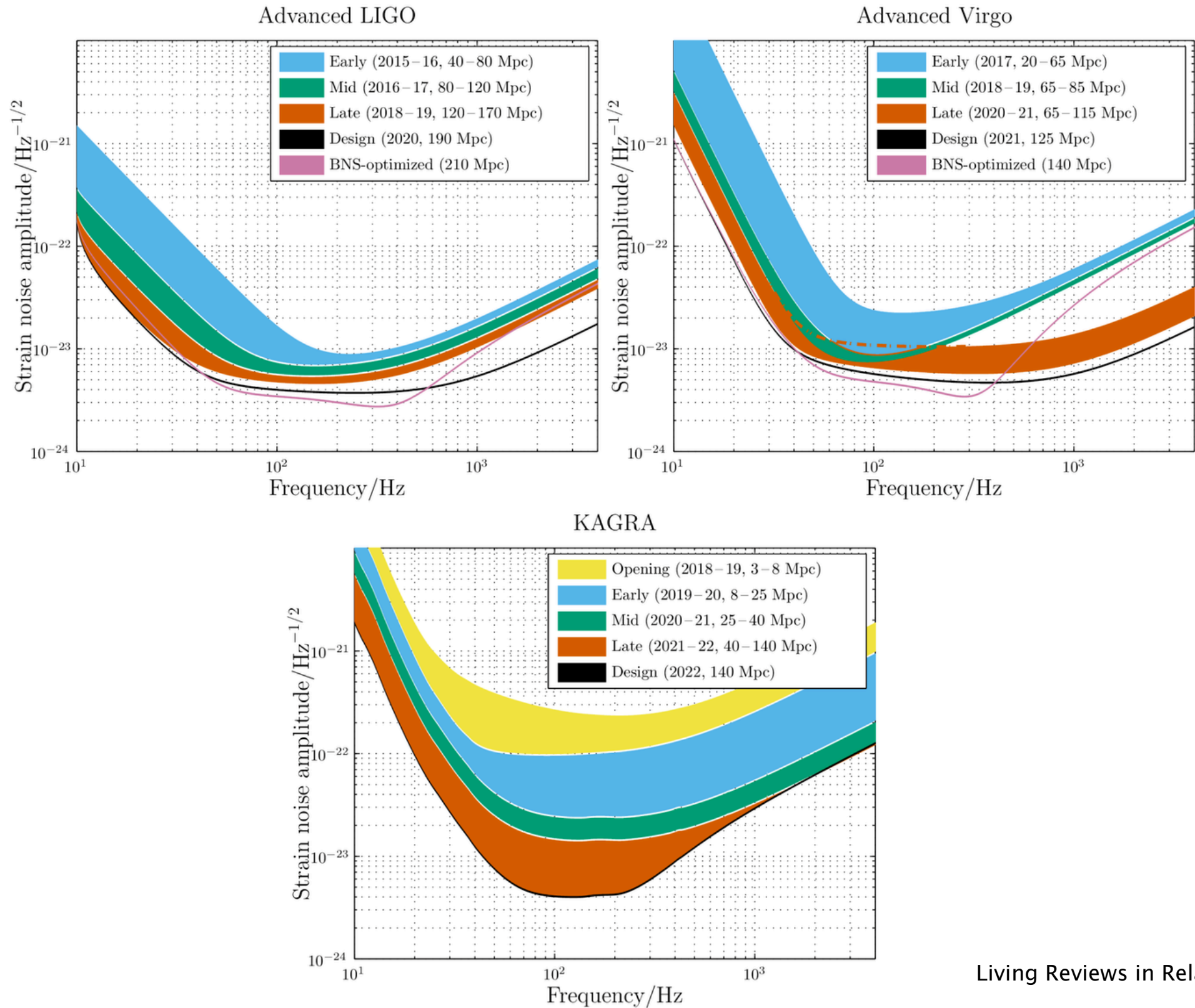


1330 members
860 authors
101 groups
20 countries

465 members
360 authors
96 groups
8 countries

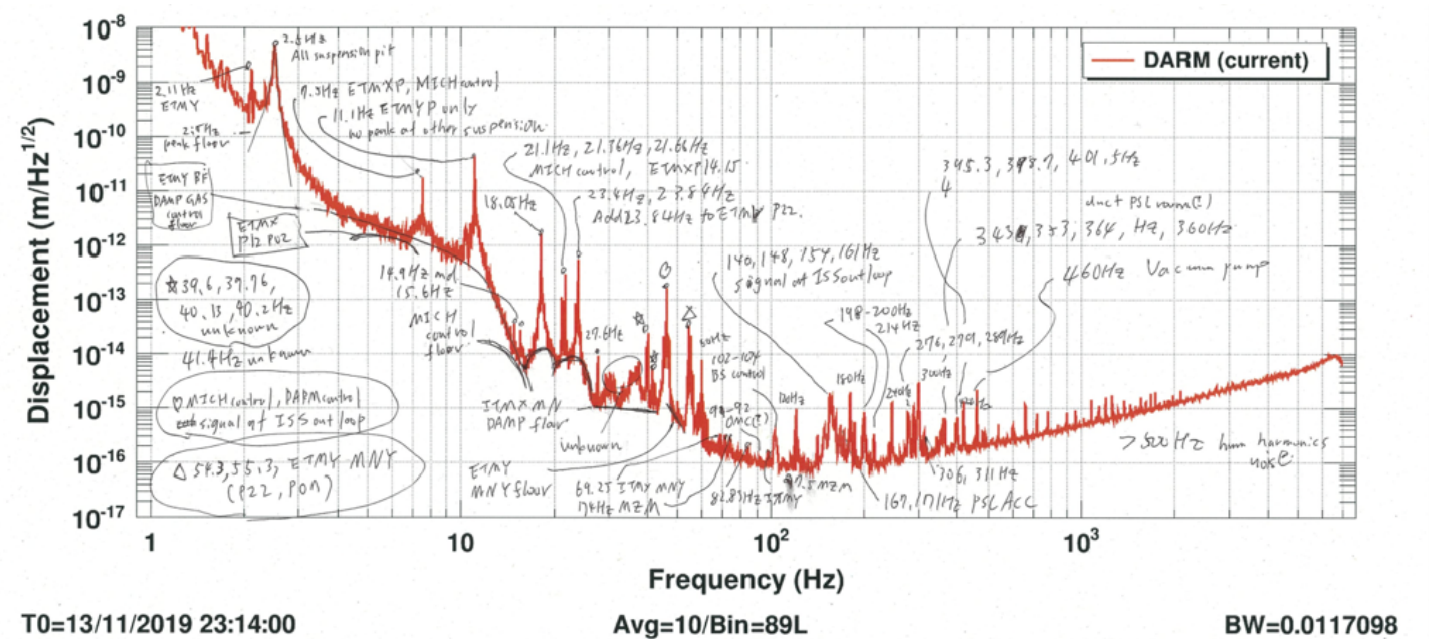
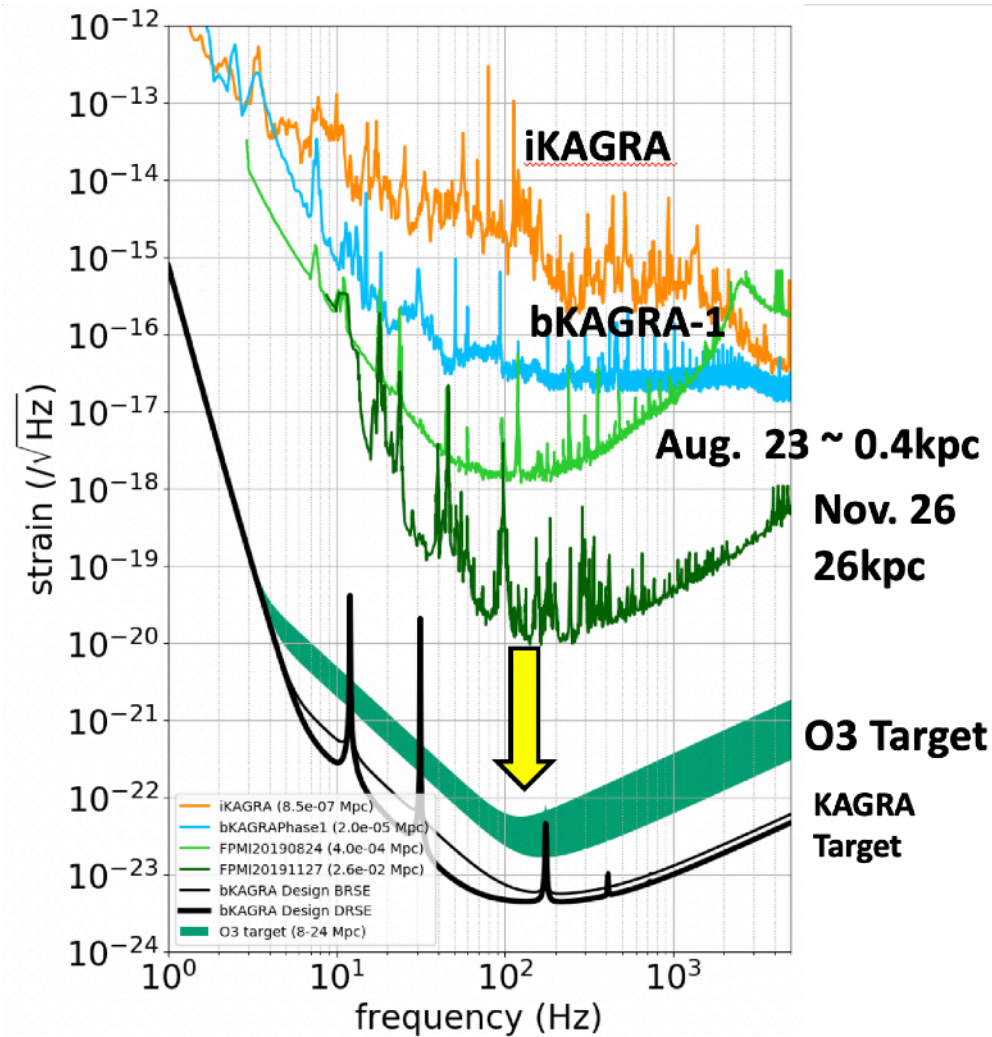
390 members
200 authors
110 groups
14 regions

aLIGO, aVirgo & KAGRA : Target Sensitivity



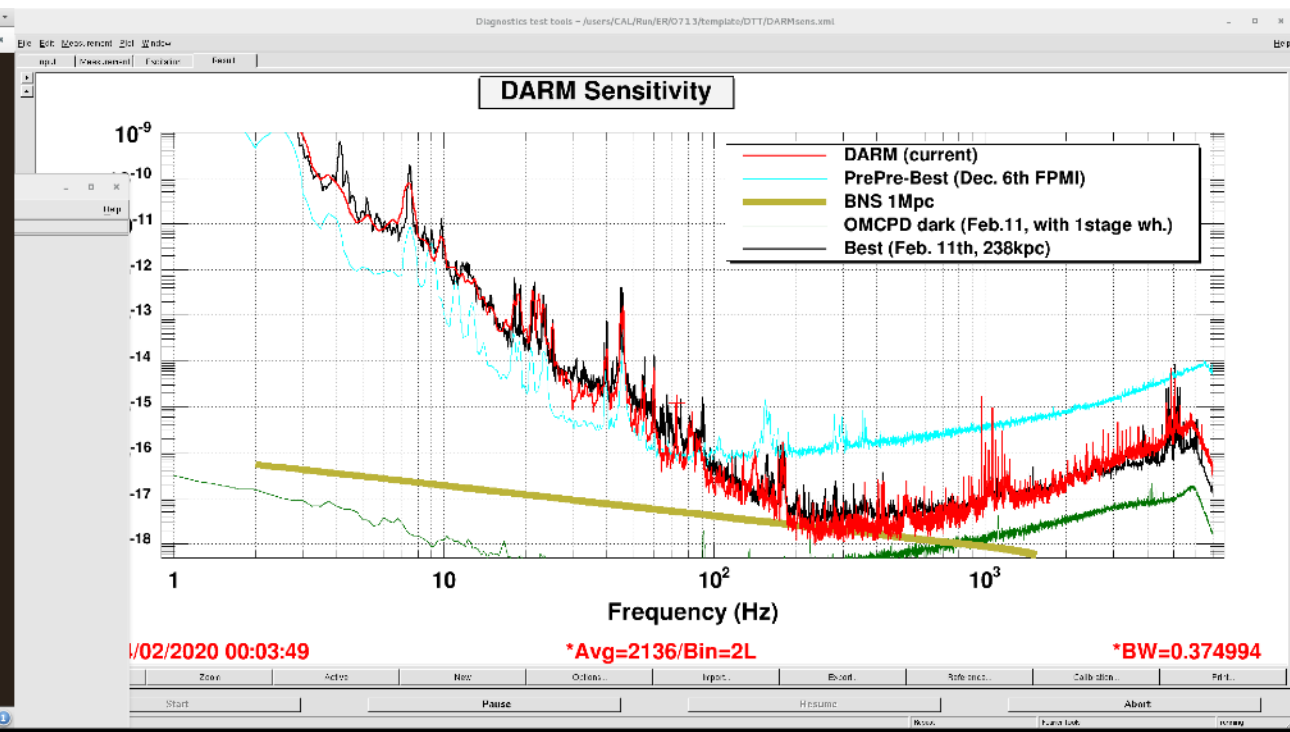
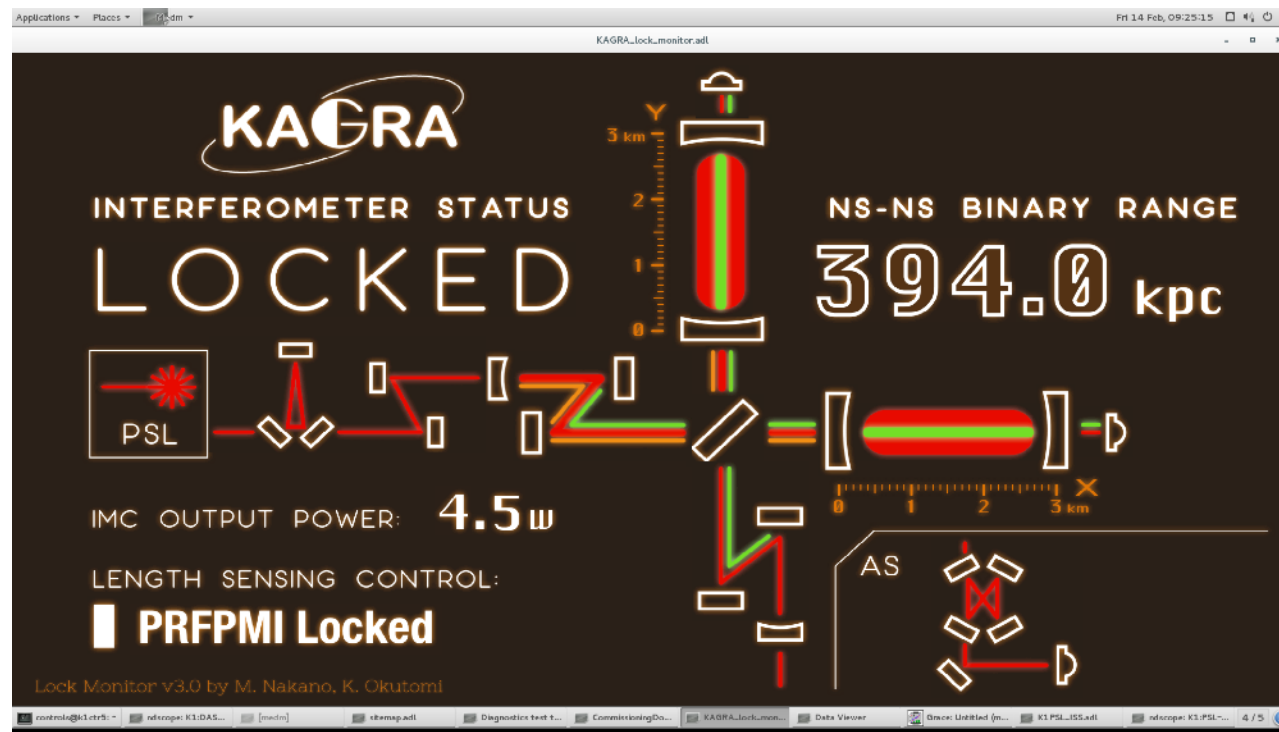
Living Reviews in Relativity; 21:3; 2018

Rush to 1 Mpc by February 25, 2020



2020/2/13

<http://klog.icrr.u-tokyo.ac.jp/osl/?r=12961>



重力波初検出を発表するDavid Reitze 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。”**<https://www.youtube.com/watch?v=aEPlwEJmZyE>

四国新聞だけ
ちがった．．． 残念（笑）

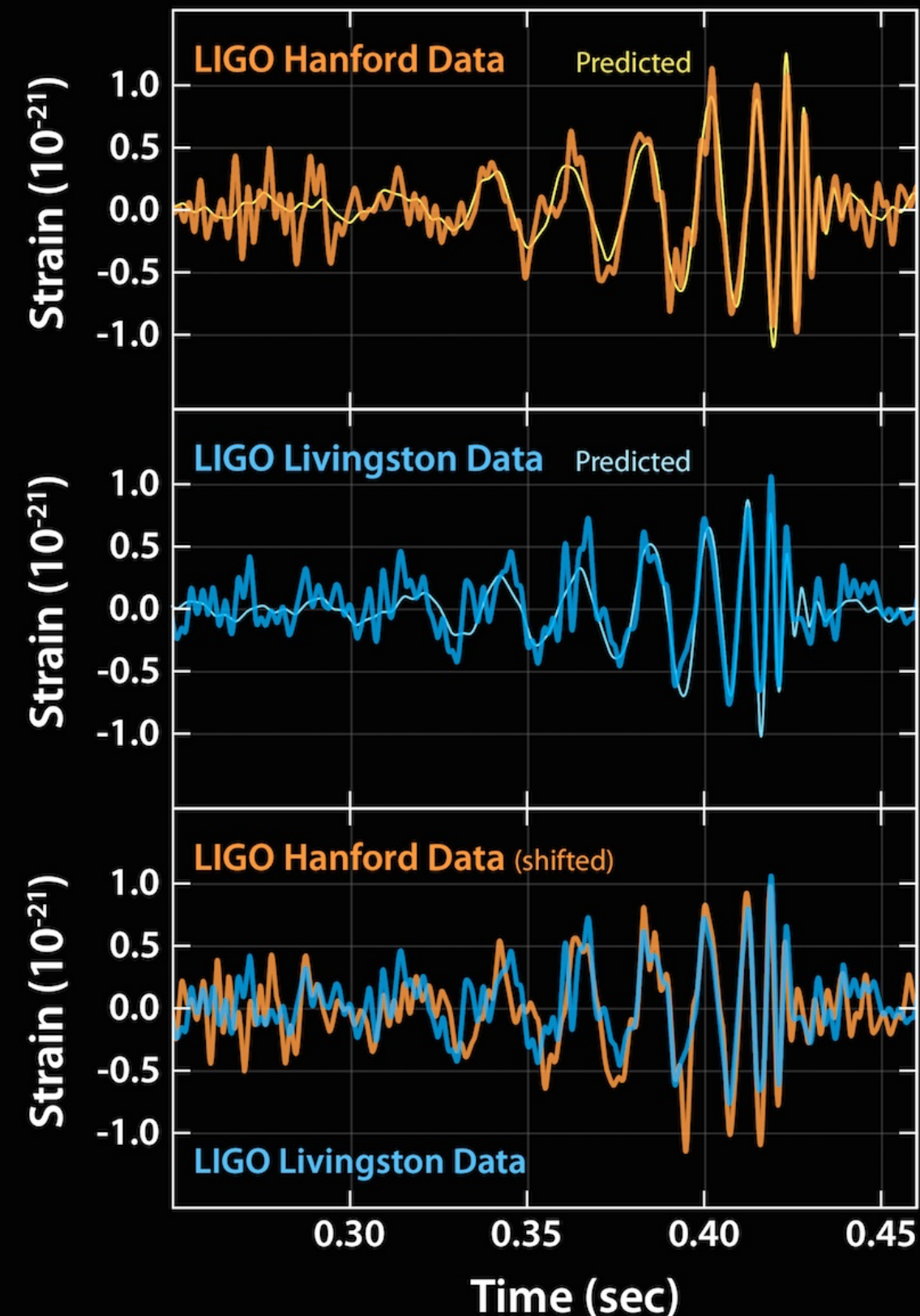


2016年2月, LIGOが重力波を初めて検出した, と発表した

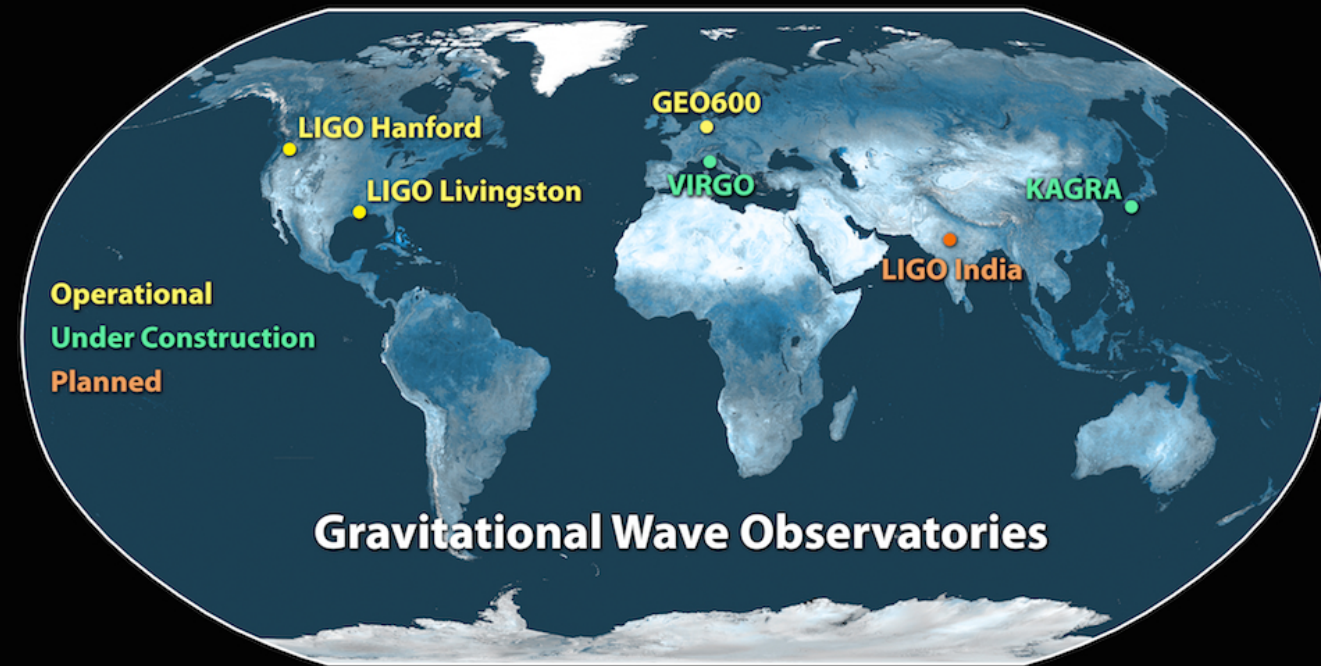
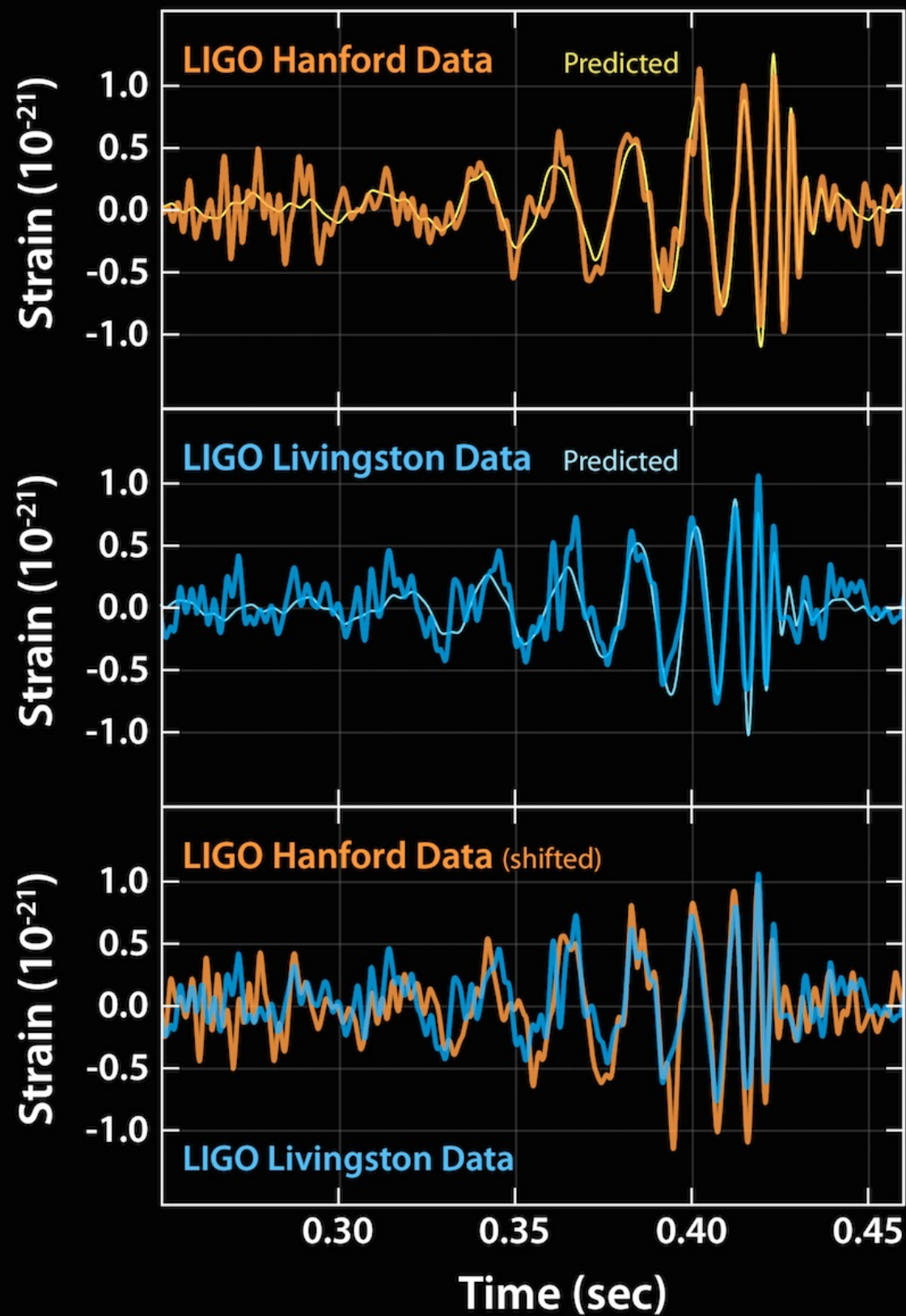
2015年9月14日



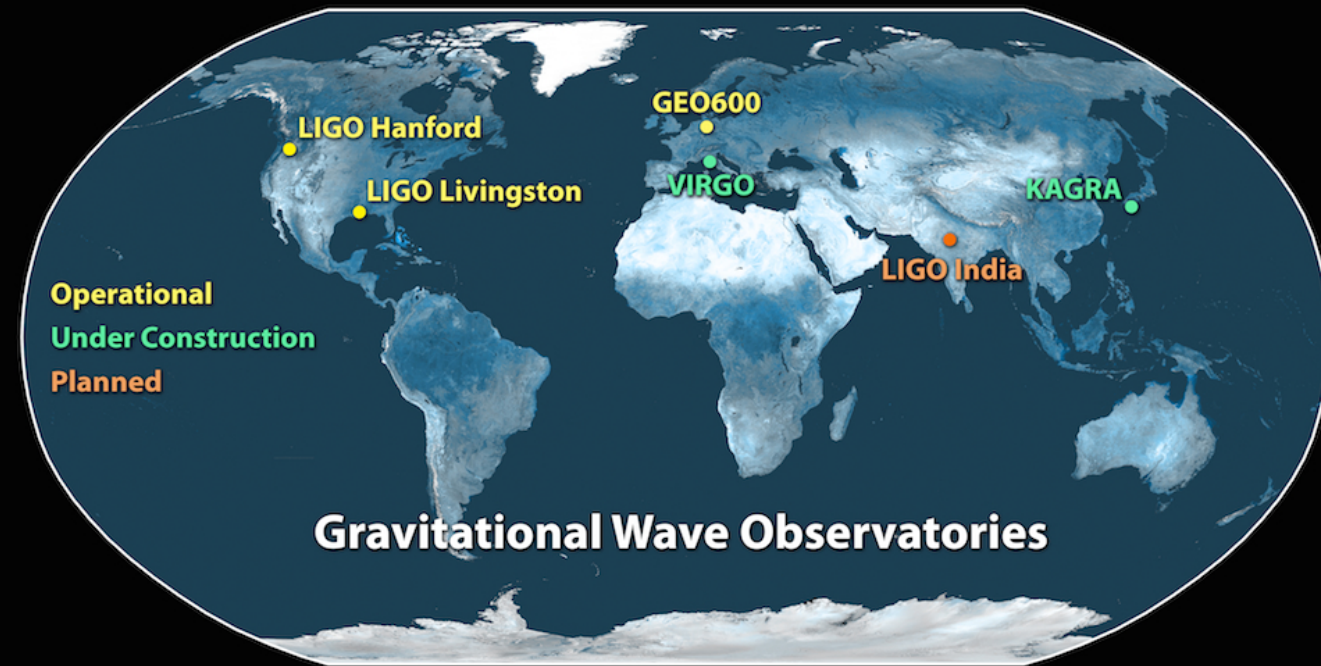
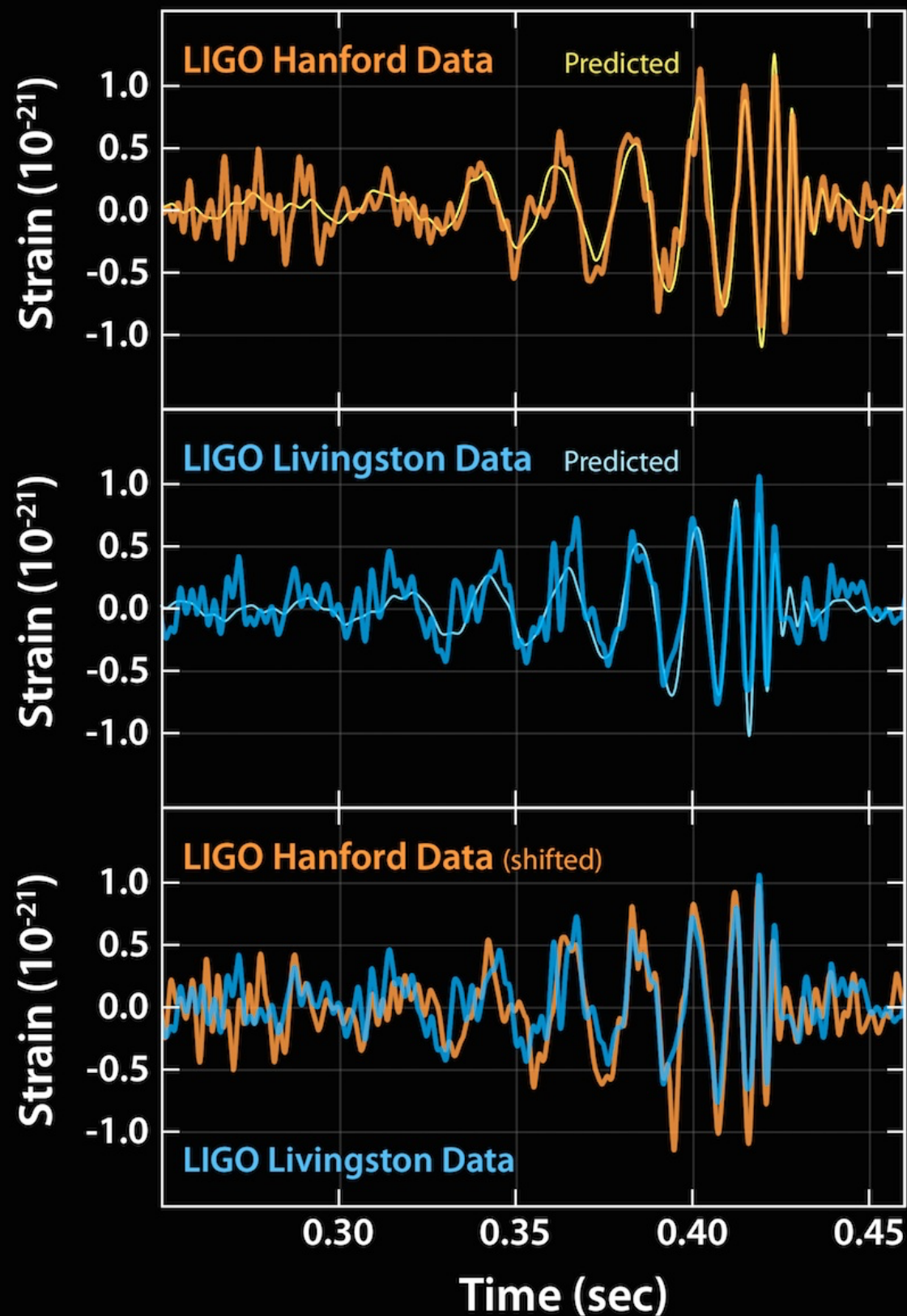
ブラックホール連星の合体
によって生じた重力波だった



2015年9月14日



GW150914



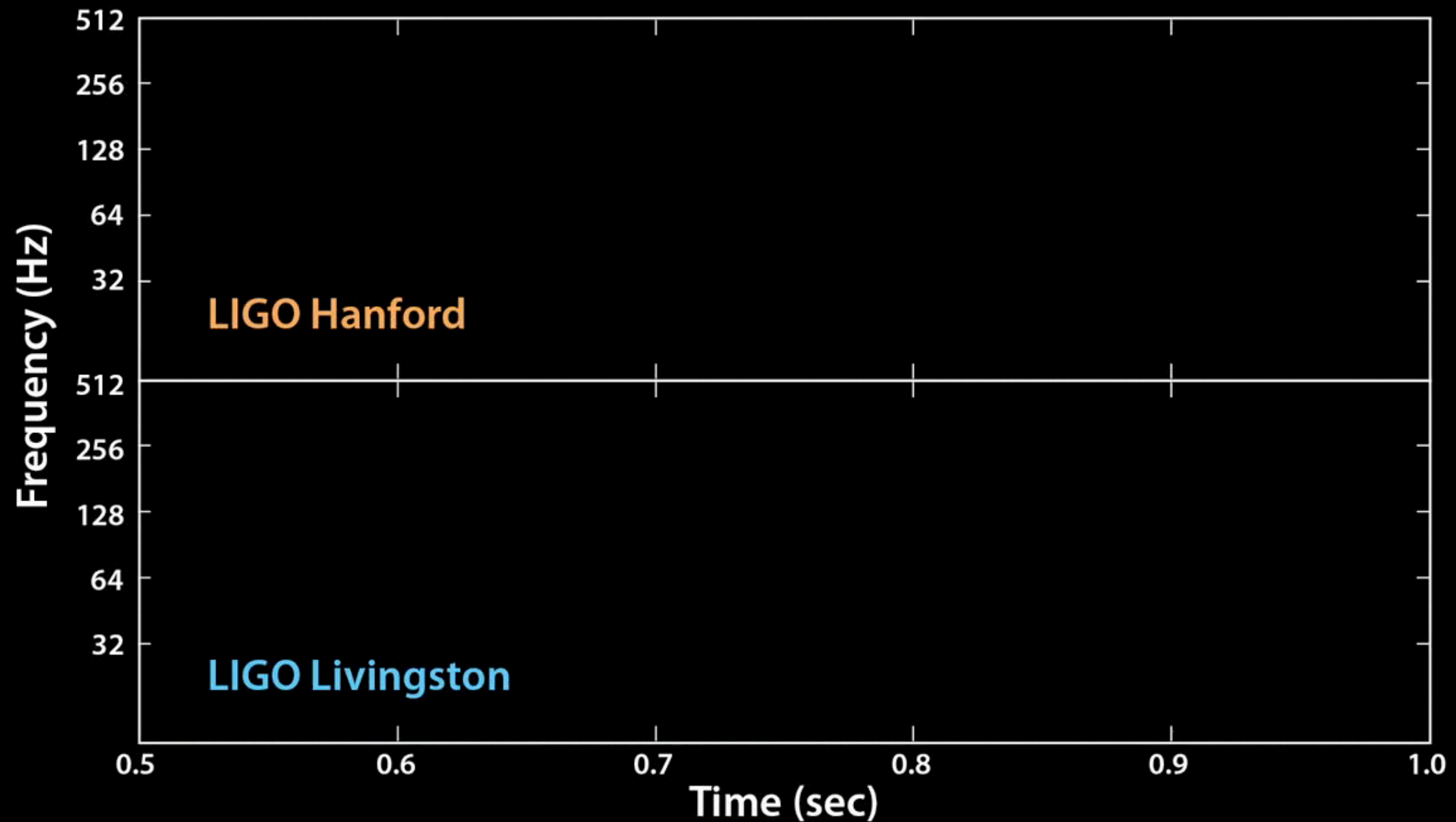
Blackhole merger of
36 Msun + 29 Msun
→ 62 Msun.

Lost 3 Msun

$$E = mc^2$$

13億光年先 (440 Mpc)

重力波波形を音にすると. . .



はじめ2回は実周波数, 後の2回は聞きやすいように+400Hz

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



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](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.116.061102)

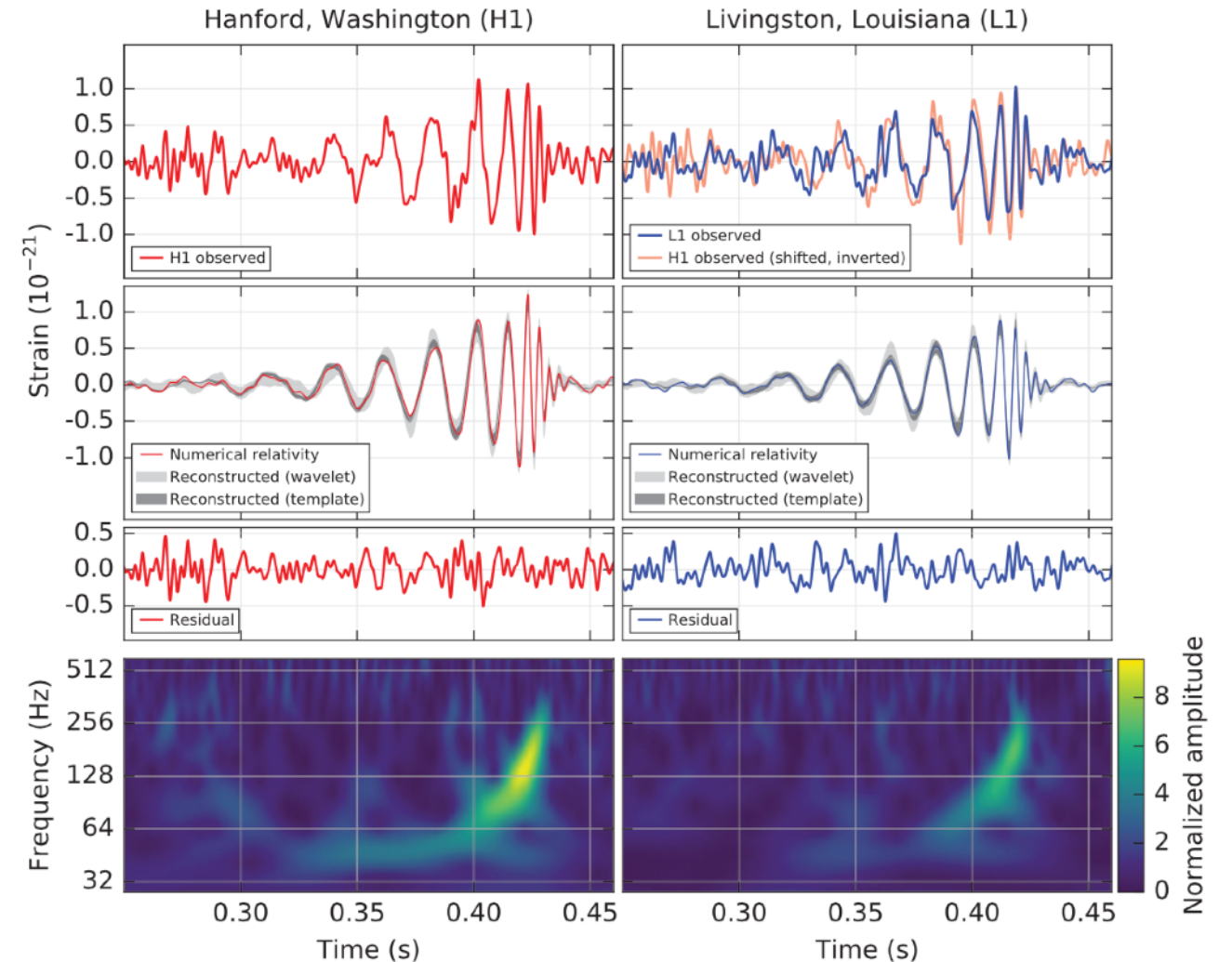


FIG. 1. The gravitational-wave event GW150914 observed by the LIGO Hanford (H1, left column panels) and Livingston (L1, right column panels) detectors. Times are shown relative to September 14, 2015 at 09:50:45 UTC. For visualization, all time series are filtered

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,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. Amari,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. Aubert,⁸ S. Babak,²⁹ P. Bacon,³⁰ M. K. M. Bader,³¹ 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,³⁶ 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 Y. Batur,³⁹ P. Bassiri,⁴⁰ A. Basti,^{18,19} J. C. Batch,³⁷ C. Baune,⁸ V. Bavigadga,³⁴ M. Bazzan,^{41,42} B. Behnke,²⁹ M. Bejger,⁴³ C. Belczynski,⁴⁴ A. S. Bell,³ C. J. Bell,³⁶ B. K. Berger,¹ J. Bergmann,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,³³ J. K. Blackburn,¹ C. D. Blair,⁵¹ D. G. Blair,⁵¹ R. M. Blair,⁵² 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. Bouffanaï,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,⁶⁰ M. Brinkmann,⁶¹ V. Brissou,²³ P. Brockill,¹⁶ A. F. Brooks,⁶² D. A. Brown,³⁵ D. Brown,⁴³ N. M. Brown,¹⁰ C. C. Buchanan,⁶³ A. Buikema,¹⁰ T. Bulik,⁶⁴ 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,^{66,63} 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,⁷³ C. Casentini,^{25,13} S. Caudill,¹⁶ M. Cavaglià,⁷⁴ F. Cavalieri,⁷⁵ R. Cavalieri,³⁴ G. Cella,¹⁹ C. B. Cepeda,¹ L. Cerboni Baiardi,^{57,58} G. Cerretani,^{18,19} E. Cesarini,^{25,13} 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,⁵³ 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,⁷¹ S. Cortese,³⁴ C. A. Costa,¹¹ M. W. Coughlin,⁷⁸ S. B. Coughlin,⁸² J. P. Coulon,⁸³ S. T. Countryman,³⁹ P. Couvares,¹ E. E. Cowan,⁶³ D. M. Coward,⁵¹ M. J. Cowart,⁶ D. C. Coyne,⁸ R. Coyne,⁷¹ K. Craig,³⁶ J. D. E. Creighton,¹⁶ T. D. Creighton,⁸³ J. Cripe,² S. G. Crowder,⁴⁵ A. Cumming,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,⁸⁵ C. F. Da Silva Costa,⁵ V. Dattilo,³⁴ I. Dave,⁴⁸ H. P. Daveloza,⁸³ M. Davies,²³ G. S. Davies,³⁶ E. J. Daw,⁸⁶ 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,¹⁵ T. Denker,^{8,17} T. Dent,⁸ H. Dereli,⁵³ V. Dergachev,⁸ R. De Rosa,^{18,19} R. De Rosa,^{67,4} F. DeSalvo,⁸⁷ S. Dhurandhar,¹⁴ M. C. Díaz,⁸⁸ 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. Dojcinovski,⁸⁸ V. Dolique,⁶⁵ F. Donovan,¹⁰ K. L. Dooley,²¹ S. Doravari,^{6,8} R. Douglas,³⁶ T. P. Downes,¹⁶ M. Drago,^{8,89,90} R. W. P. Drever,¹ J. C. Driggers,³⁷ Z. Du,⁷⁰ M. Ducrot,⁵ S. E. Dwyer,⁷⁶ T. B. Edo,⁸⁶ M. C. Edwards,⁷⁸ A. Effler,⁸ H.-B. Eggenstein,⁸ P. Ehrens,¹ J. Eichholz,⁵ S. Eikenberry,⁵ W. Engels,³⁷ R. C. Essick,¹⁰ T. Etzel,¹ M. Evans,¹⁰ T. M. Evans,⁶ R. Everett,⁷² M. Factourovich,³⁹ V. Fafone,^{25,13,12} H. Fair,³⁵ S. Fairhurst,²¹ X. Fan,⁷⁰ Q. Fang,⁵¹ S. Farinon,⁴⁷ B. Farr,⁷⁵ W. M. Farr,⁴⁵ M. Favata,⁸ M. Fays,⁹¹ H. Fehrmann,⁸ M. M. Fejer,⁴⁰ D. Feldbaum,⁵ I. Ferrante,^{18,19} E. C. Ferreira,¹ F. Ferrini,³⁴ F. Fidecaro,^{18,19} L. S. Finn,⁷² I. Fiori,³⁴ D. Fiorucci,³⁰ R. P. Fisher,³⁵ R. Flaminio,^{65,92} M. Fletcher,³⁶ H. Fong,⁶⁹ J.-D. Fournier,⁵³ S. Franco,²³ S. Frasca,^{79,28} F. Frasconi,¹⁹ M. Frede,⁸ Z. Frei,⁵⁴ A. Freise,⁴⁵ R. Frey,²⁹ V. Frey,²³ T. T. Fricke,⁸ P. Fritschel,¹⁰ V. V. Frolov,⁶ P. Fulda,⁵ M. Fyfe,⁶ H. A. G. Gabbard,²¹ J. R. Gair,⁹³ L. Gammaitoni,^{32,33} S. G. Gaonkar,¹⁴ F. Garufi,^{67,4} A. Gatto,³⁰ G. Gaur,^{94,95}

¹LIGO, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts 02139, USA
²Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 12227-010 São José dos Campos, São Paulo, Brazil
³INFN, Gran Sasso Science Institute, I-67100 L'Aquila, Italy
⁴INFN, Sezione di Roma Tor Vergata, I-00133 Roma, Italy
⁵Inter-University Centre for Astronomy and Astrophysics, Pune 411007, India
⁶International Centre for Theoretical Sciences, Tata Institute of Fundamental Research, Bangalore 560012, India
⁷University of Wisconsin-Milwaukee, Milwaukee, Wisconsin 53201, USA
⁸Leibniz Universität Hannover, D-30167 Hannover, Germany
⁹Università di Pisa, I-56127 Pisa, Italy
¹⁰INFN, Sezione di Pisa, I-56127 Pisa, Italy
¹¹Australian National University, Canberra, Australian Capital Territory 0200, Australia
¹²The University of Mississippi, University, Mississippi 38677, USA
¹³California State University Fullerton, Fullerton, California 92831, USA
¹⁴LAL, Université Paris-Sud, CNRS/IN2P3, Université Paris-Saclay, Orsay, France
¹⁵Chennai Mathematical Institute, Chennai, India 603103
¹⁶Università di Roma Tor Vergata, I-00133 Roma, Italy
¹⁷INFN, Sezione di Pisa, I-56127 Pisa, Italy
¹⁸Australian National University, Canberra, Australian Capital Territory 0200, Australia
¹⁹The University of Mississippi, University, Mississippi 38677, USA
²⁰California State University Fullerton, Fullerton, California 92831, USA
²¹LAL, Université Paris-Sud, CNRS/IN2P3, Université Paris-Saclay, Orsay, France
²²Chennai Mathematical Institute, Chennai, India 603103
²³Università di Roma Tor Vergata, I-00133 Roma, Italy
²⁴University of Southampton, Southampton SO17 1BJ, United Kingdom
²⁵Universität Hamburg, D-22761 Hamburg, Germany
²⁶INFN, Sezione di Roma, I-00185 Roma, Italy
²⁷Albert-Einstein-Institut, Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik, D-14476 Potsdam-Golm, Germany
²⁸APC, AstroParticule et Cosmologie, Université Paris Diderot, CNRS/IN2P3, CEA/Ifre, Observatoire de Paris, Sorbonne Paris Cité, F-75205 Paris Cedex 13, France
²⁹Montana State University, Bozeman, Montana 59717, USA
³⁰Università di Perugia, I-06123 Perugia, Italy
³¹INFN, Sezione di Perugia, I-06123 Perugia, Italy
³²European Gravitational Observatory (EGO), I-56021 Cascina, Pisa, Italy
³³Syracuse University, Syracuse, New York 13244, USA
³⁴SUPA, University of Glasgow, Glasgow G12 8QQ, United Kingdom
³⁵LIGO Hanford Observatory, Richland, Washington 99352, USA
³⁶Wigner RCP, RMKI, H-1121 Budapest, Konkoly Thege Miklós út 29-33, Hungary
³⁷Columbia University, New York, New York 10027, USA
³⁸Stanford University, Stanford, California 94305, USA
³⁹Università di Padova, Dipartimento di Fisica e Astronomia, I-35131 Padova, Italy
⁴⁰INFN, Sezione di Padova, I-35131 Padova, Italy
⁴¹CAAMK-PAN, 00-716 Warsaw, Poland
⁴²Astronomical Observatory Warsaw University, 00-478 Warsaw, Poland
⁴³University of Birmingham, Birmingham B15 2TT, United Kingdom
⁴⁴Università degli Studi di Genova, I-16146 Genova, Italy
⁴⁵INFN, Sezione di Genova, I-16146 Genova, Italy
⁴⁶RRCAT, Indore MP 452013, India
⁴⁷Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia
⁴⁸SUPA, University of the West of Scotland, Paisley PA1 2BE, United Kingdom
⁴⁹University of Western Australia, Crawley, Western Australia 6009, Australia
⁵⁰Department of Astrophysics/IMAPP, Radboud University Nijmegen, P.O. Box 9010, 6500 GL Nijmegen, Netherlands
⁵¹Artemis, Université Côte d'Azur, CNRS, Observatoire Côte d'Azur, CS 34229, Nice cedex 4, France
⁵²MTA Eötvös University, "Lendület" Astrophysics Research Group, Budapest 1117, Hungary
⁵³Institut de Physique de Rennes, CNRS, Université de Rennes 1, F-35042 Rennes, France
⁵⁴Washington State University, Pullman, Washington 99164, USA



Rainer Weiss
Barry C. Barish
Kip S. Thorne
“for decisive contributions to the LIGO detector and the observation of gravitational waves”

N. Gehrels,⁶⁸ G. Gemme,⁴⁷ B. Gendre,⁵³ E. Genin,³⁴ A. Gennai,¹⁹ J. George,⁴⁸ L. Gergely,⁹⁶ 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,⁹⁷ A. Glaefke,³⁶ J. R. Gleason,⁵ E. Goetz,⁹⁸ R. Goetz,¹ L. Goudan,⁵⁴ G. González,² J. M. Gonzalez Castro,^{18,19} A. Gopakumar,⁹ N. A. Gordon,³⁶ M. L. Gorodetsky,⁴⁹ S. E. Gossan,¹ M. Gosselin,³⁴ R. Gouaty,⁷ C. Graef,³⁶ P. B. Graft,⁶² M. Granata,⁴⁵ A. Grant,³⁶ S. Gras,¹⁰ C. Gray,³⁷ G. Greco,^{57,58} A. C. Green,⁴⁵ R. J. S. Greenhalgh,¹⁰⁰ P. Groot,⁷² H. Grote,⁸ S. Grunewald,²⁹ G. M. Guidi,^{37,58} X. Guo,⁷⁰ A. Gupta,¹⁴ M. K. Gupta,⁹⁵ K. E. Gushwa,¹ E. K. Gustafson,¹ R. Gustafson,⁹⁸ J. J. Hacker,²² B. R. Hall,³⁶ E. D. Hall,⁷ G. Hammond,³⁶ M. Haney,⁹⁹ M. M. Hanke,³ J. Hanks,³⁷ C. Hanna,⁷² M. D. Hannam,⁹¹ 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,³ C. J. Haster,⁴⁵ K. Haughian,³⁶ J. Healy,¹⁰² J. Heefner,^{1,8} 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,¹⁰⁰ K. A. Hodge,¹ D. Hofman,⁴⁵ S. E. Hollitt,¹⁰⁴ K. Holt,⁶ D. E. Holz,⁷³ P. Hopkins,⁹¹ 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,^{105,82} D. Huet,²³ B. Hughey,⁷³ S. Husa,⁶⁶ S. H. Huttner,³⁶ T. Huynh-Dinh,⁶ A. Idriy,⁷² N. Indik,⁸ D. R. Ingram,³⁷ R. Inta,⁷¹ H. N. Isa,³⁶ J.-M. Isac,⁶⁰ M. Isi,¹ G. Islam,²² T. Isogai,¹⁰ B. R. Iyer,¹⁵ K. Izumi,³⁷ M. B. Jacobson,¹ T. Jacquin,⁶⁰ H. Jang,⁷⁷ K. Jani,⁶³ 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 K. Haris,¹⁰⁸ C. V. Kalahatgi,^{24,91} V. Kalogera,⁸² S. Kandhasamy,²¹ G. Kang,⁷⁷ J. B. Kanner,⁸ S. Karki,⁵⁹ M. Kasprzak,^{23,34} E. Katsavounidis,¹⁰ W. Katzman,⁸ S. Kaufer,¹⁷ T. Kaur,⁵¹ K. Kawabe,³⁷ F. Kawazoe,^{8,17} F. Kéfélian,⁵³ M. S. Kehl,⁶⁹ D. Keitel,⁸⁶⁵ D. B. Kelley,³⁵ W. Kells,¹ R. Kennedy,⁸⁶ D. G. Keppel,⁸ J. S. Key,⁸³ A. Khalaidovski,⁶¹ F. Y. Khalili,⁴⁹ I. Khan,¹² S. Khan,⁹¹ Z. Khan,⁵¹ E. A. Khazanov,¹⁰ 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,⁹⁷ S. Kissel,³⁷ L. Kleybolte,²⁷ S. Klimentenko,⁵³ 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,³⁶ R. 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. Leonard,^{89,90} J. R. Leong,⁸ N. Leroy,²³ N. Letendret,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,⁹¹ J. E. Lord,³⁵ M. Lorenzini,^{12,13} V. Lorette,¹¹⁷ M. Lormand,⁸ 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,³¹ 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,⁴⁴ V. Mangano,³⁶ G. L. Mansell,²⁰ M. Manske,¹⁶ M. Mantovani,³⁴ F. Marchesoni,^{118,33} F. Marion,⁶ S. Márka,³⁹ Z. Márka,³⁹ A. S. Markosyan,⁴⁹ E. Maros,¹ F. Martelli,^{37,58} L. Martellini,⁵³ I. W. Martin,³⁶ R. M. Martin,⁵² D. V. Martynov,¹ J. N. Marx,¹ K. Mason,¹⁰ A. Masserot,⁷ T. J. Massinger,³⁶ M. Masso-Reid,³⁶ F. Matichard,¹⁰ L. Matone,³⁹ N. Mavalvala,¹⁰ N. Mazumder,³⁶ G. Mazzolo,⁸ R. McCarthy,³⁷ D. E. McClelland,³⁰ 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,²⁷ D. Mendoza-Gandara,⁸ R. A. Mercer,¹⁶ E. Merilh,³⁷ M. Merzougou,³⁵ S. Meshkov,¹ C. Messenger,⁶ 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,⁸ R. Mittleman,¹⁰ A. Moggi,¹⁹ M. Mohan,³⁴ S. R. P. Mohapatra,¹⁰ M. Montani,^{57,58} B. C. Moore,⁸⁸ C. J. Moore,¹²² D. Moraru,³⁷ G. Moreno,³⁷ S. R. Morris,⁸³ K. Mossavi,⁸ B. Mours,⁷ C. M. Mow-Lowry,¹⁶ C. L. Mueller,⁵ G. Mueller,¹ A. W. Muir,⁹¹ Arunava Mukherjee,¹⁵ D. Mukherjee,¹⁶ S. Mukherjee,^{93,28} N. Mukund,¹⁴ A. Mullavey,⁶ J. Munch,¹⁰⁴ D. J. Murphy,³⁹ P. G. Murray,³⁴ A. Mytidis,⁵ I. Nardecchia,^{25,13} D. Naticchi,^{79,28} R. K. Nayak,¹²³ V. Necula,⁵ K. Nedkova,¹⁰³ G. Nelemans,^{52,9} M. Neiri,^{46,47} A. Neunert,²⁰ G. Newton,³⁶ T. T. Nguyen,²⁰ A. B. Nielsen,³ S. Nissankar,^{52,9} A. Nitz,⁵ F. Nocera,⁸⁴ D. Nolting,⁶ M. E. N. Normandin,⁸³ L. K. Nuttall,³⁵ J. Oberling,³⁷ E. Ochsner,¹ J. O'Dell,¹⁰⁰ E. Oelker,¹⁰ G. H. Ogün,¹²⁴ J. J. Oh,¹²⁵ S. H. Oh,¹²⁵ F. Ohme,⁹¹ M. Oliver,⁶⁶ P. Oppermann,⁸ Richard J. Oram,⁸ B. O'Reilly,⁶ R. O'Shaughnessy,¹⁰² C. D. Ott,⁷⁶ D. J. Ottaway,¹⁰⁴ R. S. Ottens,⁵ H. Overmire,⁶ B. J. Owen,⁷¹ 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,⁶² P. Pannarale,⁹⁷ B. C. Pant,⁴⁸ F. Paoletti,^{34,19} A. Paoli,³⁴ M. A. Papa,^{29,16,8} H. R. Paris,⁶⁰ W. Parker,⁶ D. Pasucci,³⁶ A. Pasqualetti,³⁴ R. Passaqueti,^{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,⁵³ M. Pickenpack,⁸ F. Piergiovanni,^{57,58}

V. Pierro,⁸⁷ G. Pillant,³⁴ L. Pinard,⁶⁵ I. M. Pinto,⁸⁷ 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,⁹¹ S. S. Premachandra,¹¹⁴ T. Prestegard,¹¹⁴ L. R. Price,¹ M. Prijatelj,²⁴ M. Principe,⁸⁷ S. Privitera,²⁹ R. Prix,⁸ G. A. Prodi,^{89,90} L. Prokhorov,⁴⁹ O. Puenken,⁸ M. Punturo,³³ P. Puppo,²⁸ M. Pürer,²⁹ H. Qi,¹⁶ J. Qin,⁵¹ V. Quetschke,⁸³ E. A. Quintero,¹ R. Quitzow-James,⁵⁹ F. J. Raab,³⁷ D. S. Rabeling,²⁰ H. Radkins,³⁷ P. Raffai,⁵⁴ S. Raja,⁴⁹ M. Rakhmanov,⁸³ 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,¹³⁰ S. D. Reyes,³⁵ F. Ricci,^{79,28} K. Riles,⁹⁸ N. A. Robertson,¹²⁶ R. Robic,³⁶ F. Robinet,²³ A. Rocchi,¹³ L. Rolland,⁷ J. G. Rollins,¹ V. J. Roma,⁵⁹ J. D. Romano,⁸³ R. Romano,³⁴ 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,

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_{start} (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

2016年2月, LIGOが重力波を初めて検出した, と発表した

2016年(平成28年)2月12日(金曜日) 12版 総合 2

宇宙の謎解き 国際競争

本年(二〇一六年)は、アインシュタインが一般相対性理論の本論文を発表してちょうど一〇〇年になる。その一〇〇年を祝うかのように、二月一二日深夜(米国時間一日)、アメリカのLIGO(ライゴ、注1)のグループは、ブラックホールが衝突・合体して発生した重力波を捉えることに成功した、と発表した。重力波は、一般相対性理論が予言する物理現象だが、一世紀を経て、ようやく直接観測されたことになる。

私は、一般相対性理論の理論研究に関わって四半世紀になる。これまで重力波を研究の中心に据えてきたわけではないが、この瞬間を待ち望んでいた一人

「予想通りで驚いた」 —重力波初観測の報道に接して



真貝 寿明

重力波はアインシュタインが残した百年来の宿題だ。その答えはブラックホールの謎解きにもつながる。日欧米では高精度の大型装置(重力波望遠鏡)をつくらせて検出を狙ってきた。

(永井理)

実験チームの二つの望遠鏡
ナダ
州
ワシントン
イリノイ州
500m
はLIGO提供

12

重力波 初の直接観測

「研究者勇気づけた」

大阪市大院・神田教授 学生らに解説

米国を中心とした国際研究チームが「重力波」を初めて直接観測したとの発表を受け、重力波の研究が専門の神田展行・大阪市立大学大学院教授(51)は12日、発表内容についての説明会を大阪市住吉区の同大杉本キャンパスで開いた。成果を詳しく理解してもらう狙い。学生ら約100人が参加し、真剣な表情で聴き入った。

【畠山哲郎】

神田教授は、岐阜県飛騨市の大型低温重力波望遠鏡「KAGRA」のプロジェクトでもデータ管理グループのリーダーを務める。説明会では観測されたデータの見方などを解説し「我々にとっても勇気づけられるものだった」と語った。発表を受けて、研究室の学生

が締め切り間際の論文を慌てて書き換えたエピソードを披露すると、会場は笑いに包まれた。

同大大学院理学研究科2年の和知慎吾さん

(23)は「重力波だけでなく、ブラックホールも直接観測したことになると分かり、ためになった」と話してい



重力波観測について解説する大阪市立大学大学院理学研究科の神田展行教授—大阪市住吉区で、川平愛撮影

た。
重力波は、質量を持った物体が動いた時に周囲の時空にゆがみが生じ、そのゆがみが光速でさざ波のように宇宙空間に伝わる現象。物理学者のアインシュタインが「一般相対性理論」で存在を予言し、世界中の研究者が観測に挑戦していた。

大阪工大「予想通りで驚いた」

大阪工業大情報科学部の真貝寿明教授(一般相対性理論)は「祝・重力波の直接検出」と題して、研究室のウェブページに

100年と展開」を出版している。「こんなにも予想通りのものが見つかるのかと驚いた。素晴らしい発見だ」と感想を語った。今後の研究については「日本でもKAGRAを

使い、改めて重力波を確認したり、海外のチームと協力して重力波がどこから来たものなのかを調べたりしていくことが重要だ」と話した。

【畠山哲郎】

毎日新聞 2016/2/13

「窮理」 2016/8

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	± 0.002 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	3.6×10^{56} erg s ⁻¹
false alarm prob.	< 1 in 5 million	radiated GW energy	2.5-3.5 M _⊙
false alarm rate	< 1 in 200,000 yr	remnant ringdown freq.	~ 250 Hz
Source Masses	M _⊙	remnant damping time	~ 4 ms
total mass	60 to 70	remnant size, area	180 km, 3.5×10^5 km ²
primary BH	32 to 41	consistent with general relativity?	passes all tests performed
secondary BH	25 to 33	graviton mass bound	< 1.2×10^{-22} eV
remnant BH	58 to 67	coalescence rate of binary black holes	2 to 400 Gpc ⁻³ 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= 9.46×10^{12} km; Mpc=mega parsec=3.2 million lightyear, Gpc= 10^3 Mpc, fm=femtometer= 10^{-15} m, M_⊙=1 solar mass= 2×10^{30} kg

重力波が検出された！

重力波が検出できた！

BHが存在した！

BH連星が存在した！

相対論が第0近似として正しい！

We detected GW !

We could detect GW !

BH exists !

BH binary exists !

GR is right as the 0th order !

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, $n(t)$:

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

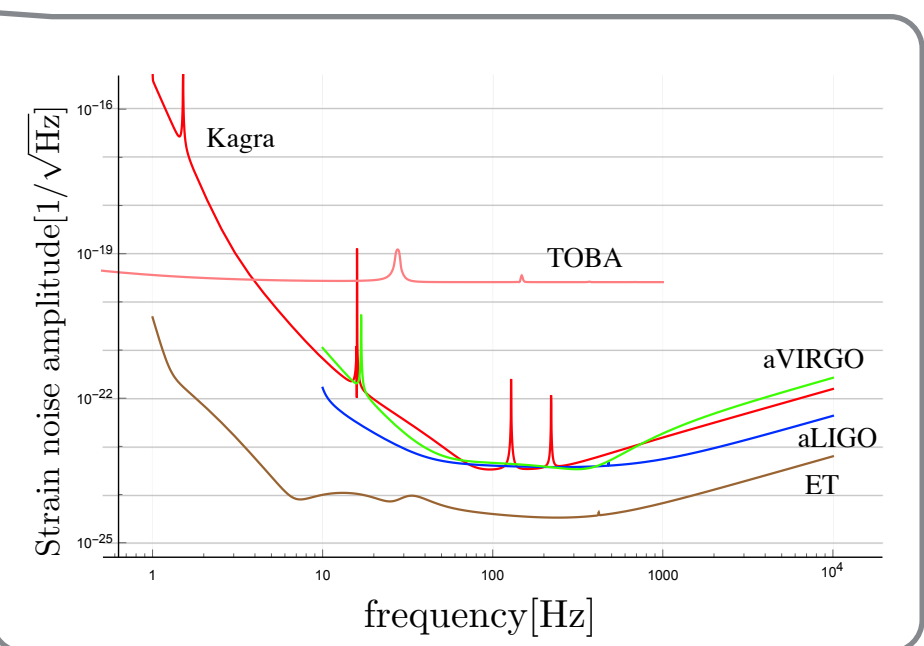
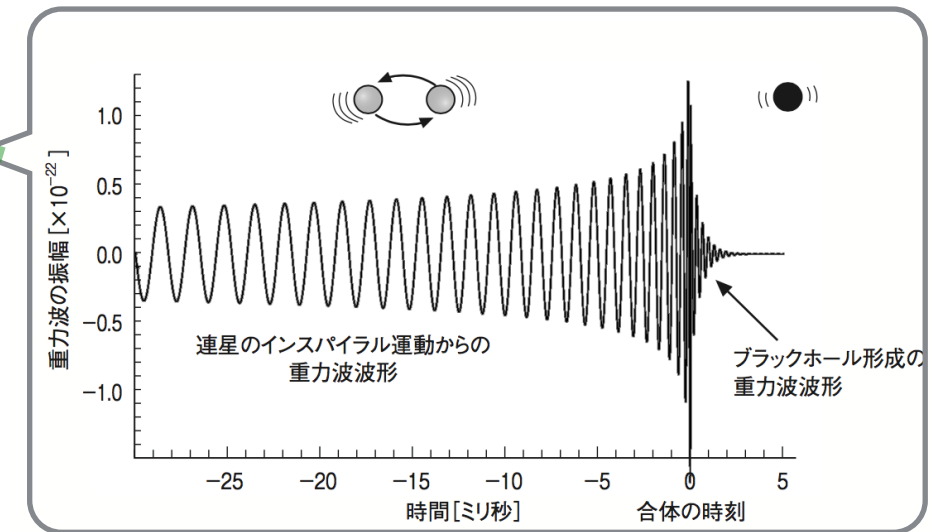
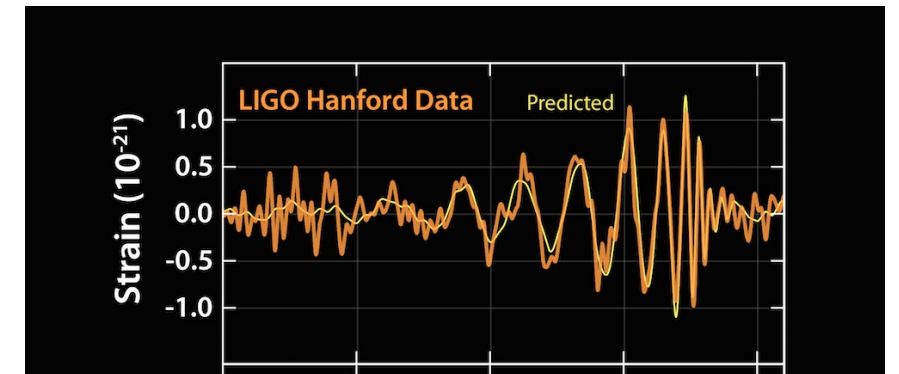
The standard procedure for the detection is judged by the optimal signal-to-noise ratio (SNR), ρ , which is given by

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

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

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

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



第1問 次の文章は、二〇〇二年に刊行された科学論の一節である。これを読んで、後の問い(問1～6)に答えよ。なお、設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った。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。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きており、二十世紀後半の科学技術の存在はGNPの二パーセント強の投資を要求するまでになっ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先進国の社会体制を維持する重要な装置となってきた。

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っていた。「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、自然に介入し、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ってきたが、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す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」という問いかけを、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^(注4)コリンズとピンチの『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っている。コリンズとピンチは、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^(注5)謬の知識という神のイメージで捉えられてきており、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、^(注5)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というのである。

⑥ コリンズとピンチの処方箋は、科学者が振りまいた当初の「実在と直結した無^(注5)謬の知識という神のイメージ」を科学の実態に即した「不^(注6)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^(注7)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。一九六九年にウエーバーが、十二年の歳月をかけて開発した実験装置を

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ったのである。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、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できれば、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っており、それと食い違いが実験の失敗がセ(エ)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ったかどうかはわからない。しかし、優れた装置があれば、何が適切な結果かということはわからない……」。コリンズとピ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って否定論に傾き、それ以後、重力波の存在は明確に否定されたのであった。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って決着をつけられていなかったが、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。

⑩ コリンズとピンチは、このようなケーススタディーをもとに、「もっと科学を」路線を批判するのである。民主主義国家の一

7 ウェーバー——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っ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が証明されなかったが、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。

(ウ)

ヤツカイ
3
⑤ ヤツコウがある野草を探す
④ ヤツキになって反対する
③ ヤクドシを乗り切る
② ツウヤクの資格を取得する
① ごりヤクがある

(エ)

センコク
4
⑤ 筆跡がコクジした署名
④ コクソウ地帯
③ コクビヤクのつけにくい議論
② コクメイな描写
① 上級裁判所へのジョウウコク

物 理

I 空所を埋め、問いに答えよ。(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

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

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、

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

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。

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

式①、②より、

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

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。

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

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、

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

となる。この式より

$$\Delta \vec{v} = - \left(\text{エ} \right) \times \vec{F} \Delta t \tag{4}$$

が得られる。式④は、

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

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。

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。

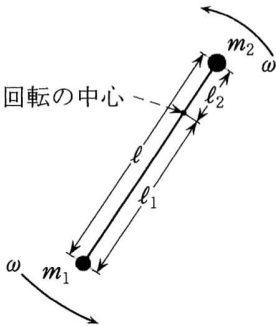


図1 互いの周りを回転する星1と星2

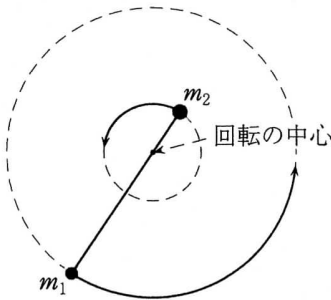


図2 力学的エネルギーが保存するときの軌道

sport

2016/4/21

Cameron McEvoy wears his passion on his swimming cap

Swimmer and physics student Cameron McEvoy is sporting the signature of a gravitational wave on his cap.



Cameron McEvoy wins a 100m heat with the gravitational wave on his Bond University club cap. Source:AAP

The discovery has made a big impression on McEvoy, 21, whose heroes tend to be scientists rather than swimmers.

“It’s the 100th anniversary of Einstein’s general theory of relativity, which is his theory of gravity and coincidentally, physicists at Advanced LIGO (observatory) discovered gravitational waves, which is the stretching and contraction of space-time itself — everything we move in and pretty much what the universe is,” he said.



2017/10





GRAVITATIONAL WAVES DRESS

★★★★★ 6 reviews
\$179.00

SIZE

- X-SMALL

SMALL

MEDIUM

L
- XX-LARGE

X-SMALL WITH 15" SLEEVES
- SMALL WITH 15" SLEEVES

MEDIUM
- LARGE WITH 15" SLEEVES

X-LARGE
- XX-LARGE WITH 15" SLEEVES

ADD TO CART

Want to wear the fabric of space time?

Celebrate the **discovery of gravitational waves**. At first glance, you see plaid. Look a bit further and you see data from the **LIGO** detectors. It's a classic educational twist.

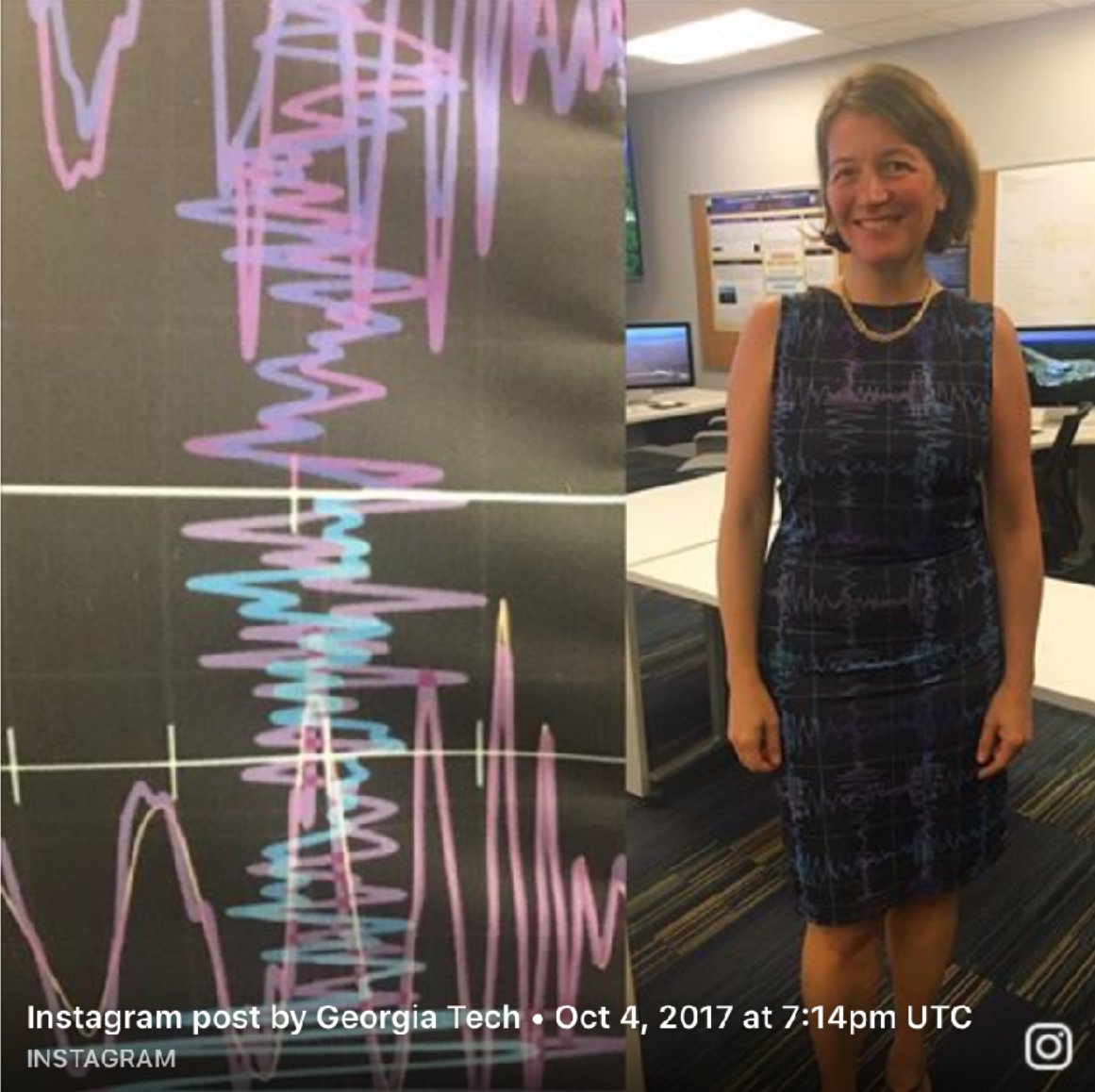
MATCHING PLAID TIE AND ACCESSORIES AVAILABLE



Laura Cadonati

10月11日 1:22 · 2人

Posting for a bit of comic relief: "It's like a better version of Ms Frizzle!!" Thanks to [Gabriela Gonzalez](#) for the dress, a rite of passage of sort?



Instagram post by Georgia Tech • Oct 4, 2017 at 7:14pm UTC
INSTAGRAM

👍 いいね！ 💬 コメントする ➦ シェアする

👍❤️ あなた、Jorge Pullinさん、Deirdre Shoemakerさん、他83人

Accessories > Ties

Gravitational Waves Tie

★★★★☆ 4,4 (1254)

\$44.30

per tie

Qty: 1

Add to Cart

15% Off with code CREATIVEDEAL



Designed for you
by Shenova by Zazzle

Customize



Independent artist's content may not match model depicted, RealView™ technology illustrates fit and usage only.



GRAVTON VEGETABLE

■グラビトン野菜

1箱 4,500円(税・送料込み)

季節や生産地の特色が生きたバラエティ豊かな10〜13種類の新鮮なお野菜を、厳選してバランス良くお届けいたします。

ご注文はこちら



おいしさの秘密！

鮮度保持袋

高波動（重力波）を導入したポリエチレン袋に入れてお届けします。細胞の活性化と酸化還元作用で野菜の鮮度を保つ効果があります。

ダンボール箱

ダンボール箱にも重力波が入っています。空箱は大切な衣類や小物などの収納箱としてもお使いいただけます。



重力波が入っている段ボール箱？？？



AwaraSan @Awara_san · 4月19日

>段ボール箱にも重力波が入っています
この、何を言っているんだ感が



3,522



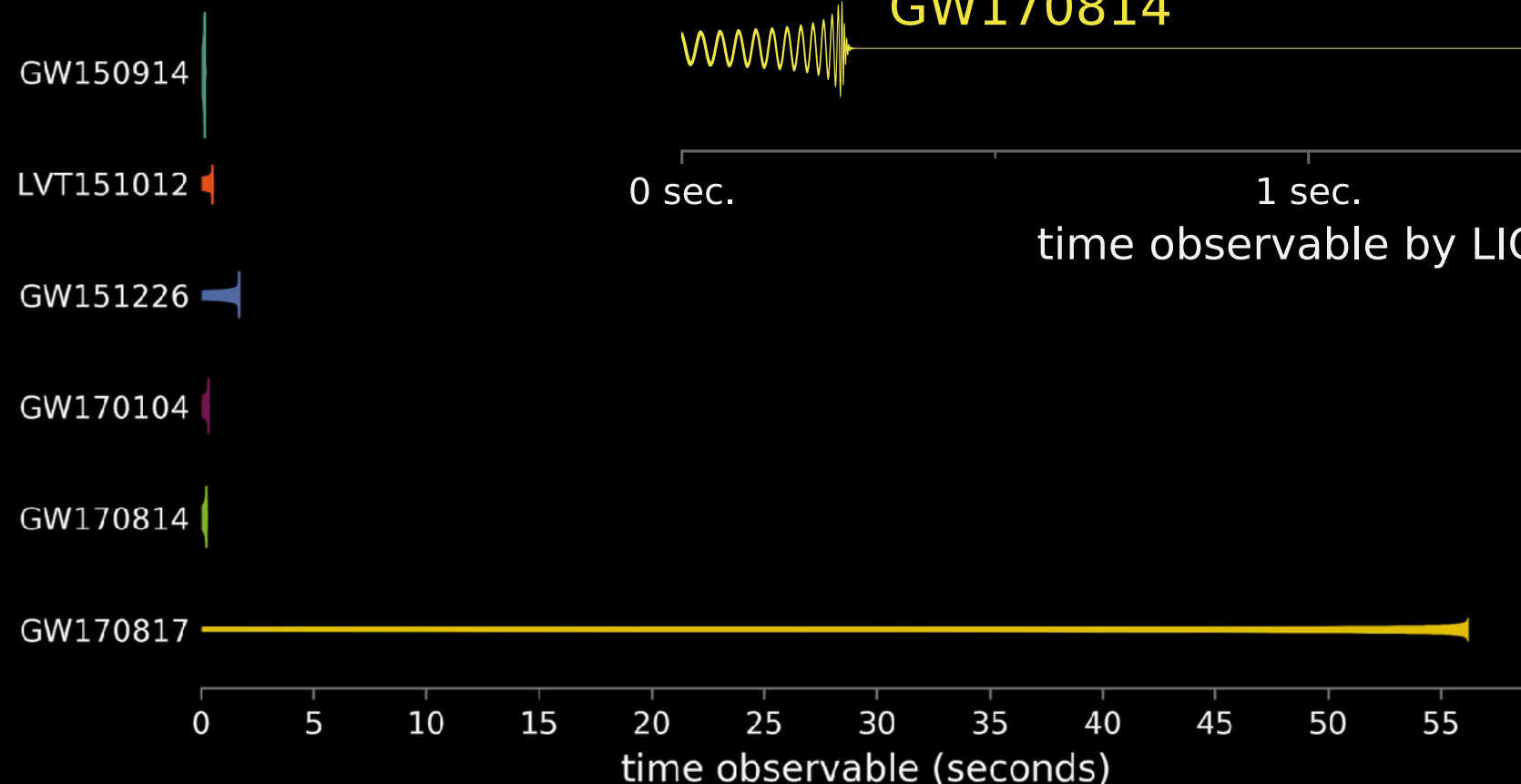
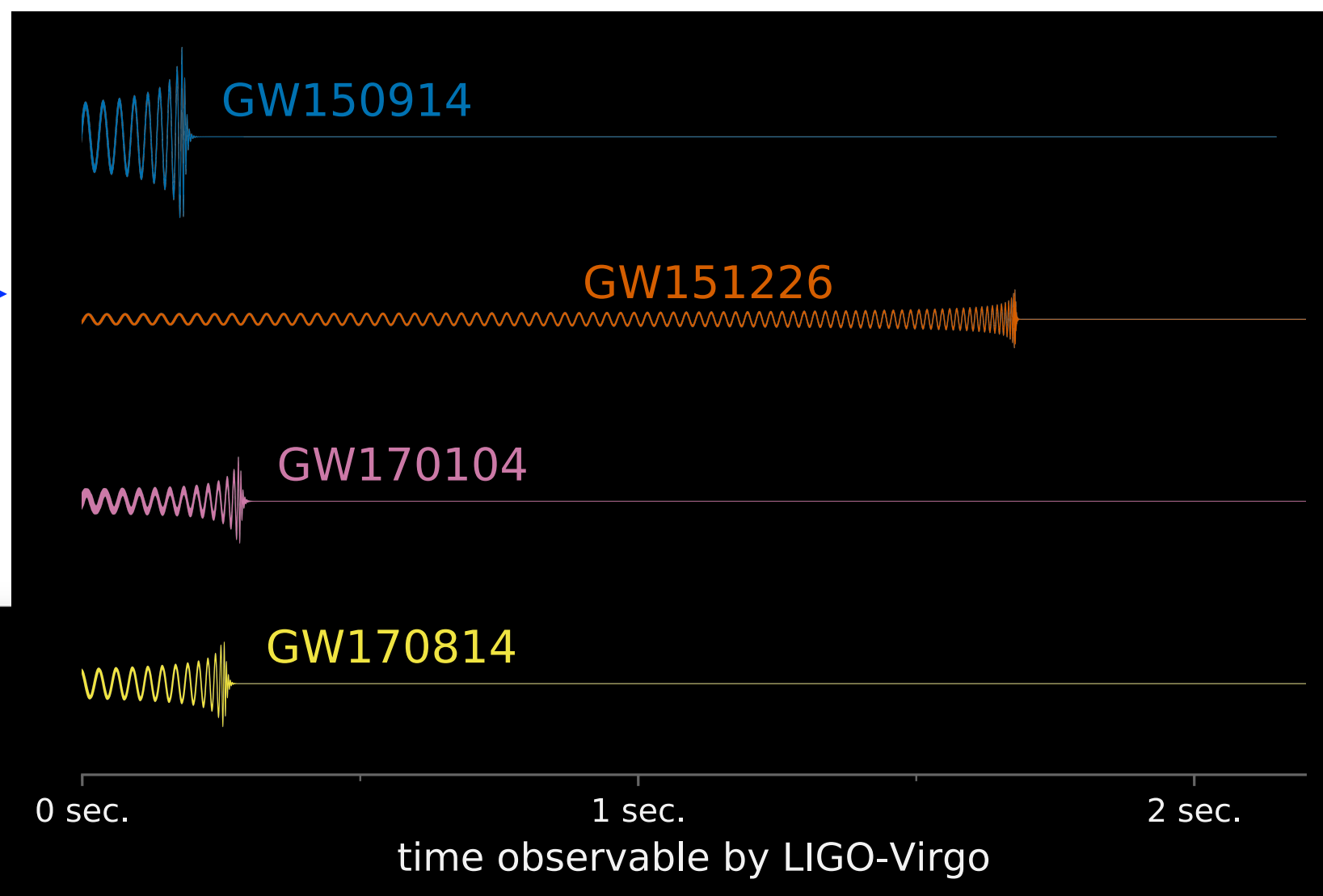
1,243



連星中性子星合体 重力波検出, 多くの天文台が同時観測

GW170817

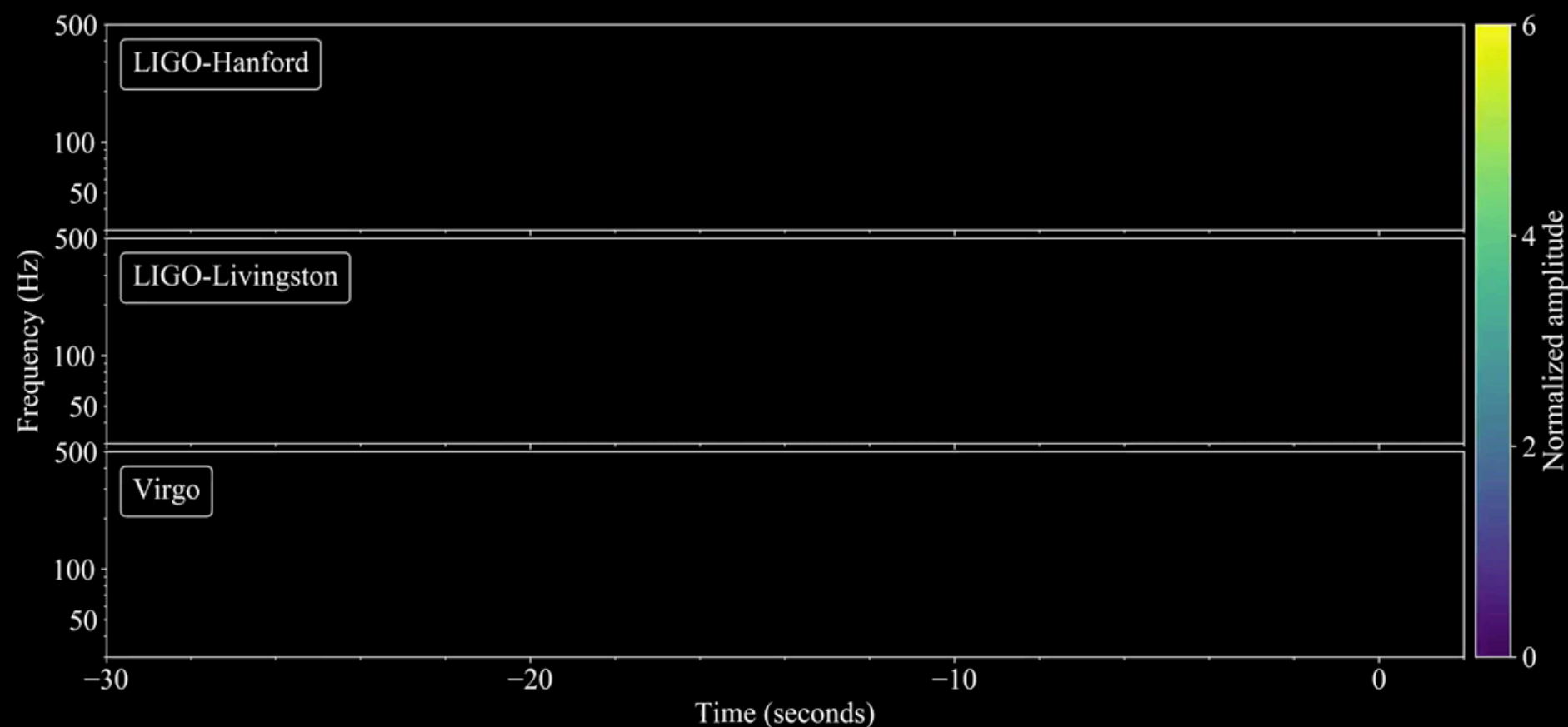
これまでの
BHBH合体
による重力波



今回のNSNS
合体による重力波

連星中性子星合体 重力波検出, 多くの天文台が同時観測

GW170817



GW150914

LVT151012

GW151226

GW170104

GW170814

GW170817

0 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 55

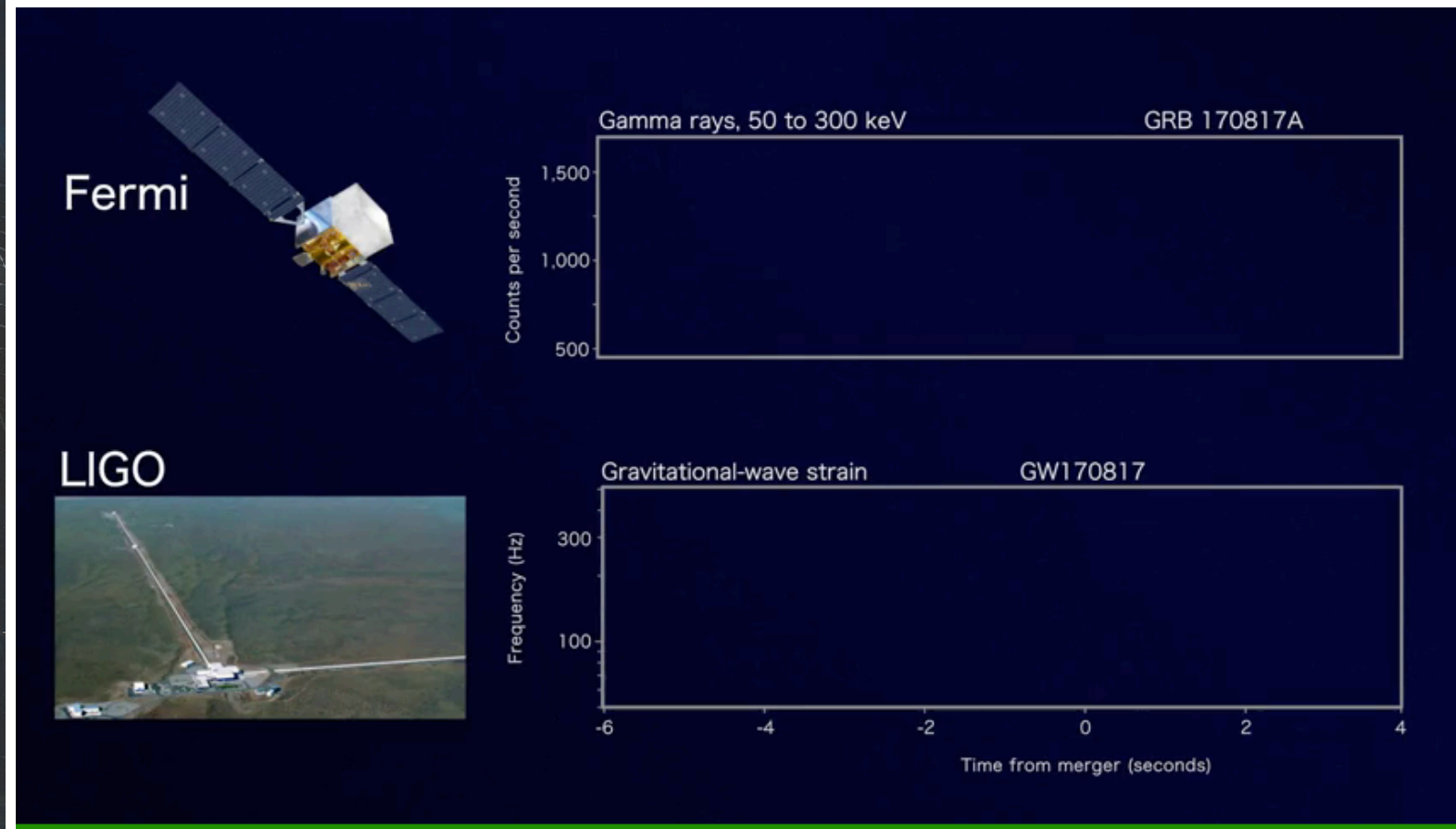
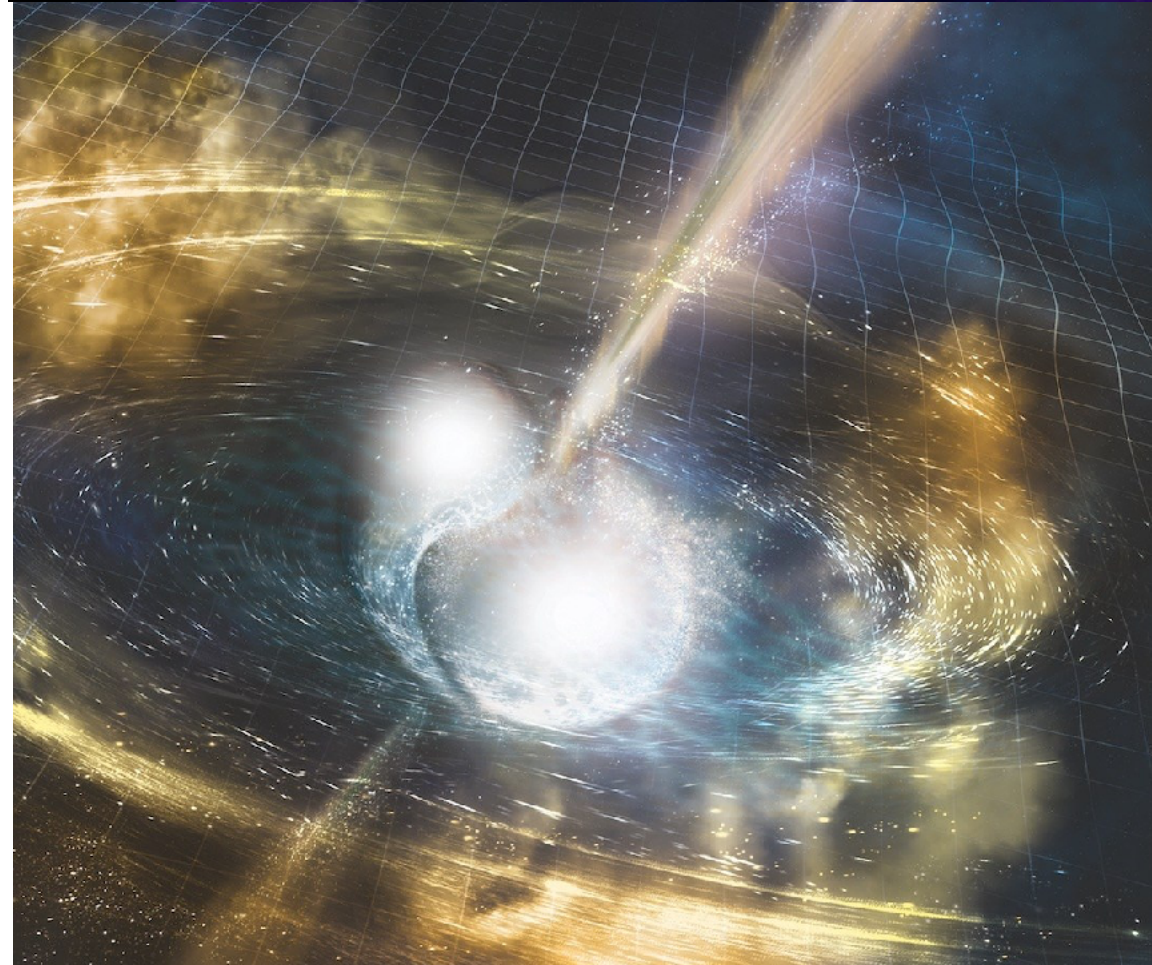
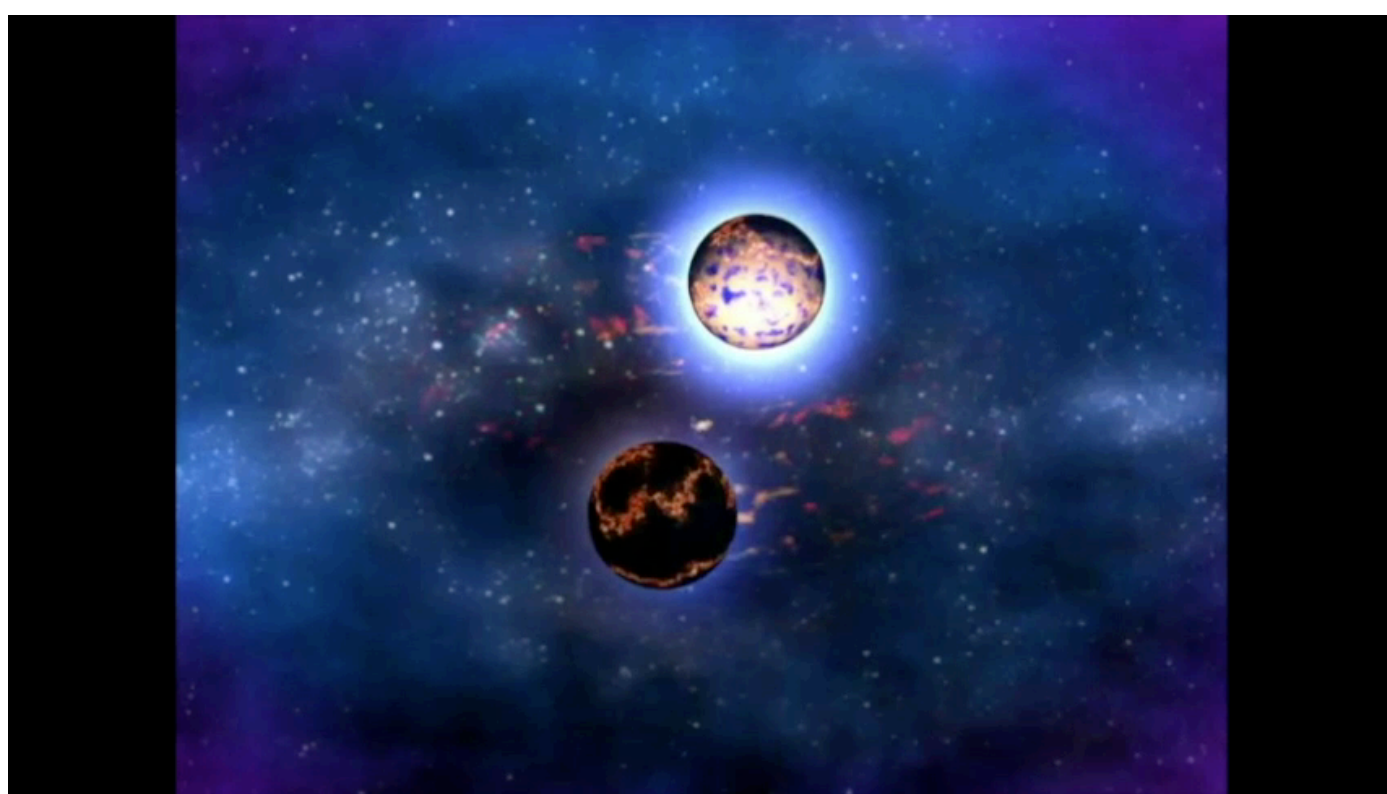
time observable (seconds)

LIGO/University of Oregon/Ben Farr

今回のNSNS
合体による重力波

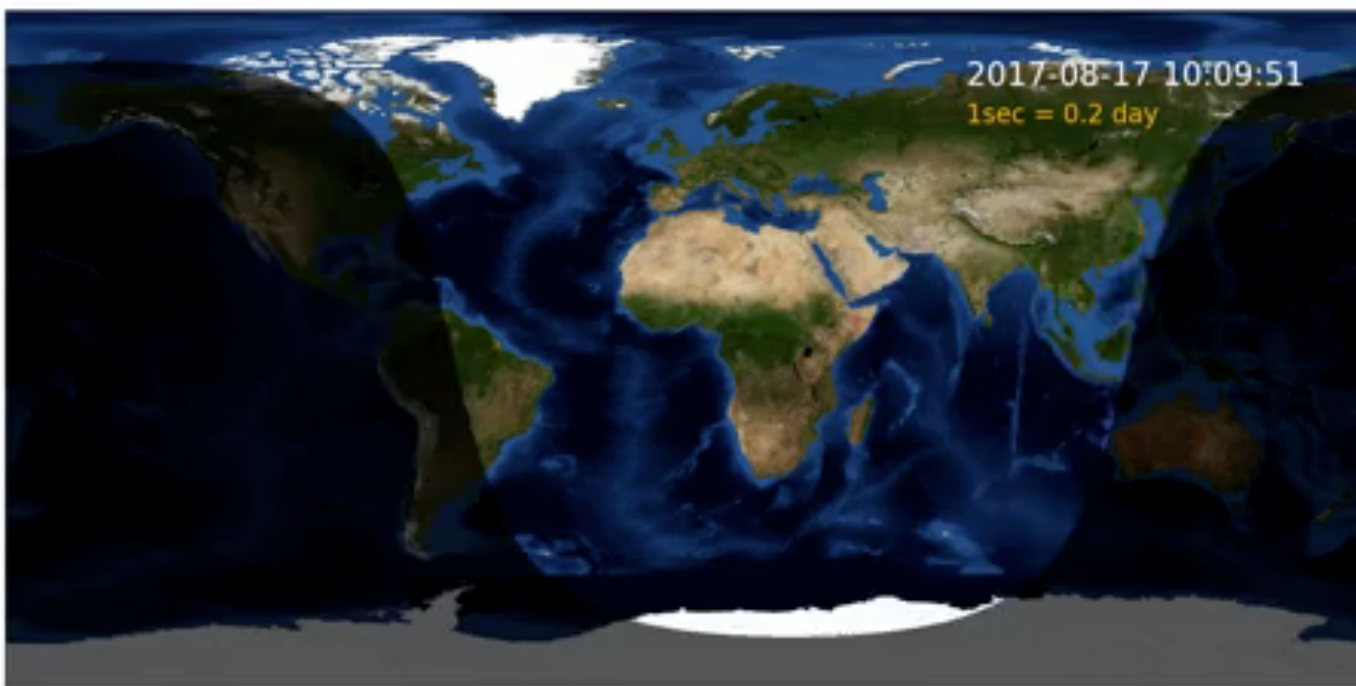
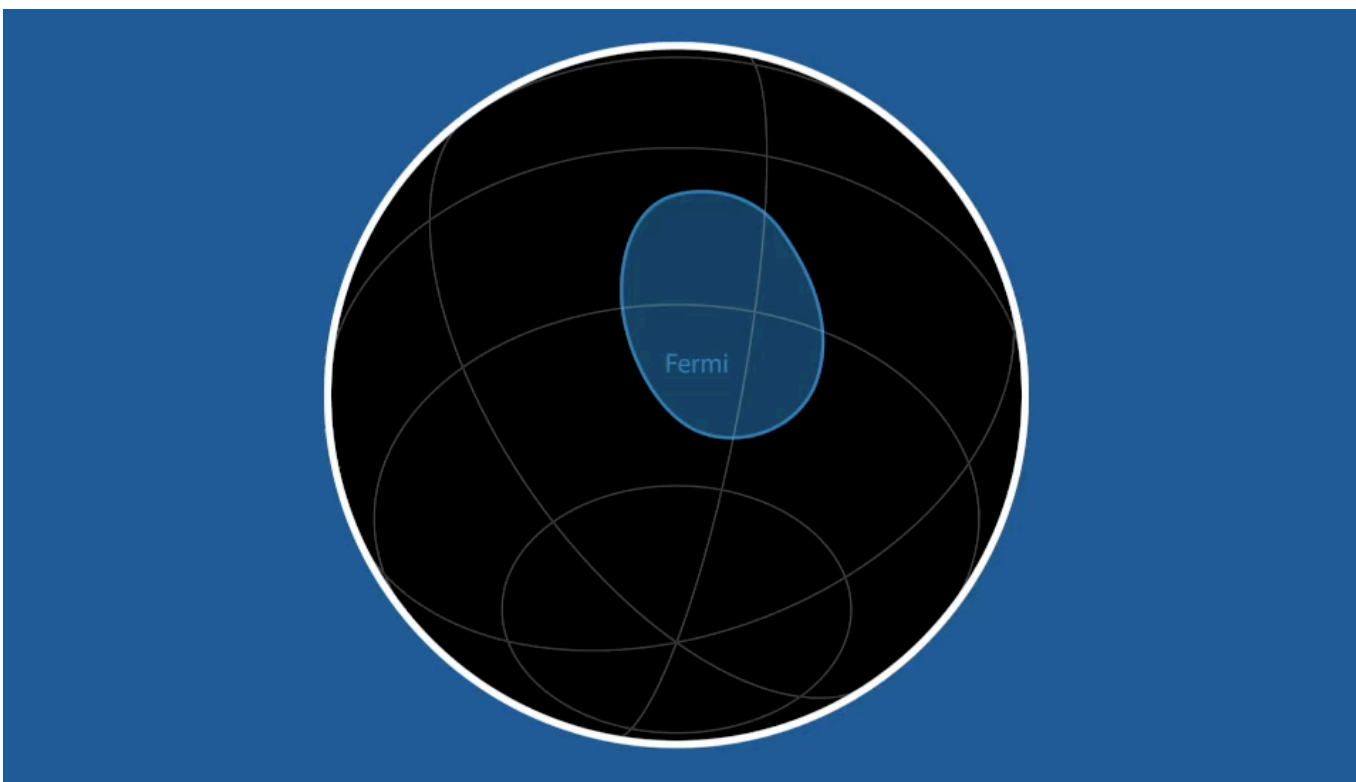
連星中性子星合体 重力波検出, 多くの天文台が同時観測

GW170817



連星中性子星合体 重力波検出, 多くの天文台が同時観測

GW170817



波源はNGC4993 (40Mpc先) !
1億3000万光年先

ASTROPHYSICAL JOURNAL LETTERS, 848:L12 (59pp), 2017 October 20

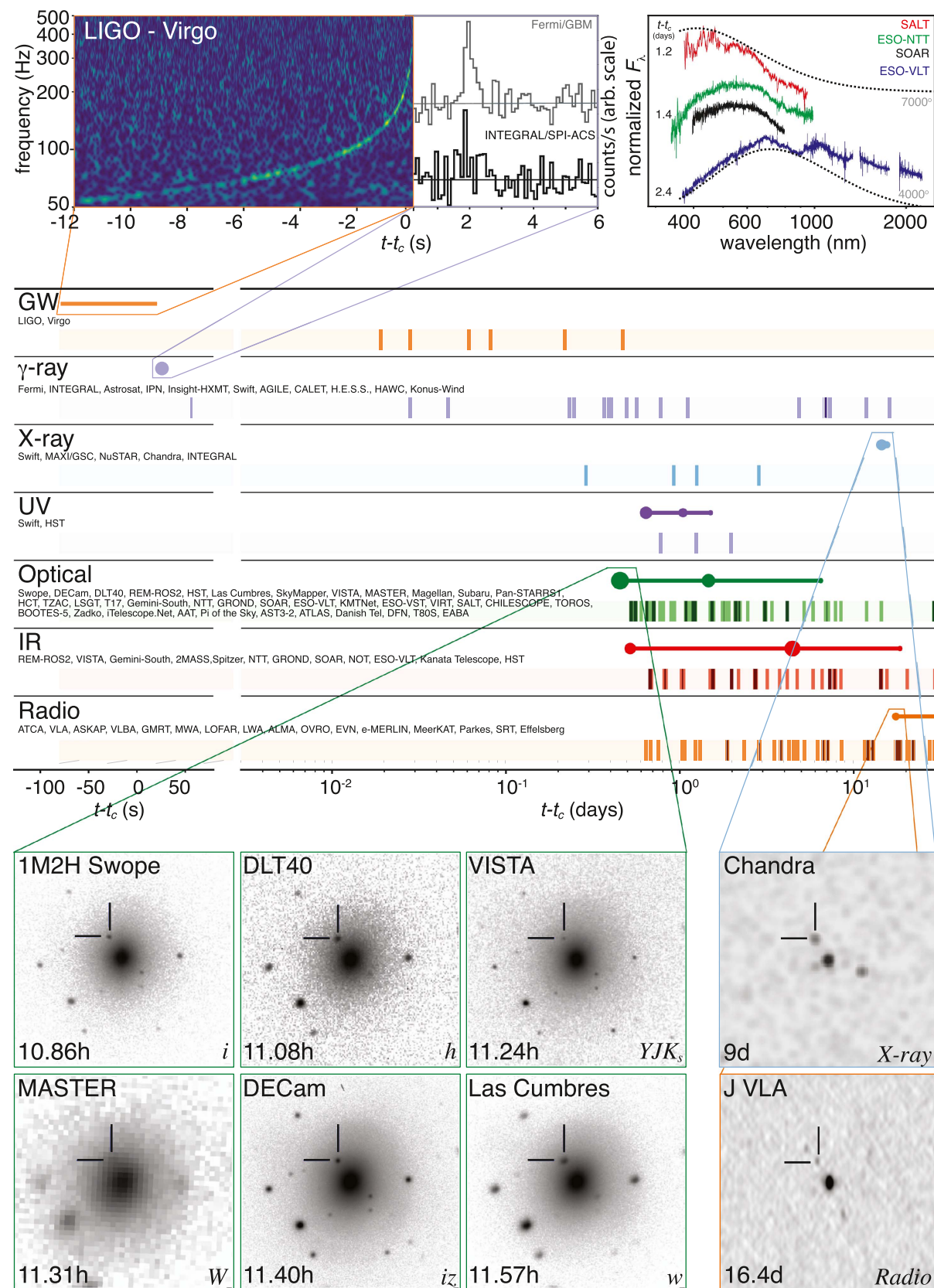


Figure 2. Timeline of the discovery of GW170817, GRB 170817A, SSS17a/AT 2017gfo, and the follow-up observations are shown by messenger and wavelength relative to the time t_c of the gravitational-wave event. Two types of information are shown for each band / messenger. First, the shaded dashes represent the

連星中性子星合体 重力波検出, 多くの天文台が同時観測

GW170817

FIRST COSMIC EVENT OBSERVED IN GRAVITATIONAL WAVES AND LIGHT

Colliding Neutron Stars Mark New Beginning of Discoveries

Collision creates light across the entire electromagnetic spectrum. Joint observations independently confirm Einstein's General Theory of Relativity, help measure the age of the Universe, and provide clues to the origins of heavy elements like gold and platinum

Gravitational wave lasted over 100 seconds

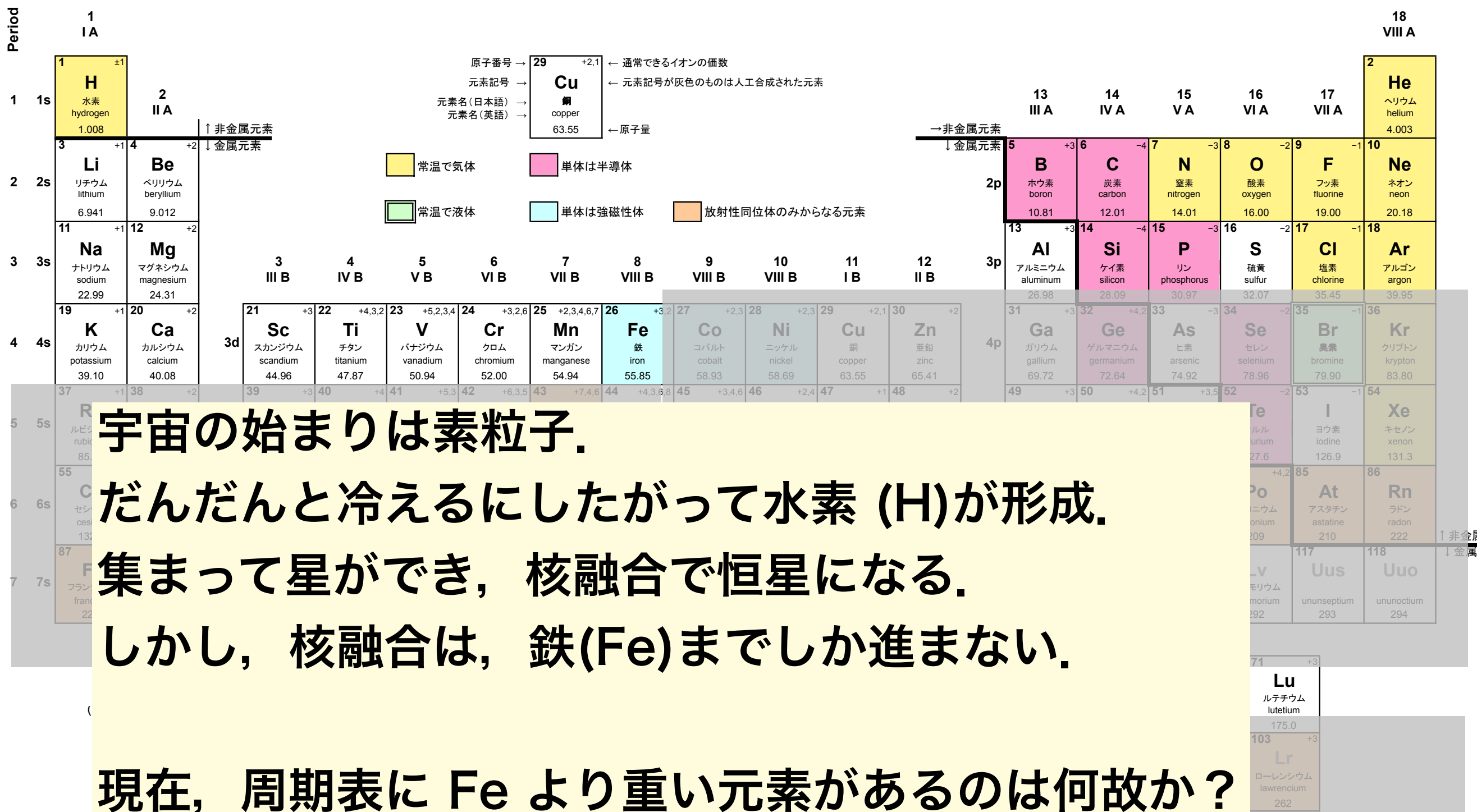
On August 17, 2017, 12:41 UTC, LIGO (US) and Virgo (Europe) detect gravitational waves from the merger of two neutron stars, each around 1.5 times the mass of our Sun. This is the first detection of spacetime ripples from neutron stars.

Within two seconds, NASA's Fermi Gamma-ray Space Telescope detects a short gamma-ray burst from a region of the sky overlapping the LIGO/Virgo position. Optical telescope observations pinpoint the origin of this signal to NGC 4993, a galaxy located 130 million light years distant.

LIGO

Georgia Tech Center for Relativistic Astrophysics





[LIGO'S **GRAVITATIONAL-WAVE** DETECTIONS]

[**GW150914**]

DISCOVERED:

14.09.2015

1.3 BILLION
LIGHT-YEARS
AWAY

62 SOLAR
MASSES

360 KILOMETRES IN
DIAMETER

[**GW151226**]

DISCOVERED:

26.12.2015

1.4 BILLION
LIGHT-YEARS
AWAY

21 SOLAR
MASSES

120 KILOMETRES IN
DIAMETER

[**GW170104**]

DISCOVERED:

04.01.2017

3 BILLION
LIGHT-YEARS
AWAY

49 SOLAR
MASSES

270 KILOMETRES IN
DIAMETER

1 BILLION
LIGHT YEARS

2 BILLION
LIGHT YEARS

3 BILLION
LIGHT YEARS

4 BILLION
LIGHT YEARS

DID YOU KNOW ?

THE SOLAR MASS IS
A STANDARD UNIT OF MASS

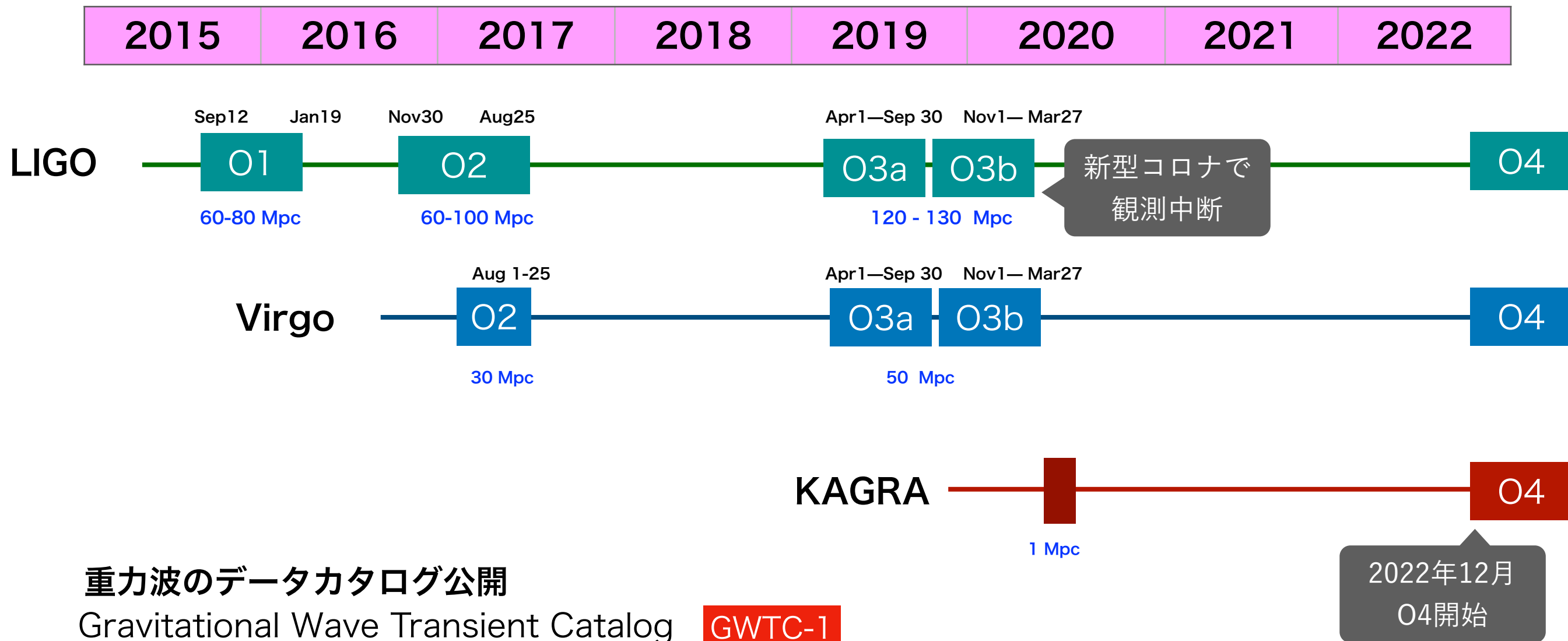
IN ASTRONOMY

IT IS EQUAL TO
THE MASS OF THE SUN

EQUAL TO APPROXIMATELY
 1.99×10^{30} KG

YOU ARE
HERE

観測スケジュール (Observation 1/2/3a/3b)



重力波のデータカタログ公開

Gravitational Wave Transient Catalog

GWTC-1

2018/12/3

GWTC-2

2020/10/28

GWTC-2.1

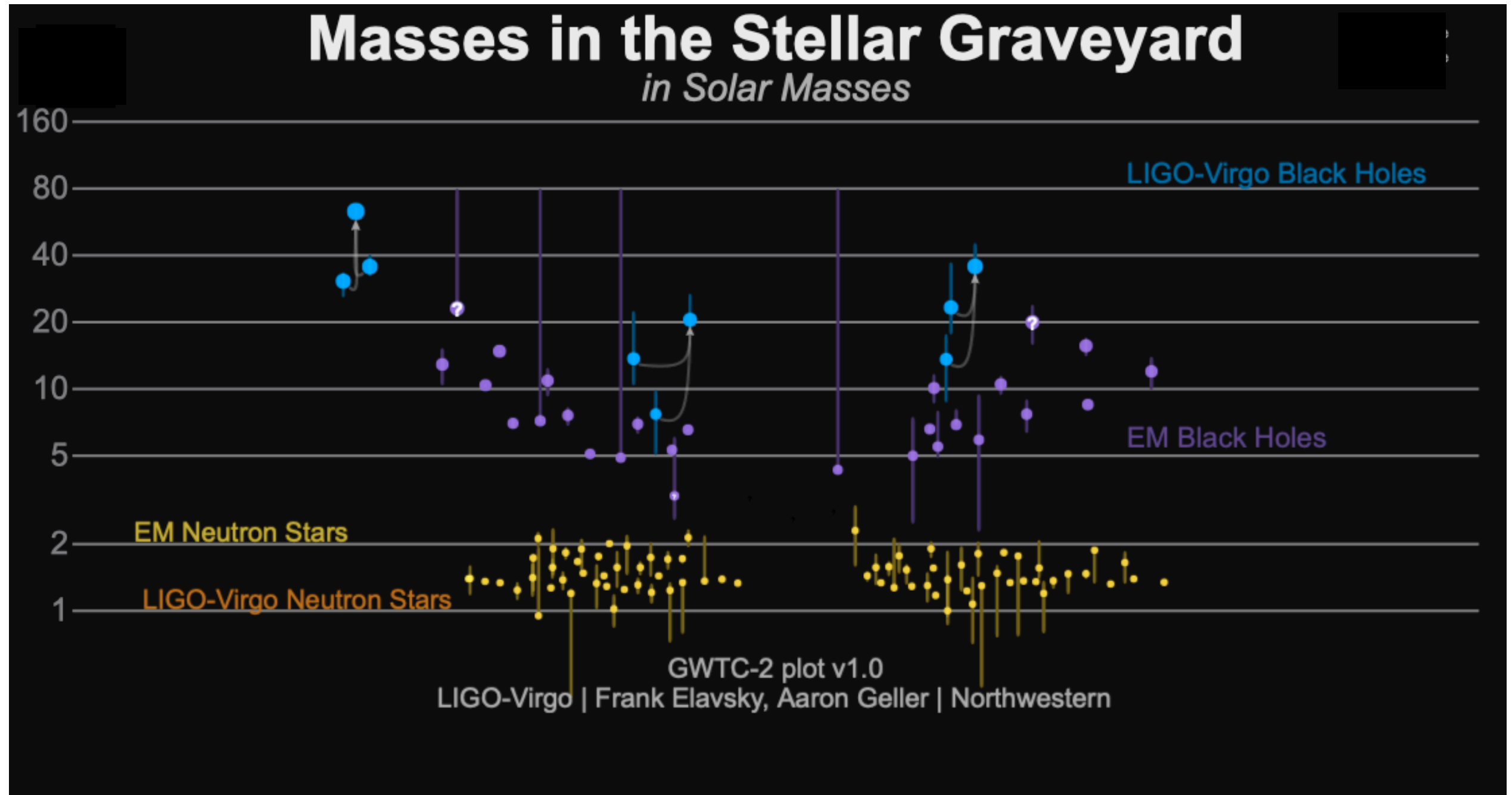
2021/8/2

GWTC-3

2021/11/5



O1 (2015/9/12 - 2016/1/19)



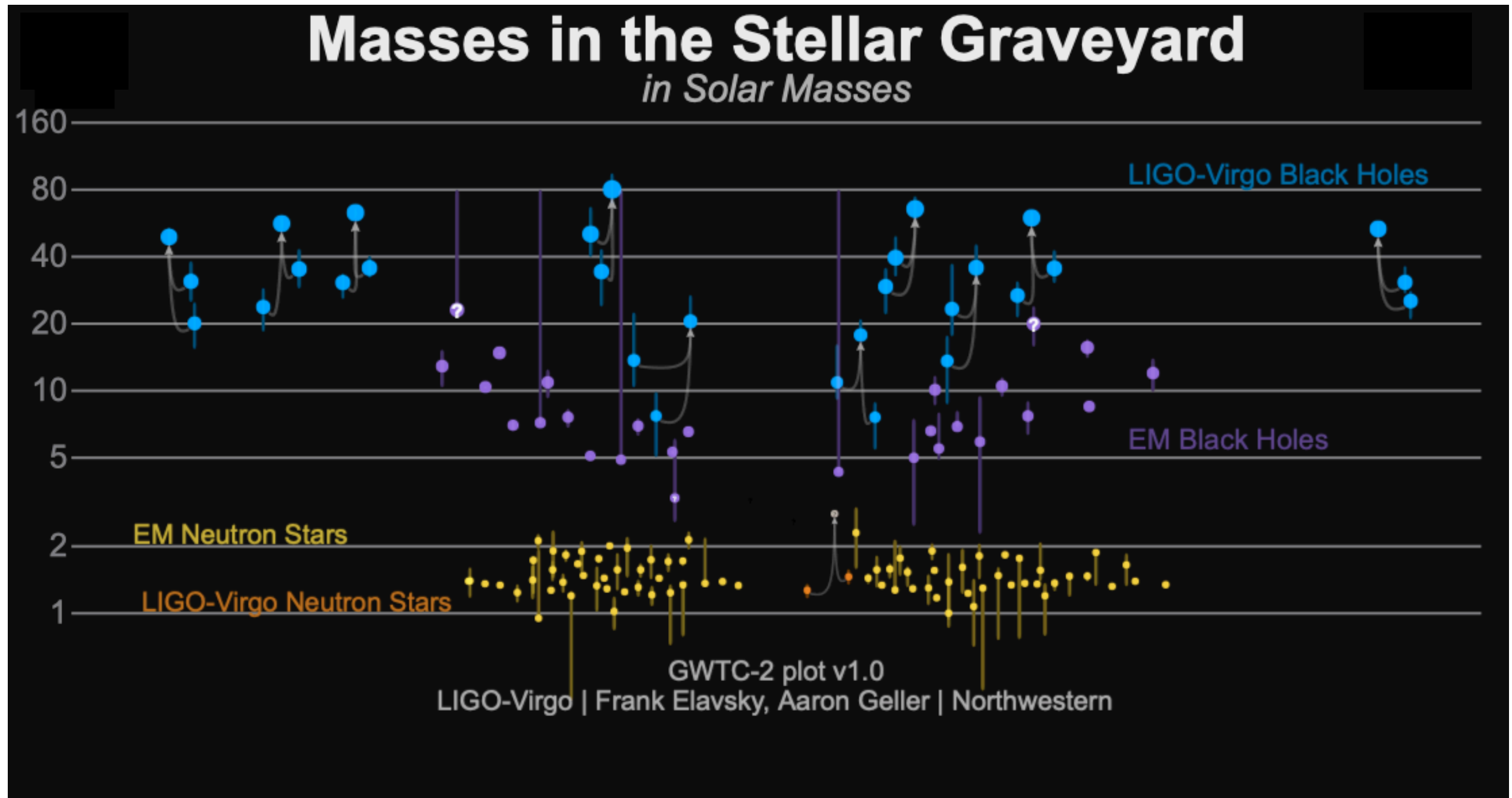
3 BHBH

GW150914: the first ever detection of gravitational waves from the merger of two black holes more than a billion light years away

<https://media.ligo.northwestern.edu/gallery/mass-plot>

O2 (2016/11/30 - 2017/8/25)

After O2 : GWTC1 (2018/12/3 released)



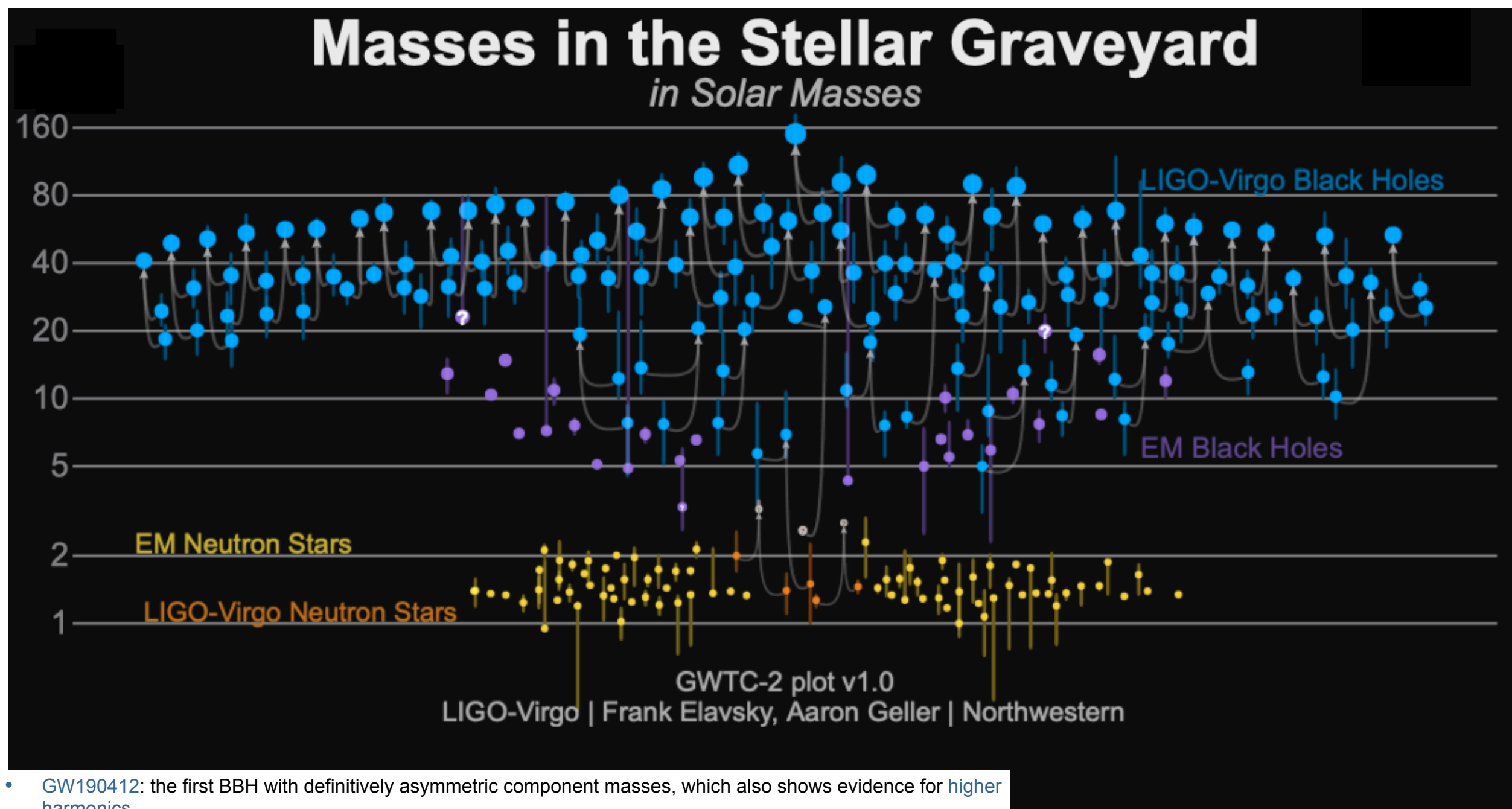
- **GW170814**: the first GW signal measured by the three-detector network, also from a binary black hole (BBH) merger;
- **GW170817**: the first GW signal measured from a binary neutron star (BNS) merger — and also the first event observed in light, by dozens of telescopes across the entire electromagnetic spectrum.

<https://media.ligo.northwestern.edu/gallery/mass-plot>

10 BHBH
1 NSNS

O3a (2019/4/1 - 2019/9/30)

After O3a : GWTC2 (2020/10/28 released)



- [GW190412](#): the first BBH with definitively asymmetric component masses, which also shows evidence for [higher harmonics](#)
- [GW190425](#): the second gravitational-wave event consistent with a BNS, following [GW170817](#)
- GW190426_152155: a low-mass event consistent with either an NSBH or BBH
- GW190514_065416: a BBH with the smallest effective aligned spin of all O3a events
- GW190517_055101: a BBH with the largest effective aligned spin of all O3a events
- [GW190521](#): a BBH with total mass over 150 times the mass of the Sun
- [GW190814](#): a highly asymmetric system of ambiguous nature, corresponding to the merger of a 23 solar mass black hole with a 2.6 solar mass compact object, making the latter either the lightest black hole or heaviest neutron star observed in a compact binary
- GW190924_021846: likely the lowest-mass BBH, with both black holes exceeding 3 solar masses

46 BHBH

2 NSNS

2 BH+?

重力波

重力波の生成機構 一般相対性理論によれば、大質量でコンパクトな天体が加速度運動することにより、重力波が発生する。重力波源としては連星の合体や超新星爆発、非球対称な星の高速回転や、宇宙初期に起源をもつ重力波が宇宙空間を伝播していると考えられる。これらのうち、データとの相関解析を可能にする波形予測ができるのは、連星合体からの重力波である。十分に合体前はニュートン力学に相対論補正を加えたポスト・ニュートン展開により、合体前後は数値シミュレーションにより、合体後ブラックホールが生じる場合にはブラックホール時空の摂動によっても波形モデルが得られる。これらのモデルと重力波干渉計で得られる信号の相関をとることで、連星ブラックホール（以下 BBH）や連星中性子星（BNS）、および中性子星・ブラックホール連星（NSBH）の合体現象による重力波の検出、および、パラメータ推定が 2015 年以来可能になった。

重力波の観測 これまでに、米欧のレーザー干渉計 LIGO, Virgo によって、O3a と呼ばれる観測期間終了までに、BBH による重力波が 46 例、BNS による重力波が 2 例報告されている。日本の KAGRA（かぐら）も O3b 観測期間の最後に共同観測に入った。O3b 期の重力波イベントは 2021 年 7 月時点で未発表である。現在、各干渉計は次の観測期間 O4（2022 年夏から 1 年間の予定）に向けて観測感度を上げるため、干渉計の改良中である。

重力波イベントは、観測された年月日を用いて、GW150914 の形で命名される。O3a 期より、時分秒を加えた名称が正式となった。重力波イベントは速報体制が取られ、多波長電磁波追観測が可能になっているが、これまでに波源が特定されたのは GW170817 のみである。

表 1: 重力波レーザー干渉計の位置と腕の向き（例えば N 36° W は、北から西方に 36° の向きを指す。）

干渉計		腕長 (km)	緯度	経度	X-腕	Y-腕
LIGO Hanford	米国	4	46°27'19″ N	119°24'28″ W	N 36° W	W 36° S
LIGO Livingston	米国	4	30 33 46 N	90 46 27 W	N 18° S	S 18° E
Virgo	欧州	3	43 37 53 N	10 30 16 E	N 19° E	W 19° N
KAGRA	日本	3	36 24 36 N	137 18 36 E	E 28.3° N	N 28.3° W

表 2: 過去の観測期間

観測期	Advanced LIGO		Advanced Virgo		KAGRA	
	年 月 日	年 月 日	年 月 日	年 月 日	年 月 日	年 月 日
O1	2015 9 12	–2016 1 19	–	–	–	–
O2	2016 11 30	–2017 8 25	2017 8 1	–2017 8 25	–	–
O3a	2019 4 1	–2019 9 30	同左	–	–	–
O3b	2019 11 1	–2020 3 27	同左	–	–	–
O3GK	–	–	–	–	2020 4 7	–2020 4 21

観測された中で特筆すべきイベント 突発的重力波カタログ 2(GWTC2) として 2020 年 10 月に発表されたものが 2021 年 7 月時点で最新である。

GW150914 最初に報告された直接重力波観測イベント。BBH の存在を明らかにし、太陽質量 ($M_{\odot}$) の 30 倍以上の BH の存在を初めて確認した。報告された BBH のイベントの中でも最もシグナル・ノイズ比 (SNR) が高い。GW170817 最初に報告された BNS イベント。直後に多くの追観測がなされ、マルチ・メッセンジャー天文学の初めての成功例となった。重力波波形から得られた中性子星の状態方程式に対する制限は核密度 $\rho_{\text{nuc}} = 2.8 \times 10^{14} \text{g/cm}^3$ の 2 倍の密度における圧力として ($2\rho_{\text{nuc}} = 3.5_{-1.7}^{+2.7} \times 10^{34} \text{dyn/cm}^2$ (90% 信頼区間)) である。ガンマ線と重力波の到着時刻の差 1.7 秒から得られた重力は伝播速度の光速からのず

れの割合に対する制限は 1×10^{-15} 以下である。また、可視・赤外における追観測から鉄以上の重元素合成の形跡が見られ、 r -過程元素合成の重要なチャンネルになっていることを示唆している。GW190412 明らかに質量比の異なる BBH からの重力波で、重力波の高次モードの検出がなされた。GW190425 2 番目に発見された BNS。GW190521 総質量が最大の BBH で、合体後の質量が $150M_{\odot}$ を超えるものと考えられる。いわゆる中間質量 BH の領域の候補天体の初の発見となった。BBH の合体の第 2 世代の合体とも考えられている。GW190814 星形成のシナリオでは不可能とされる $2\text{--}5M_{\odot}$ の質量領域のコンパクト天体からの重力波と考えられる。GW190924: 現在までで最小質量の BBH。GW200105, GW200115: はじめて確実なものと報告された NS-BH 連星系合体。

表 3: 報告された主な重力波（2021 年 7 月現在）。連星の質量を M_1, M_2 としたときの、チャープ質量 $M_c = (M_1 M_2)^{3/5} / (M_1 + M_2)^{1/5}$ 、質量比（中央値の比） M_2/M_1 、有効スピン χ_{eff} 、最終的に形成された BH の質量 M_{final} (NS を含む場合は全質量 $M_{\text{全}} = M_1 + M_2$)、距離、波源特定精度（平方度） $(\Delta\theta)^2$ 、シグナル・ノイズ比を示す。幅のある量は 90% の信頼区間。（種類ごとに日付順。BBH については、SNR が 13.1 より大きいもののみ。）

イベント (BBH)	$M_c(M_{\odot})$	質量比	χ_{eff}	$M_{\text{final}}(M_{\odot})$	距離 (Mpc)	$(\Delta\theta)^2$	SNR
GW150914	$28.6_{-1.5}^{+1.7}$	0.86	$-0.01_{-0.13}^{+0.12}$	$63.1_{-3.0}^{+3.4}$	440_{-170}^{+150}	179	24.4
GW170608	$7.9_{-0.2}^{+0.2}$	0.69	$0.03_{-0.07}^{+0.19}$	$17.8_{-0.7}^{+3.4}$	320_{-110}^{+120}	392	14.9
GW170814	$24.1_{-1.1}^{+1.4}$	0.82	$0.07_{-0.12}^{+0.12}$	$53.2_{-2.4}^{+3.2}$	600_{-220}^{+150}	87	15.9
GW190408.181802	$18.3_{-1.2}^{+1.9}$	0.75	$0_{-0.19}^{+0.14}$	$41.1_{-2.8}^{+3.9}$	1550_{-600}^{+400}	–	14.67
GW190412	$13.3_{-0.3}^{+0.4}$	0.28	$0.25_{-0.11}^{+0.08}$	$37.3_{-3.8}^{+3.9}$	740_{-170}^{+140}	21	18.86
GW190521	$69.2_{-10.6}^{+17.0}$	0.72	$0.03_{-0.39}^{+0.32}$	$156.3_{-22.4}^{+21.9}$	3920_{-1950}^{+2190}	940	14.38
GW190521.074359	$32.1_{-2.5}^{+3.2}$	0.78	$0.09_{-0.13}^{+0.1}$	$71.0_{-4.4}^{+6.5}$	1240_{-570}^{+400}	500	24.38
GW190630.185205	$24.9_{-2.1}^{+2.1}$	0.68	$0.1_{-0.12}^{+0.12}$	$56.4_{-4.6}^{+4.4}$	890_{-370}^{+560}	–	15.64
GW190728.064510	$8.6_{-0.3}^{+0.5}$	0.66	$0.12_{-0.07}^{+0.2}$	$19.6_{-1.3}^{+4.7}$	870_{-370}^{+260}	–	13.64
GW190814	$6.09_{-0.06}^{+0.06}$	0.11	$0_{-0.06}^{+0.06}$	$25.6_{-0.9}^{+1.1}$	240_{-50}^{+40}	19	22.18
GW190828.063405	$25.0_{-2.1}^{+3.4}$	0.82	$0.19_{-0.16}^{+0.15}$	$54.9_{-4.3}^{+7.2}$	2130_{-930}^{+660}	520	16.04
GW190910.112807	$34.3_{-4.1}^{+4.1}$	0.81	$0.02_{-0.18}^{+0.18}$	$75.8_{-8.6}^{+8.5}$	1460_{-580}^{+1030}	–	13.42
GW190924.021846	$5.8_{-0.2}^{+0.2}$	0.56	$0.03_{-0.09}^{+0.3}$	$13.3_{-1.0}^{+5.2}$	570_{-220}^{+220}	380	13.16
イベント (BNS)	$M_c(M_{\odot})$	質量比	χ_{eff}	$M_{\text{全}}(M_{\odot})$	距離 (Mpc)	$(\Delta\theta)^2$	SNR
GW170817	$1.186_{-0.001}^{+0.001}$	0.87	$0_{-0.01}^{+0.02}$	–	$40_{-15.0}^{+7.0}$	39	33
GW190425	$1.44_{-0.02}^{+0.02}$	0.70	$0.06_{-0.05}^{+0.11}$	$3.4_{-0.1}^{+0.3}$	160_{-70}^{+70}	9900	13.03
イベント (NSBH)	$M_c(M_{\odot})$	質量比	χ_{eff}	$M_{\text{全}}(M_{\odot})$	距離 (Mpc)	$(\Delta\theta)^2$	SNR
GW200105.162426	$3.41_{-0.07}^{+0.08}$	0.21	$-0.01_{-0.15}^{+0.11}$	$10.9_{-1.2}^{+1.1}$	280_{-110}^{+110}	7700	13.9
GW200115.042309	$2.42_{-0.07}^{+0.05}$	0.26	$-0.19_{-0.35}^{+0.23}$	$7.1_{-1.4}^{+1.5}$	300_{-100}^{+150}	900	11.6

得られた科学的成果 連星系については、その合体頻度について、BBH は、 $23.8_{-8.7}^{+14.0} / \text{Gpc}^3 / \text{yr}$ 、BNS は、 $561_{-413}^{+834} / \text{Gpc}^3 / \text{yr}$ 、NSBH は、 $45_{-33}^{+73} / \text{Gpc}^3 / \text{yr}$ と見積もられている。このほか、背景重力波に対して、宇宙膨張率に対して重力波のエネルギーが寄与する割合として（平坦なエネルギースペクトルを仮定した上で） $\Omega_{\text{GW}} < 6.0 \times 10^{-8}$ の上限が得られている。連続重力波の重力波振幅に対しては、おおよそ 1×10^{-25} 程度（200 Hz まわり）の上限が得られている。また、既知のパルサーからの連続重力波に対しても個々に上限が得られている。

一般相対性理論の検証も行われ、数あるテストすべてで、一般相対性理論から得られる予言と観測されている重力波信号との間に矛盾は生じていない。今後、発見数が増すにつれて連星系の形成シナリオが明らかになることが期待される、将来的には、銀河系形成シナリオや初期宇宙の情報などにも、重力波観測から多くの知見がもたらされるであろう。

➡ 50 events in total

GWTC-2

2020/10/28

➡ 55 total

GWTC-2.1

2021/8/2

➡ 90 total

GWTC-3

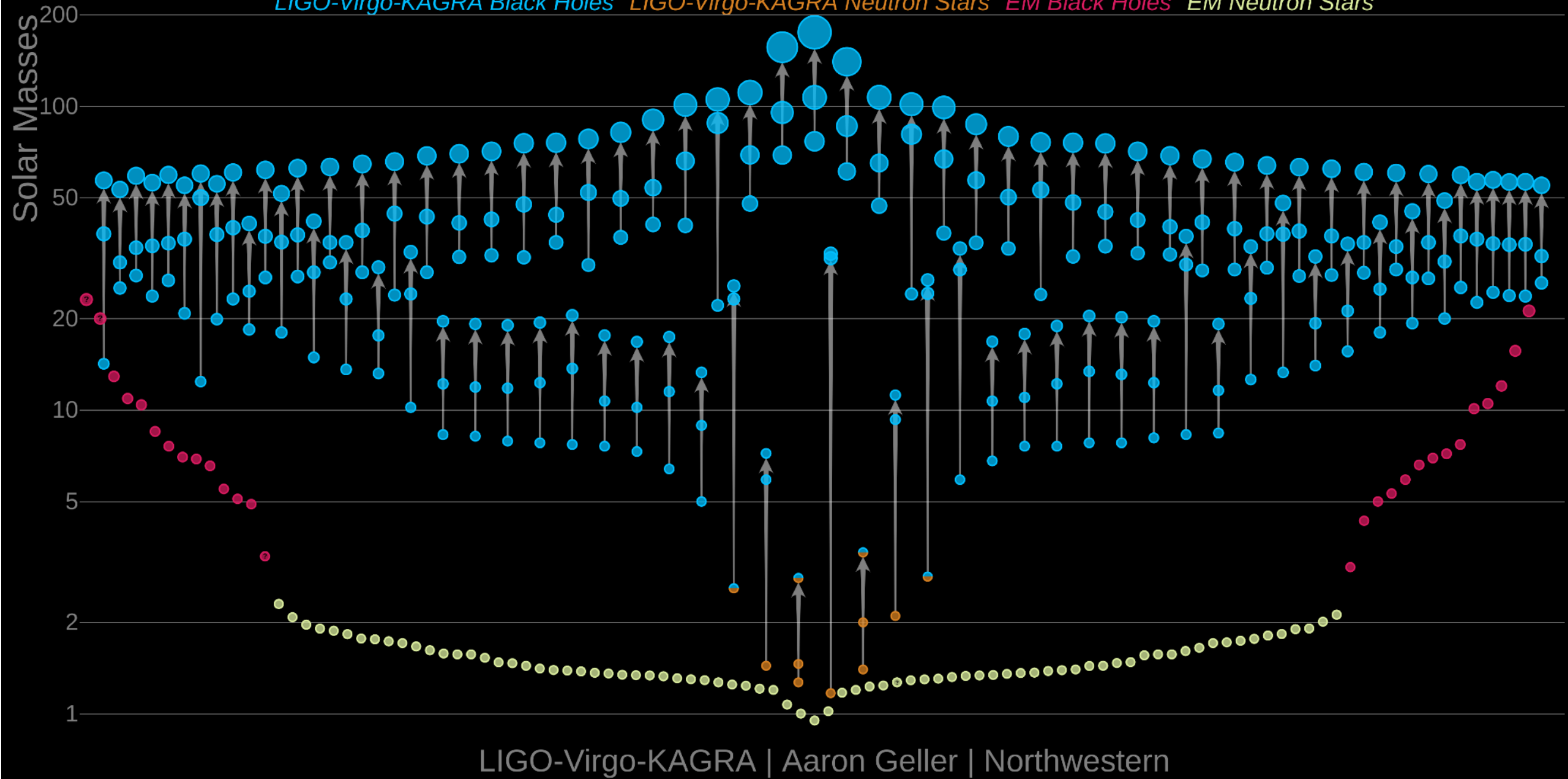
2021/11/5

O3b (2019/11/1 - 2020/3/27)

After O3b : GWTC3 (2021/11/7 released)

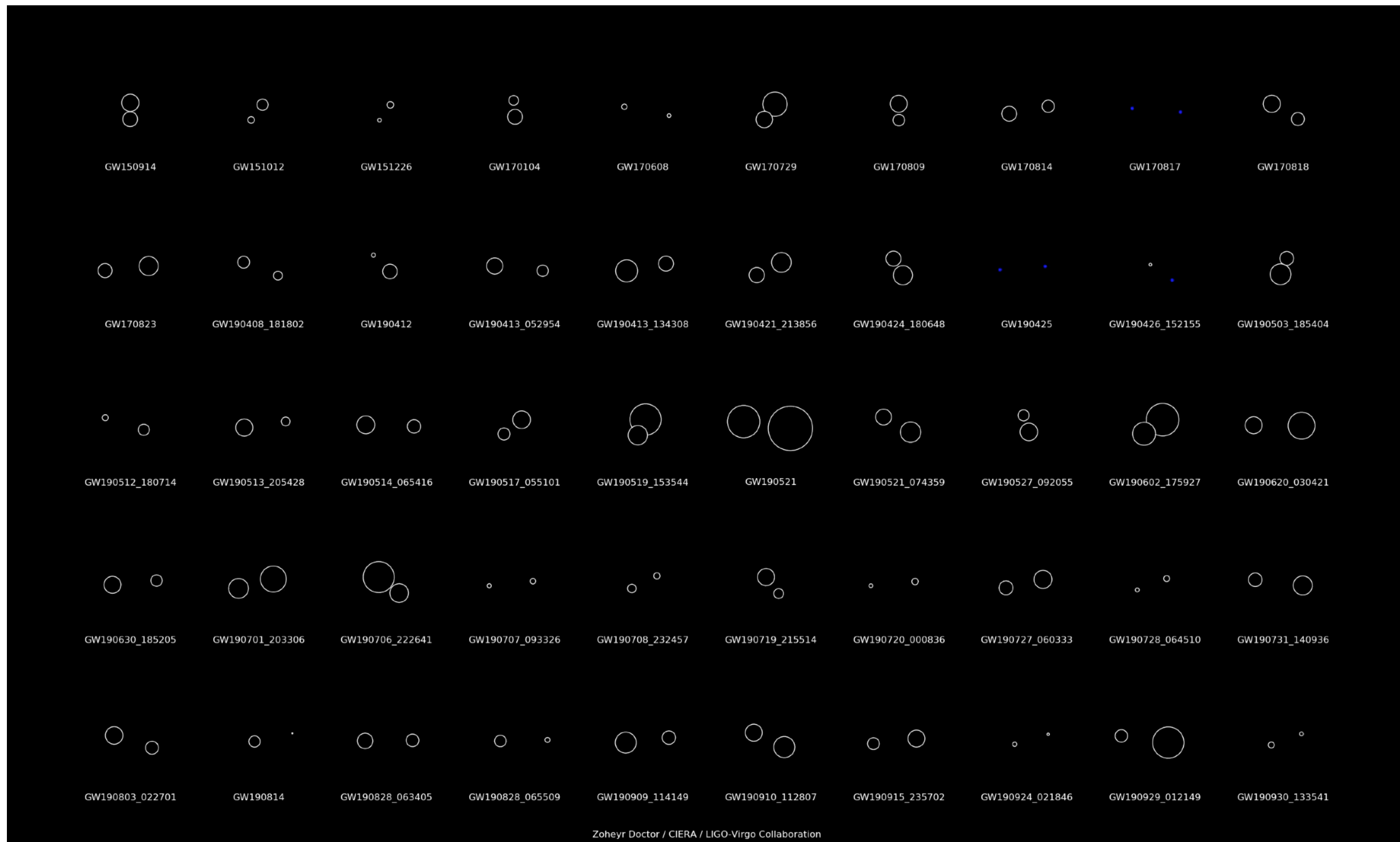
Masses in the Stellar Graveyard

LIGO-Virgo-KAGRA Black Holes *LIGO-Virgo-KAGRA Neutron Stars* *EM Black Holes* *EM Neutron Stars*



O3b (2019/11/1 - 2020/3/27)

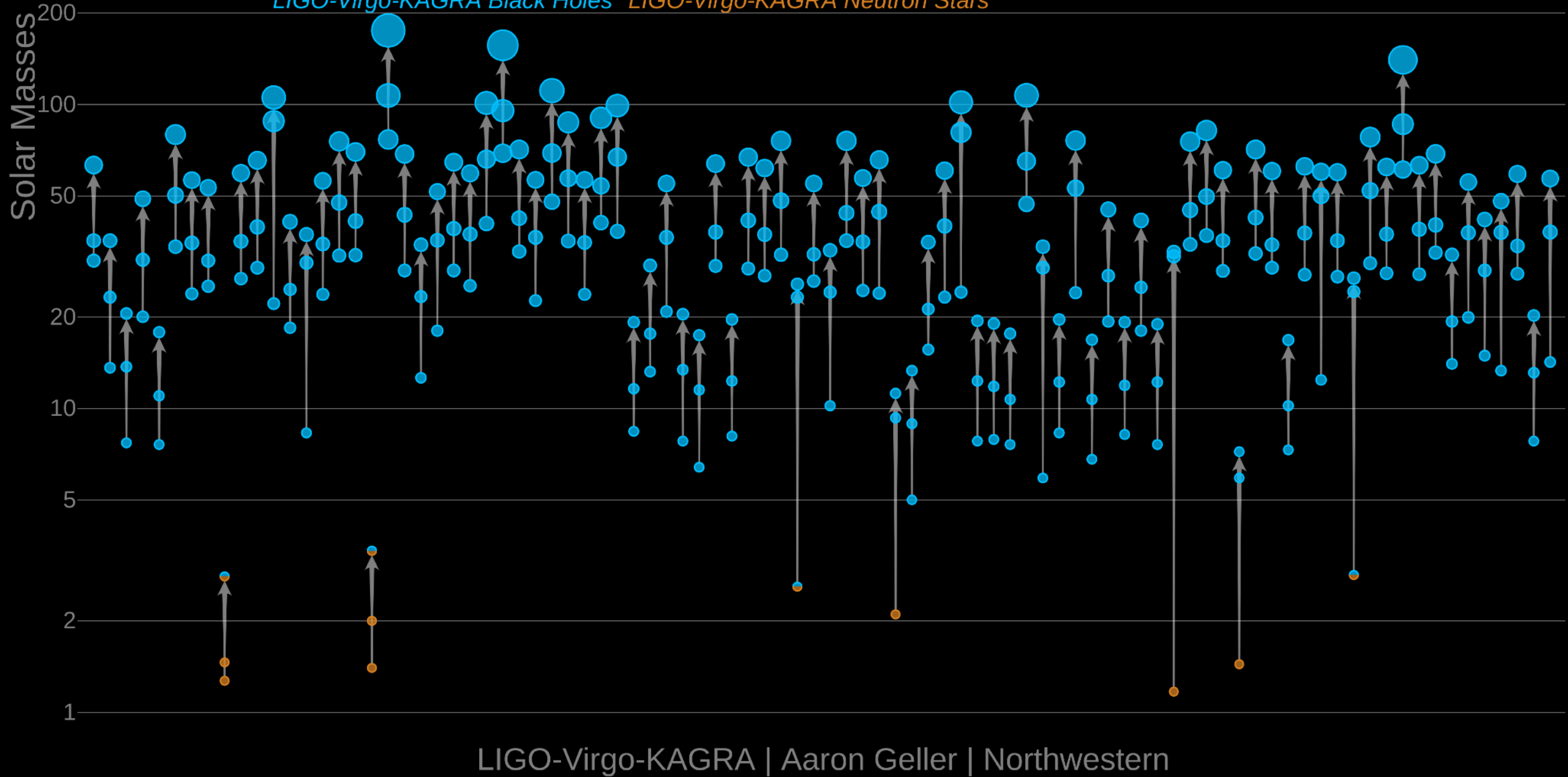
After O3b : GWTC3 (2021/11/7 released)



O3b (2019/11/1 - 2020/3/27)

After O3b : GWTC3 (2021/11/7 released)

Masses in the Stellar Graveyard

LIGO-Virgo-KAGRA Black Holes *LIGO-Virgo-KAGRA Neutron Stars*

O1

O2

O3a

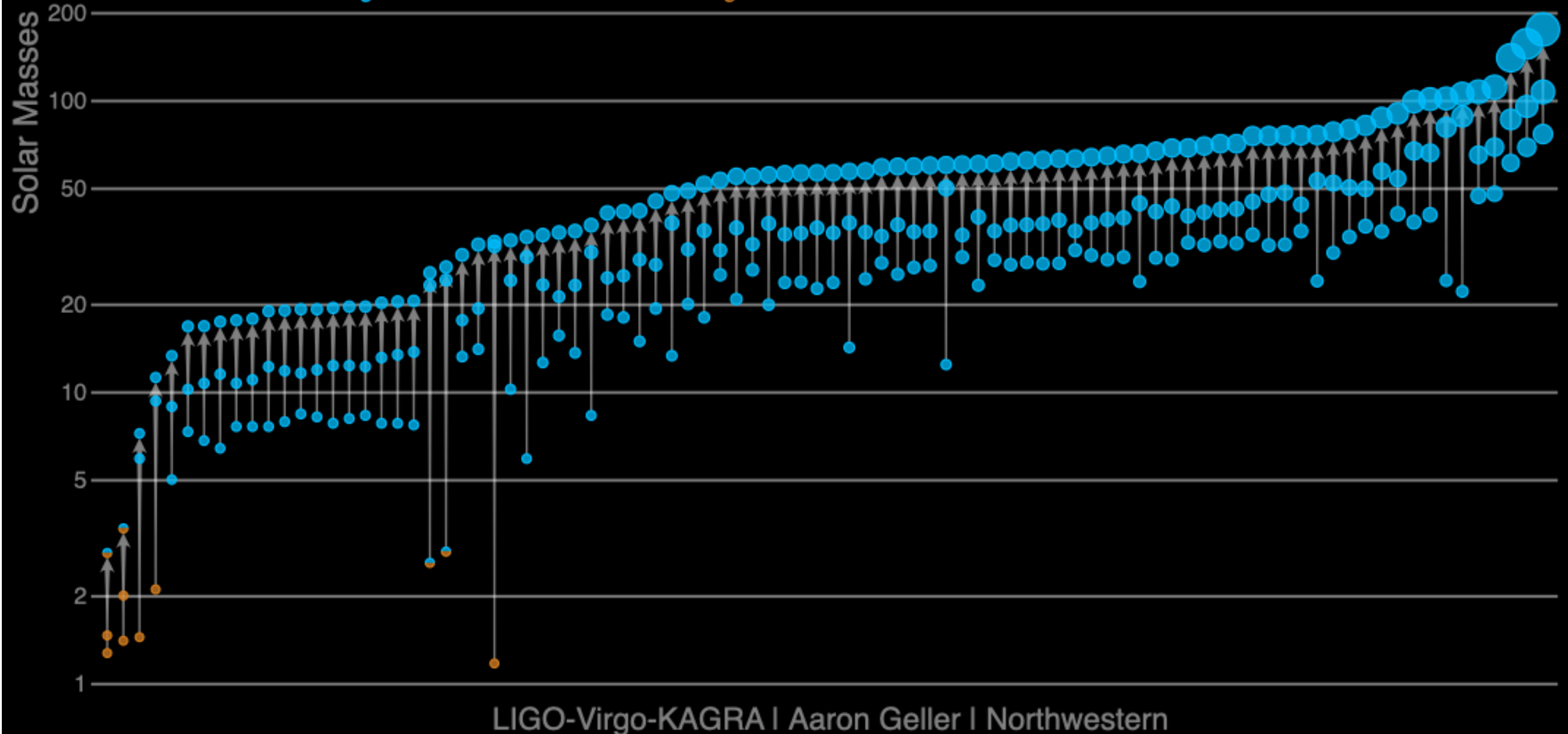
O3b

O3b (2019/11/1 - 2020/3/27)

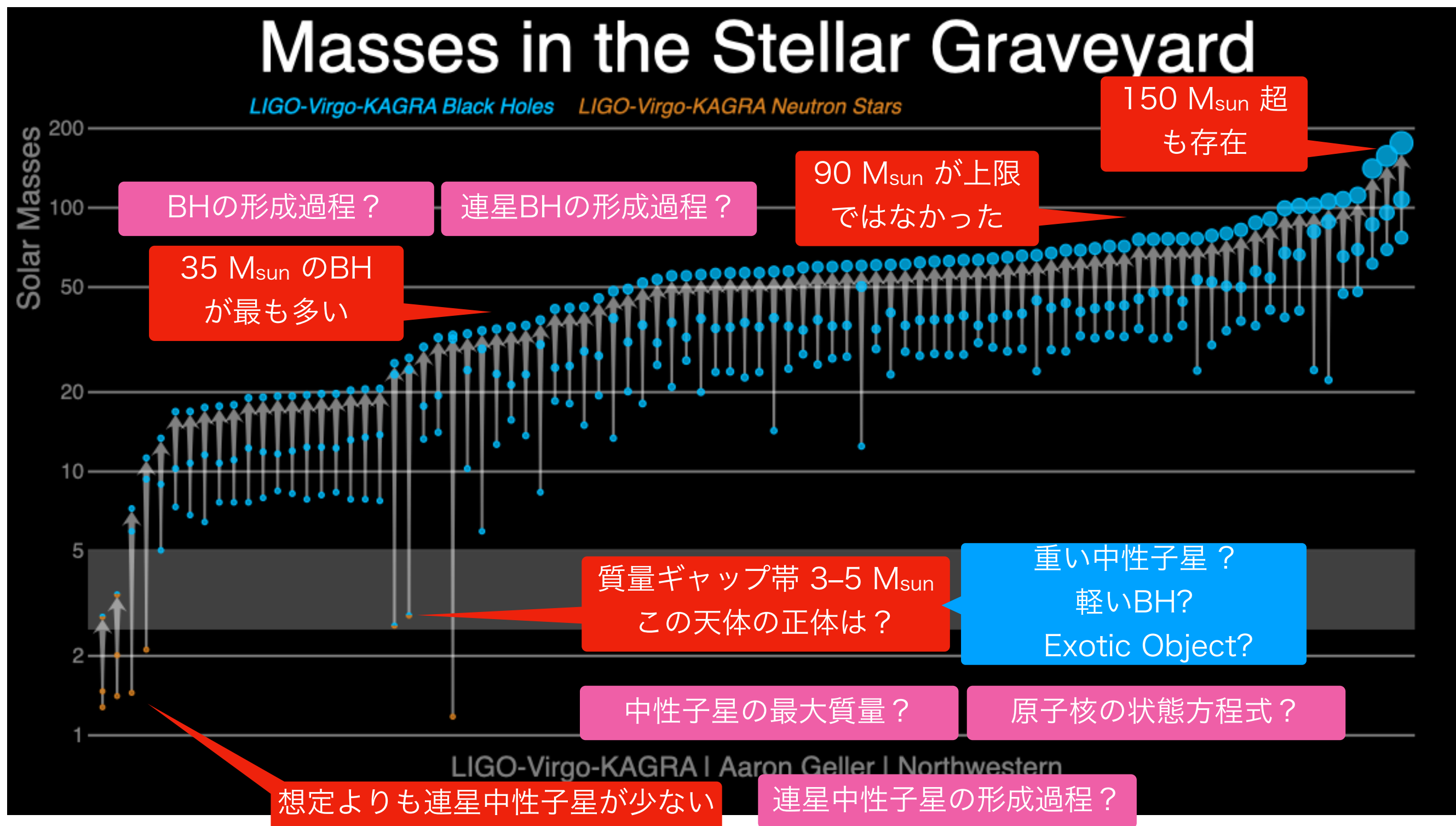
After O3b : GWTC3 (2021/11/7 released)

Masses in the Stellar Graveyard

LIGO-Virgo-KAGRA Black Holes LIGO-Virgo-KAGRA Neutron Stars



この現状をどう説明する？



マルチ・メッセンジャー天文学の誕生

														
	宇宙線	ガンマ線	X線	光			電磁波							
				紫外線	可視光線	赤外線	マイクロ波	超短波	短波	中波	長波	超長波		
波長[m]	10^{-13}	10^{-10}	10^{-9}	3.8×10^{-7}	7.7×10^{-7}	10^{-4}	1	10	10^2	10^3	10^4			
波長[nm]				380	770									
振動数[Hz]		3×10^{18}	3×10^{17}				3×10^{12}	3×10^8	3×10^7	3×10^6	3×10^5	3×10^4		
利用例		医療／食品照射	医療／X線写真	殺菌	光学機器	赤外線写真	携帯電話 電子レンジ	テレビ FMラジオ	短波ラジオ	AMラジオ	電波時計 飛行機の通信			

ガンマ線

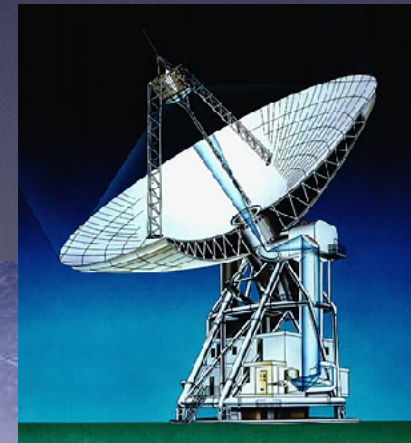
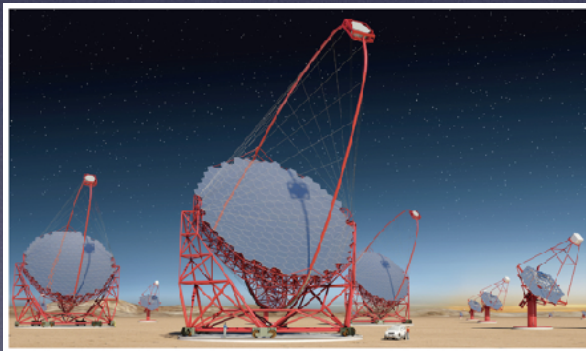
X線

可視光

赤外

電波

重力波



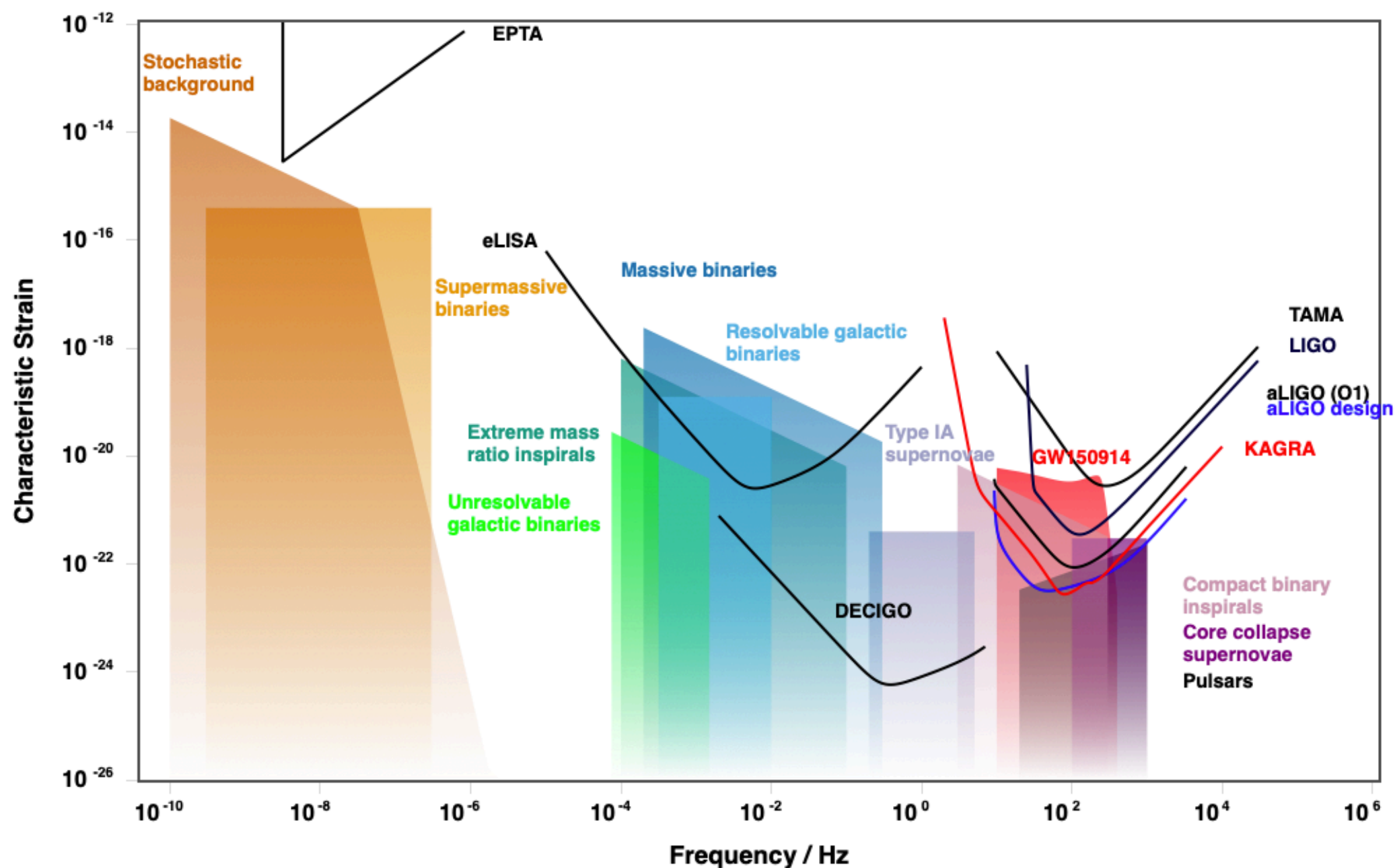
重力波天文学
は
じ
め
ま
し
た。



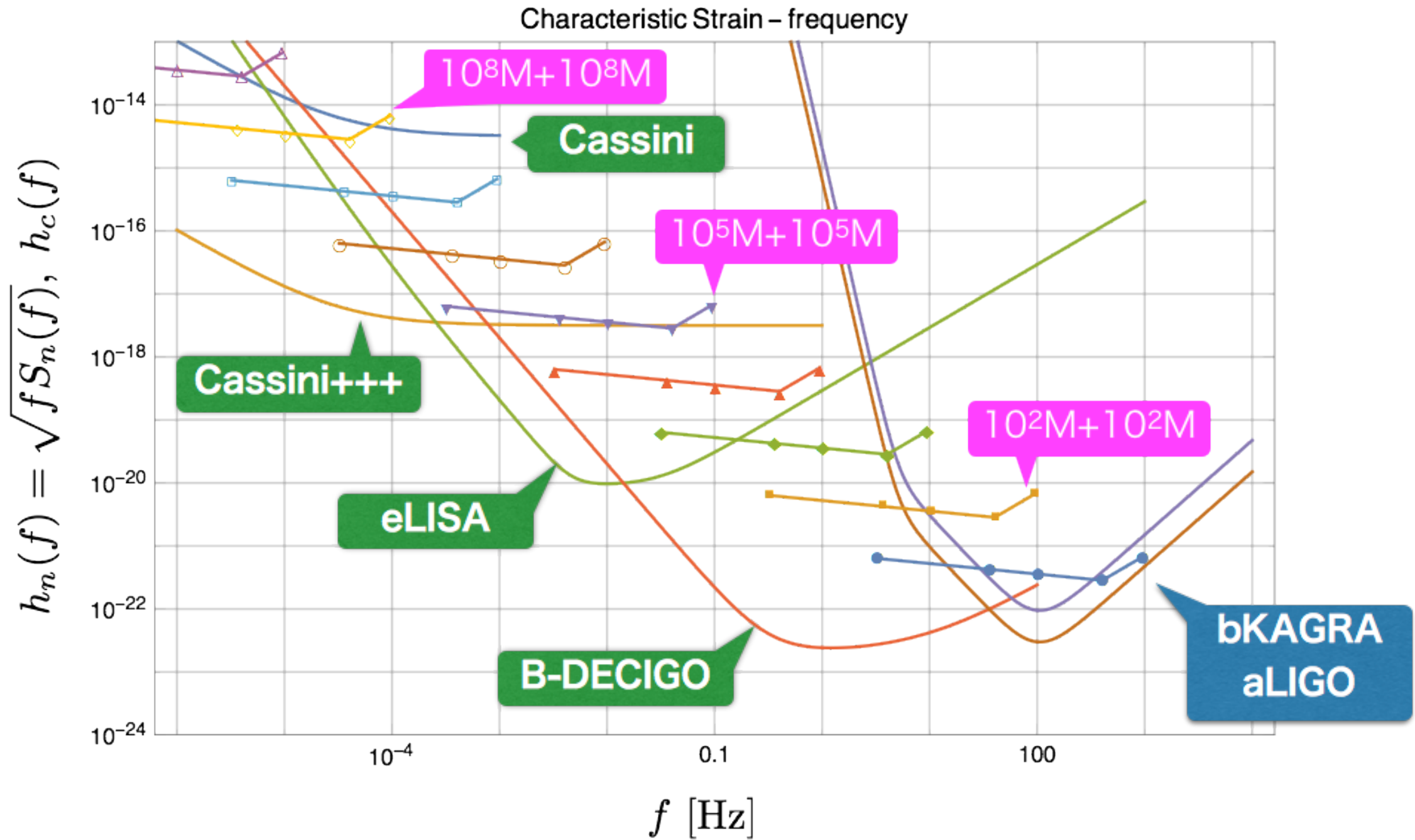
GW observatory plans in space

<http://gwplotter.com>

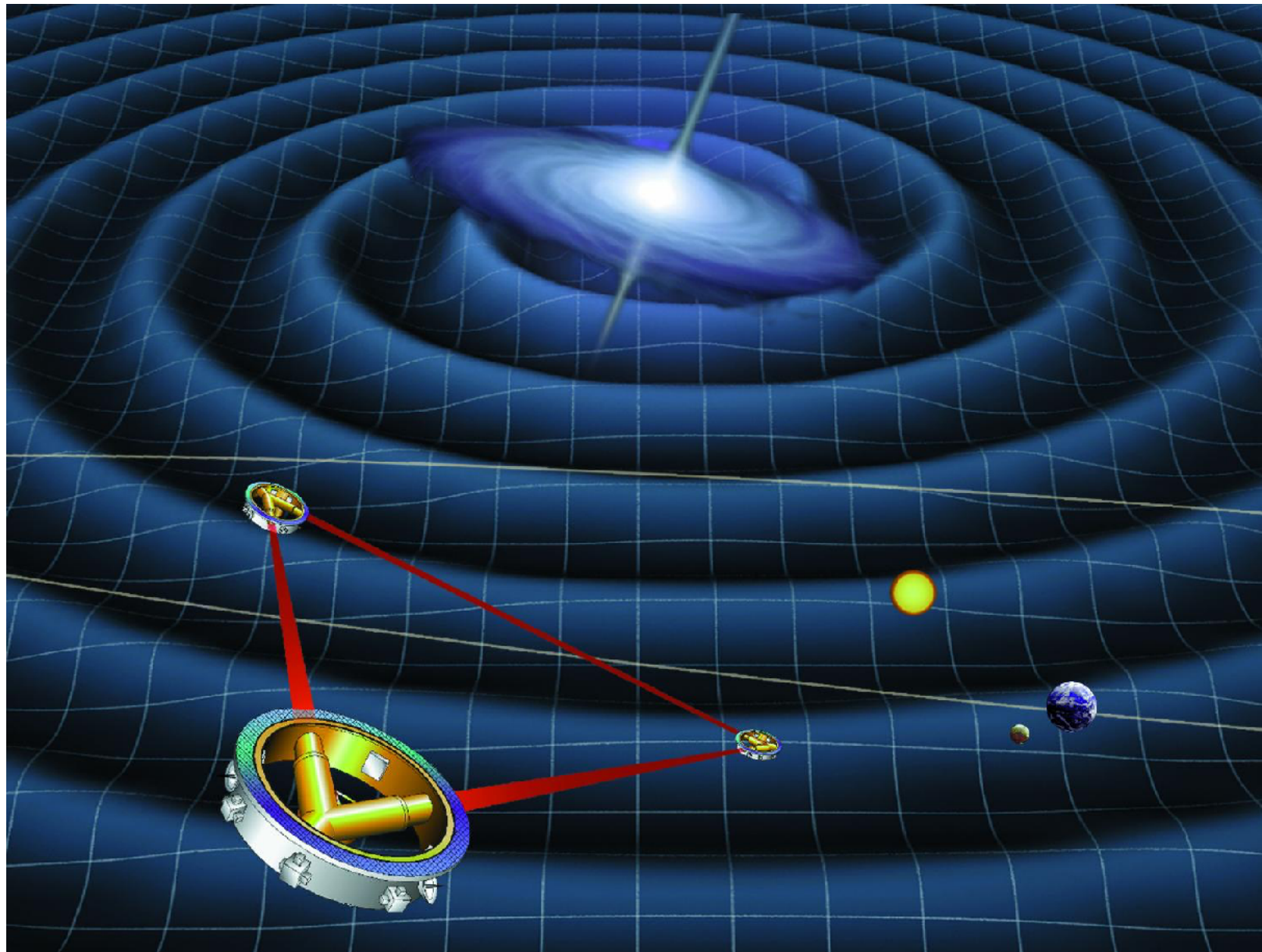
Gravitational Wave Detectors and Sources



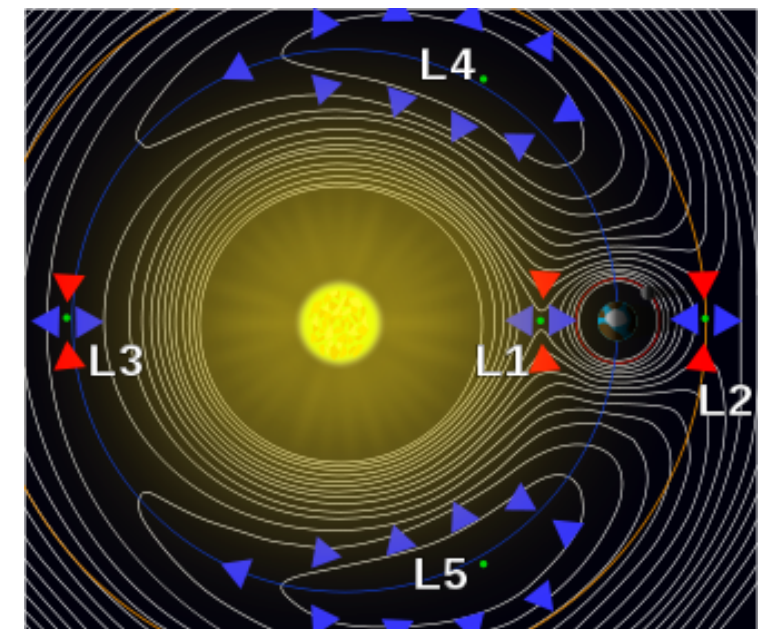
GW observatory plans in space



Laser Interferometer Space Antenna

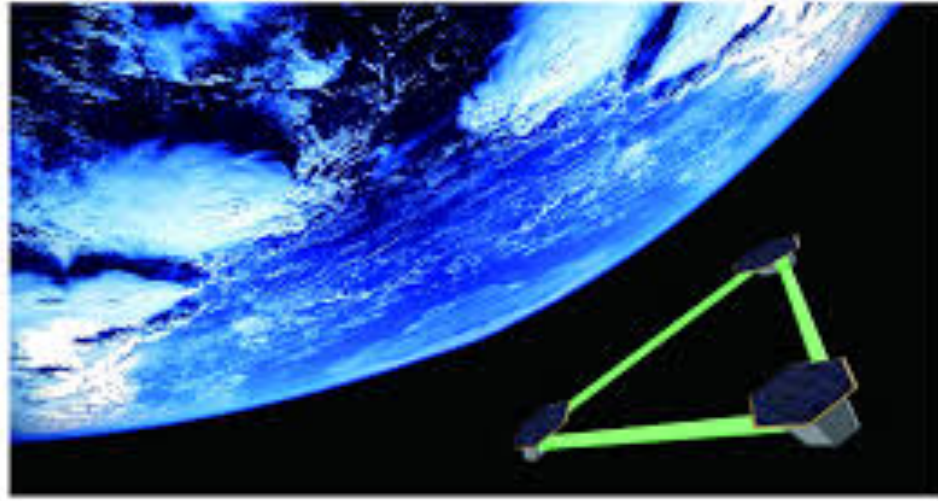


2034年に打ち上げ予定
250万kmの腕の長さ
地球の公転軌道のL4
低周波数帯（mHzからHz帯）



重力波宇宙干渉計DECIGO (ディサイゴ)

Deci-hertz Interferometer Gravitational wave Observatory



1000kmの腕の長さ
低周波数帯 (decihzからHz帯)

宇宙全体スケールで
巨大ブラックホール連星合体の
重力波が検出できる

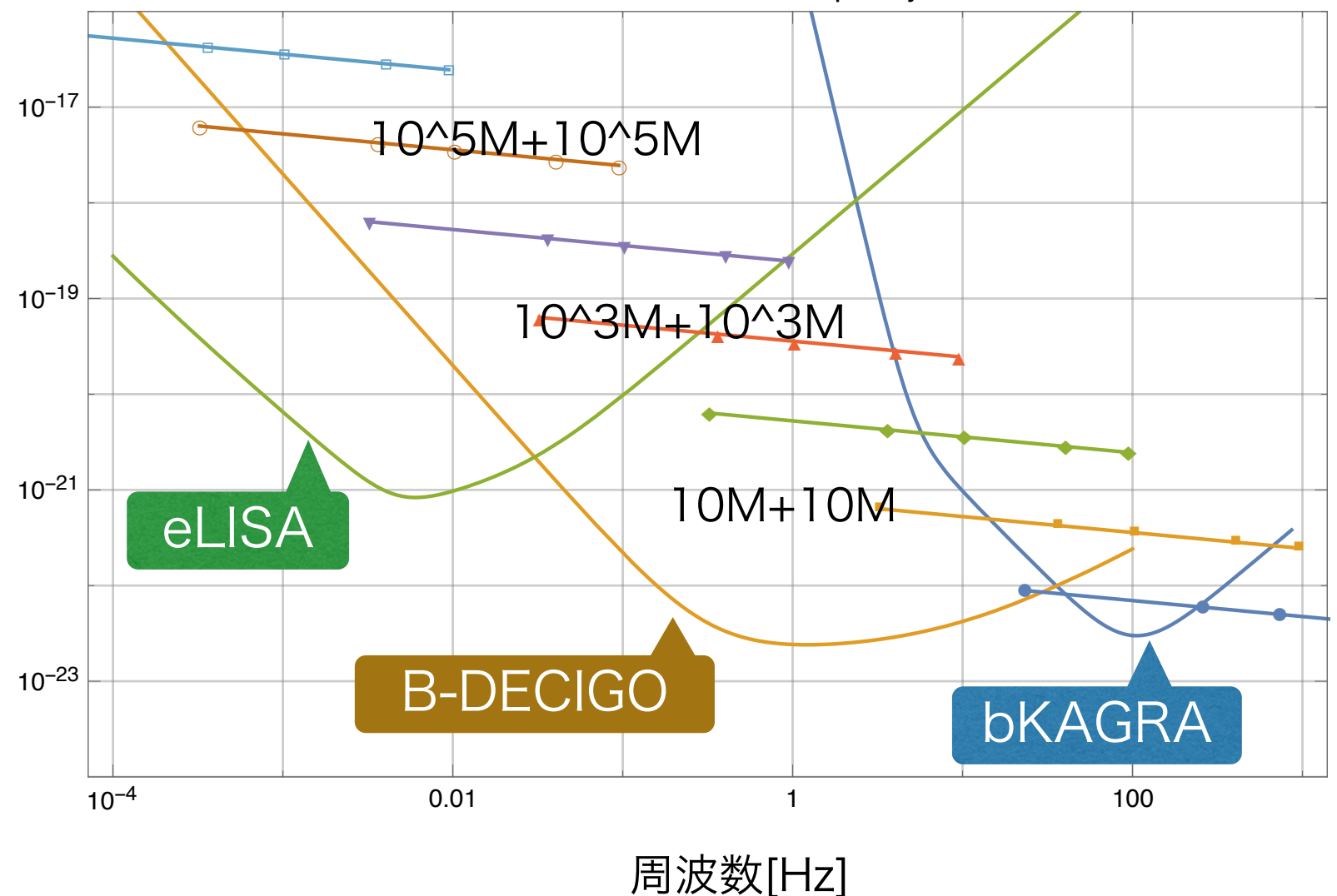


銀河中心の超巨大ブラックホール
形成過程がわかる

宇宙の膨張速度がわかる

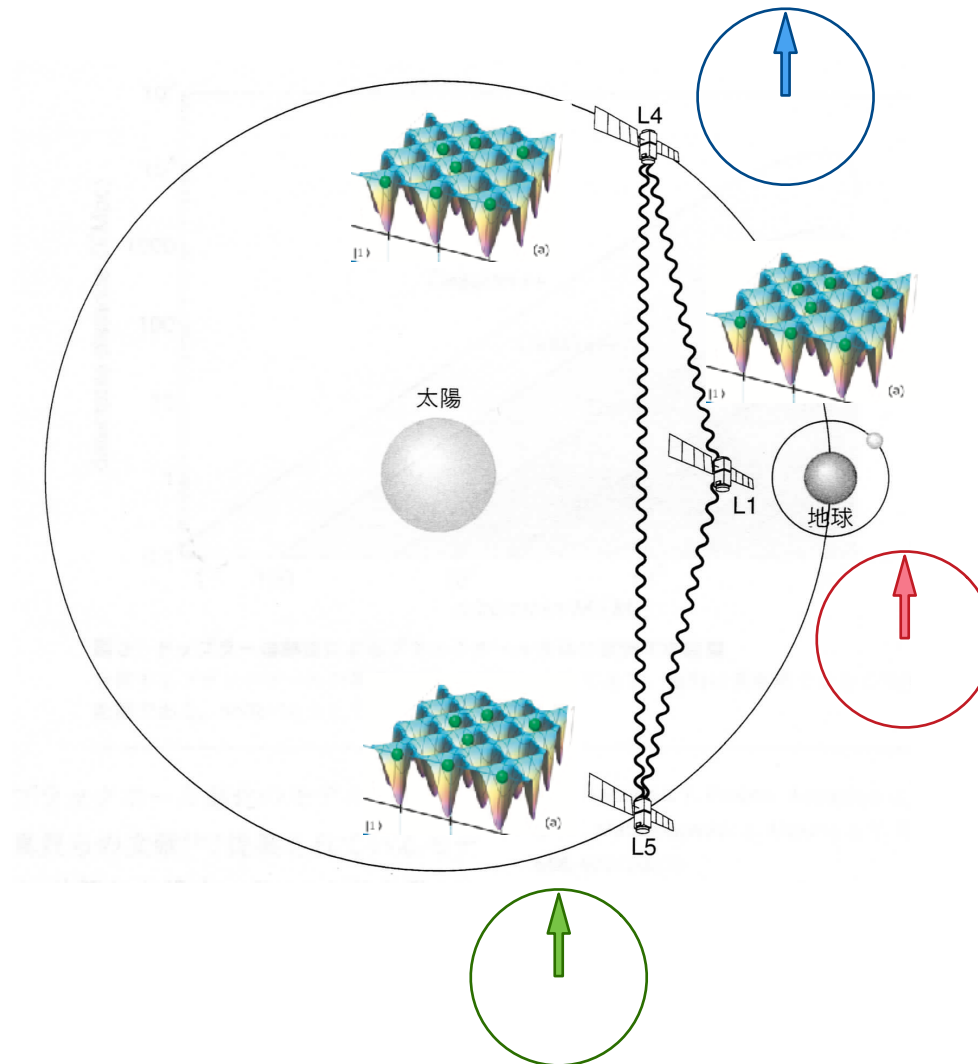
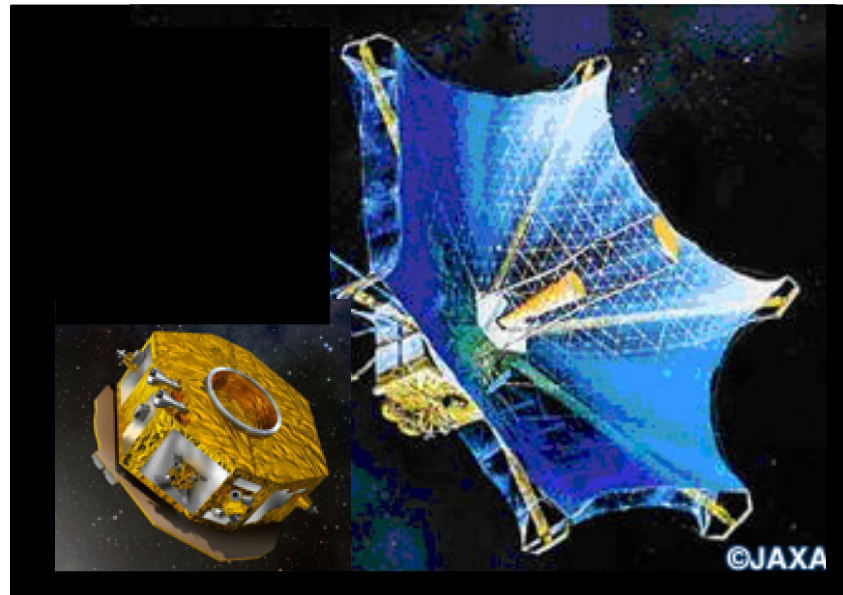
重力波の検出感度

Characteristic Strain – frequency



宇宙空間光格子時計ネットワーク INO

Interplanetary Network of Optical Lattice Clocks



「数理科学」 2018-12

「科学」 2017-12

Int. J. Mod. Phys.
D 28 (2019) 1940002
[arXiv:1809.10317](https://arxiv.org/abs/1809.10317)

宇宙全体スケールで
巨大ブラックホール連星合体の
重力波が検出できる



銀河中心の超巨大ブラックホール
形成過程がわかる



伊能忠敬

江戸時代，日本中で
精密な測量をして地図を作成

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

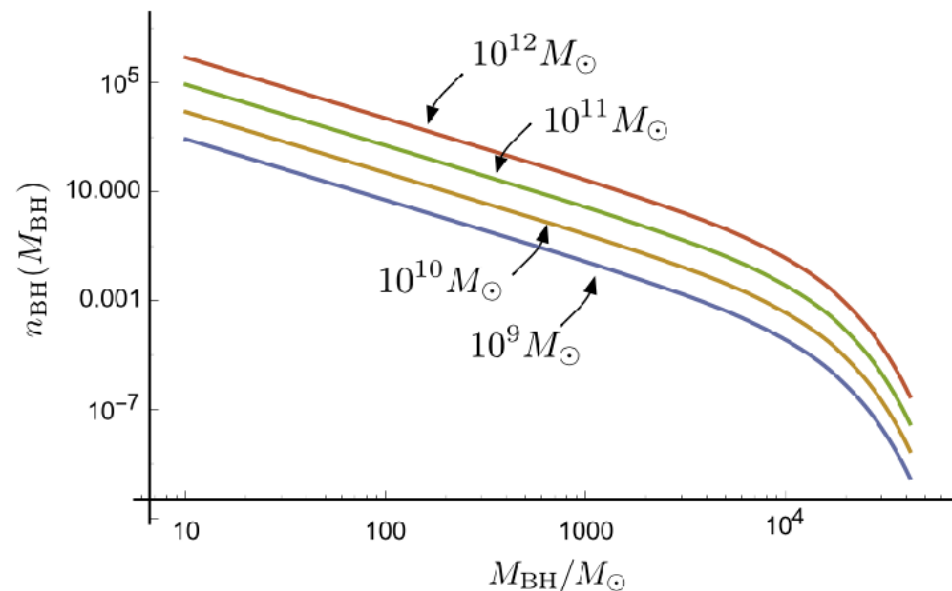


Figure 5. Number density of BHs per galaxy as a function of BH mass for different total mass of galaxies $M_{\text{galaxy}} = 10^9 M_{\odot}, \dots, 10^{12} M_{\odot}$.

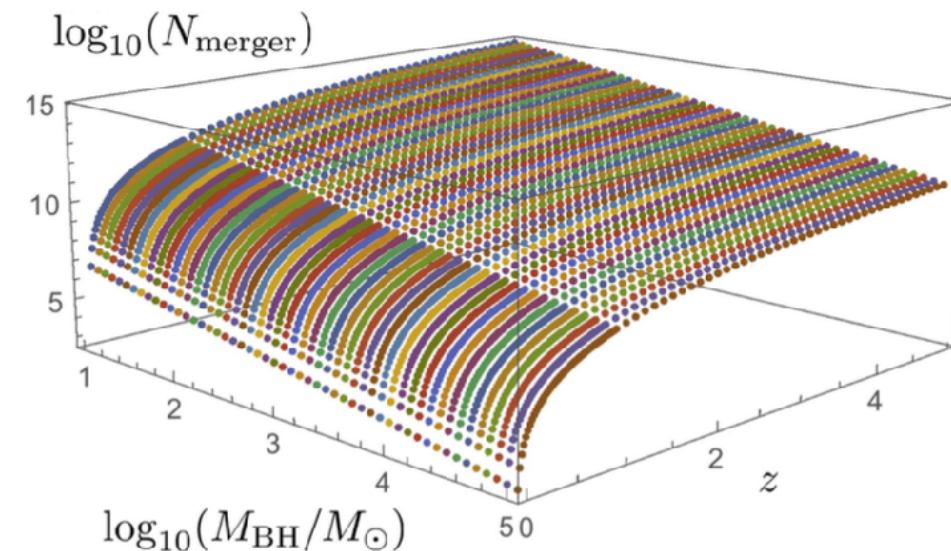
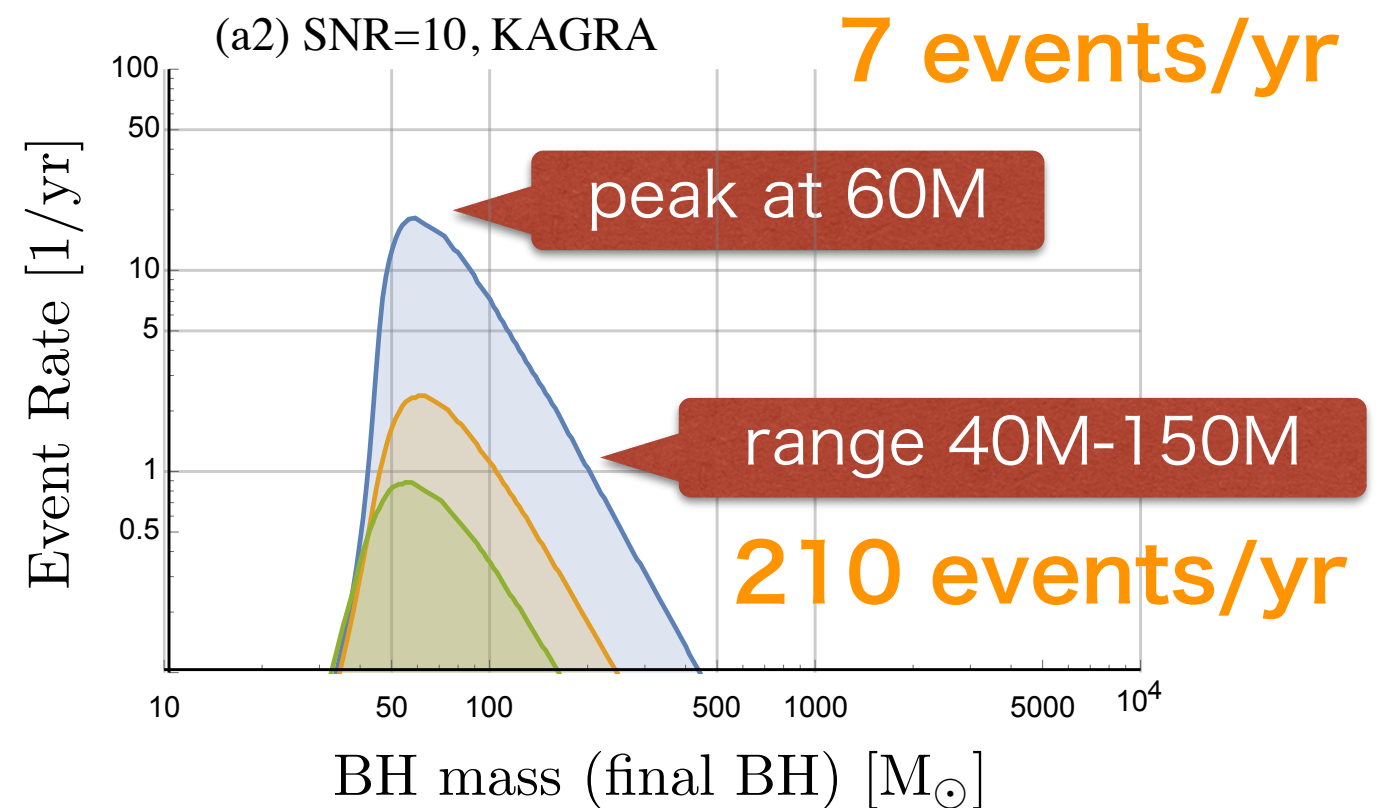
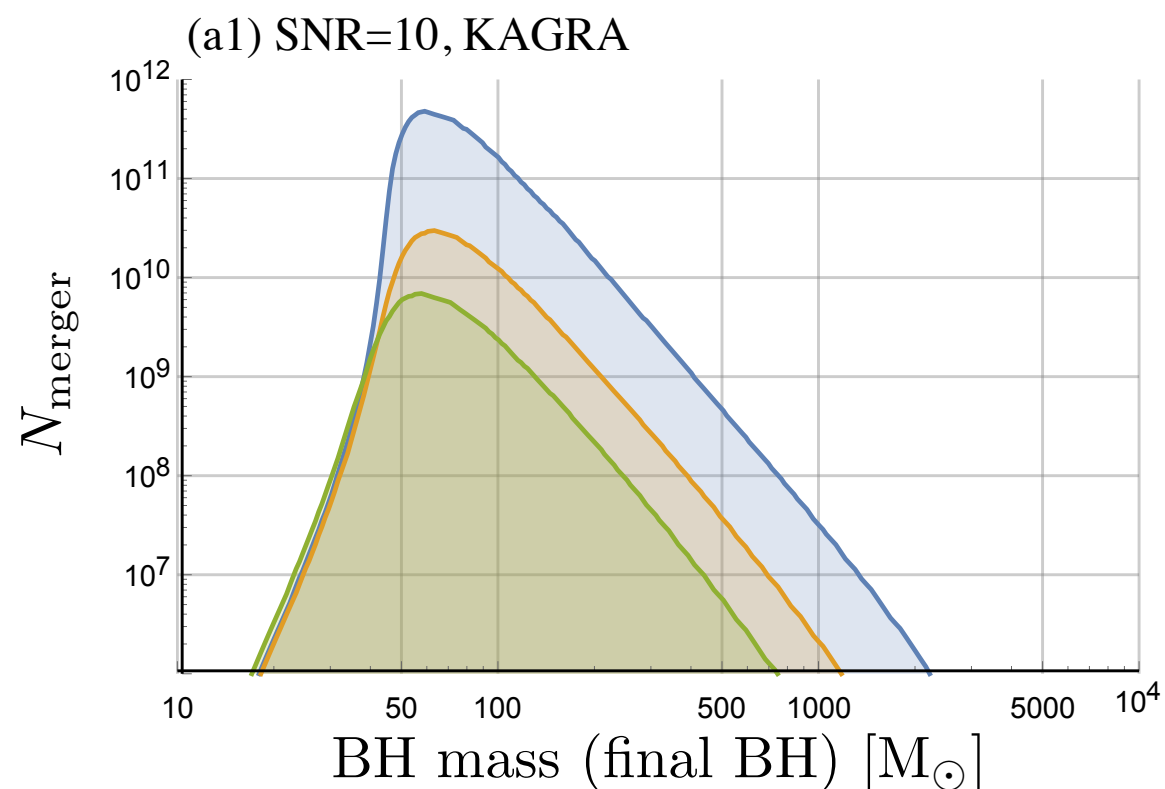


Figure 6. Cumulative distribution function of the number of BH mergers $N_{\text{merger}}(M_{\text{BH}})$ as a function of the redshift z . N_{merger} is expressed with binned one, of which we binned 20 for one order in M_{BH} .

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

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](https://doi.org/10.3847/1538-4357/835/2/276)

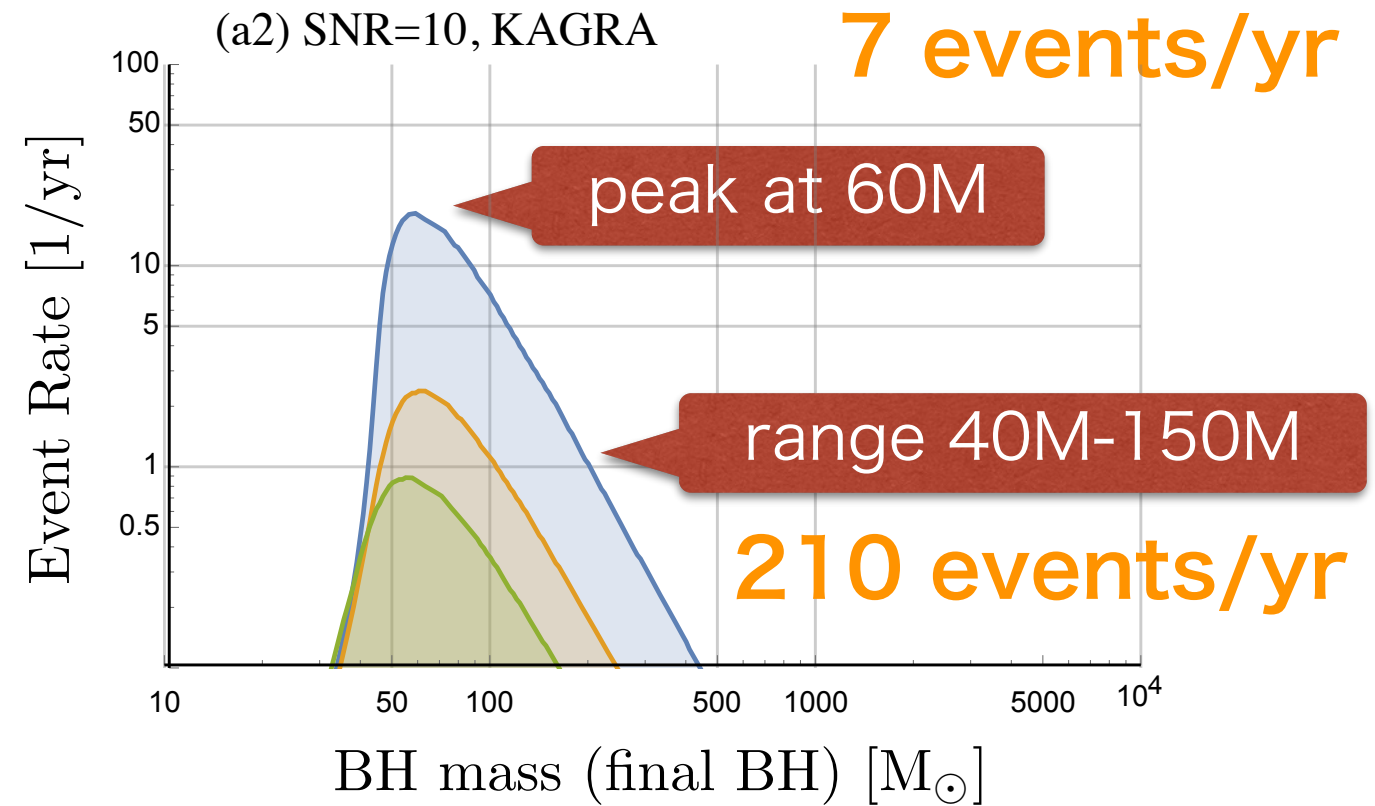


Gravitational Waves from Merging Intermediate-mass Black Holes. II. Event Rates at Ground-based Detectors

Hisa-aki Shinkai¹, Nobuyuki Kanda², and Toshikazu Ebisuzaki³

Event Rates at bKAGRA/aLIGO

Mass distribution	$R/(\text{Gpc}^{-3} \text{ yr}^{-1})$		
	PyCBC	GstLAL	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

Shinkai+ ApJ 835(2017)276

Inoue+ MNRAS461(2016)4329

Kinugawa+ MNRAS456(2015)1093

