

重力波天文学とKAGRA



アインシュタイン方程式

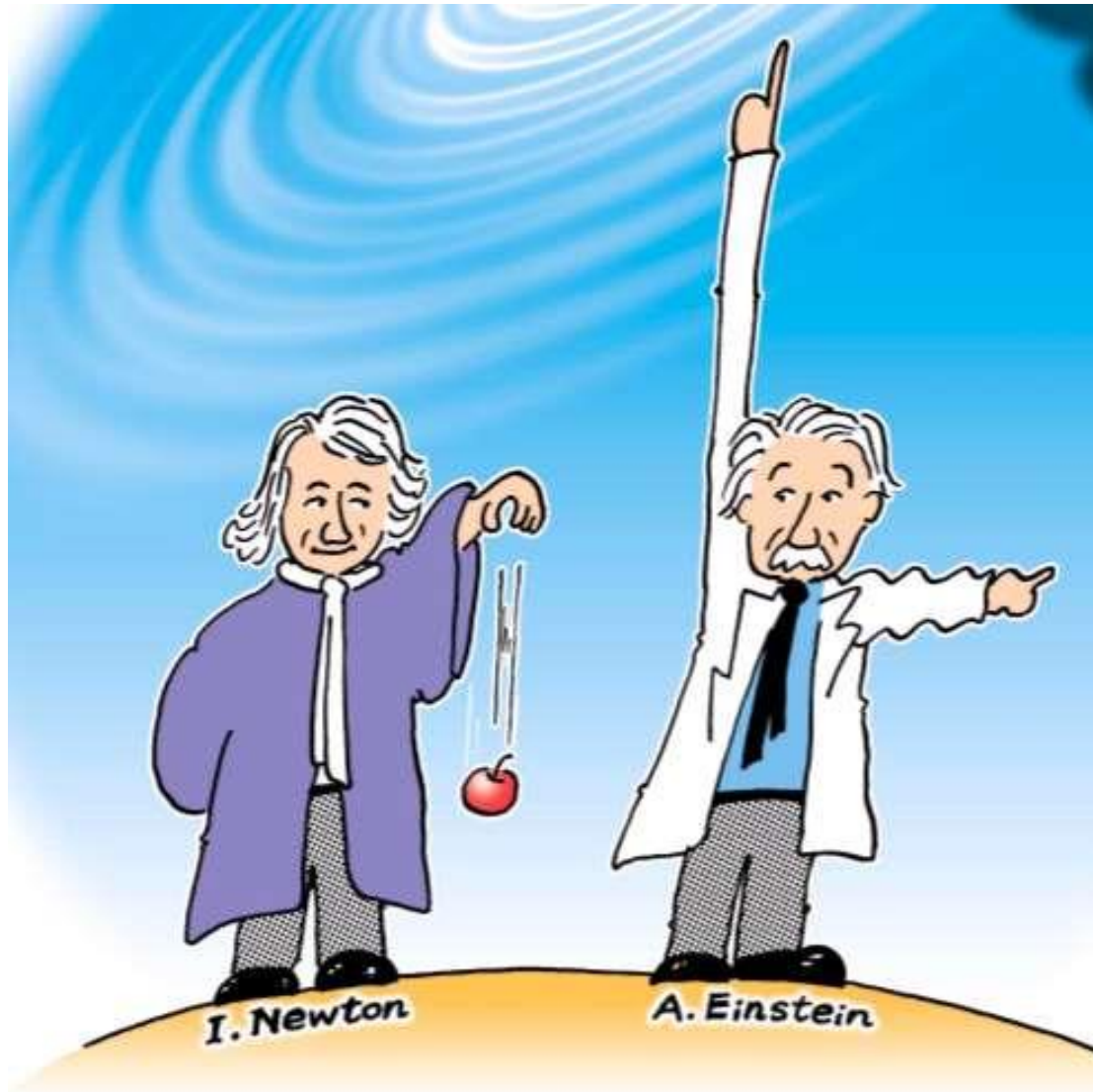
$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

時間空間の幾何学
(曲がり)を表す量

物質を
表す量

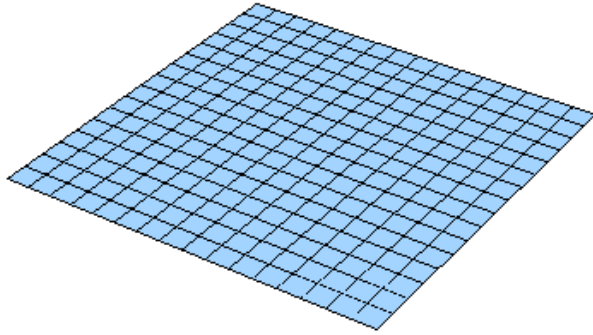
重力の概念の変更

ニュートン重力

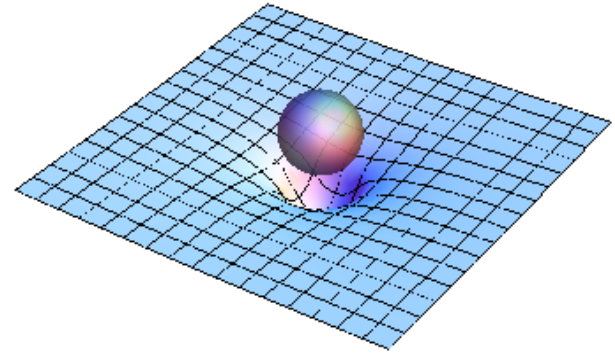


アインシュタイン重力

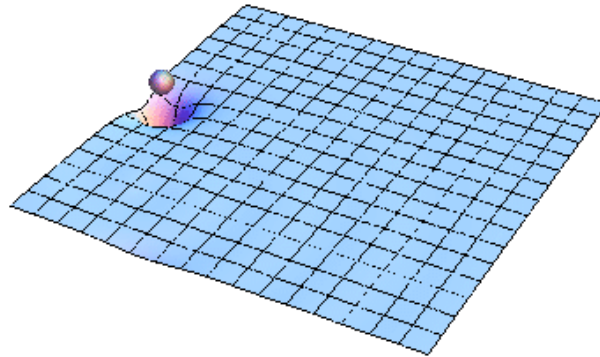
曲がった時空から重力波へ



平坦な時空（特殊相対性理論）



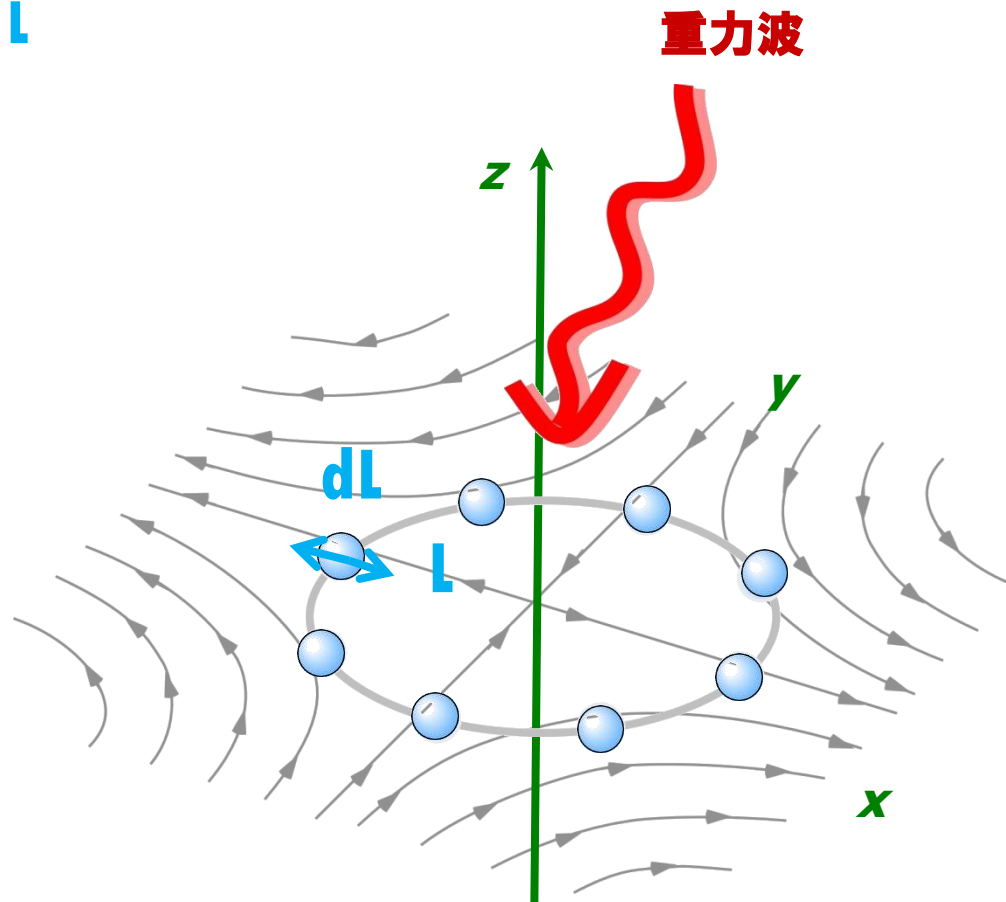
曲がった時空（一般相対性理論）



重力波

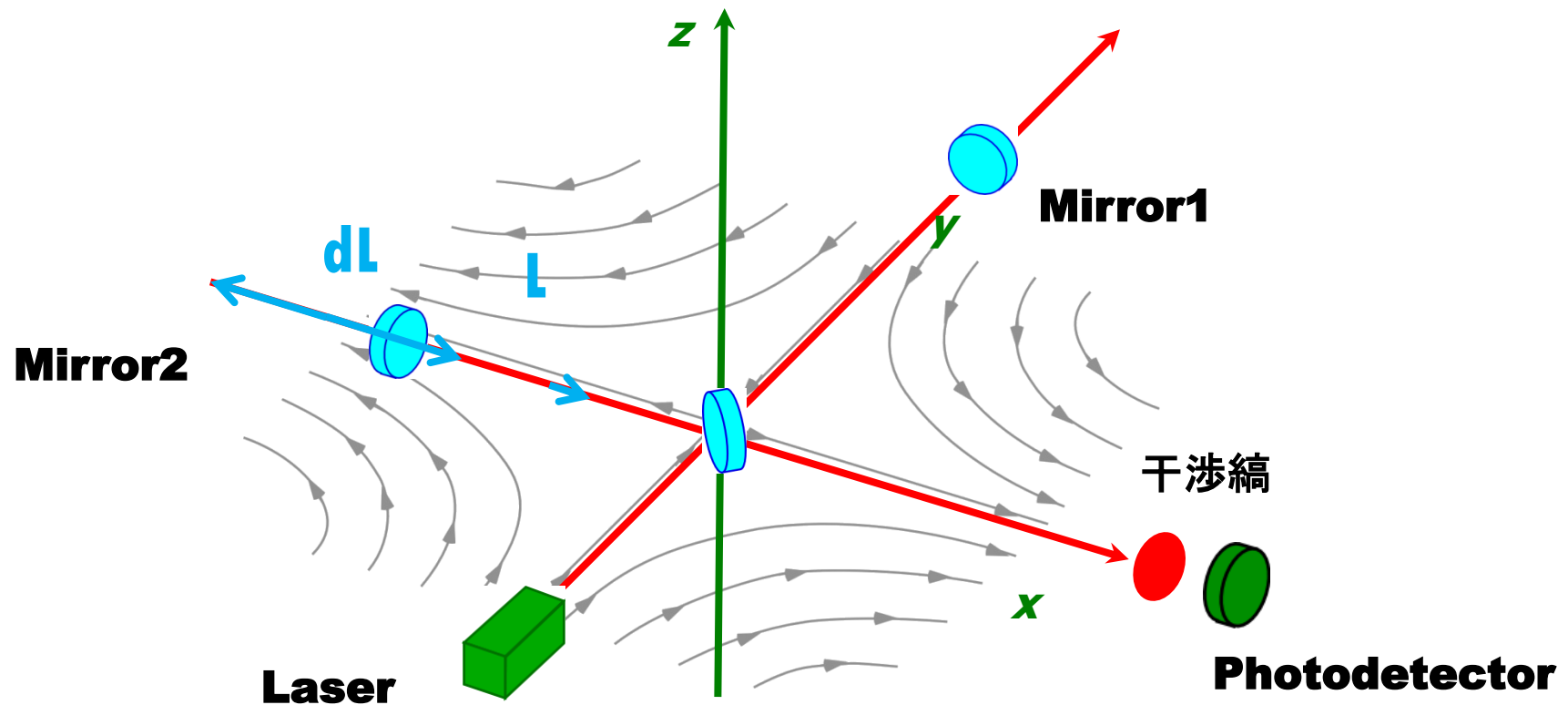
重力波の検出原理1

$$\text{歪み}(h) \equiv dL / L$$

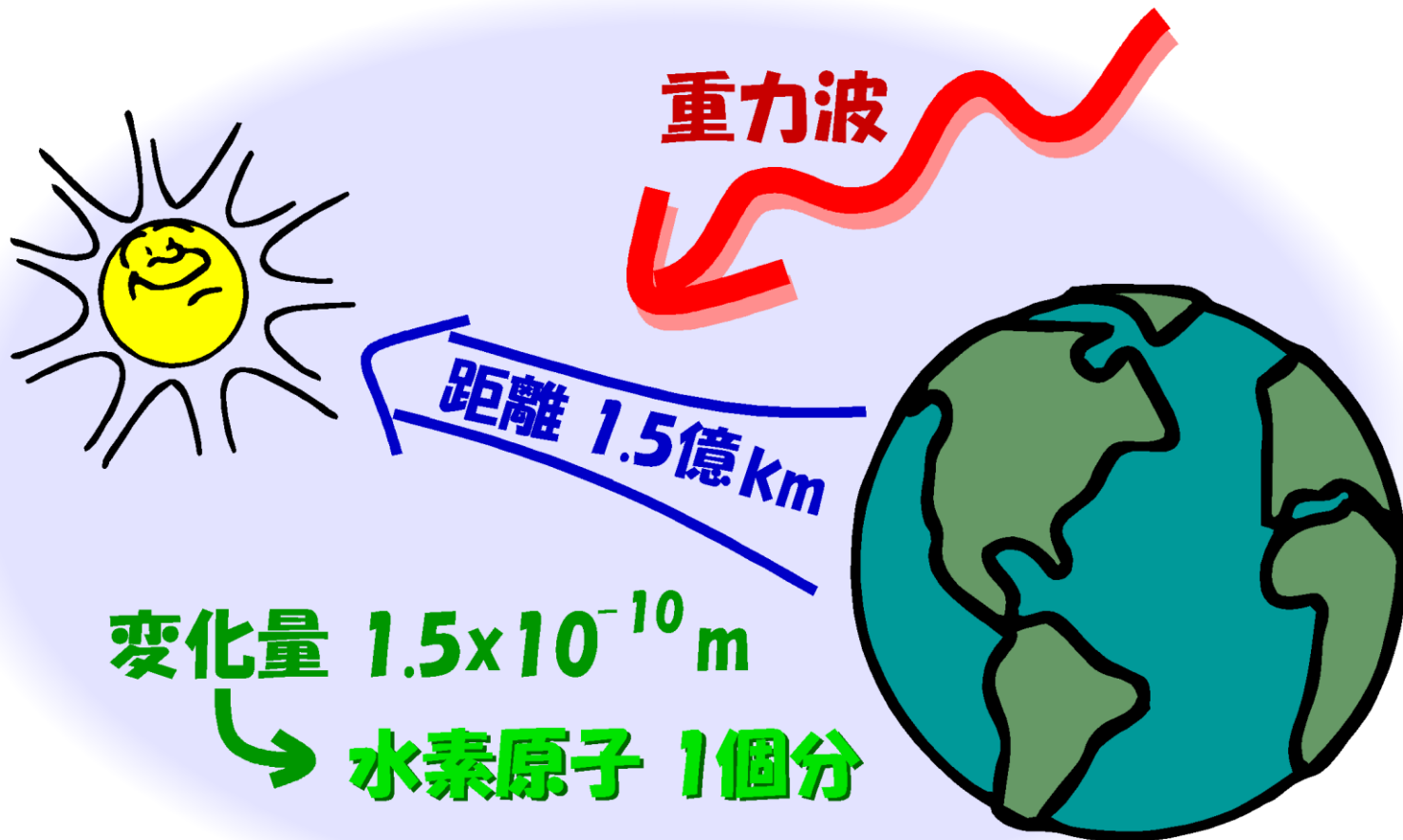


重力波の検出原理2

$$\text{歪み}(h) \equiv dL / L$$



重力波の大きさ



$$h = \Delta L / L = 10^{-21}$$

ついに重力波が直接検出されました



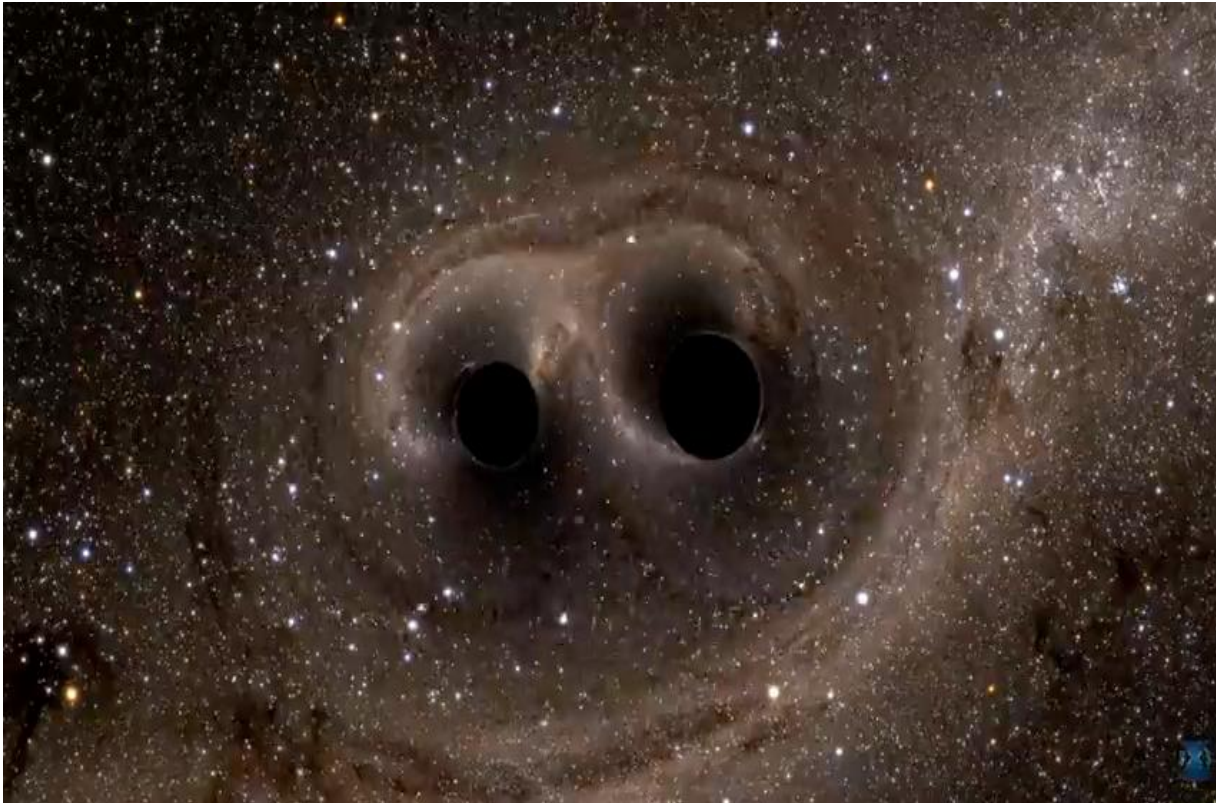
ワシントンでの記者会見の様子(2016. 2. 11)

9

連星ブラックホールからの重力波

GW150914

LIGOのWebサイトより

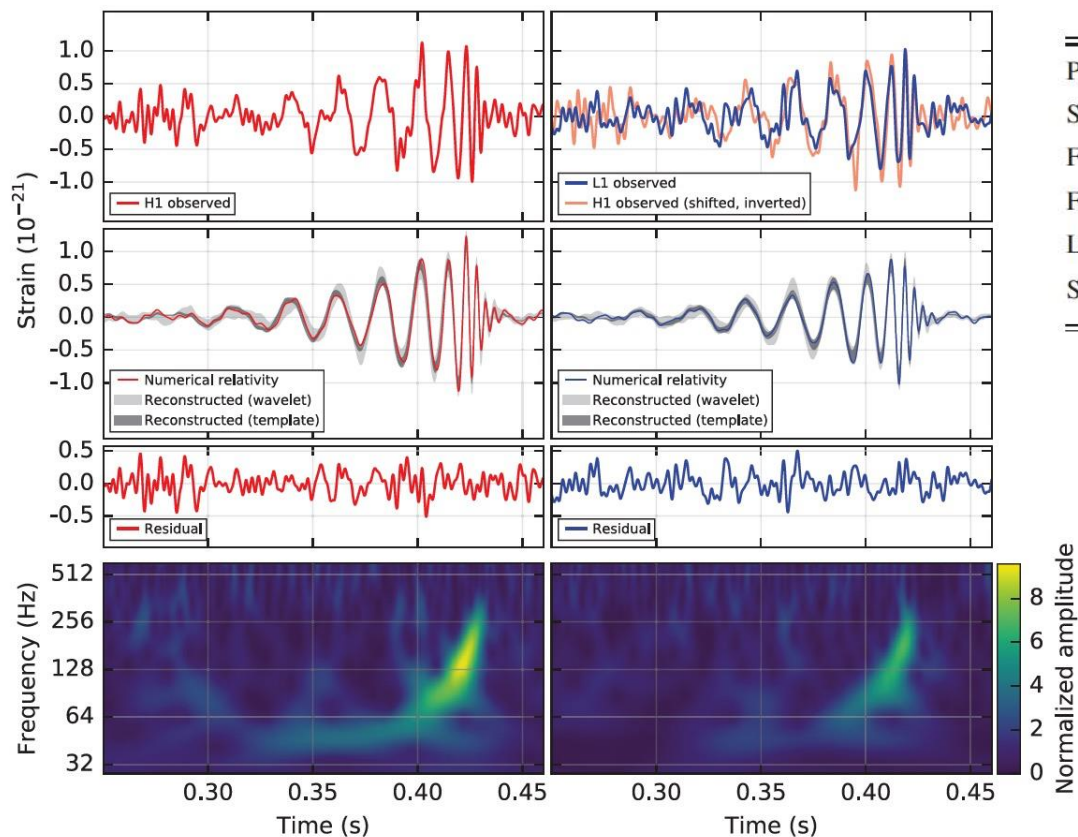


ブラックホール連星合体(想像)

<https://www.ligo.caltech.edu/video/ligo20160211v3>

連星ブラックホールからの重力波

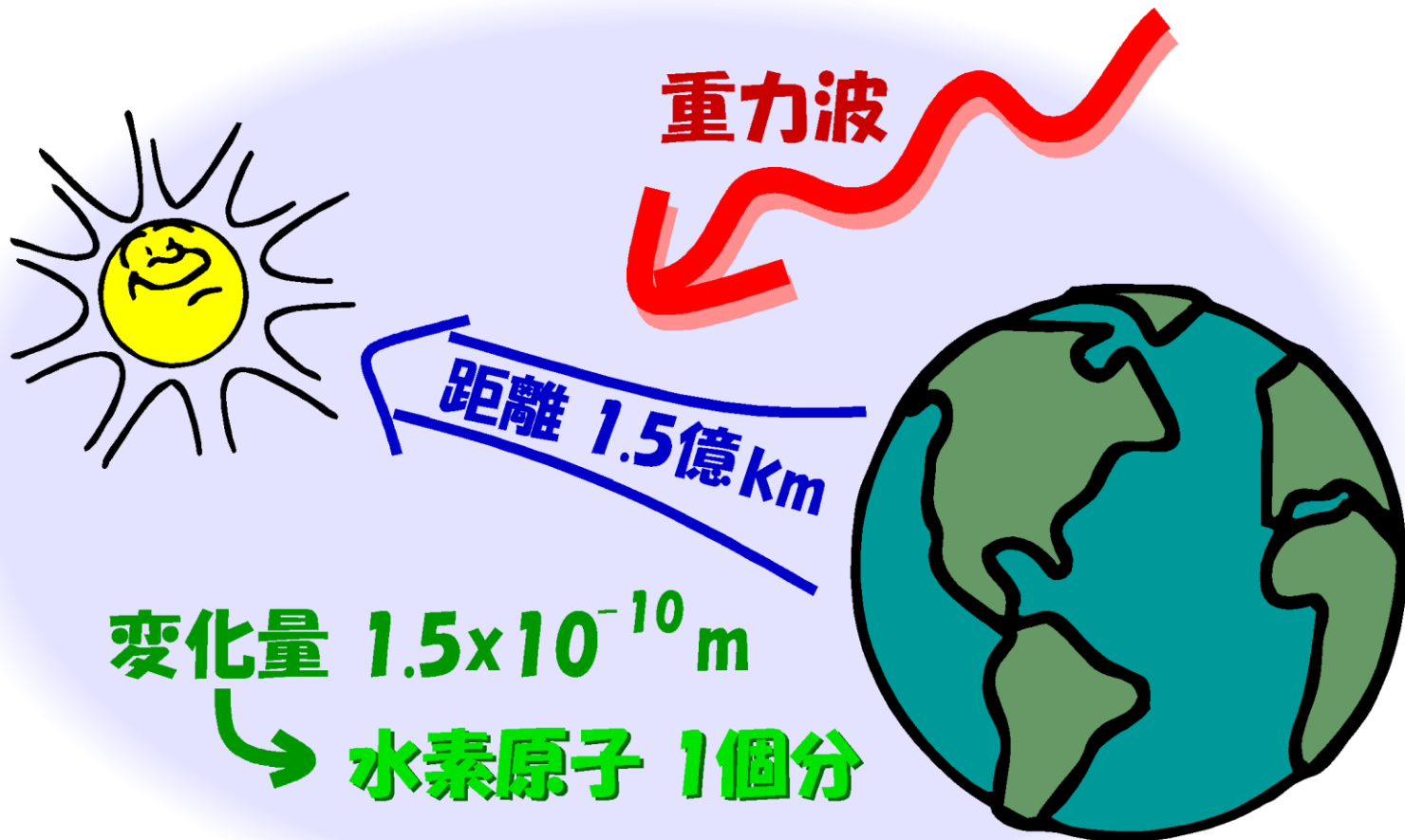
GW150914



Primary black hole mass	$36^{+5}_{-4} M_{\odot}$
Secondary black hole mass	$29^{+4}_{-4} M_{\odot}$
Final black hole mass	$62^{+4}_{-4} M_{\odot}$
Final black hole spin	$0.67^{+0.05}_{-0.07}$
Luminosity distance	410^{+160}_{-180} Mpc
Source redshift z	$0.09^{+0.03}_{-0.04}$

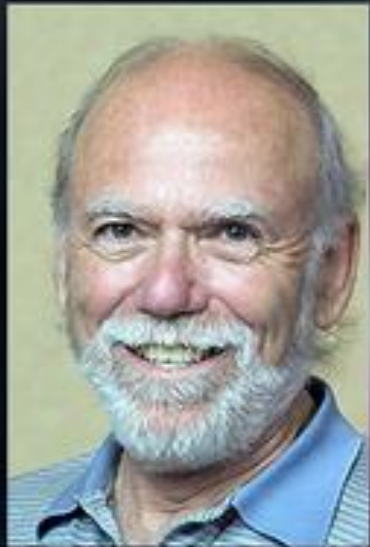
LIGOのスライドより

重力波の大きさ



$$h = \Delta L / L = 10^{-21}$$

重力波初観測にノーベル物理学賞



Barry C. Barish (Caltech)



Kip S. Thorne (Caltech)



Rainer Weiss (MIT)



2017 Nobel Prize in Physics

連星中性子星合体もとられました

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

Abbott et al.

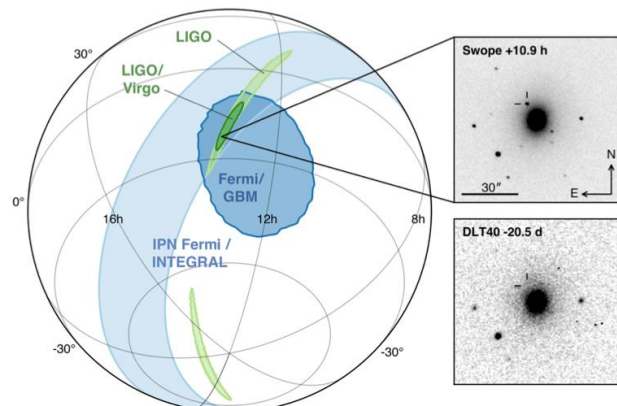
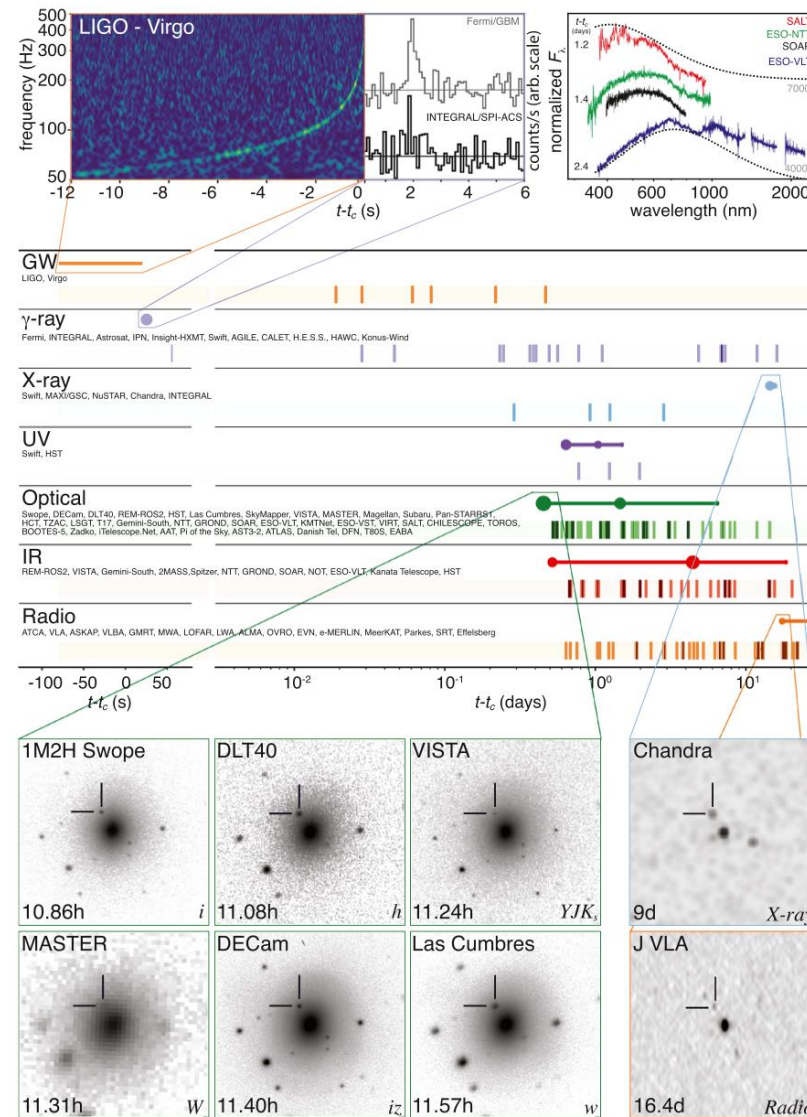
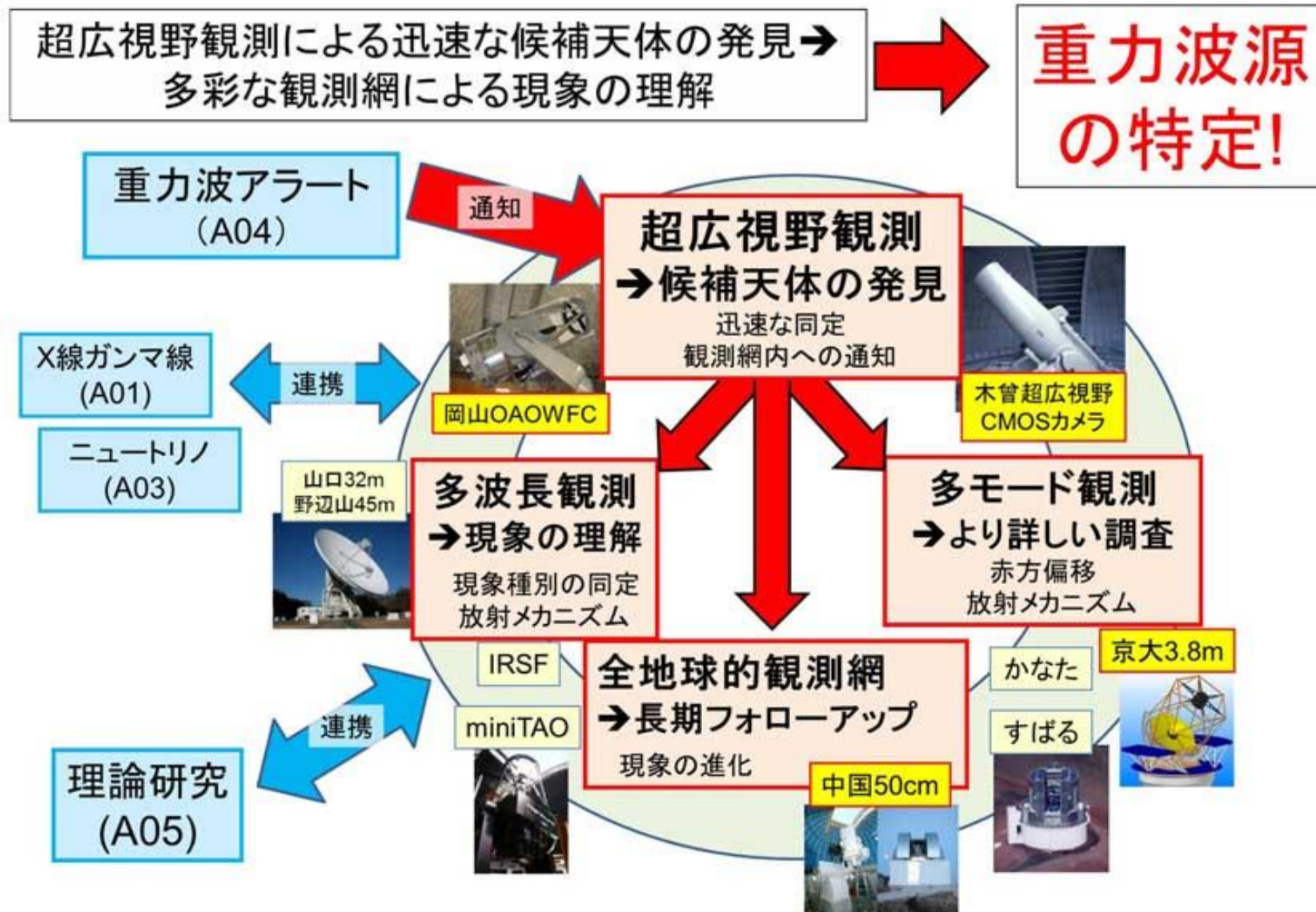


Figure 1. Localization of the gravitational-wave, gamma-ray, and optical signals. The left panel shows an orthographic projection of the 90% credible regions from LIGO (190 deg²; light green), the initial LIGO-Virgo localization (31 deg²; dark green), IPN triangulation from the time delay between *Fermi* and *INTEGRAL* (light blue), and *Fermi*-GBM (dark blue). The inset shows the location of the apparent host galaxy NGC 4993 in the Swope optical discovery image at 10.9 hr after the merger (top right) and the DLT40 pre-discovery image from 20.5 days prior to merger (bottom right). The reticle marks the position of the transient in both images.



GW170817
GRB170817A
SSS17a / AT2017gfo
マルチメッセンジャー観測

日本の望遠鏡ネットワーク J-GEM



中性子連星合体の現場をとらえた

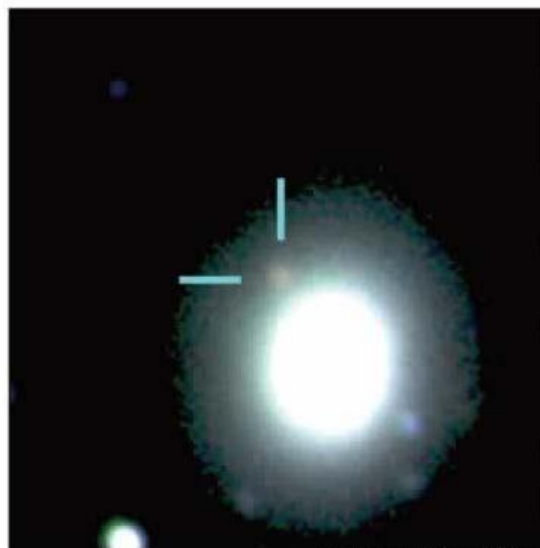
重力波天体が放つ光を初観測：日本の望遠鏡群が捉えた重元素の誕生の現場 — 重力波を追いかけた天文学者たちは宝物を見つけた —

2017年10月16日 | [研究成果](#)

2017.08.18-19



2017.08.24-25



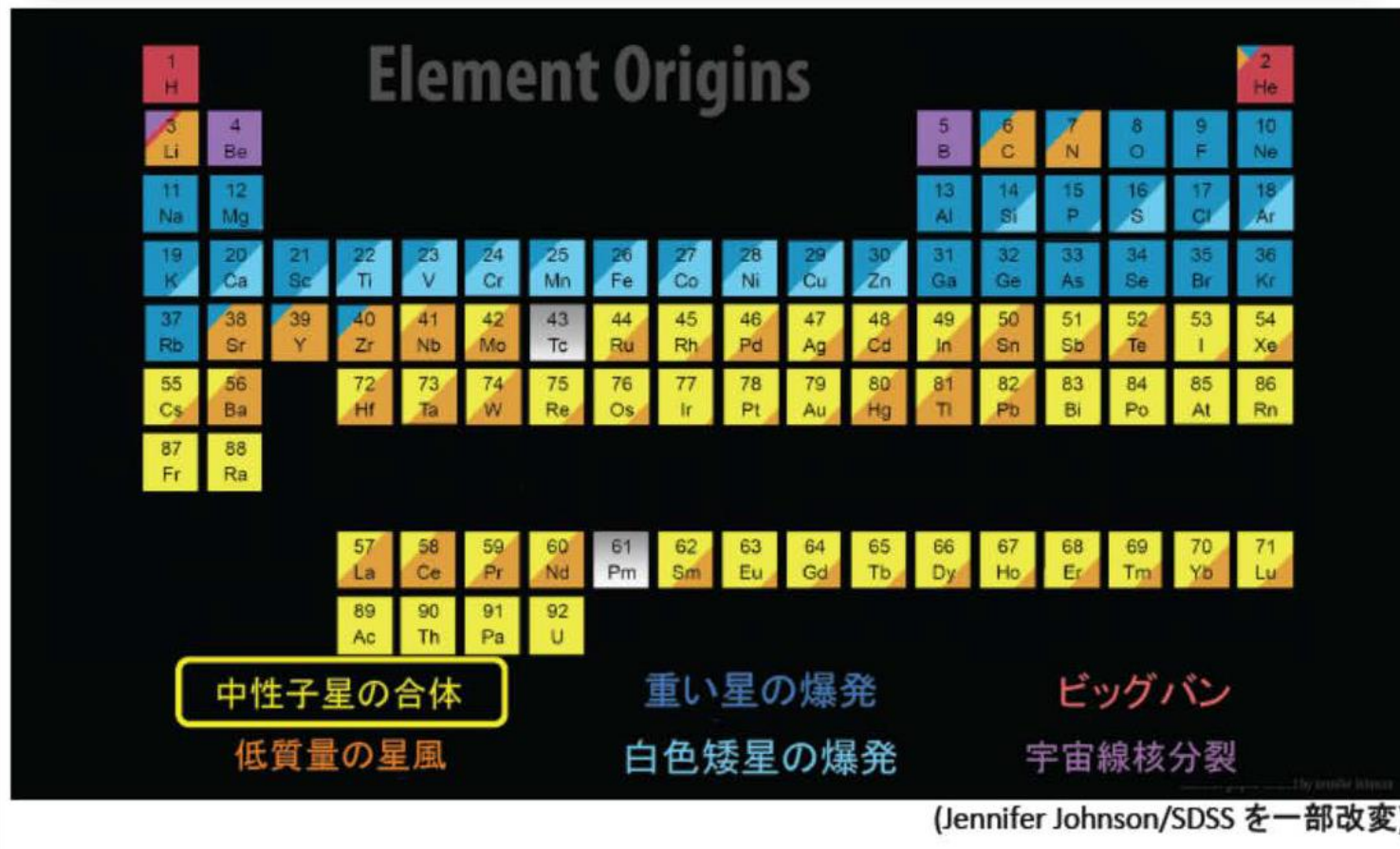
Credit: NAOJ / Nagoya University

GW 170817の可視光赤外線対応天体。疑似3色合成画像は、すばる望遠鏡（zバンドを青）とIRSF（Hバンドを緑、Ksバンドを赤）のデータを用いて作られた。[オリジナルサイズ \(35KB\)](#)

連星中性子星合体からわかること

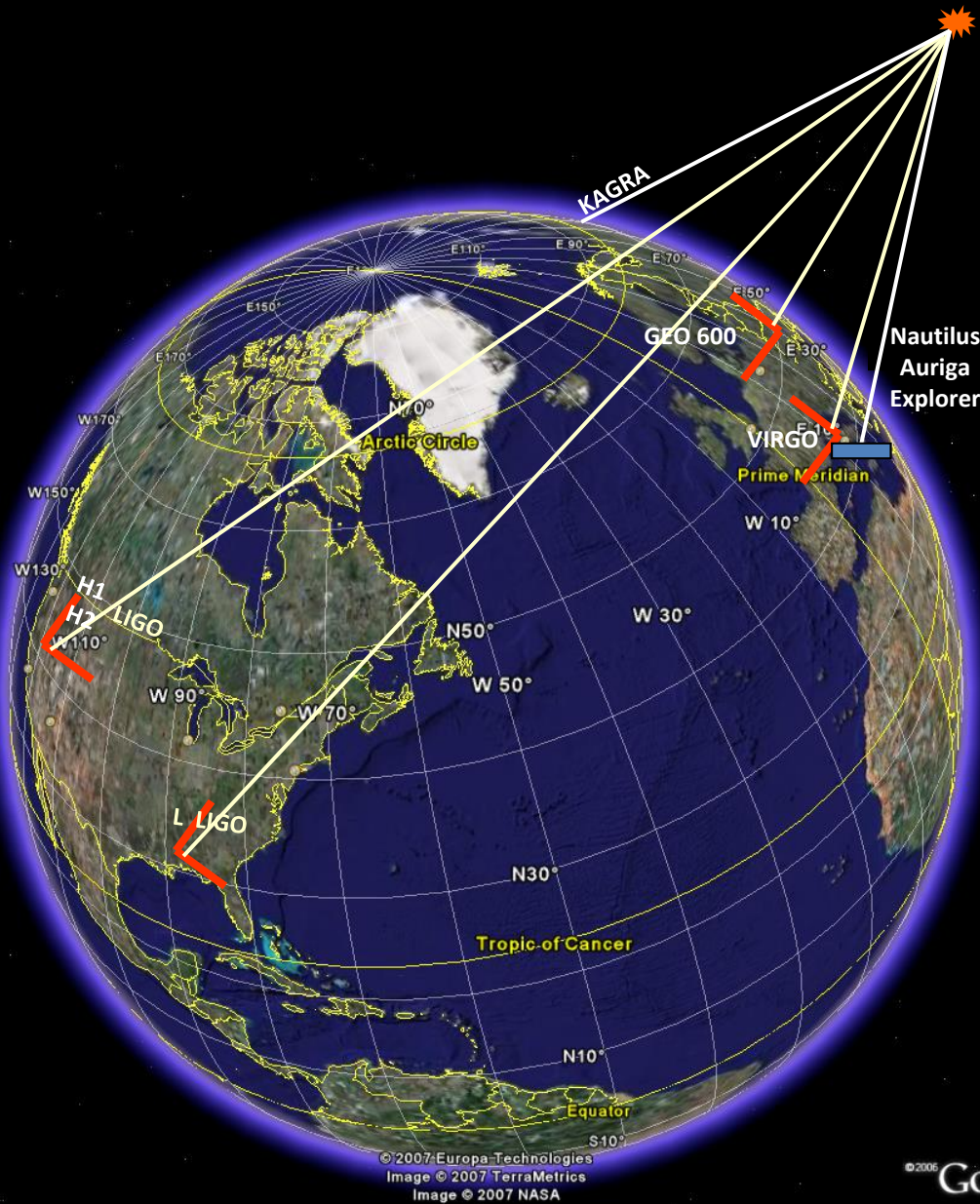


3.6 元素の生まれた場所



このようなことを調べられる光学観測のためには、いち早く位置を特定することが必須

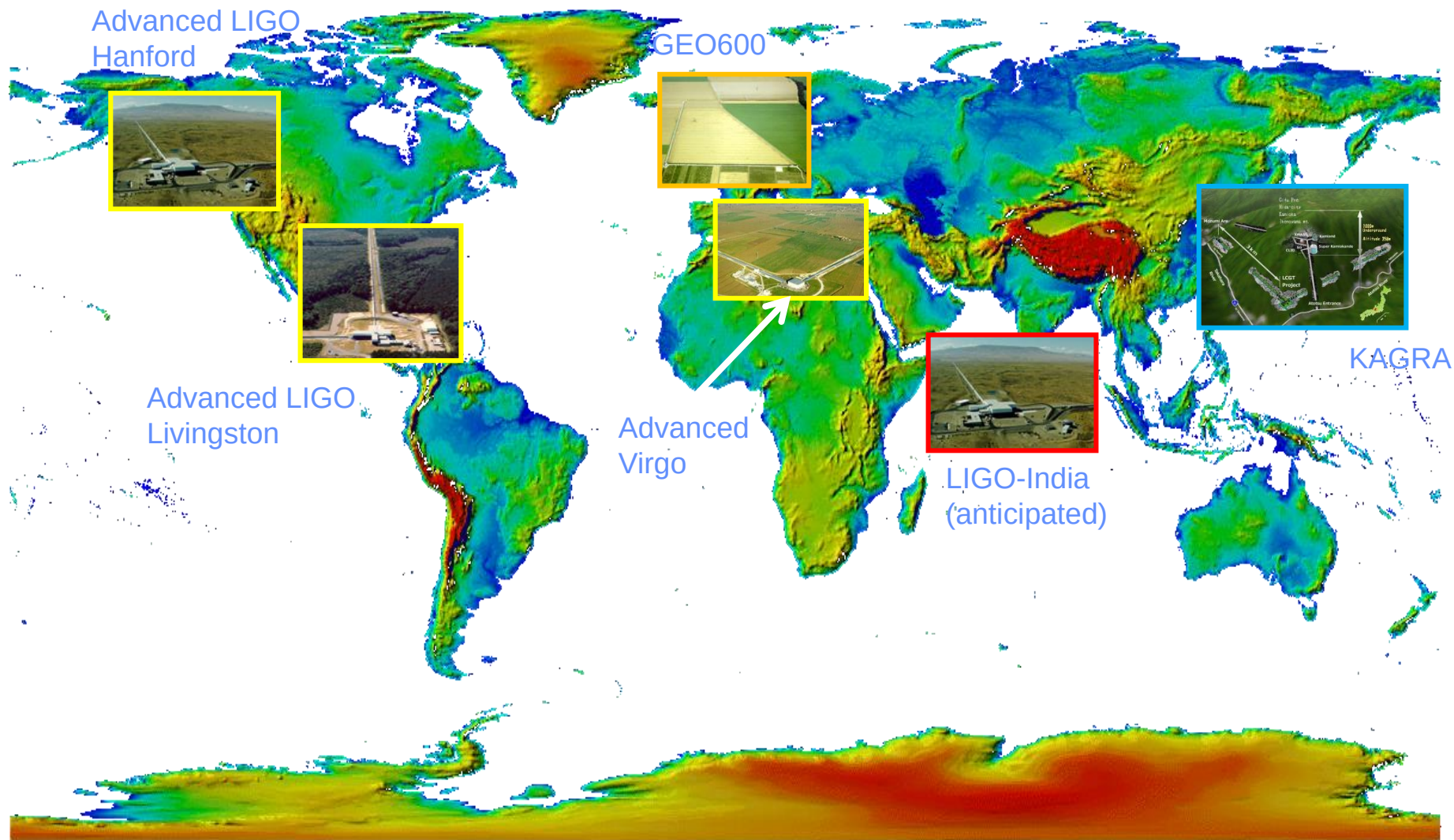
Global network of Detectors



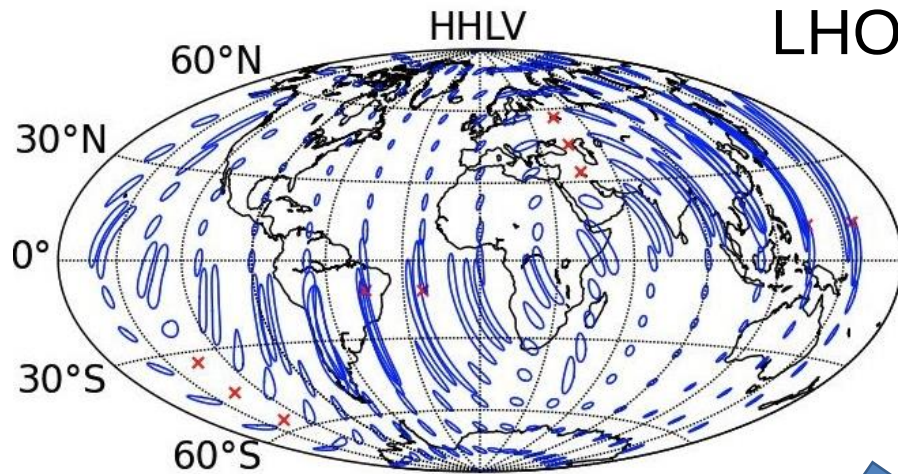
大型低温重力波望遠鏡 KAGRA

Alt 5586.99 mi

世界の重力波望遠鏡



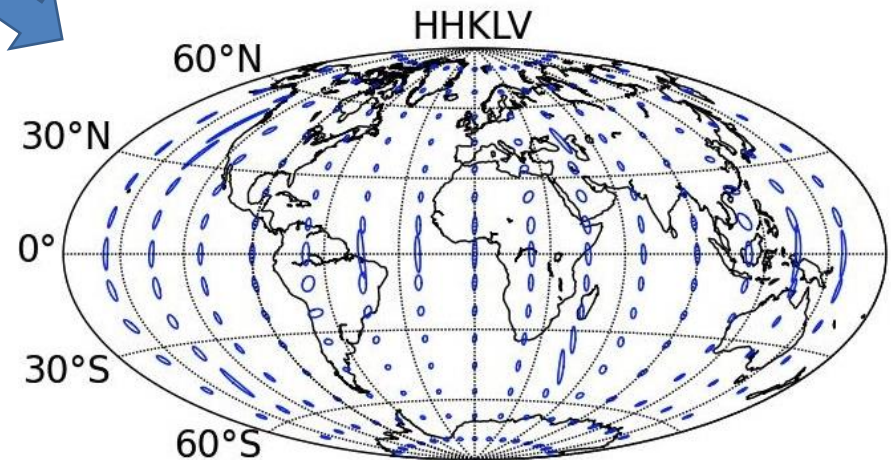
国際観測ネットワークとKAGRA



x denotes blind spots

S. Fairhurst, “Improved source localization with LIGO India”, [J. Phys.: Conf. Ser. 484 012007](#)

LHO + LLO + Virgo + KAGRA



LIGO (基線長4km、東西海岸に各一台)



大型低温重力波望遠鏡KAGRAの概要

目的

大型低温重力波望遠鏡KAGRAで宇宙からの「**重力波**」を観測することにより、超新星爆発やコンパクト連星合体の天体現象を解明する。それにより、ブラックホール生成の瞬間などを研究する**重力波天文学の国際的研究拠点を構築**する。

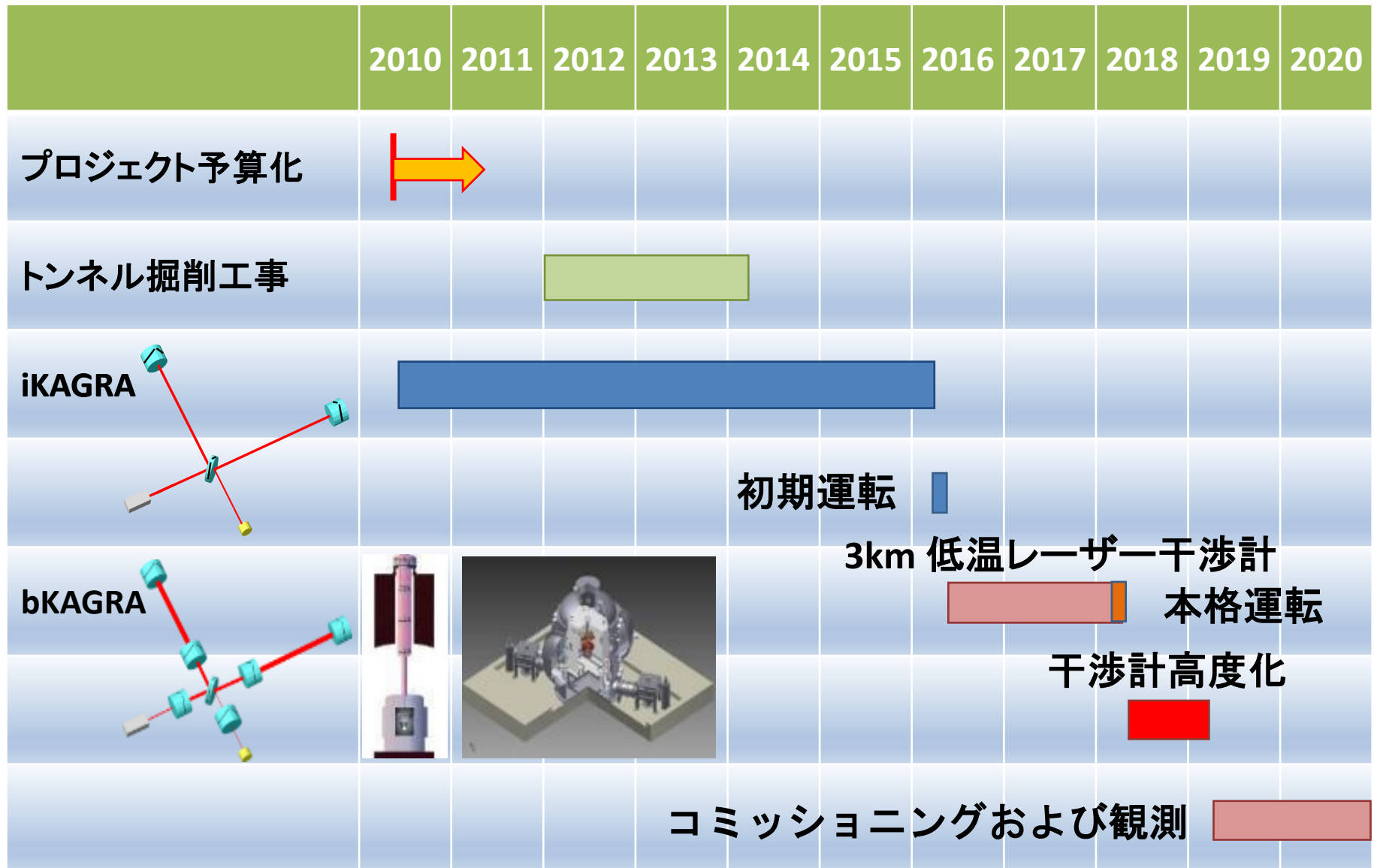
設備と事業の概要

- ・世界最高感度の**一辺3kmのL字型の大型レーザー干渉計を整備**して重力波を観測する。
- ・宇宙線研をホストとし、国立天文台、高エネルギー加速器研究機構と協力し、国内外の研究者と**国際**共同利用・共同研究体制で実現。
- ・完成後は国内外で200人以上が集まる国際観測拠点。



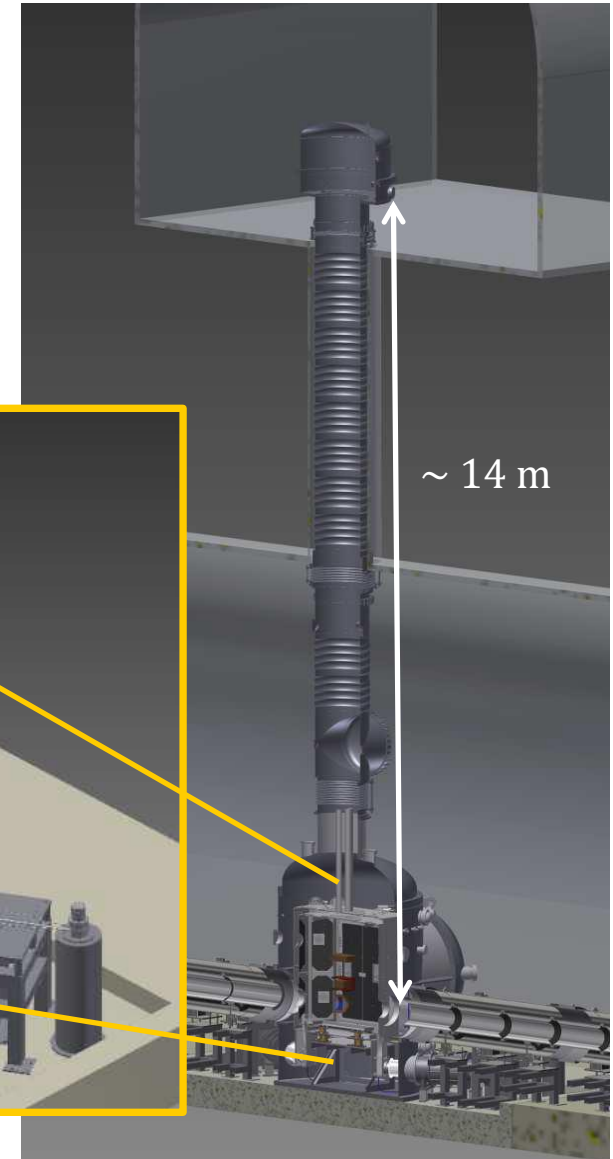
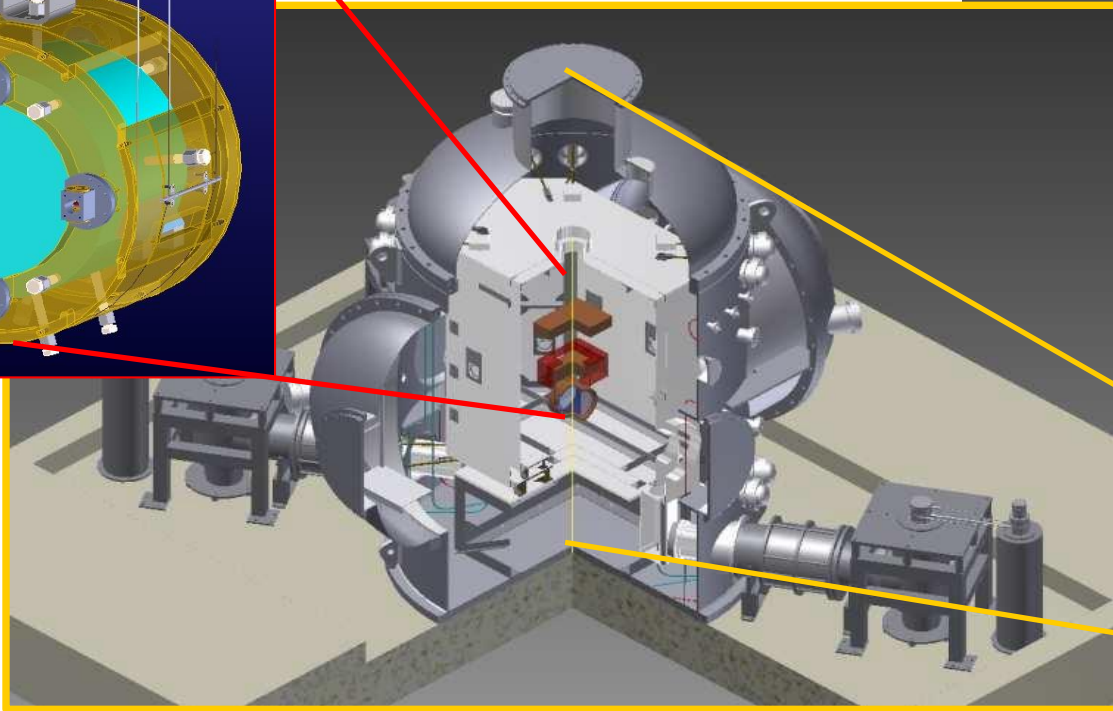
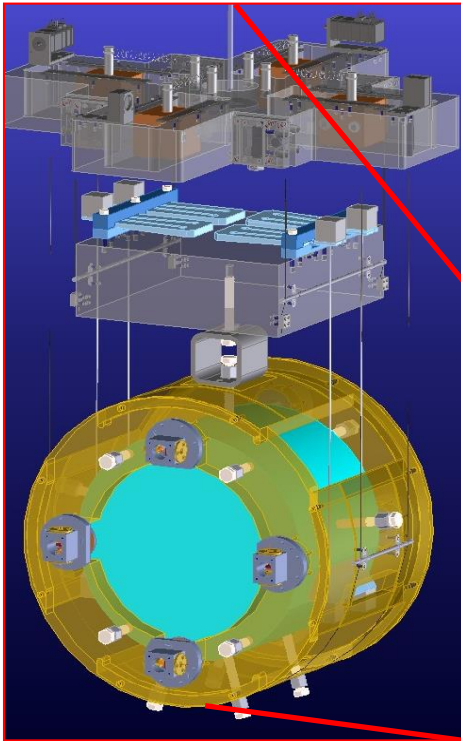


KAGRAのスケジュール

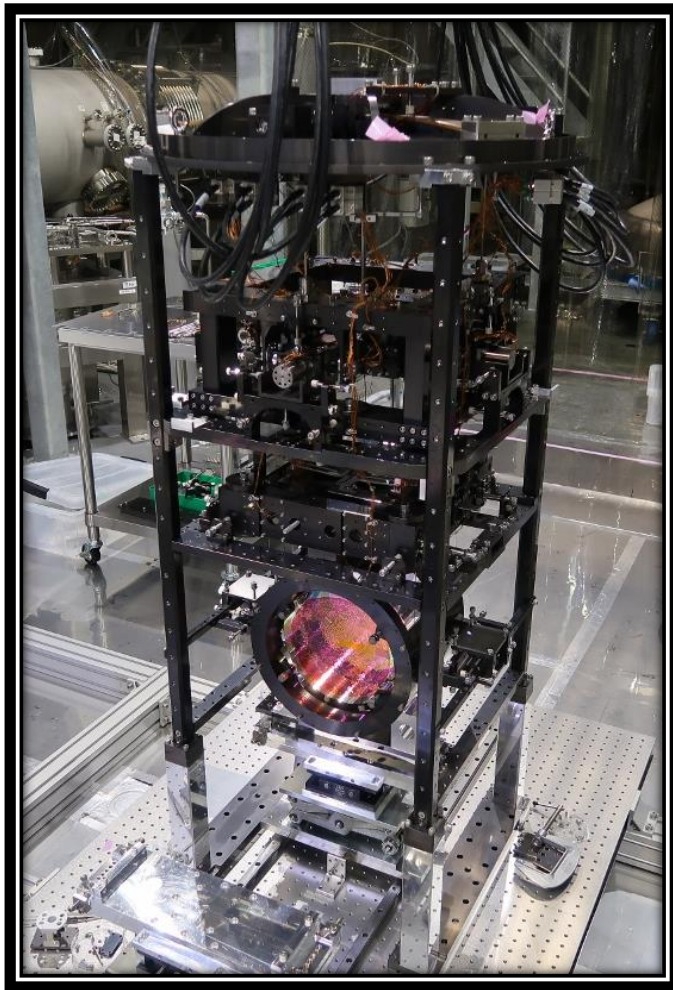


本格観測に向けての最後の準備(低温系)

極低温鏡の懸架システム
(設計図)

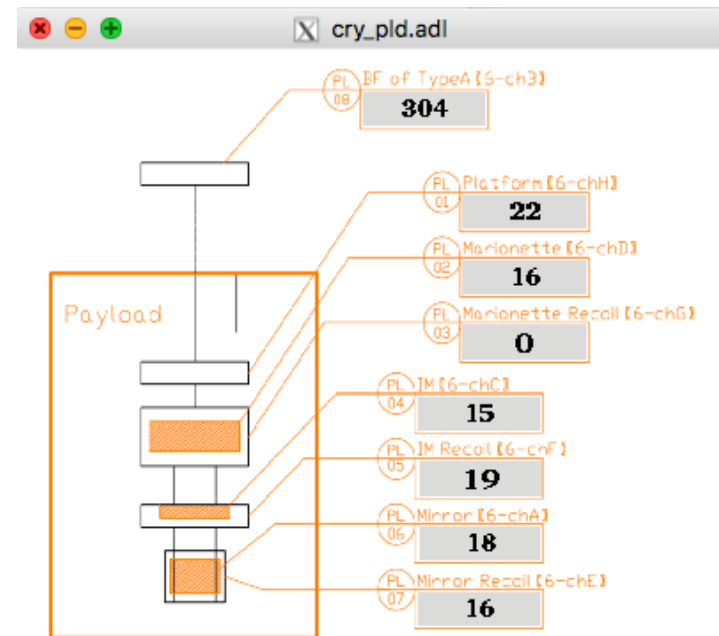


本格観測に向けて(低温鏡システム)



低温鏡懸架装置

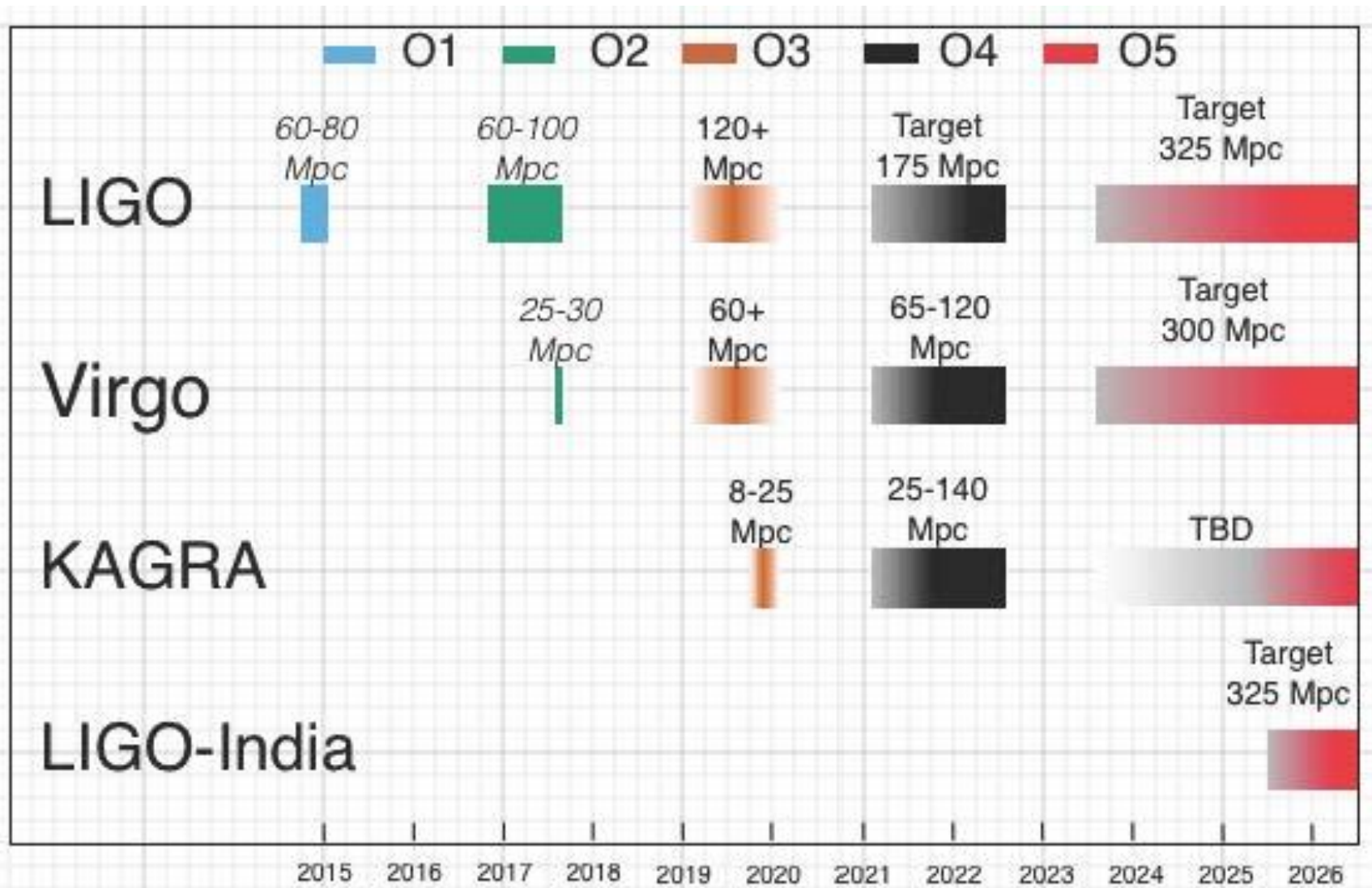
低温鏡を20K以下に冷却した



KAGRAの現状(中央エリア、低温容器)



LIGO&Virgoと本計画の共同観測の予定



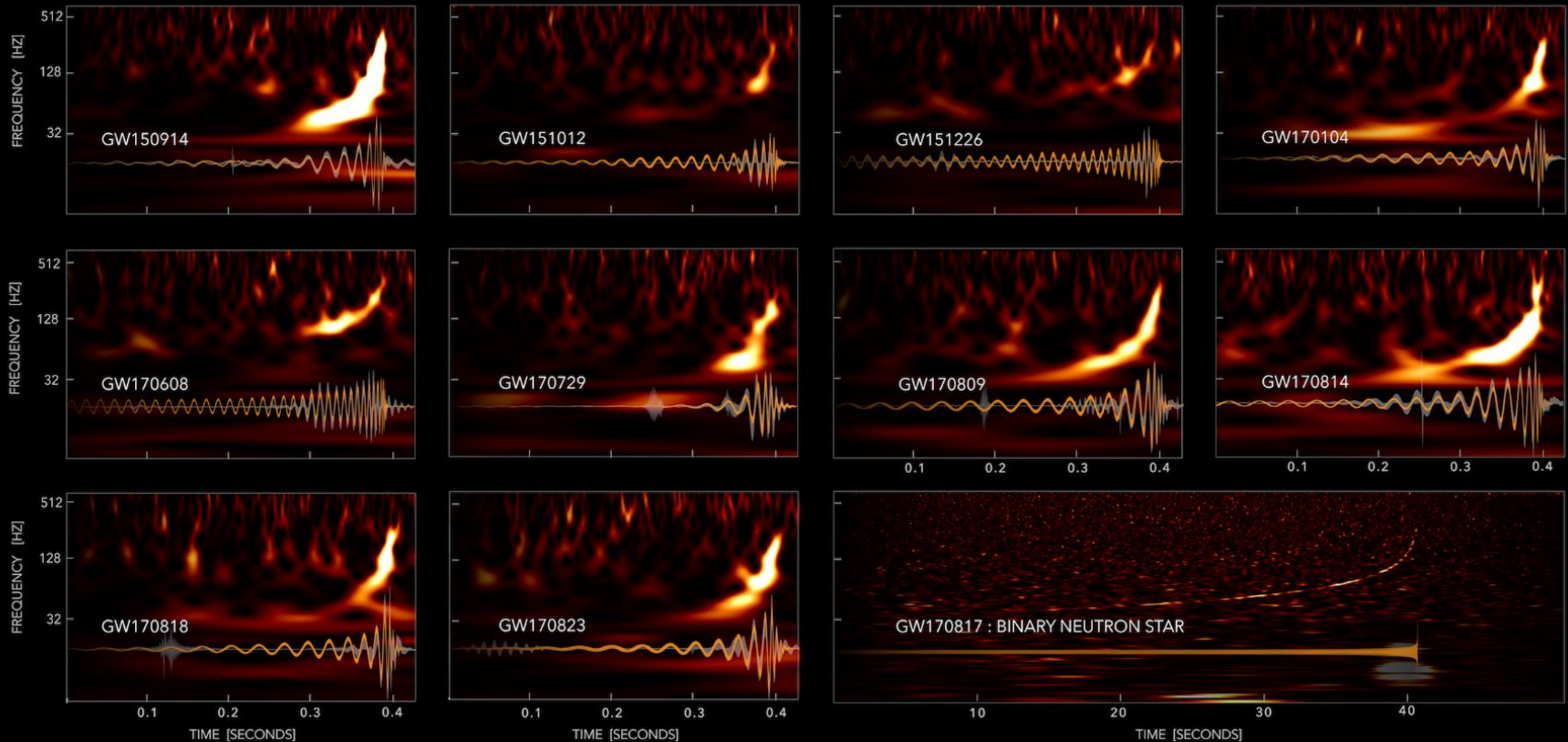
GWTC-1: A Gravitational-Wave Transient Catalog of Compact Binary Mergers Observed by LIGO and Virgo during the First and Second Observing Runs

Event	$m_1/M_\odot$	$m_2/M_\odot$	$M/M_\odot$	χ_{eff}	$M_f/M_\odot$	a_f	$E_{\text{rad}}/(M_\odot c^2)$	$\ell_{\text{peak}}/(\text{erg s}^{-1})$	d_L/Mpc	z	$\Delta\Omega/\text{deg}^2$
GW150914	$35.6^{+4.8}_{-3.0}$	$30.6^{+3.0}_{-4.4}$	$28.6^{+1.6}_{-1.5}$	$-0.01^{+0.12}_{-0.13}$	$63.1^{+3.3}_{-3.0}$	$0.69^{+0.05}_{-0.04}$	$3.1^{+0.4}_{-0.4}$	$3.6^{+0.4}_{-0.4} \times 10^{56}$	430^{+150}_{-170}	$0.09^{+0.03}_{-0.03}$	180
GW151012	$23.3^{+14.0}_{-5.5}$	$13.6^{+4.1}_{-4.8}$	$15.2^{+2.0}_{-1.1}$	$0.04^{+0.28}_{-0.19}$	$35.7^{+9.9}_{-3.8}$	$0.67^{+0.13}_{-0.11}$	$1.5^{+0.5}_{-0.5}$	$3.2^{+0.8}_{-1.7} \times 10^{56}$	1060^{+540}_{-480}	$0.21^{+0.09}_{-0.09}$	1555
GW151226	$13.7^{+8.8}_{-3.2}$	$7.7^{+2.2}_{-2.6}$	$8.9^{+0.3}_{-0.3}$	$0.18^{+0.20}_{-0.12}$	$20.5^{+6.4}_{-1.5}$	$0.74^{+0.07}_{-0.05}$	$1.0^{+0.1}_{-0.2}$	$3.4^{+0.7}_{-1.7} \times 10^{56}$	440^{+180}_{-190}	$0.09^{+0.04}_{-0.04}$	1033
GW170104	$31.0^{+7.2}_{-5.6}$	$20.1^{+4.9}_{-4.5}$	$21.5^{+2.1}_{-1.7}$	$-0.04^{+0.17}_{-0.20}$	$49.1^{+5.2}_{-3.9}$	$0.66^{+0.08}_{-0.10}$	$2.2^{+0.5}_{-0.5}$	$3.3^{+0.6}_{-0.9} \times 10^{56}$	960^{+430}_{-410}	$0.19^{+0.07}_{-0.08}$	924
GW170608	$10.9^{+5.3}_{-1.7}$	$7.6^{+1.3}_{-2.1}$	$7.9^{+0.2}_{-0.2}$	$0.03^{+0.19}_{-0.07}$	$17.8^{+3.2}_{-0.7}$	$0.69^{+0.04}_{-0.04}$	$0.9^{+0.05}_{-0.1}$	$3.5^{+0.4}_{-1.3} \times 10^{56}$	320^{+120}_{-110}	$0.07^{+0.02}_{-0.02}$	396
GW170729	$50.6^{+16.6}_{-10.2}$	$34.3^{+9.1}_{-10.1}$	$35.7^{+6.5}_{-4.7}$	$0.36^{+0.21}_{-0.25}$	$80.3^{+14.6}_{-10.2}$	$0.81^{+0.07}_{-0.13}$	$4.8^{+1.7}_{-1.7}$	$4.2^{+0.9}_{-1.5} \times 10^{56}$	2750^{+1350}_{-1320}	$0.48^{+0.19}_{-0.20}$	1033
GW170809	$35.2^{+8.3}_{-6.0}$	$23.8^{+5.2}_{-5.1}$	$25.0^{+2.1}_{-1.6}$	$0.07^{+0.16}_{-0.16}$	$56.4^{+5.2}_{-3.7}$	$0.70^{+0.08}_{-0.09}$	$2.7^{+0.6}_{-0.6}$	$3.5^{+0.6}_{-0.9} \times 10^{56}$	990^{+320}_{-380}	$0.20^{+0.05}_{-0.07}$	340
GW170814	$30.7^{+5.7}_{-3.0}$	$25.3^{+2.9}_{-4.1}$	$24.2^{+1.4}_{-1.1}$	$0.07^{+0.12}_{-0.11}$	$53.4^{+3.2}_{-2.4}$	$0.72^{+0.07}_{-0.05}$	$2.7^{+0.4}_{-0.3}$	$3.7^{+0.4}_{-0.5} \times 10^{56}$	580^{+160}_{-210}	$0.12^{+0.03}_{-0.04}$	87
GW170817	$1.46^{+0.12}_{-0.10}$	$1.27^{+0.09}_{-0.09}$	$1.186^{+0.001}_{-0.001}$	$0.00^{+0.02}_{-0.01}$	≤ 2.8	≤ 0.89	≥ 0.04	$\geq 0.1 \times 10^{56}$	40^{+10}_{-10}	$0.01^{+0.00}_{-0.00}$	16
GW170818	$35.5^{+7.5}_{-4.7}$	$26.8^{+4.3}_{-5.2}$	$26.7^{+2.1}_{-1.7}$	$-0.09^{+0.18}_{-0.21}$	$59.8^{+4.8}_{-3.8}$	$0.67^{+0.07}_{-0.08}$	$2.7^{+0.5}_{-0.5}$	$3.4^{+0.5}_{-0.7} \times 10^{56}$	1020^{+430}_{-360}	$0.20^{+0.07}_{-0.07}$	39
GW170823	$39.6^{+10.0}_{-6.6}$	$29.4^{+6.3}_{-7.1}$	$29.3^{+4.2}_{-3.2}$	$0.08^{+0.20}_{-0.22}$	$65.6^{+9.4}_{-6.6}$	$0.71^{+0.08}_{-0.10}$	$3.3^{+0.9}_{-0.8}$	$3.6^{+0.6}_{-0.9} \times 10^{56}$	1850^{+840}_{-840}	$0.34^{+0.13}_{-0.14}$	1651

GW170817は連星中性子星
それ以外は連星ブラックホール

時間周波数マップと再構築された波形

GRAVITATIONAL-WAVE TRANSIENT CATALOG-1



LIGO-VIRGO DATA: [HTTPS://DOI.ORG/10.7935/82H3-HH23](https://doi.org/10.7935/82H3-HH23)

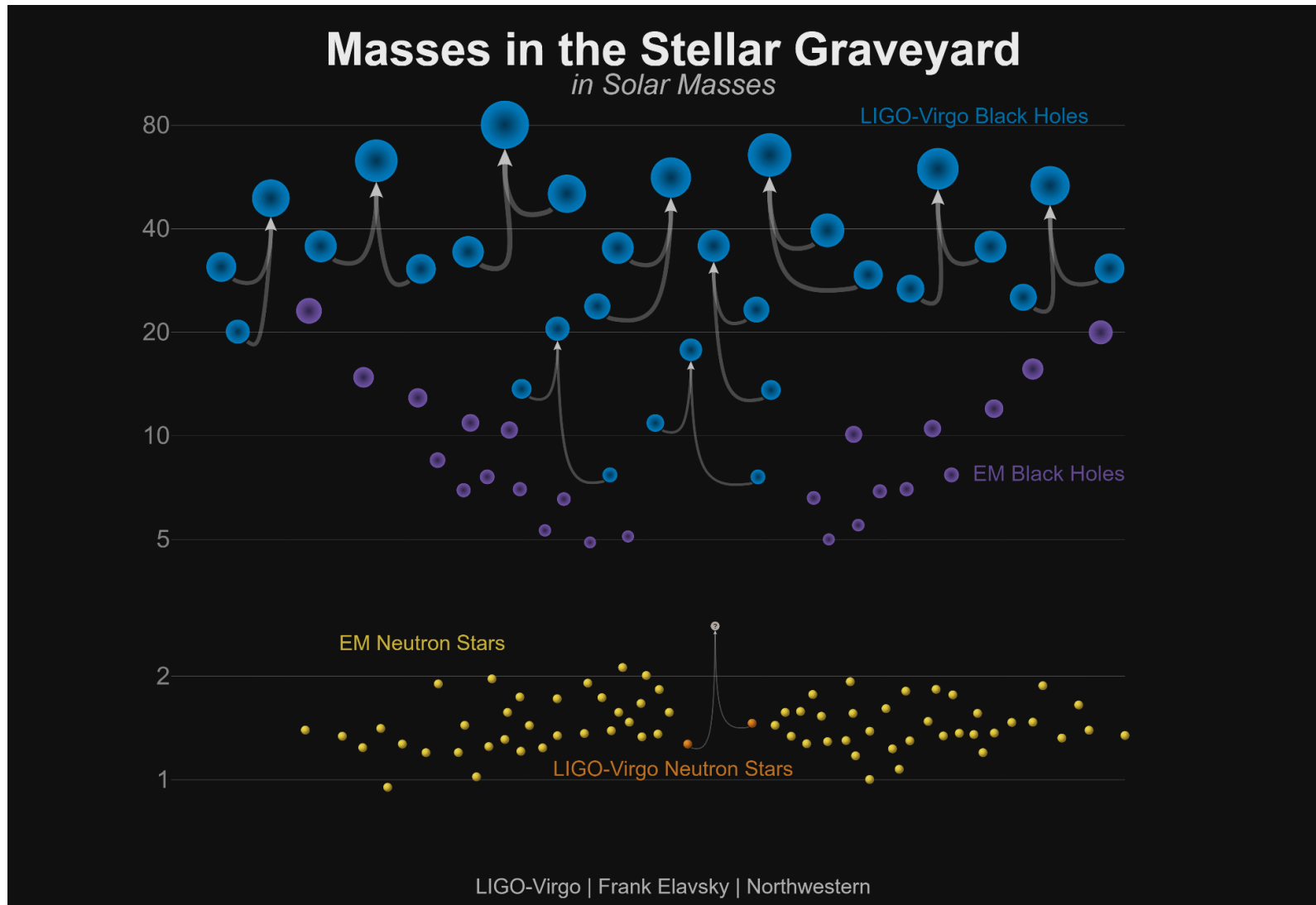
WAVELET (UNMODELED)

EINSTEIN'S THEORY

S. GHONGE, K. JANI | GEORGIA TECH

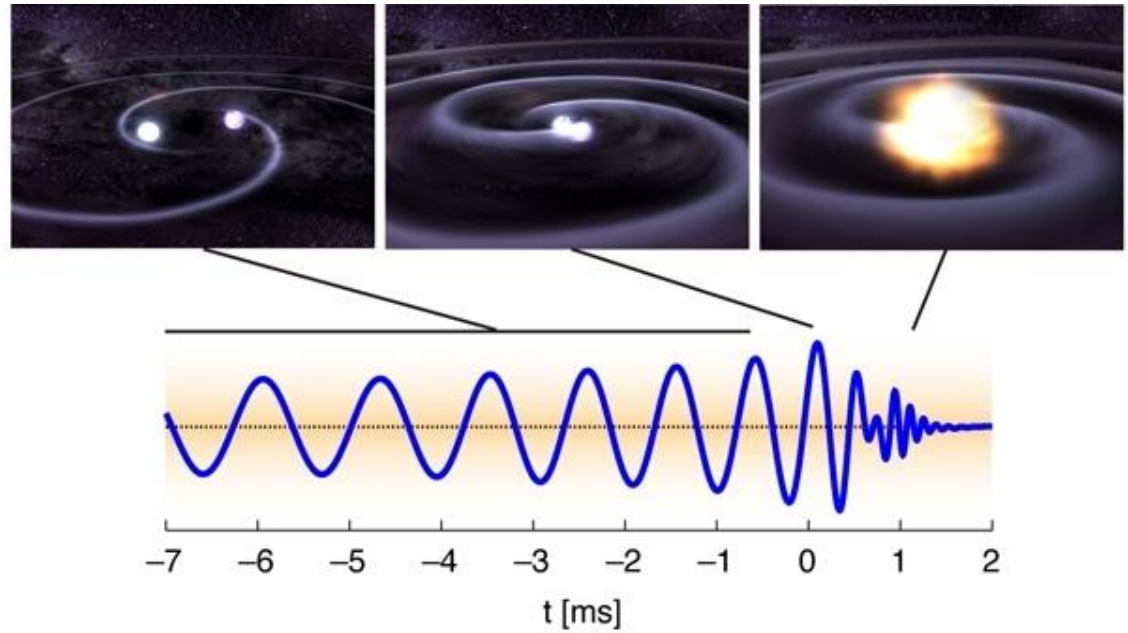
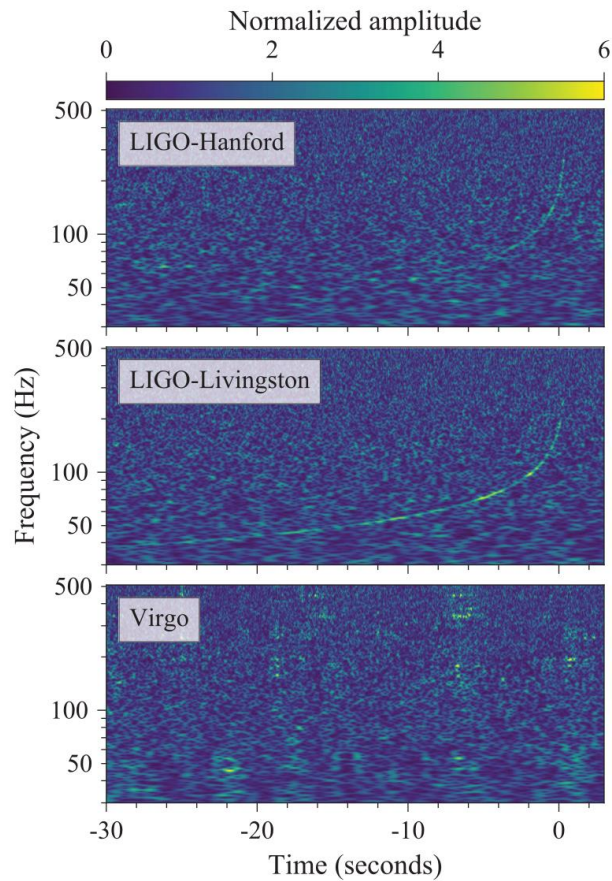
<https://www.ligo.org/detections/images/GWTC1-poster.png>

観測されたコンパクト連星の質量



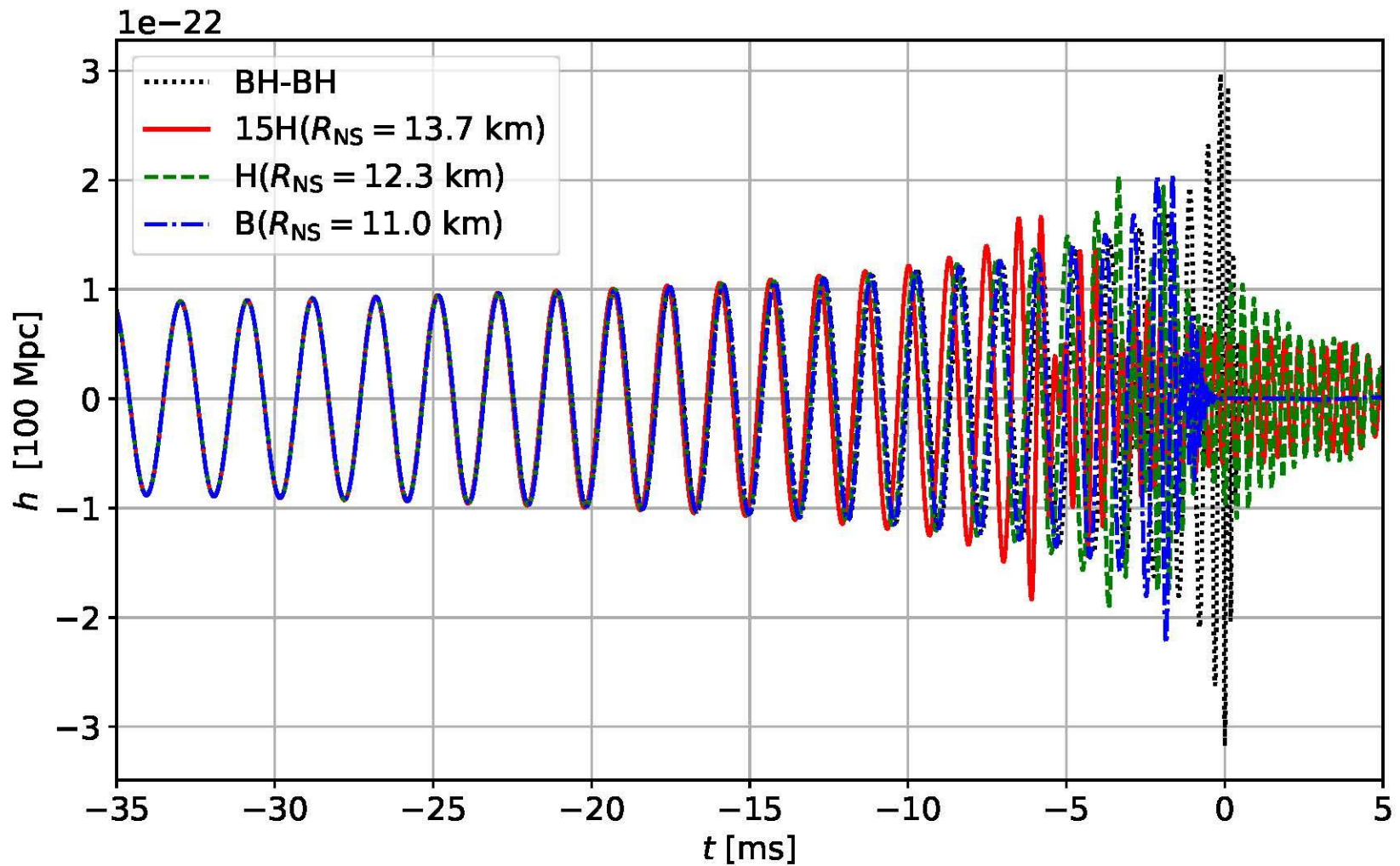
https://www.ligo.org/detections/images/Masses_of_Dead_Stars_LIGO_Virgo_default.png

中性子連星合体の重力波形



まだSNが小さいため、波形がうまく見えていない

中性子連星合体の重力波形



by Kawaguchi & Shibata

重力波天文学の発展

- **BBH**や**BNS**等のコンパクト連星の合体イベントが実際に観測された。今後も続々と同様の重力波が多数観測され、統計的な処理も可能になる。
- コンパクト連星合体だけではなく、**超新星爆発**もいずれとらえられ、電磁波観測との共同解析が進むはず(**マルチメッセンジャー天文学**)。
- もちろん、**予測されていない重力波源**の発見も期待できる。

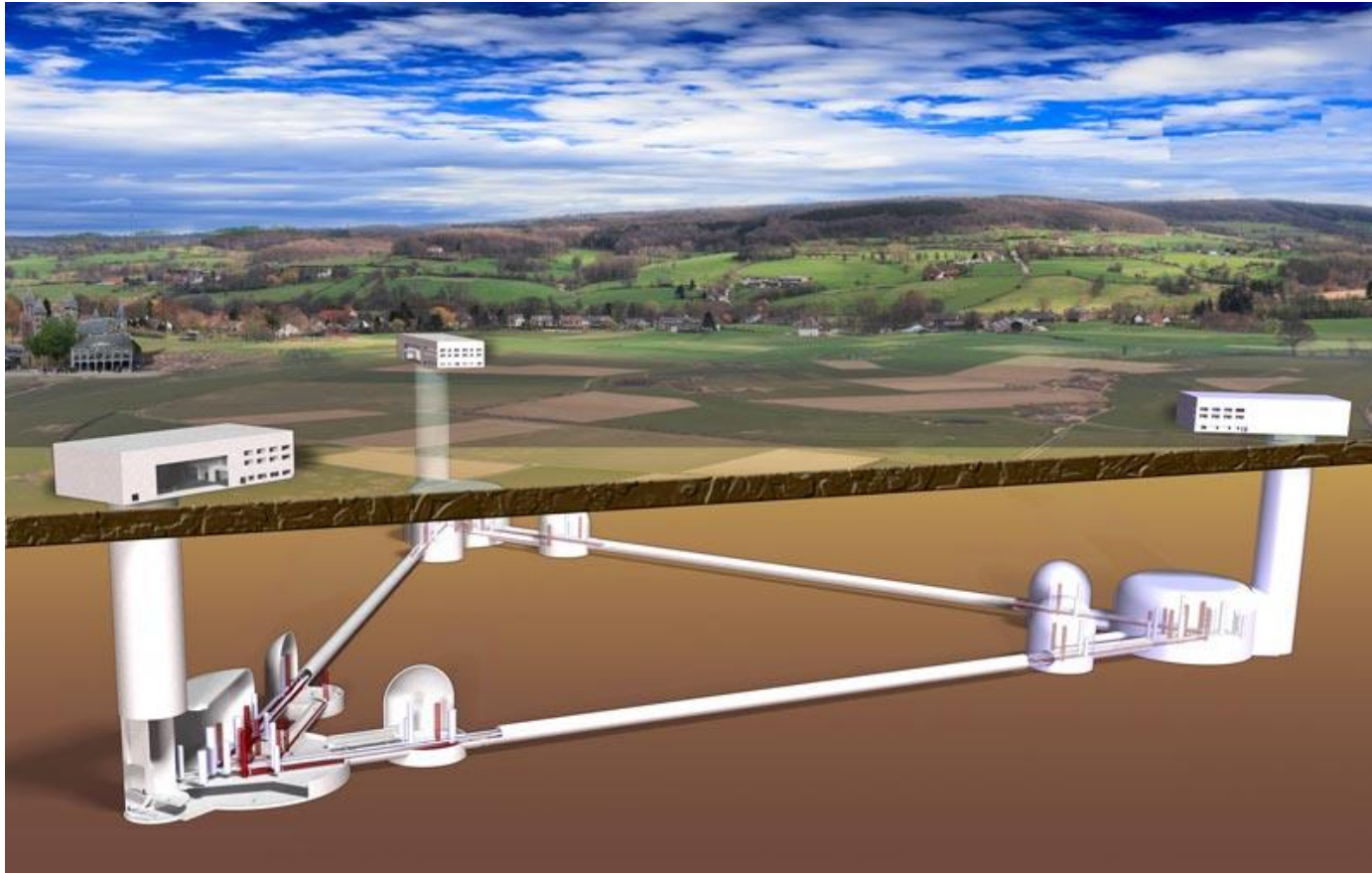
第三世代(3G)レーザー干渉計へ

3rd generation : **10 times better** sensitivity

Cryogenic techniques will be adopted.

Einstein Telescope (Europe), Voyager (U.S.A.)

KAGRAから技術提供する



http://www.et-gw.eu/images/ET_Image_Gallery/artisticview2.jpg

2020年代の重力波観測国際ネットワーク形成が進行中。

KAGRAが重力波国際ネットワークで大きな貢献をするために、建設を最速で続けて、2019年中に国際ネットワークへ参加することが不可欠。具体的には、LVの共同観測O3に参加する。