



重力波観測とKAGRAの今後

Gravitational Wave Observations and Future Prospects of KAGRA

神田展行 (大阪市立大学理学研究科 / 南部陽一郎物理学研究所)

KAGRAコラボレーション

Nobuyuki Kanda on behalf of the KAGRA collab.

第12回光赤外線天文学大学間連携ワークショップ

The 12th OISTER workshop

2021.11.26





重力波検出のこれまで

2015.9 - 2016.1 : LIGO 第1次観測運転(O1)

GW150914 初観測イベント 連星ブラックホール (BH-BH)

2016.11 - 2017.8 : LIGO+Virgo 第2次観測運転(O2)

GW170817 連星中性子星合体(NS-NS)
重力波マルチメッセンジャー観測の大成功

2019.4 - 2020.3 : LIGO+Virgo 第3次観測運転(O3)

2020.4末までの予定であったが、コロナ禍で3月までに。

2020.4 GEO+KAGRA (O3GK)

Living Reviews in Relativity (2020) 23:3
<https://doi.org/10.1007/s41114-020-00026-9>

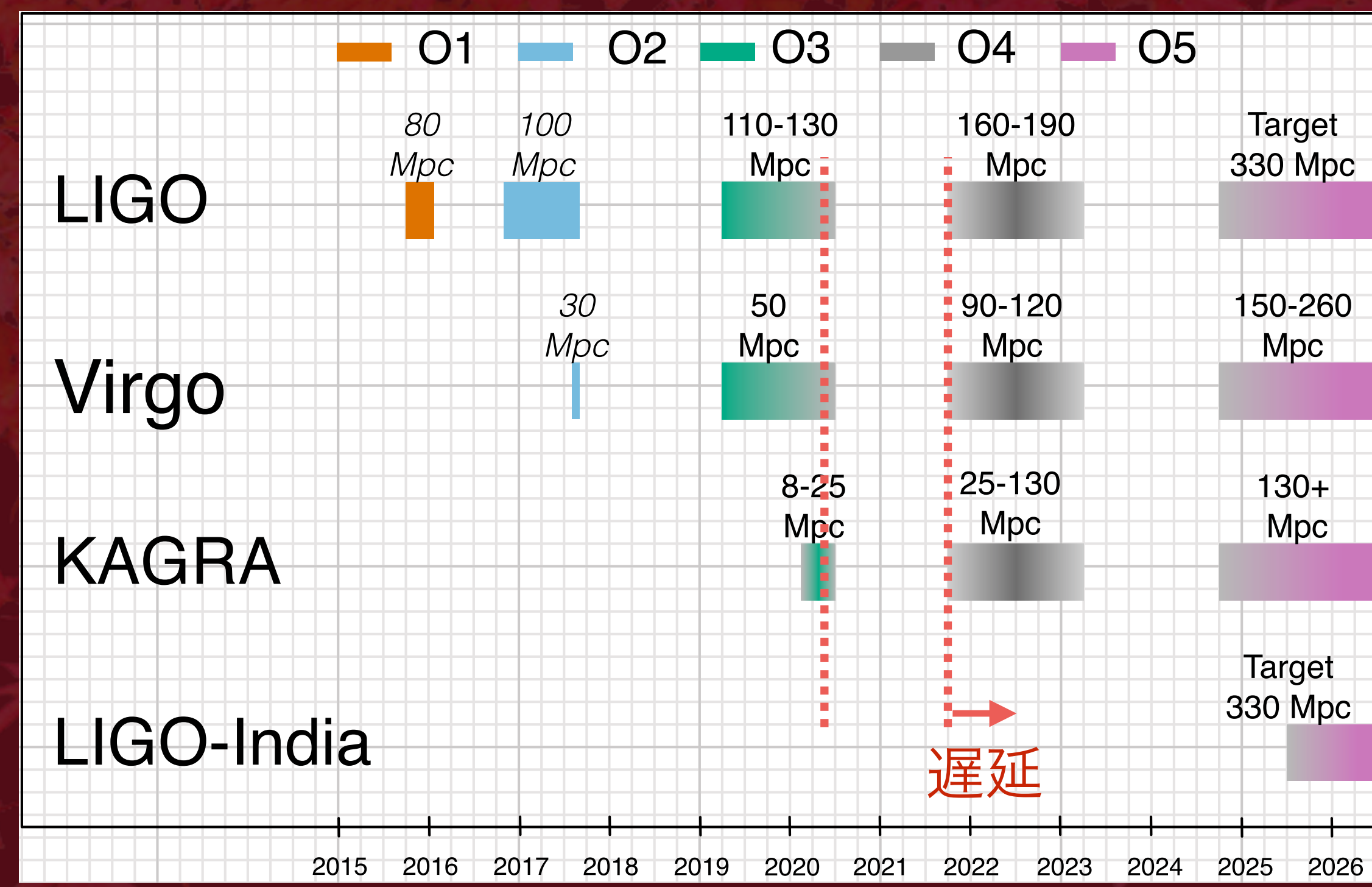


Fig. 2 The planned sensitivity evolution and observing runs of the aLIGO, AdV and KAGRA detectors

2022.Dec O4開始予定

LIGO Hanford control room. Credit: Caltech/MIT/LIGO Lab/C. Gray

Update on LIGO, Virgo and Kagra Observing Run Plans

News Release • November 15, 2021

Taking into account the most recent impacts to the LIGO, Virgo, and KAGRA detector upgrade schedules brought about by local and global conditions, we plan to start the O4 Observing run in mid-December 2022.

LIGO projects a sensitivity goal of 160-190 Mpc for binary neutron stars. Virgo projects a target sensitivity of 80-115 Mpc. KAGRA should be running with greater than 1 Mpc sensitivity at the beginning of O4, and will work to improve the sensitivity toward the end of O4.

Contact

LIGO Scientific Collaboration Spokesperson: **Patrick Brady**

Virgo Collaboration Spokesperson: **Giovanni Losurdo**

KAGRA Scientific Congress Board Chair: **Jun'ichi Yokoyama**

<https://www.ligo.caltech.edu/news/ligo20211115>

<https://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/category/latestnews>

03までの代表的な結果

KAGRAの現状～04へ

03/03-GK におけるKAGRA

現状＝04準備

05にむけて

今後期待されるKAGRAの貢献

方向決定精度 \subseteq 重力波源のパラメータ決定精度

全天に対する応答

KAGRAが寄与するために

高周波（ないし広帯域）の改良案

NS-NS合体フェーズの波形

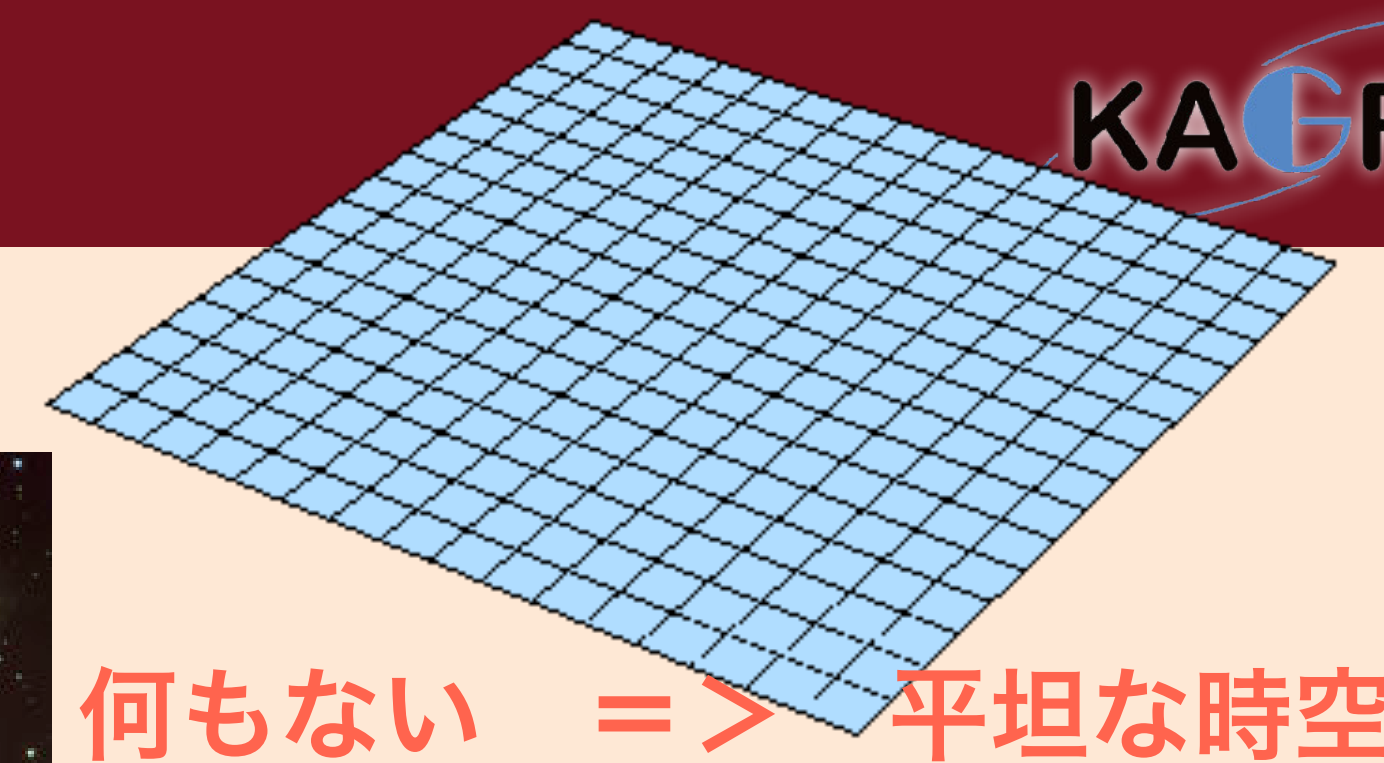
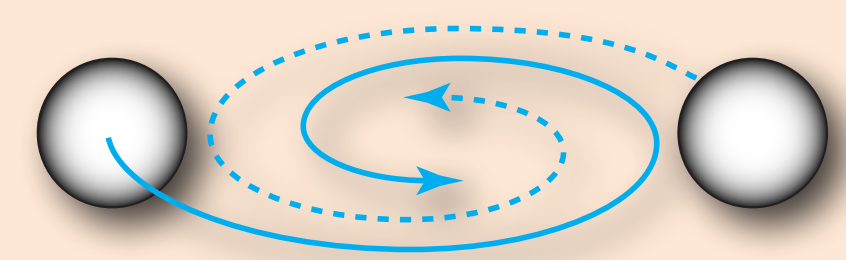
ファイバー共鳴改良案

BH準固有振動の重力波

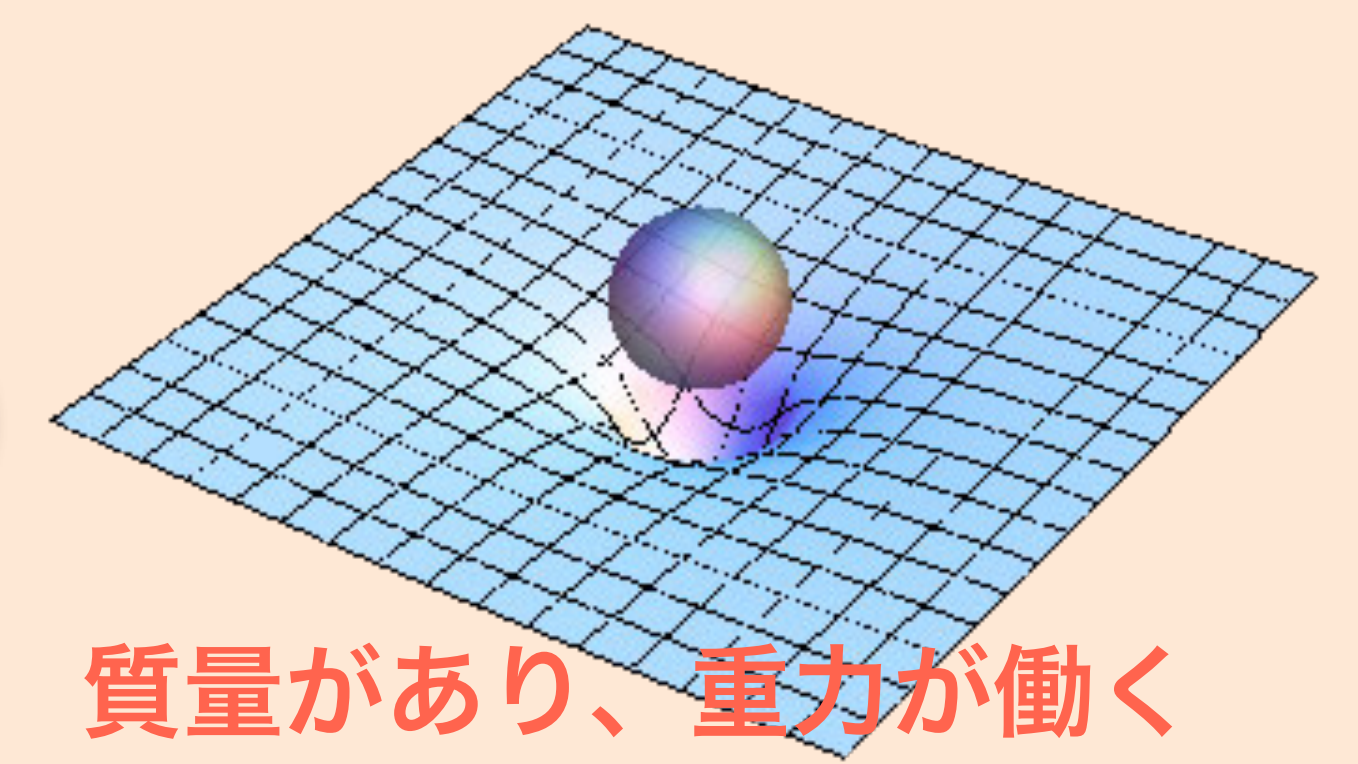
重力波とその観測方法

重力波とは？

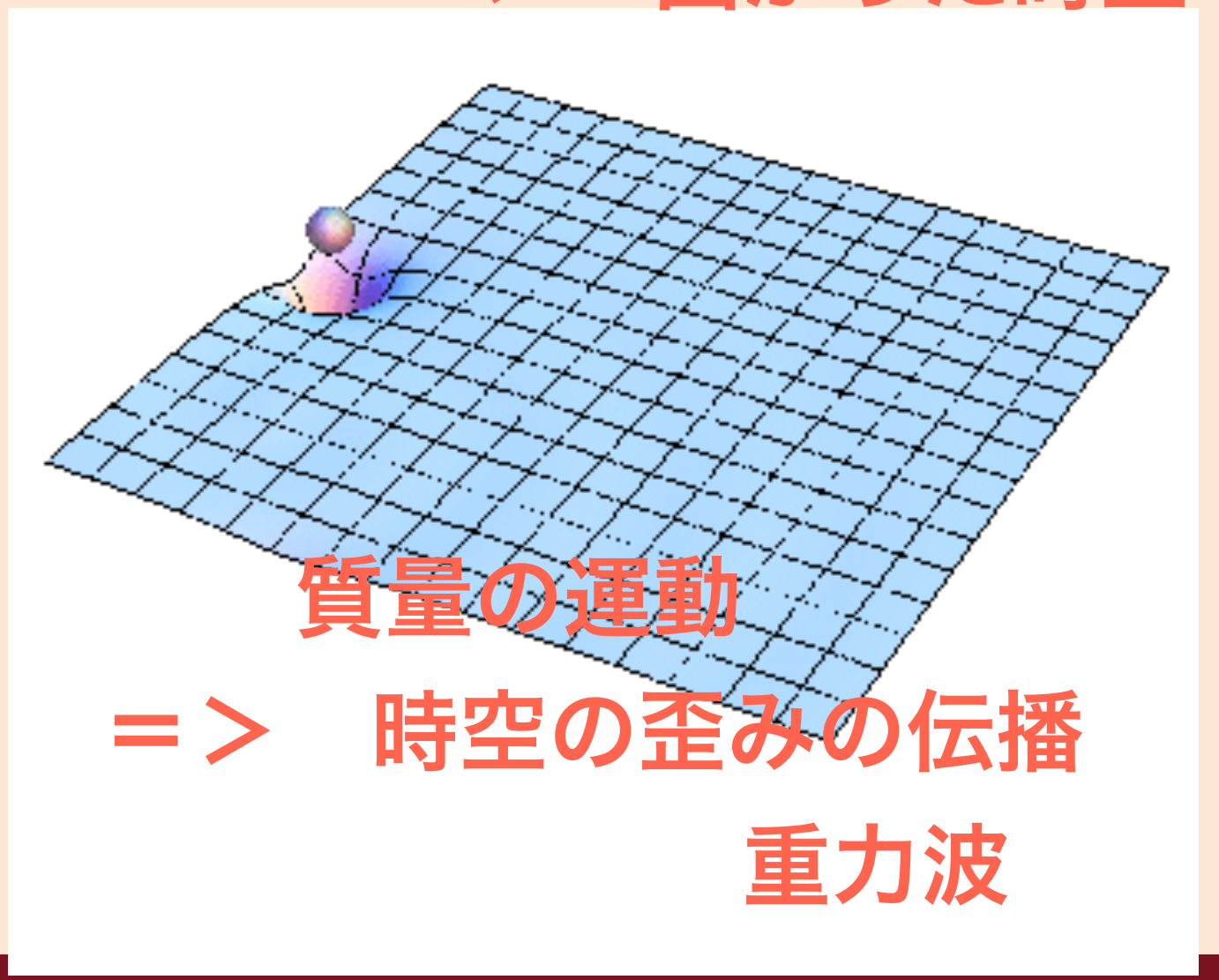
アインシュタインが一般相対性理論で予言した時空の歪みの波
 ブラックホールのように、強い重力場から発生する。
超新星爆発やコンパクト連星などの劇的な天体現象で発生する



何もない => 平坦な時空

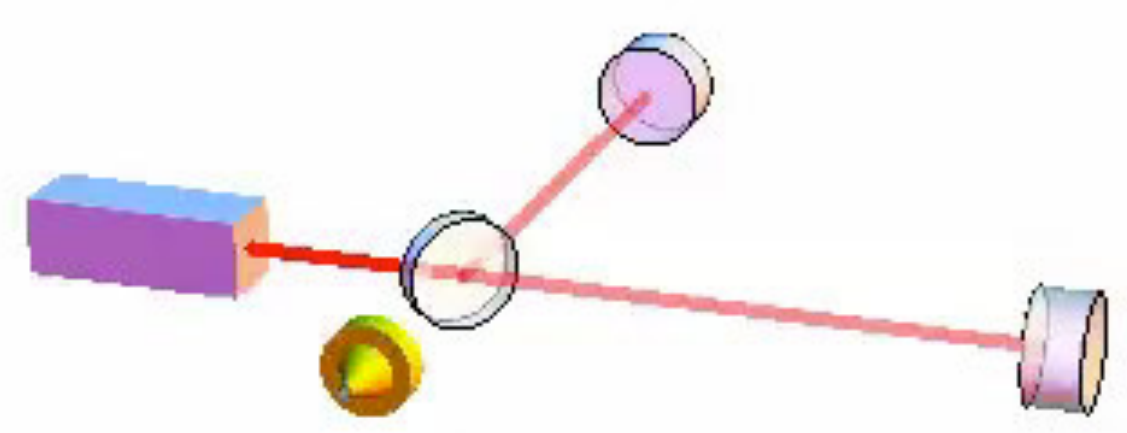


質量があり、重力が働く
=> 曲がった時空



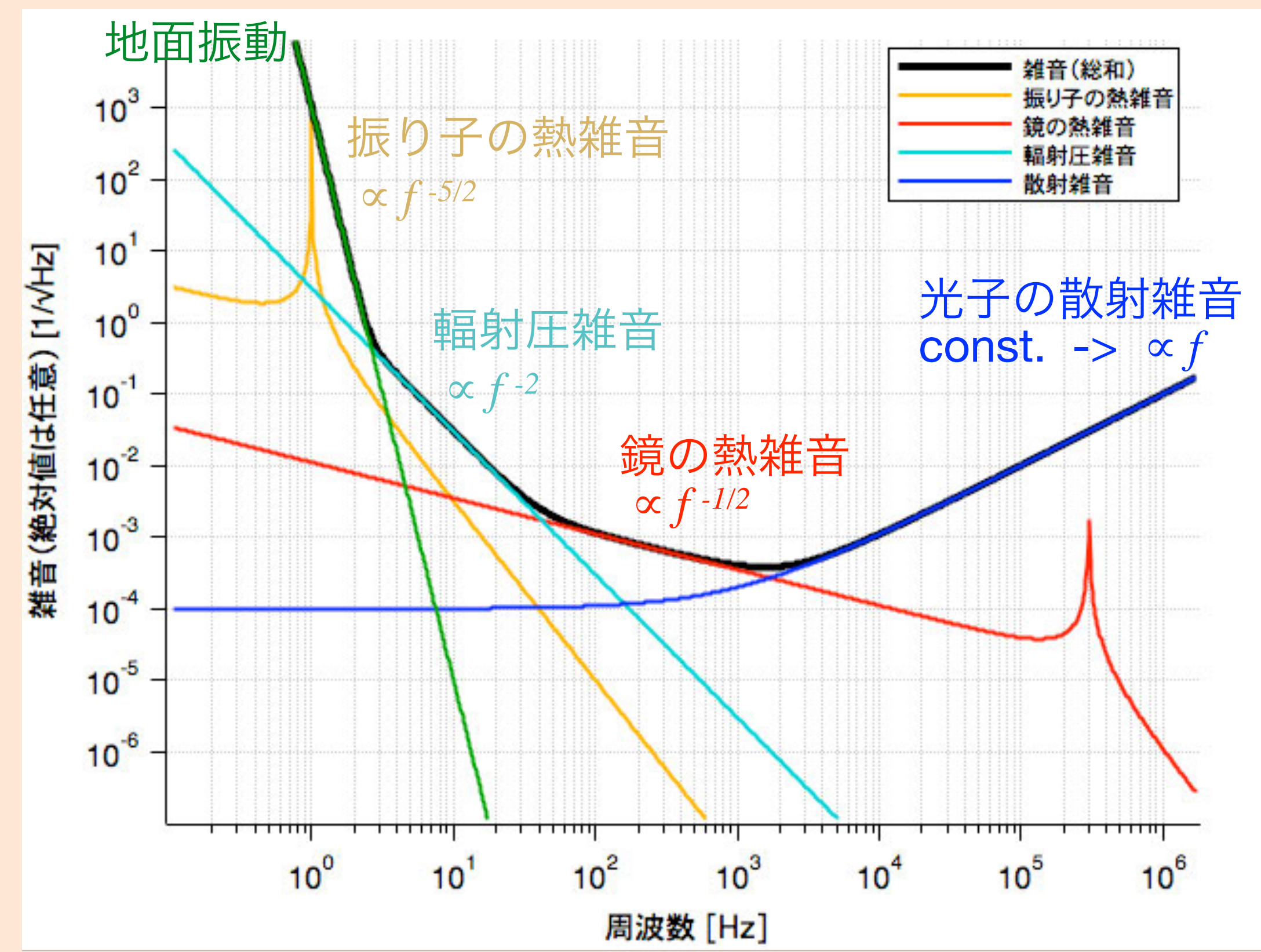
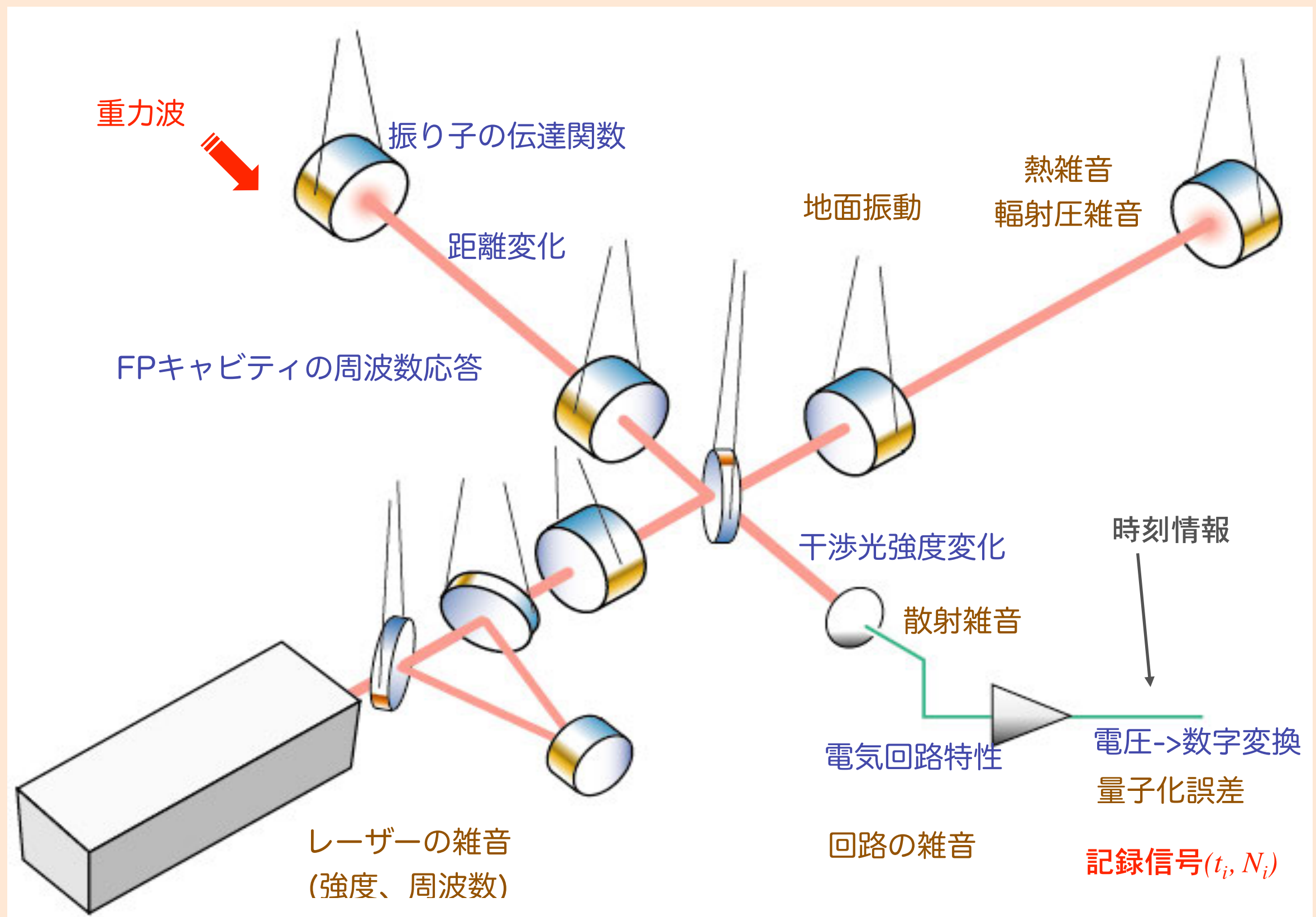
質量の運動
=> 時空の歪みの伝播
重力波

重力波



レーザー干渉系重力波検出器
 光を2つの方向に往復させて、その干渉の変化から時空の歪みの波を測定する。

信号 = 重力波 (×応答) + 雑音

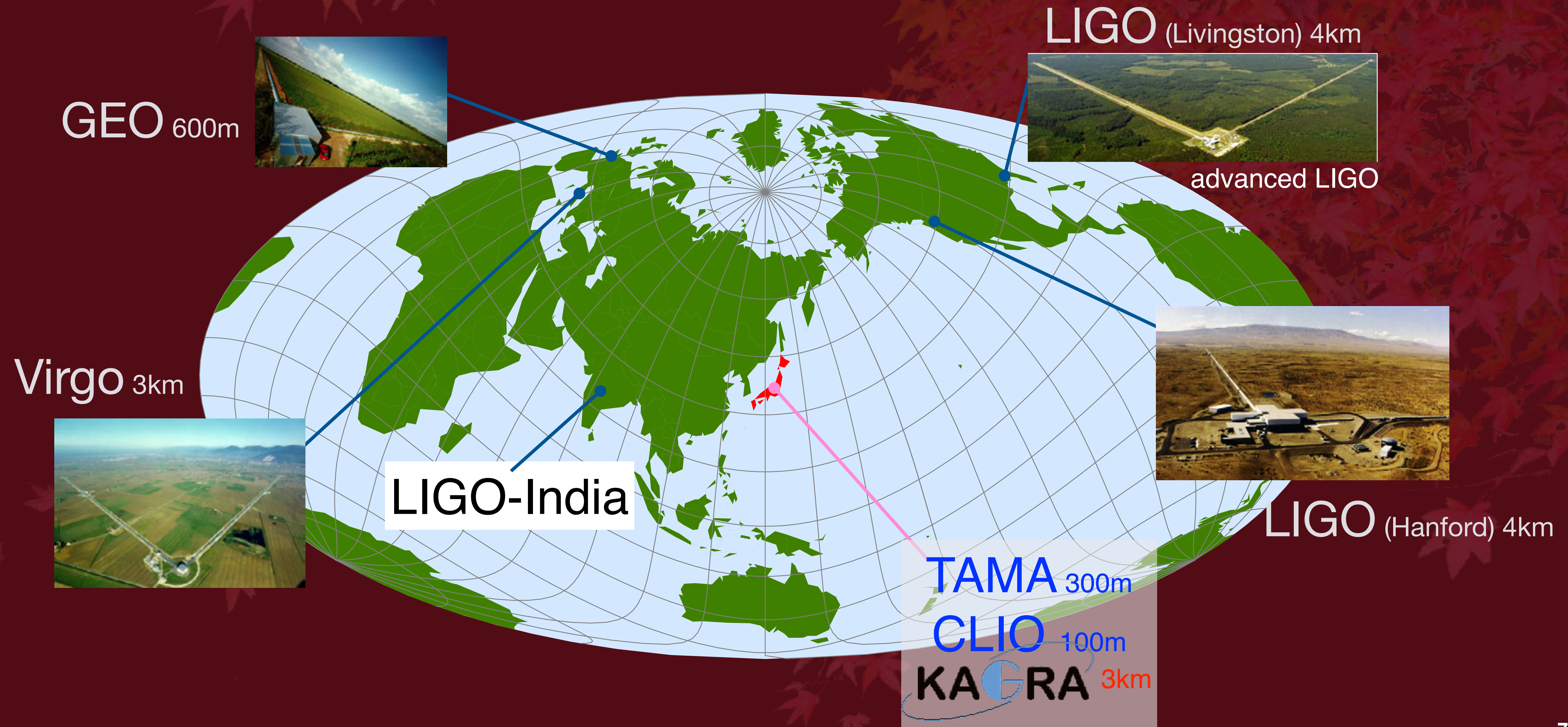


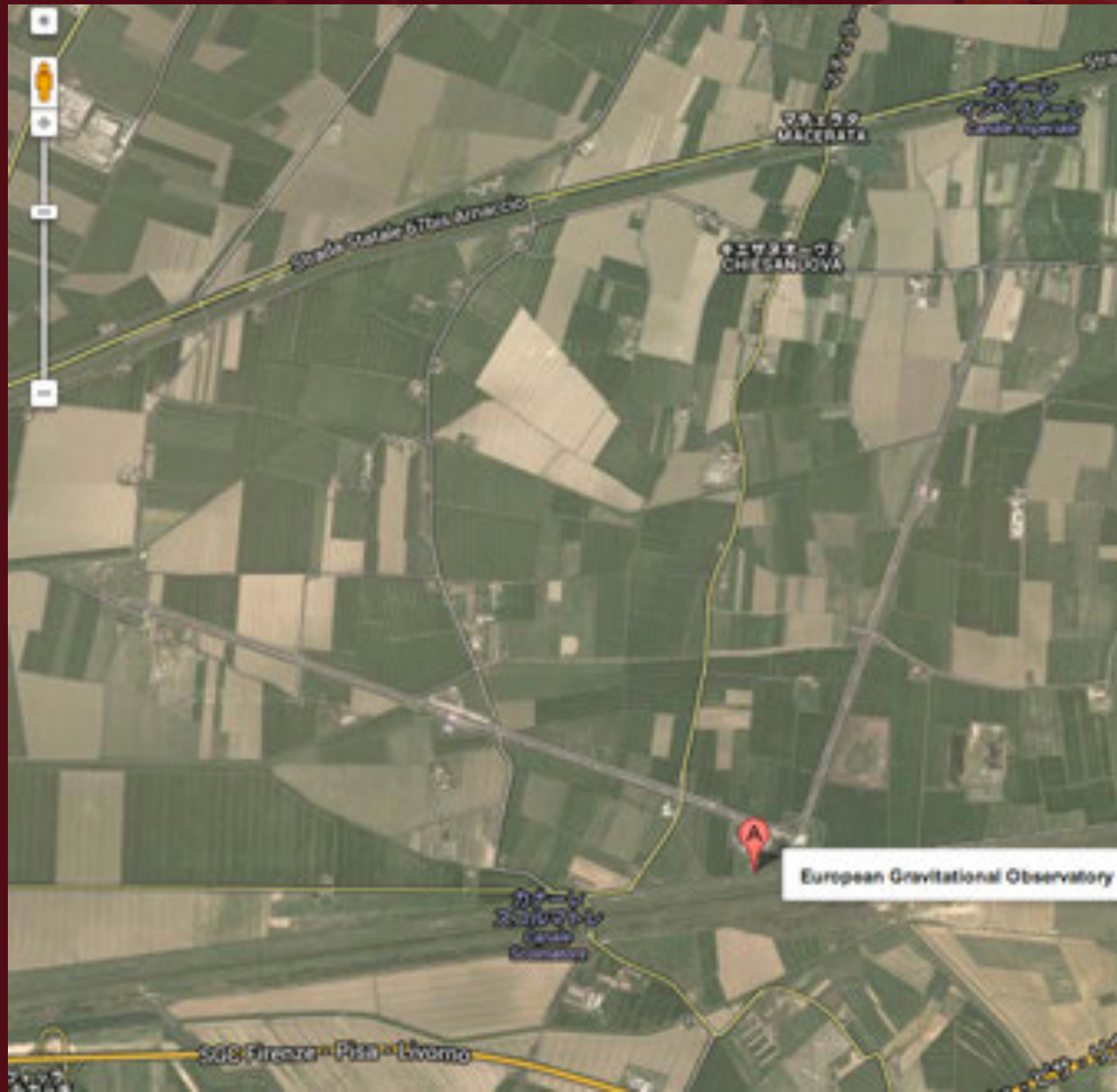
KAGRAの特徴

低温鏡(~20K, サファイヤ基材) ← 熱雑音、将来の第3世代重力波検出器も低温鏡が考えられている。

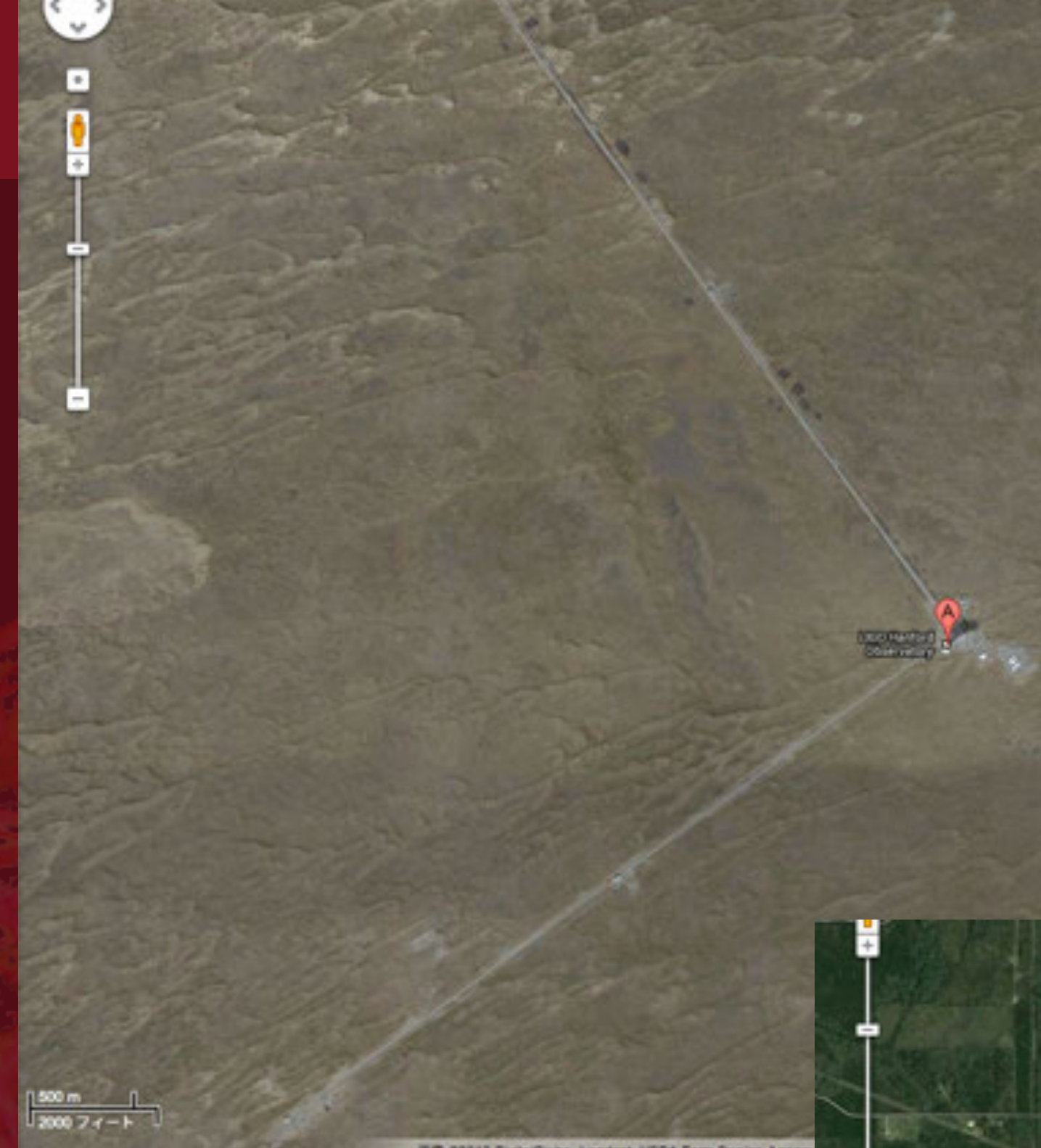
地下サイト ← 地面振動

世界の重力波検出器（レーザー干渉計型）

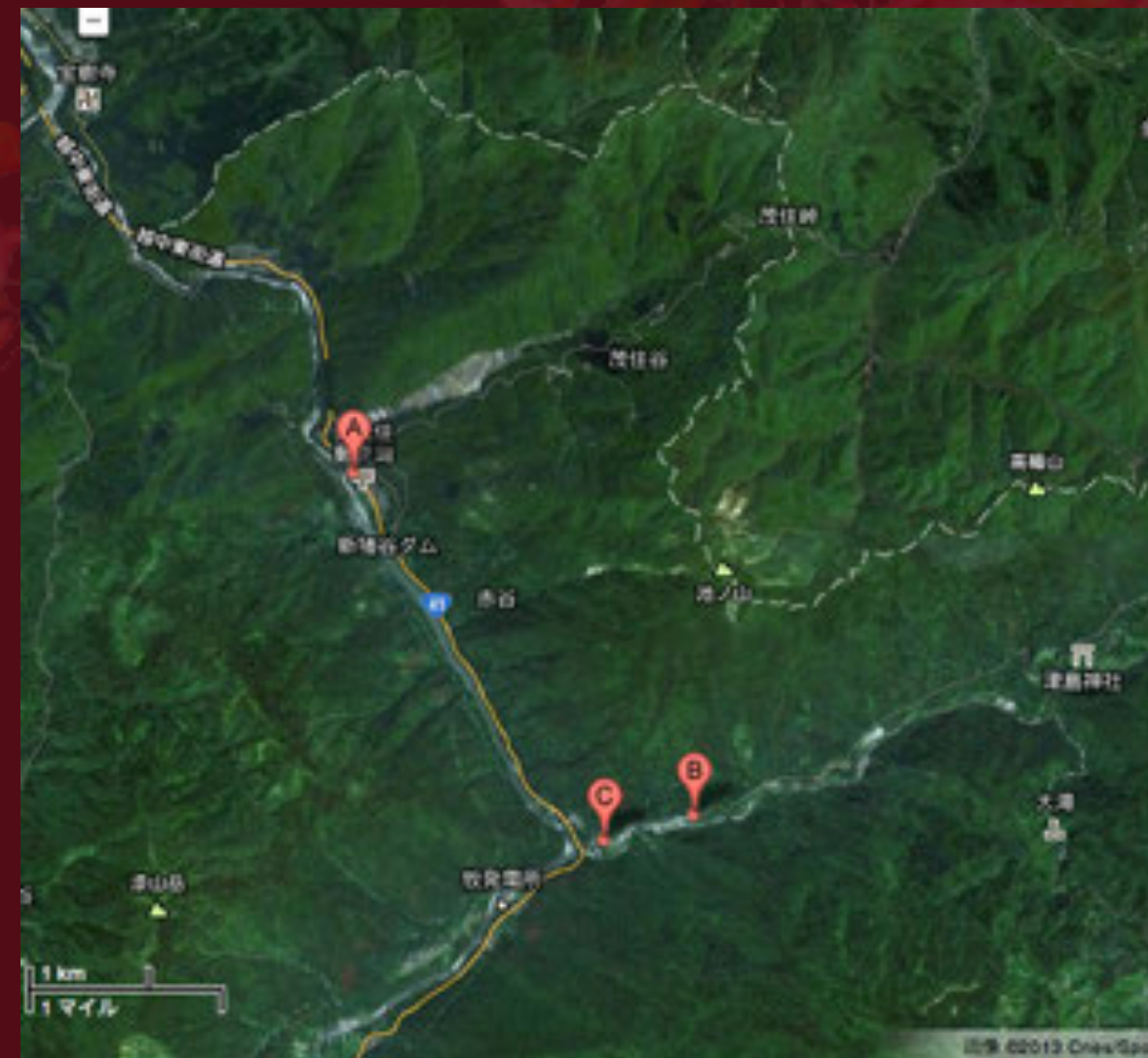




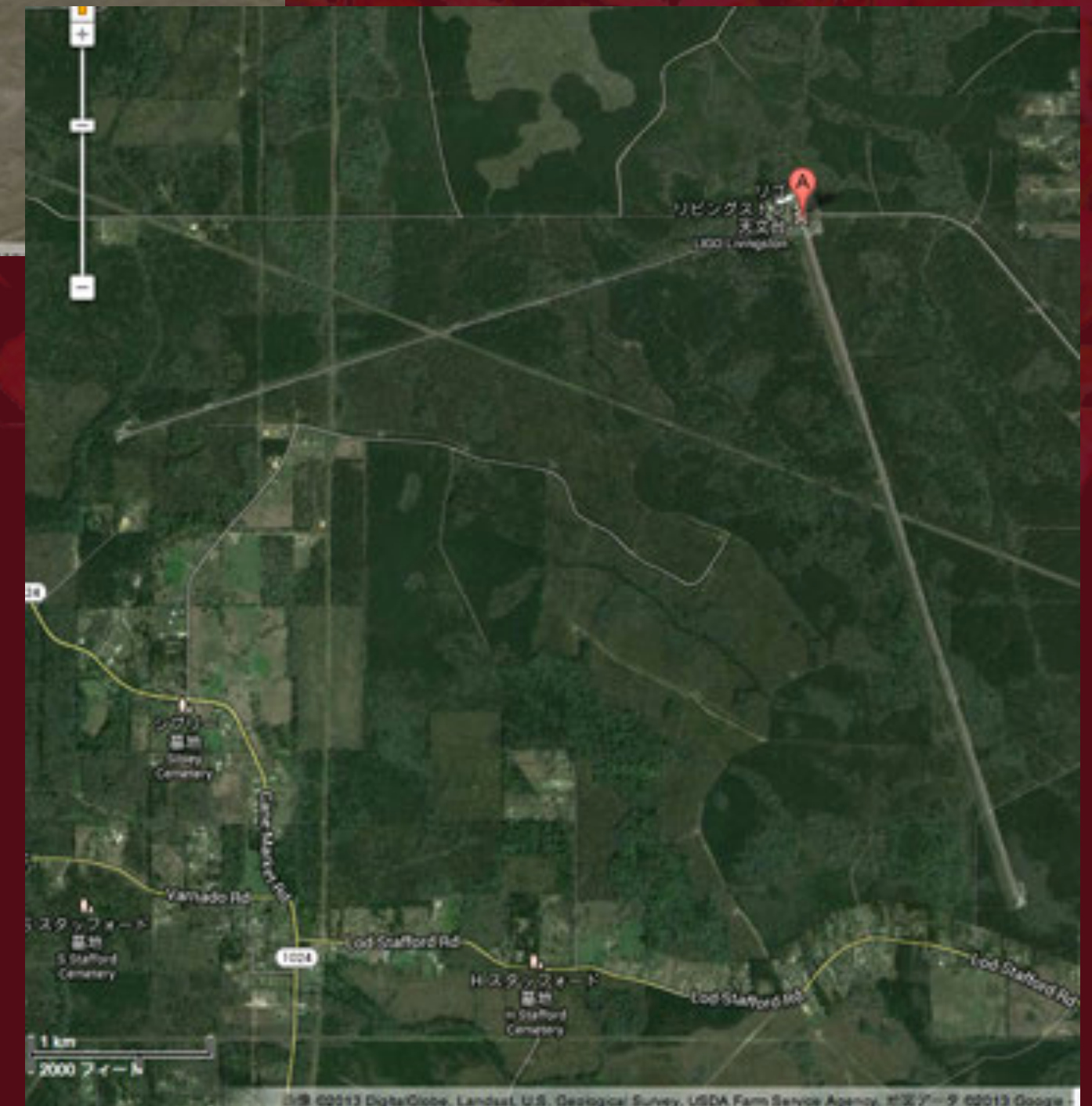
Virgo



LIGO Hanford



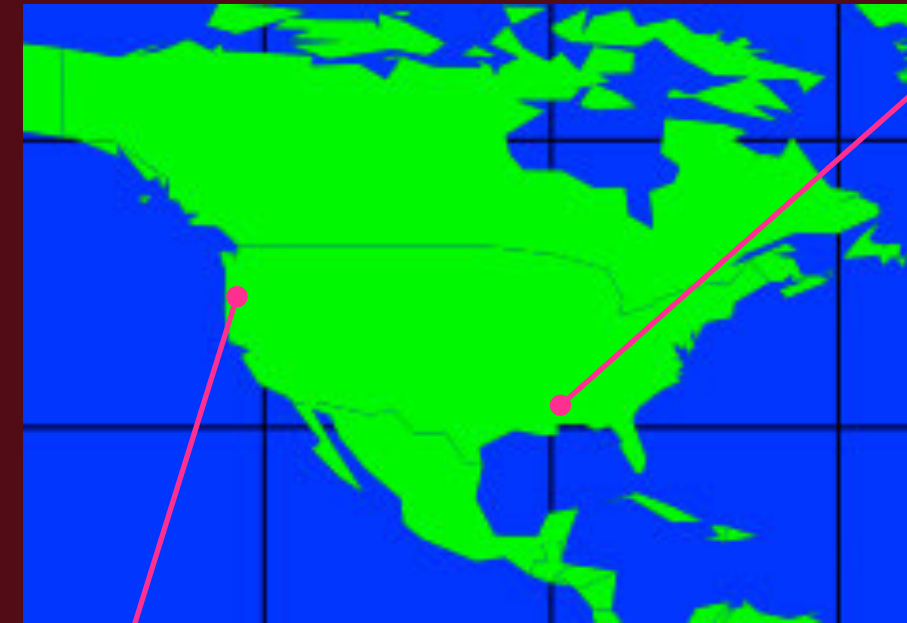
KAGRA



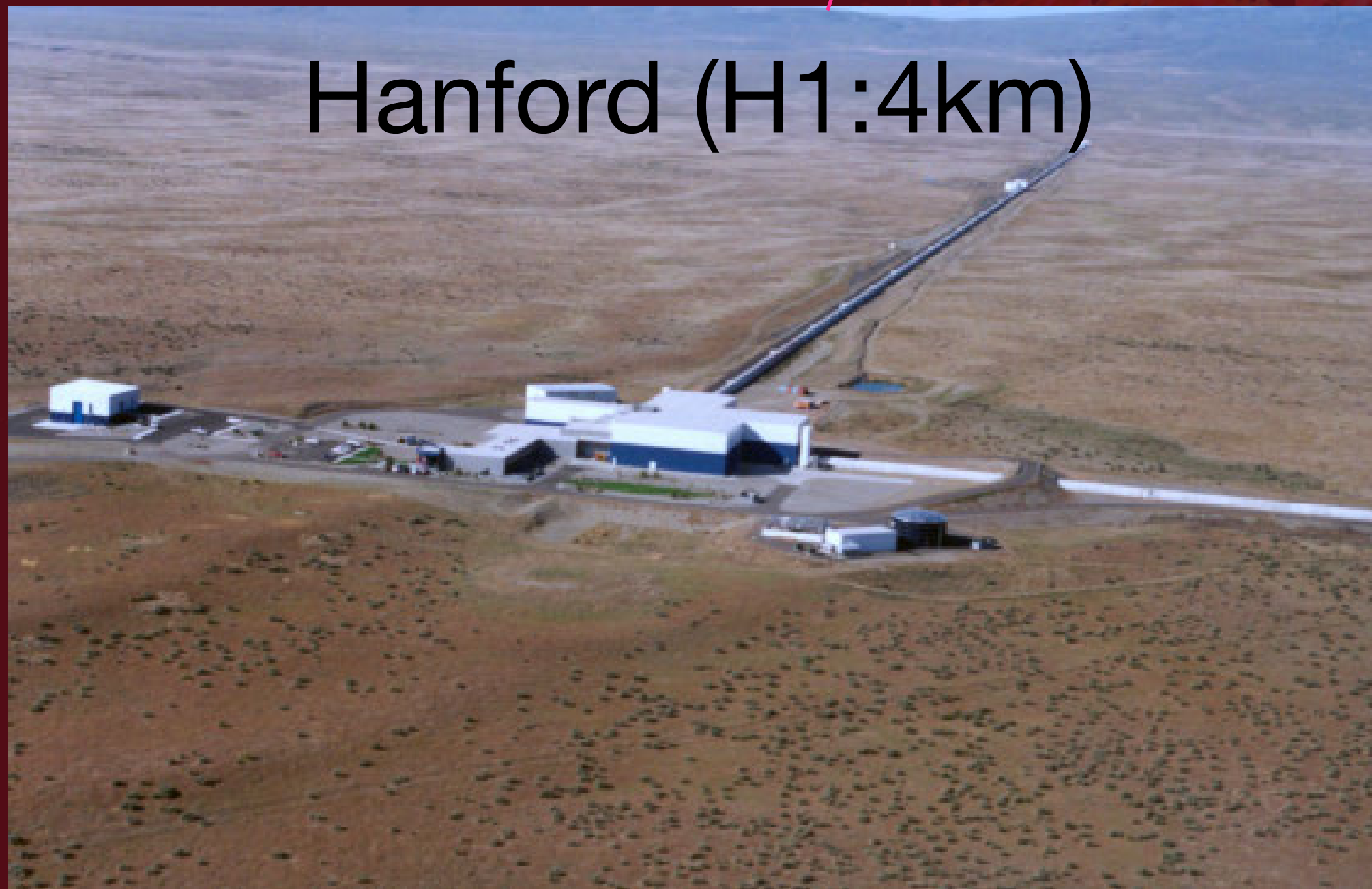
LIGO Livingston

LIGO

LIGO : Laser Interferometric
Gravitational-wave Observatory
(レーザー干渉計重力波観測所)



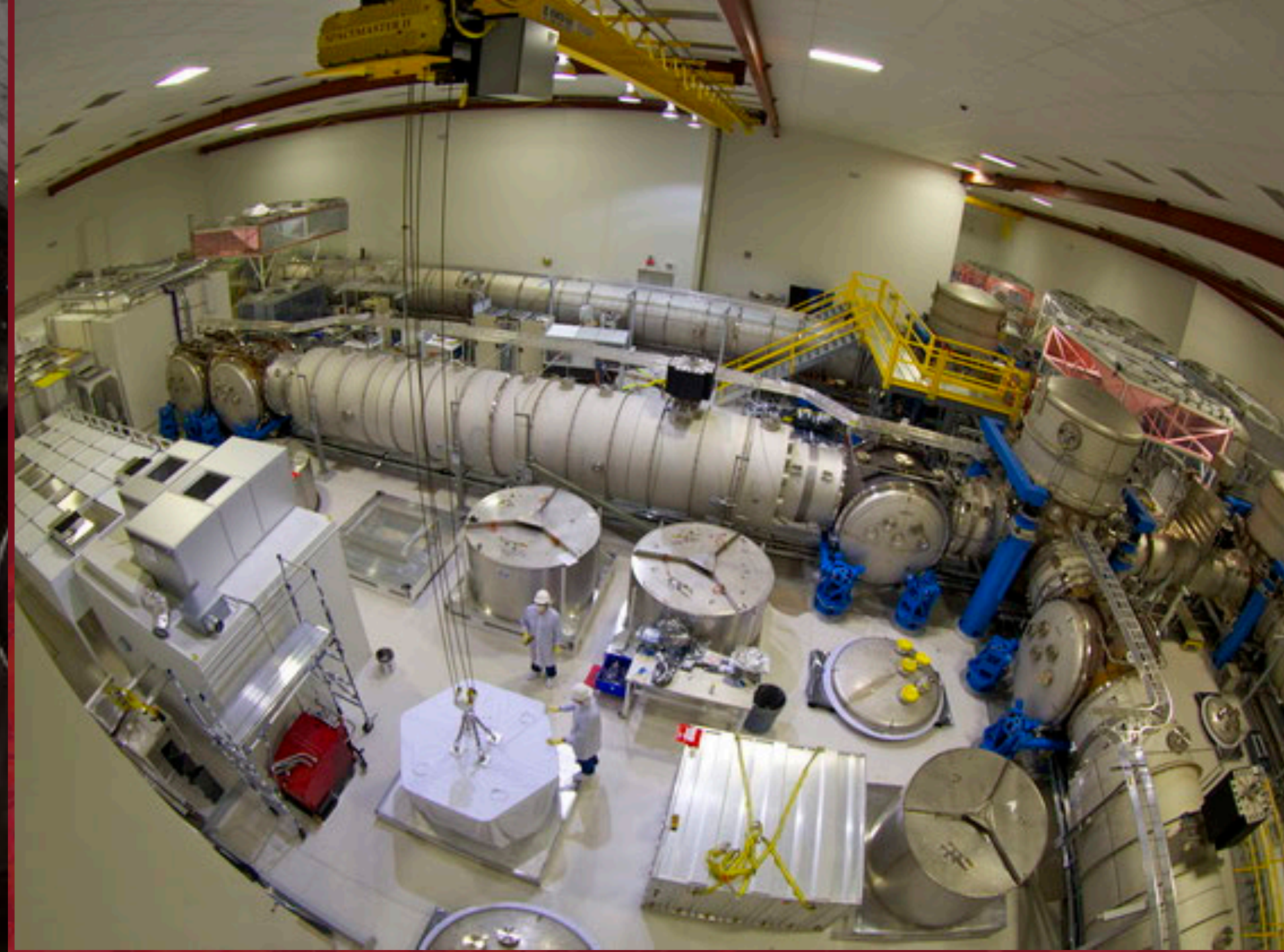
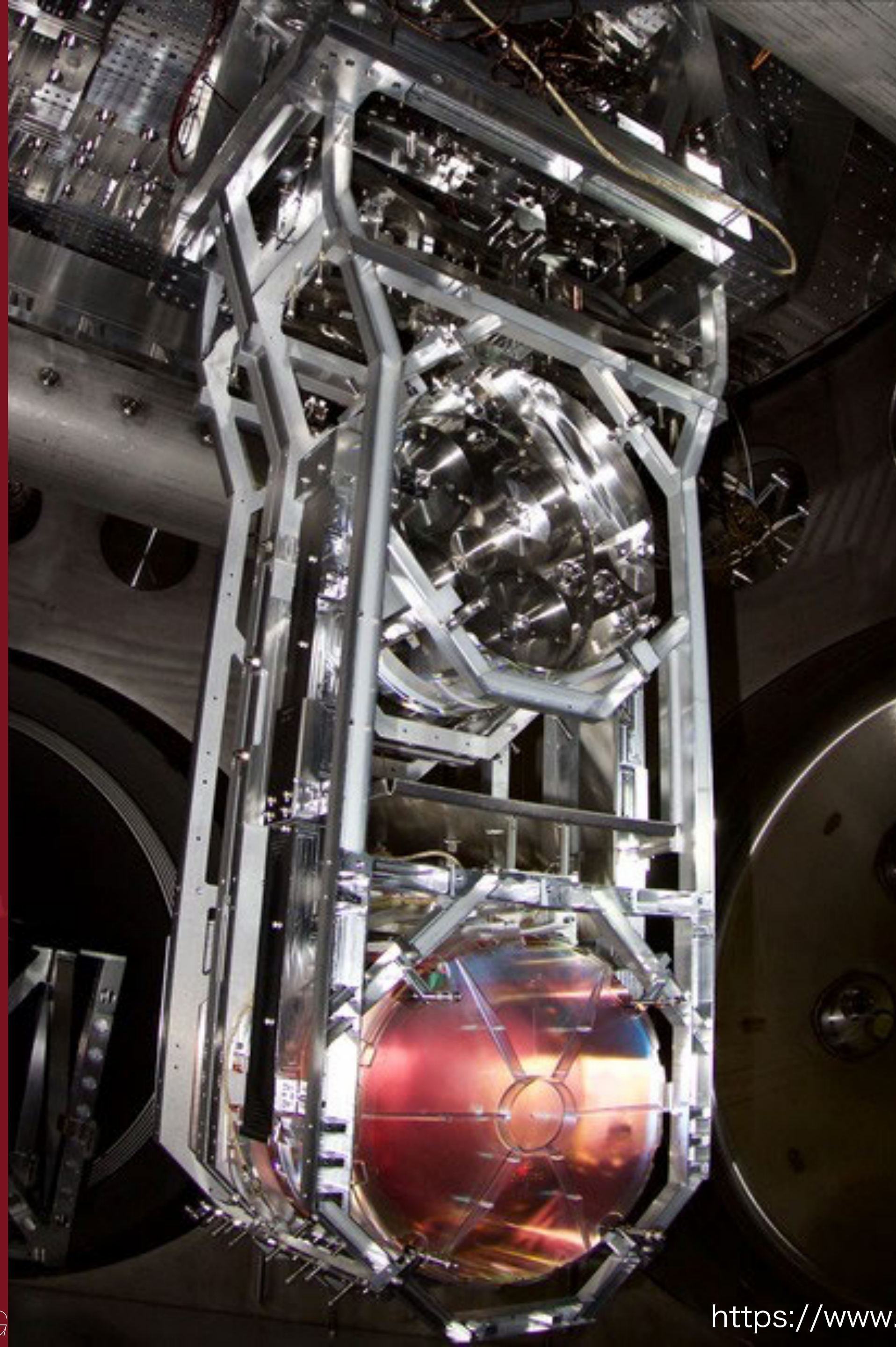
Hanford (H1:4km)



Livingston (L1:4km)



US project
Two dislocated
sites



Virgo

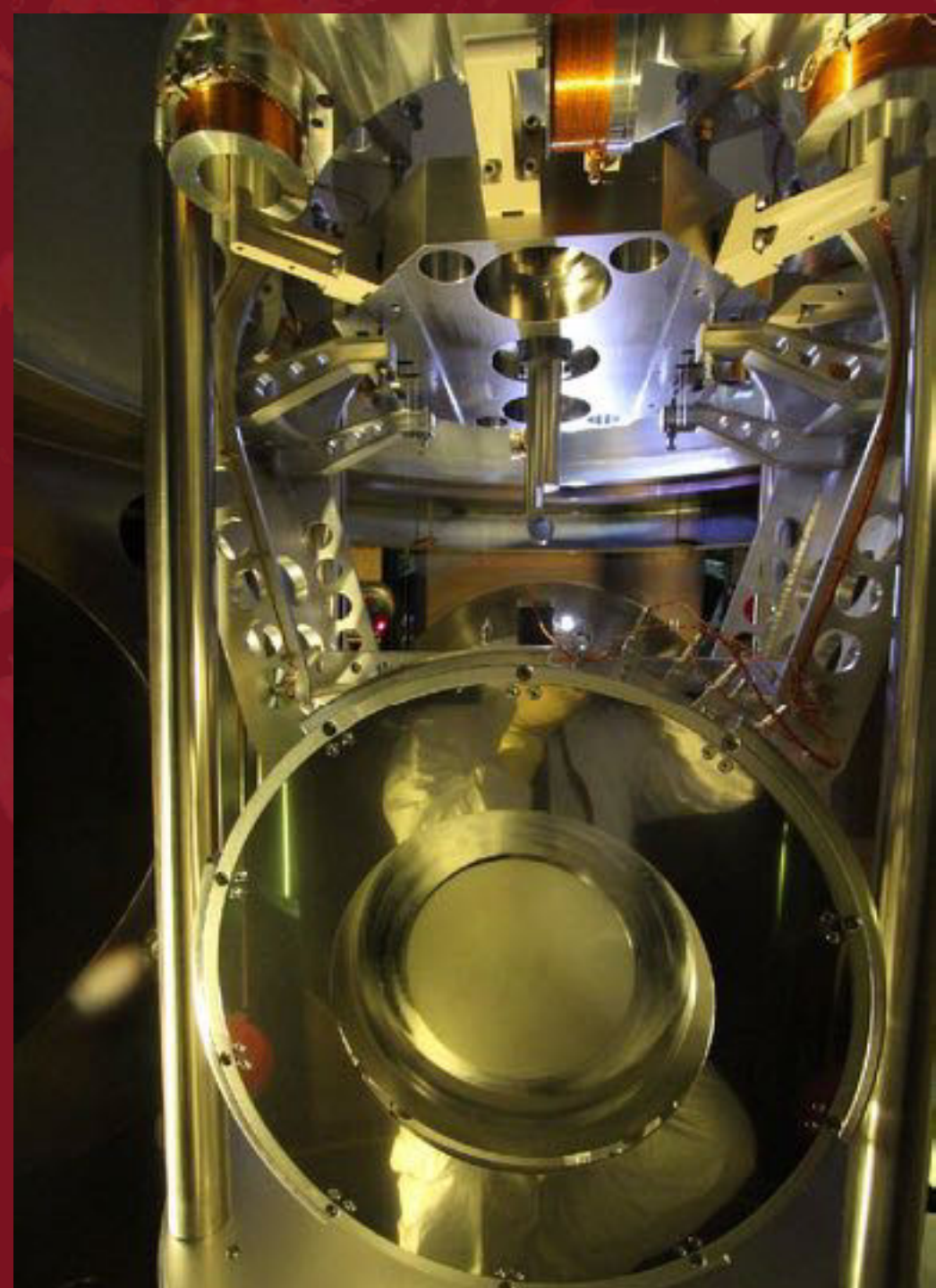
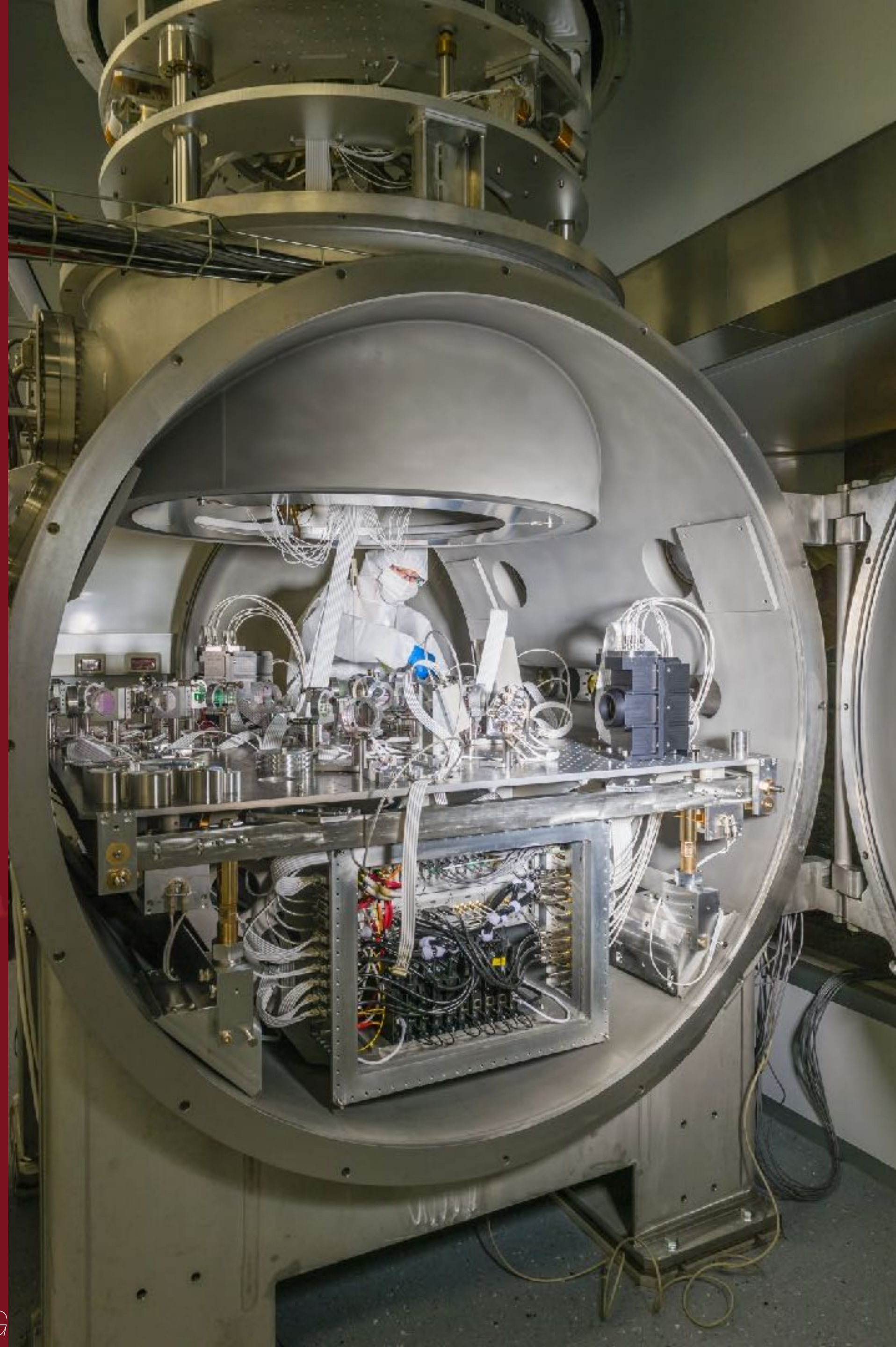
ヨーロッパの重力波観測実験

ピサ郊外（イタリア）

3km x 3km



<http://public.virgo-gw.eu/>



これまでの観測結果

重力波観測されたイベントは、コンパクト連星合体

連星ブラックホール(BH-BH)合体

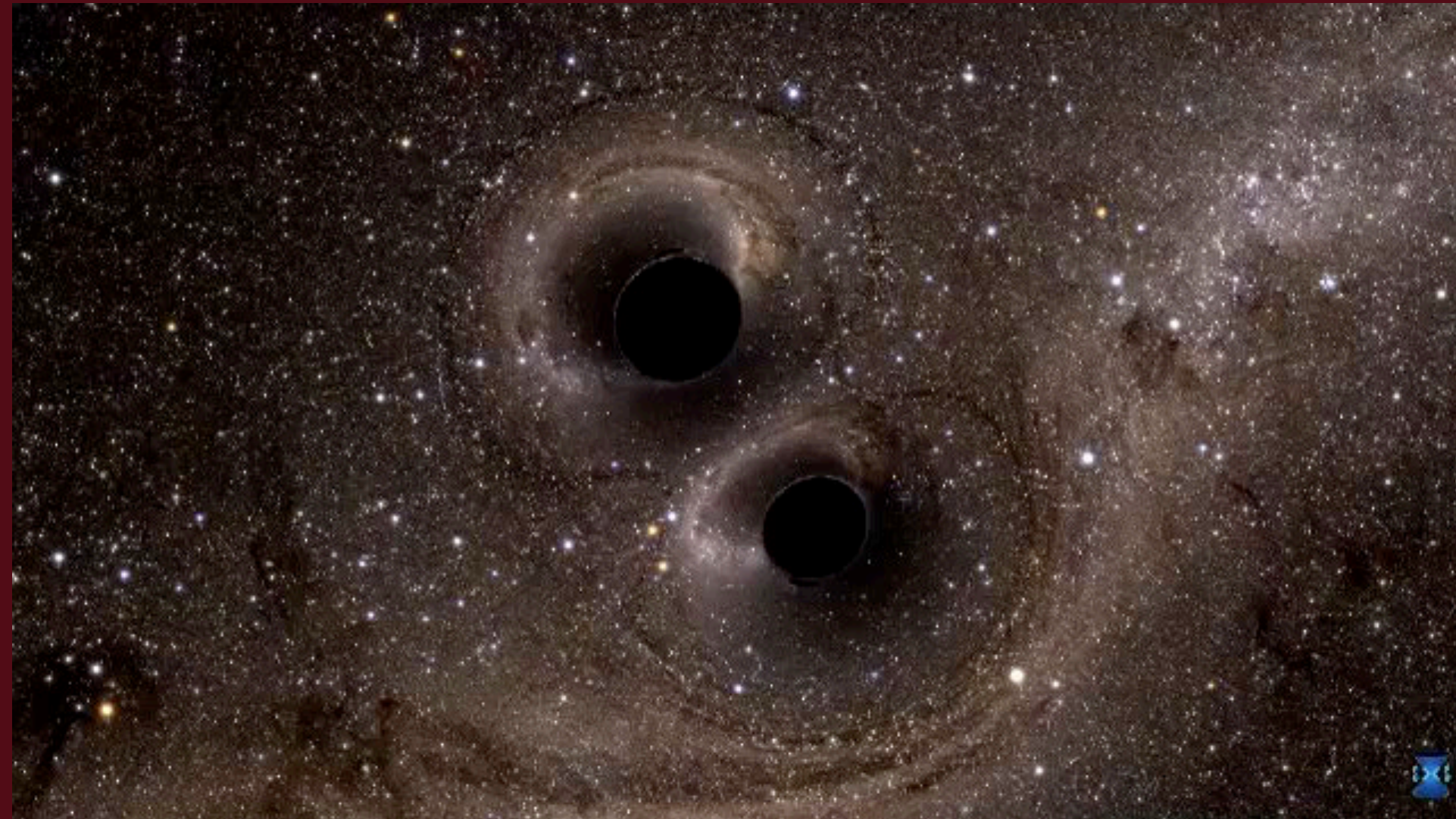
連星中性子星(NS-NS)合体

中性子星-ブラックホール(NS-BH)連星合体

超新星爆発、連続重力波はまだ観測されていない

連星合体からの重力波イベントの初観測

ブラックホール連星の合体



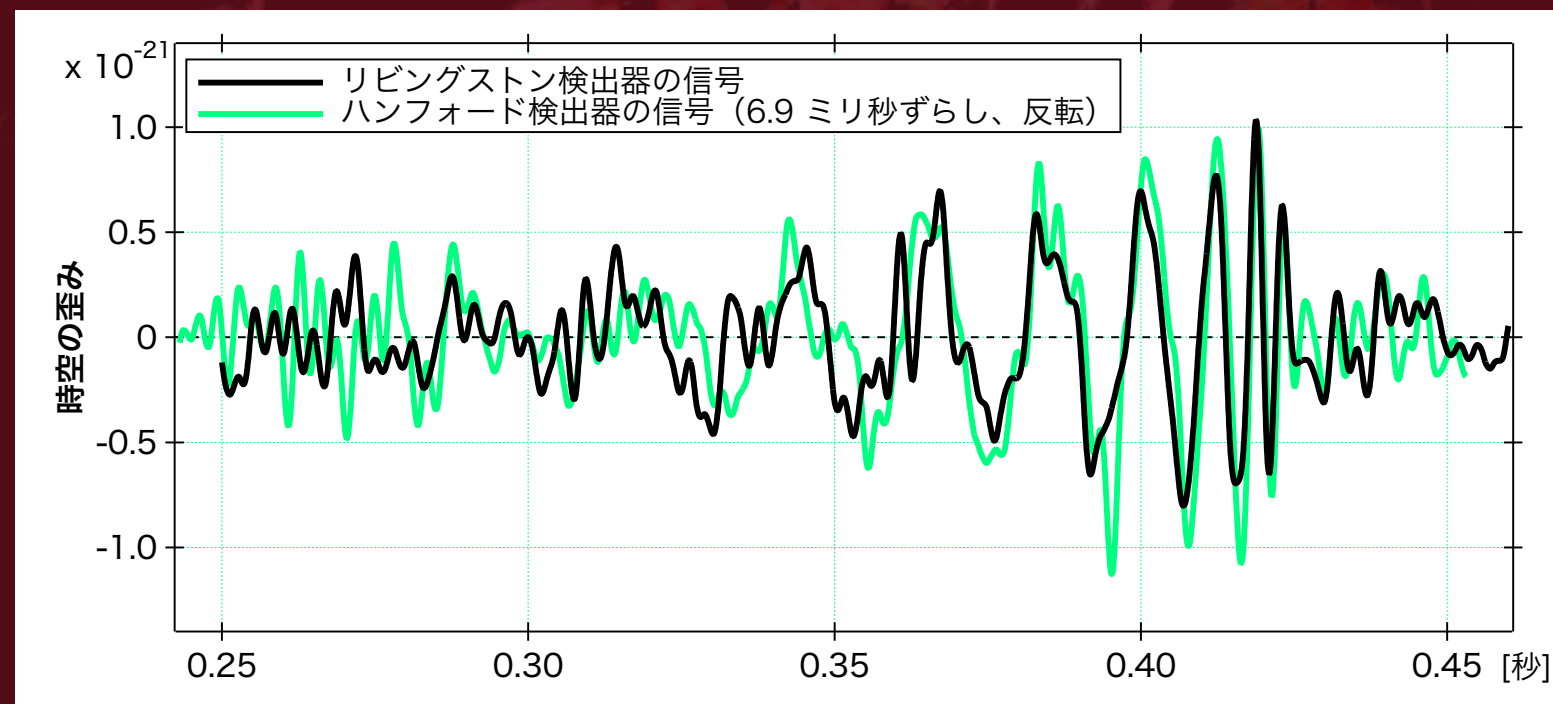
イメージ動画
LIGO

中性子星連星の合体

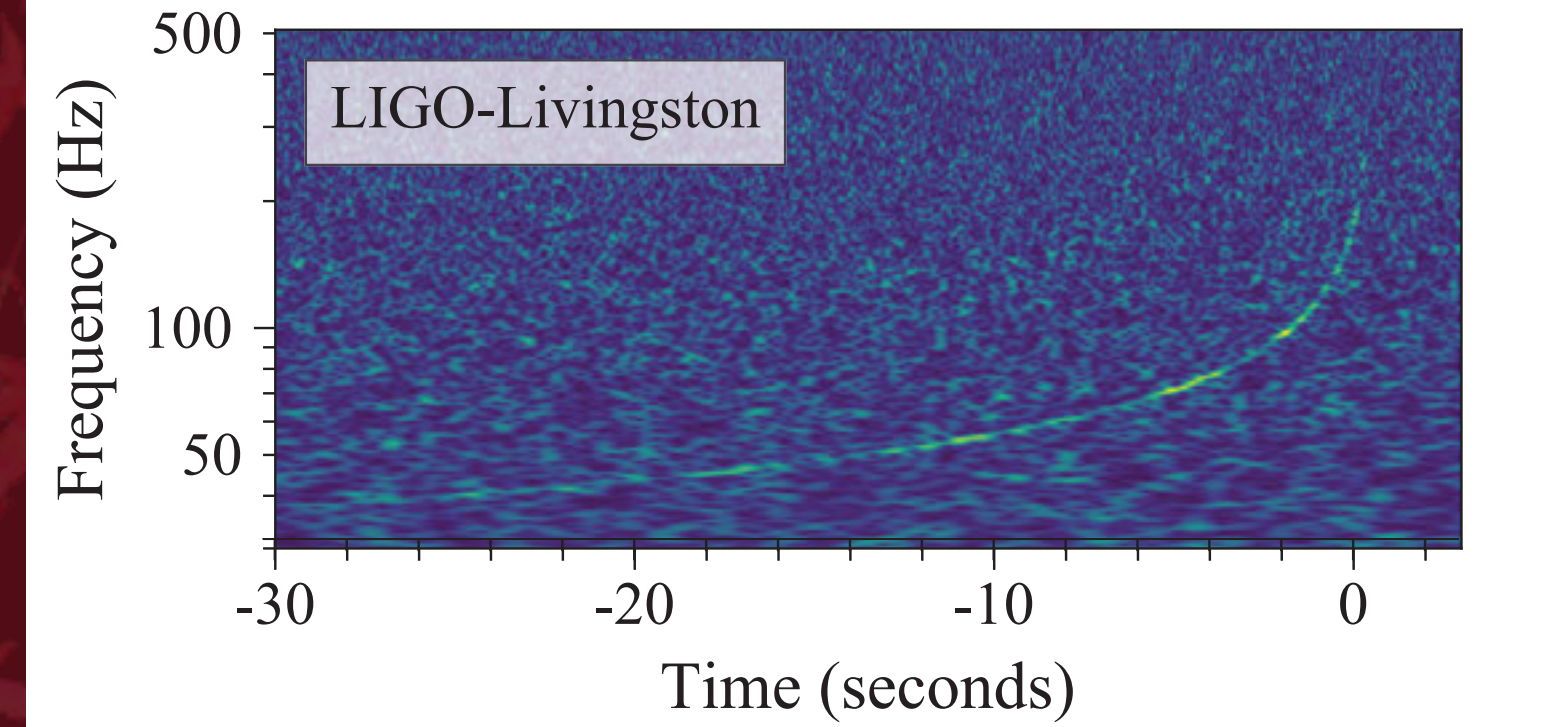


NASA
Astrophysics

LIGOの
重力波
(公開データ、論文より加工)



GW150914



LIGO発表より
抜粋

GW170817

マルチメッセンジャー観測

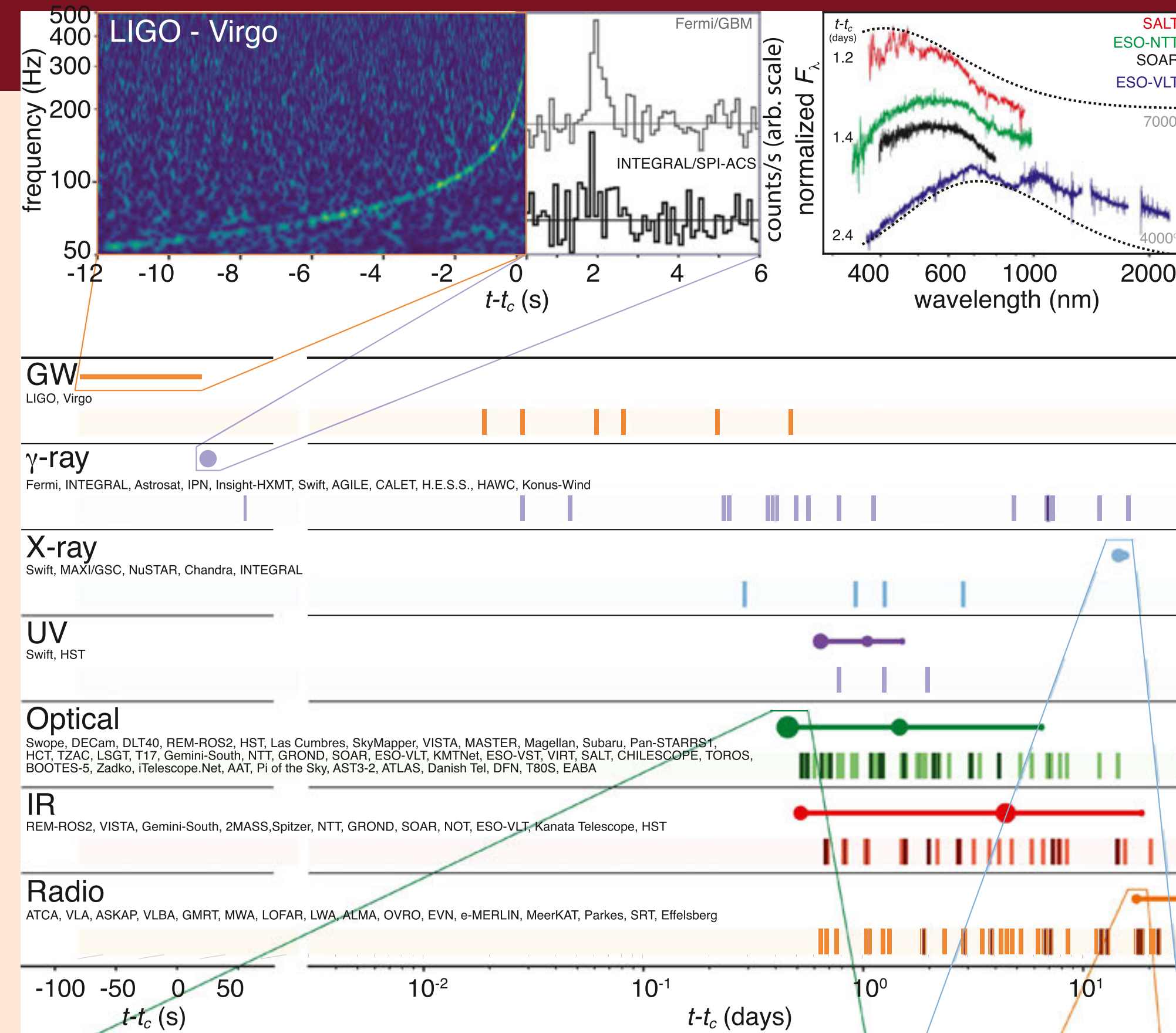
重力波でわかる中性子星連星”合体”の1.7秒後にガンマ線バースト

光赤外でも観測

キロノバ (マクロノバ)

cf: 日本のJ-GEMも観測成功!

電波でも追観測

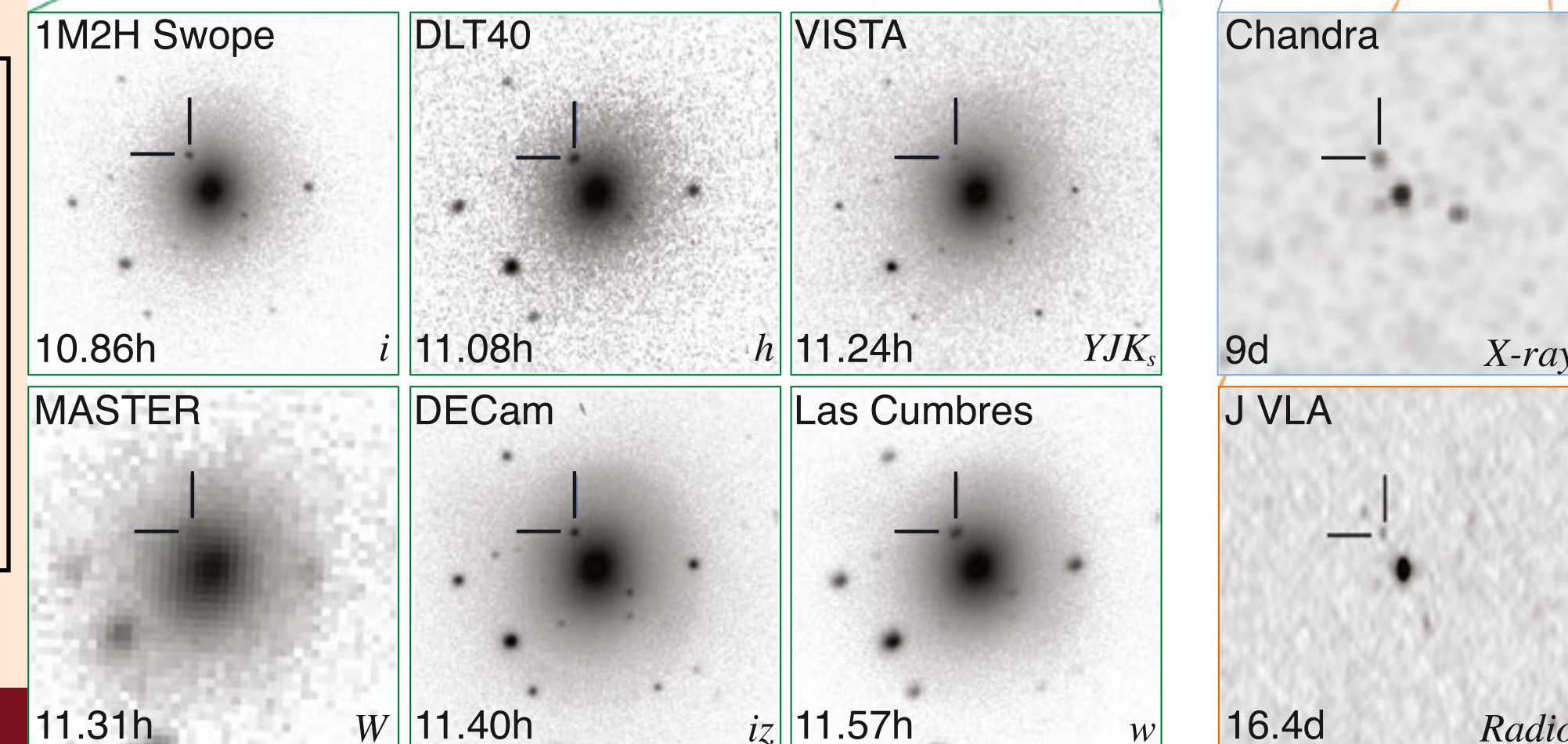


THE ASTROPHYSICAL JOURNAL LETTERS, 848:L12 (59pp), 2017 October 20
 © 2017. The American Astronomical Society. All rights reserved.
<https://doi.org/10.3847/2041-8213/aa91e9>
OPEN ACCESS

Multi-messenger Observations of a Binary Neutron Star Merger

LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration, Fermi GBM, INTEGRAL, IceCube Collaboration, AstroSat Cadmium Zinc Telluride Imager Team, IPN Collaboration, The Insight-Hxmt Collaboration, ANTARES Collaboration, The Swift Collaboration, AGILE Team, The 1M2H Team, The Dark Energy Camera GW-EM Collaboration and the DES Collaboration, The DLT40 Collaboration, GRAWITA: GRAVitational Wave Inaf TeAm, The Fermi Large Area Telescope Collaboration, ATCA: Australia Telescope Compact Array, ASKAP: Australian SKA Pathfinder, Las Cumbres Observatory Group, OzGrav, DWF (Deeper, Wider, Faster Program), AST3, and CAASTRO Collaborations, The VINROUGE Collaboration, MASTER Collaboration, J-GEM, GROWTH, JAGWAR, Caltech-NRAO, TTU-NRAO, and NuSTAR Collaborations, Pan-STARRS, The MAXI Team, TZAC Consortium, KU Collaboration, Nordic Optical Telescope, ePESSTO, GROND, Texas Tech University, SALT Group, TOROS: Transient Robotic Observatory of the South Collaboration, The BOOTES Collaboration, MWA: Murchison Widefield Array, The CALET Collaboration, IKI-GW Follow-up Collaboration, H.E.S.S. Collaboration, LOFAR Collaboration, LWA: Long Wavelength Array, HAWC Collaboration, The Pierre Auger Collaboration, ALMA Collaboration, Euro VLBI Team, Pi of the Sky Collaboration, The Chandra Team at McGill University, DFN: Desert Fireball Network, ATLAS, High Time Resolution Universe Survey, RIMAS and RATIR, and SKA South Africa/MeerKAT (See the end matter for the full list of authors.)

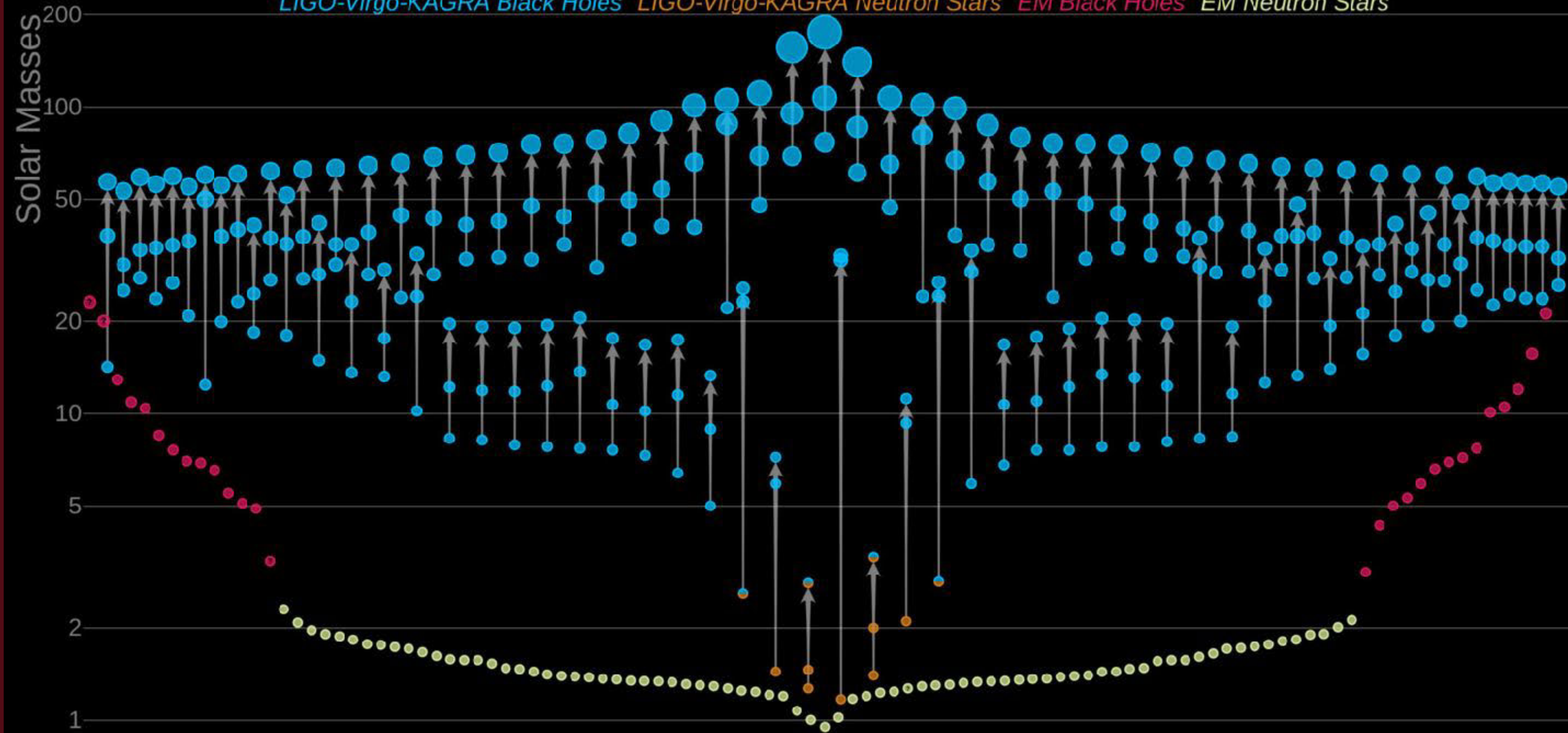
共著者 3623名



重力波観測時代

Masses in the Stellar Graveyard

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



LIGO-Virgo-KAGRA | Aaron Geller | Northwestern

<https://www.ligo.caltech.edu/image/ligo20211107a>

重力波の初観測 (2015)

ブラックホール連星合体からの重力波

中性子星連星合体の観測 (2017)

重力波 + γ 線～可視光～電波にわたるマルチメッセンジャー観測

これまでのイベント総数：121

Gravitational Wave Open Science Center

<https://www.gw-openscience.org/eventapi/html/allevnts/>

LIGO/Virgo O3 Public Alerts
Detection candidates: 56

<https://gracedb.ligo.org/superevents/public/O3/>

GWTC-2, GWTC-3

GWTC-2: Compact Binary Coalescences Observed by LIGO and Virgo During the First Half of the Third Observing Run

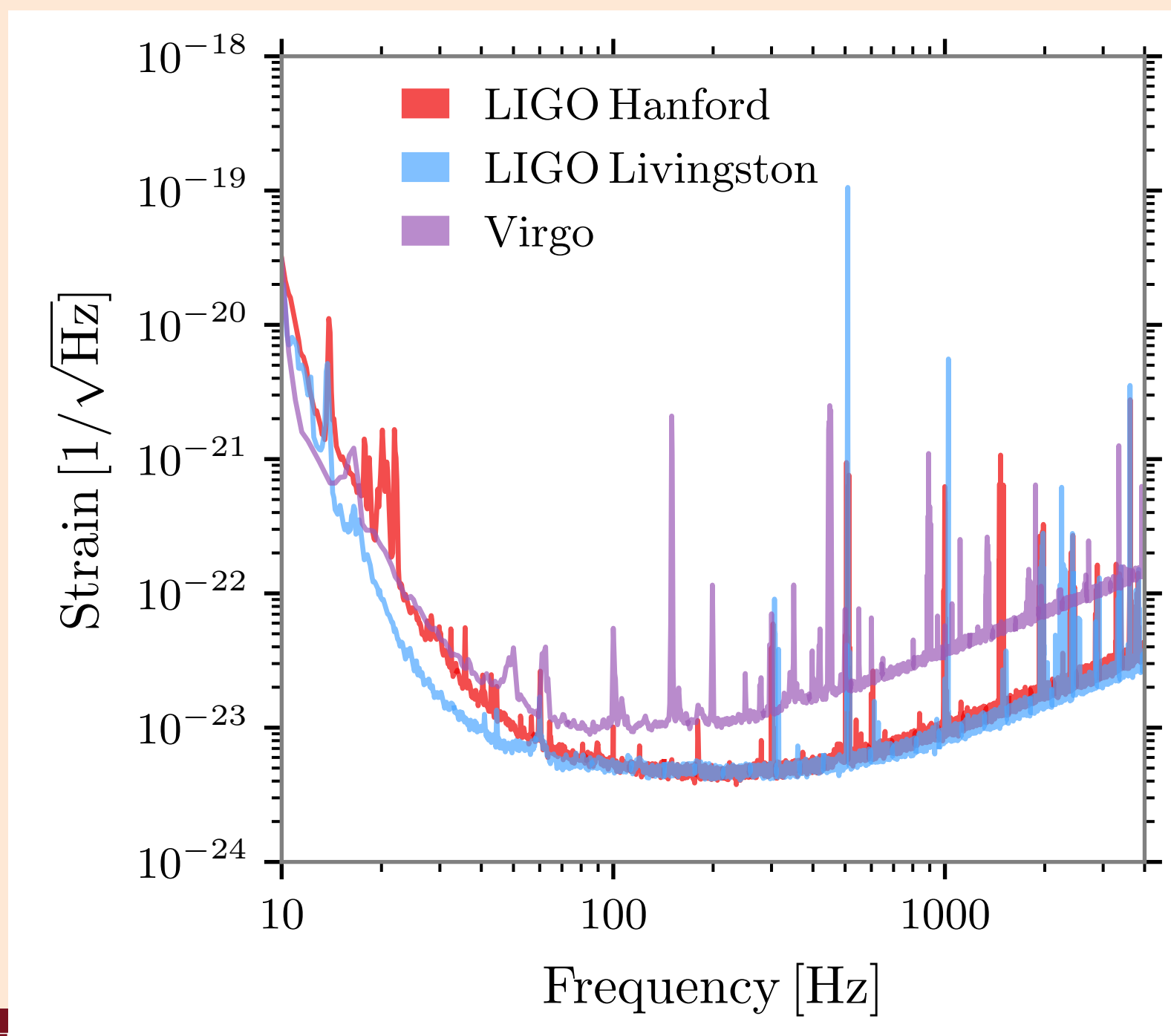
arXiv:2010.14527 [gr-qc]

GWTC-3: Compact Binary Coalescences Observed by LIGO and Virgo During the Second Part of the Third Observing Run

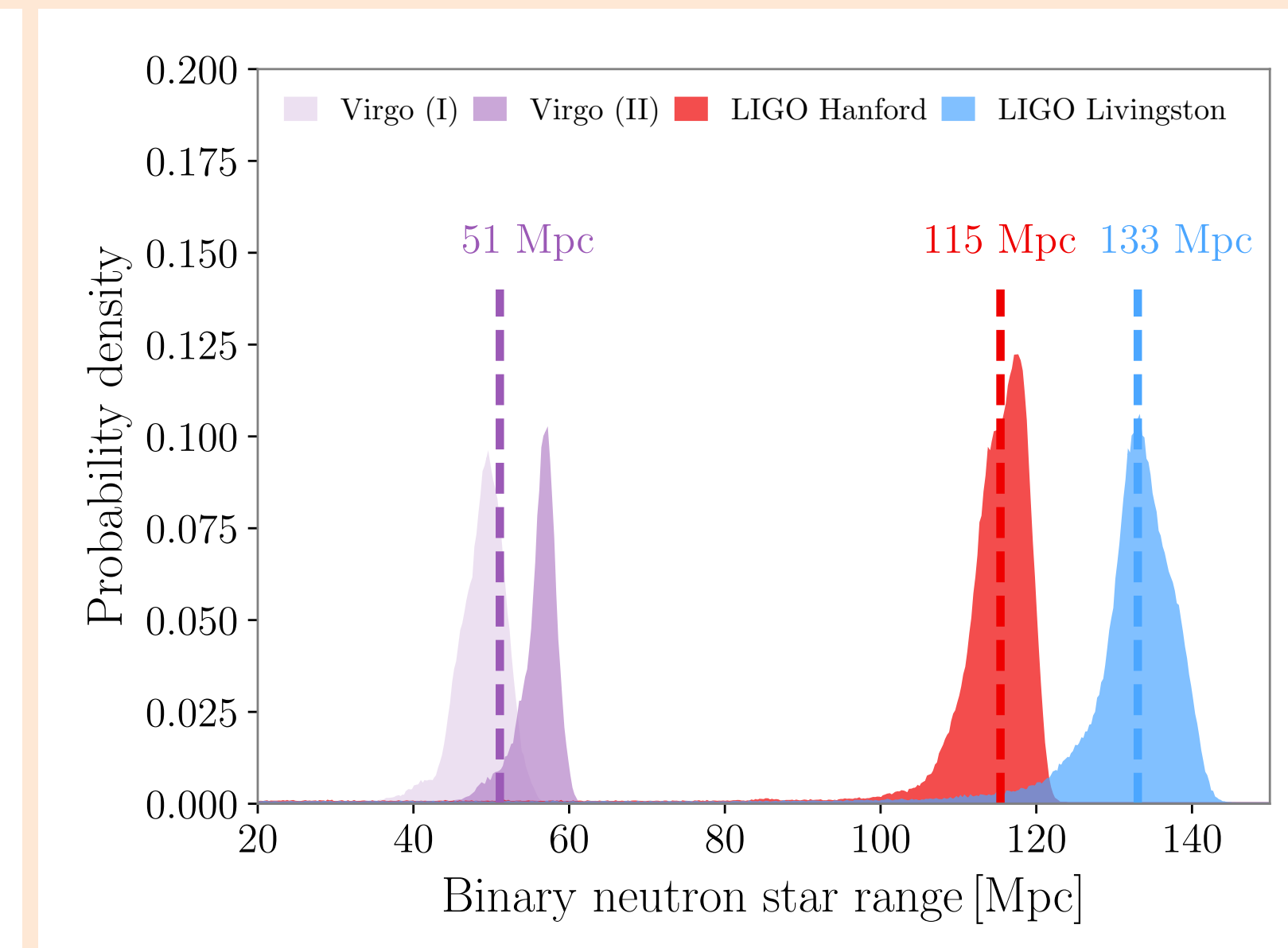
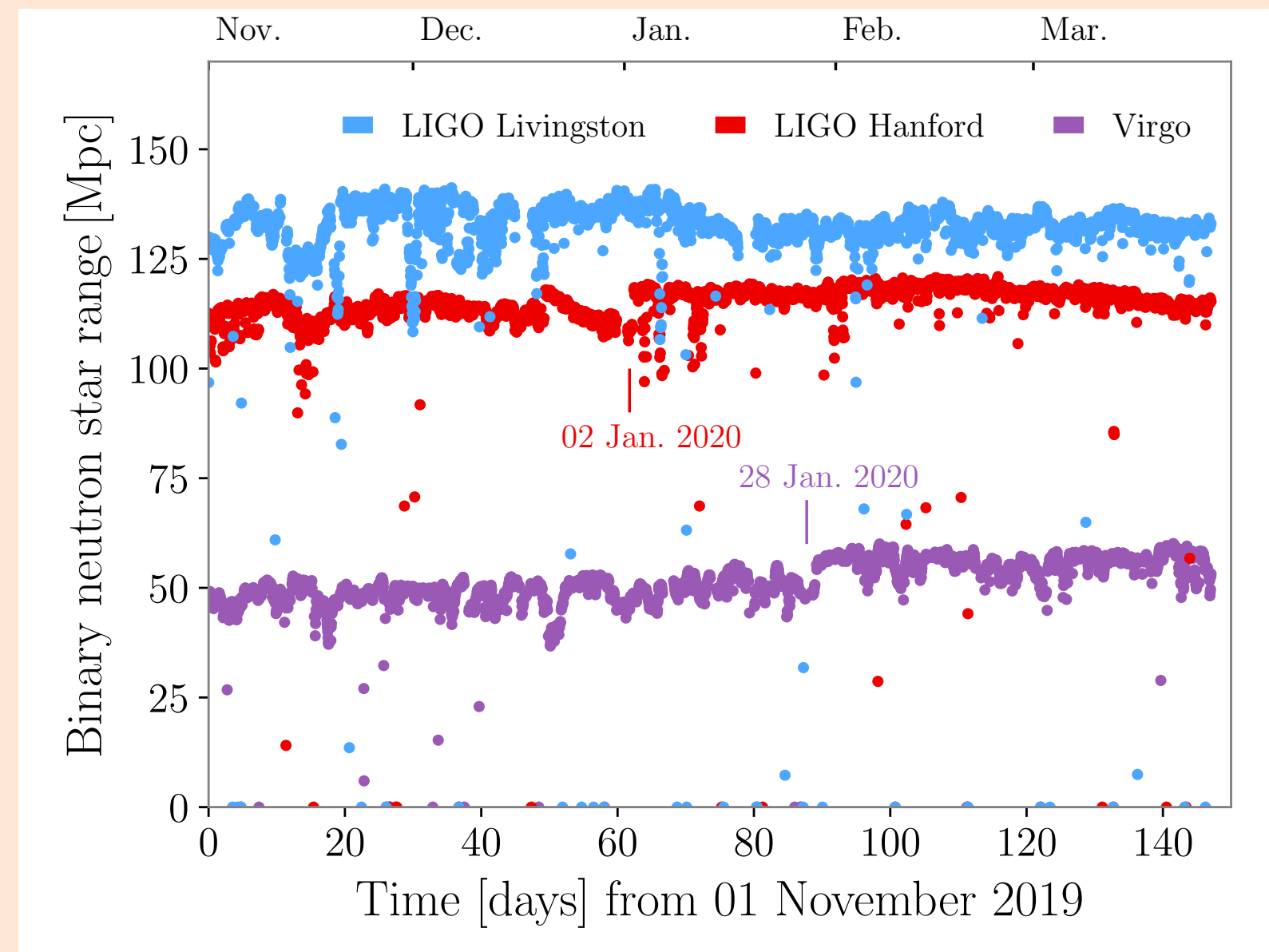
arXiv:2111.03606 [gr-qc]

GWTC-2.1: Deep Extended Catalog of Compact Binary Coalescences Observed by LIGO and Virgo During the First Half of the Third Observing Run

arXiv:2108.01045 [gr-qc]



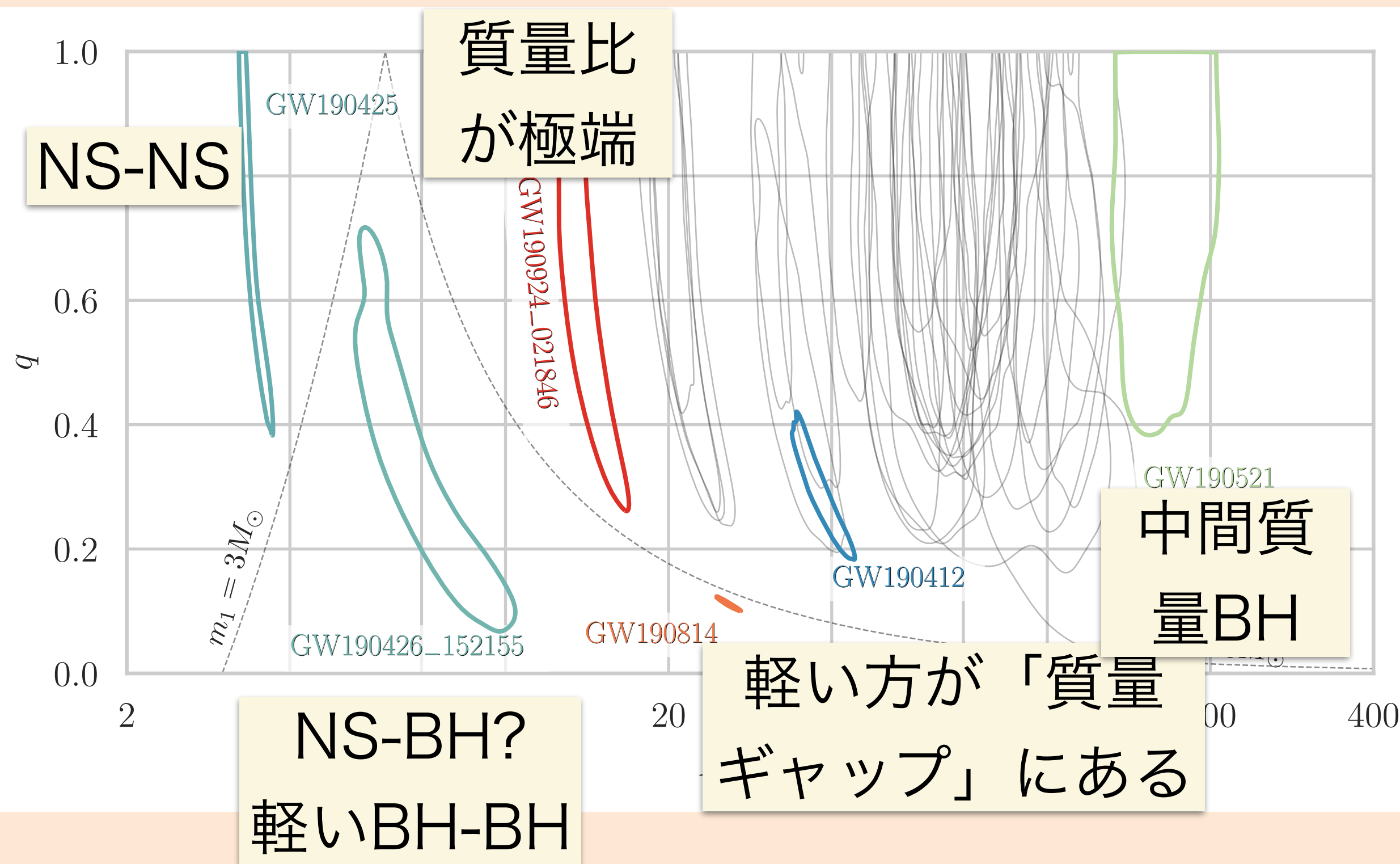
GWTC-3



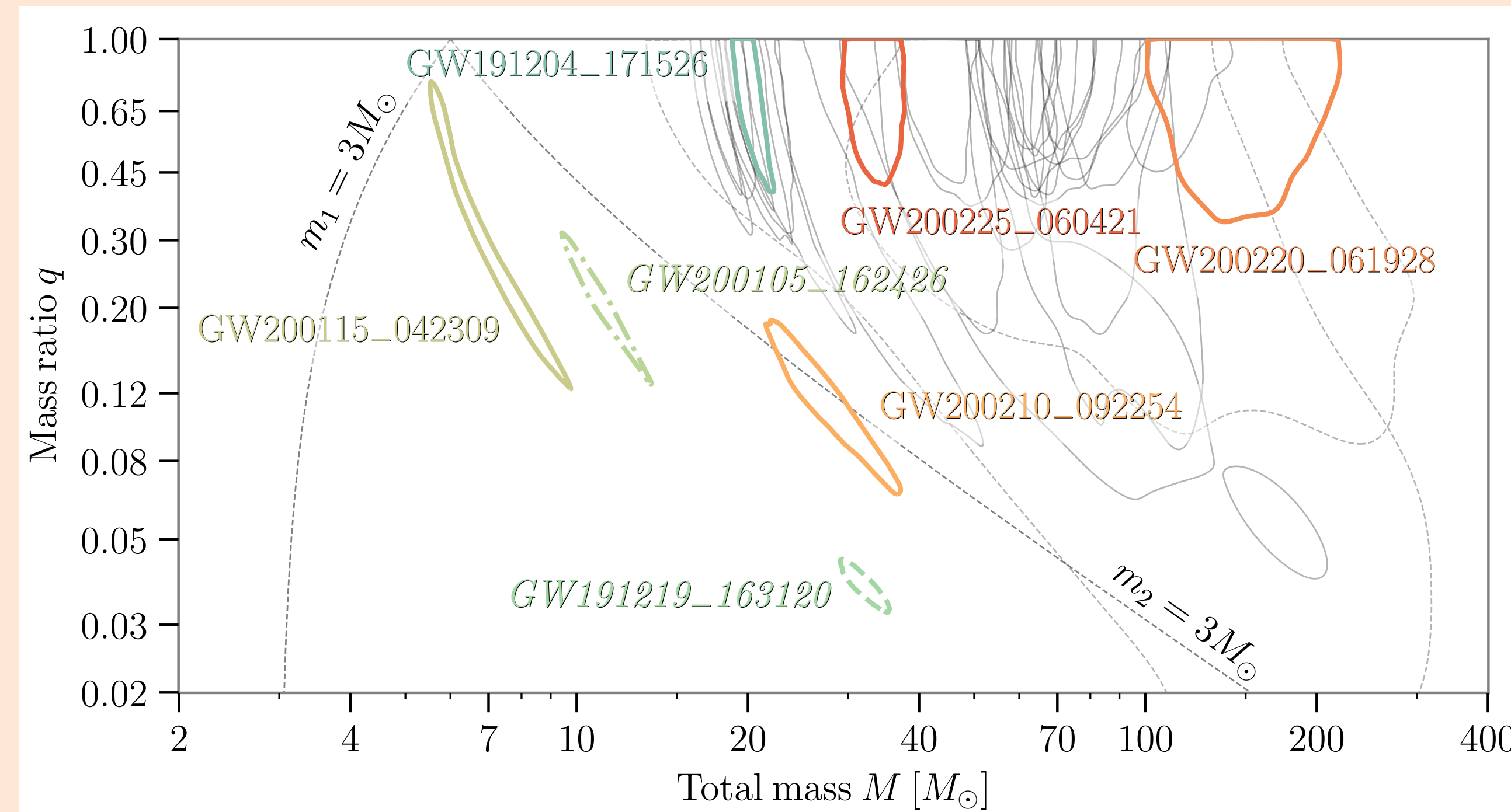
GWTC-2, -3 : 観測された連星合体の全質量と質量比

大半は"普通の"BH-BH

質量比が極端なもの、中間質量BHなどが出てきた。



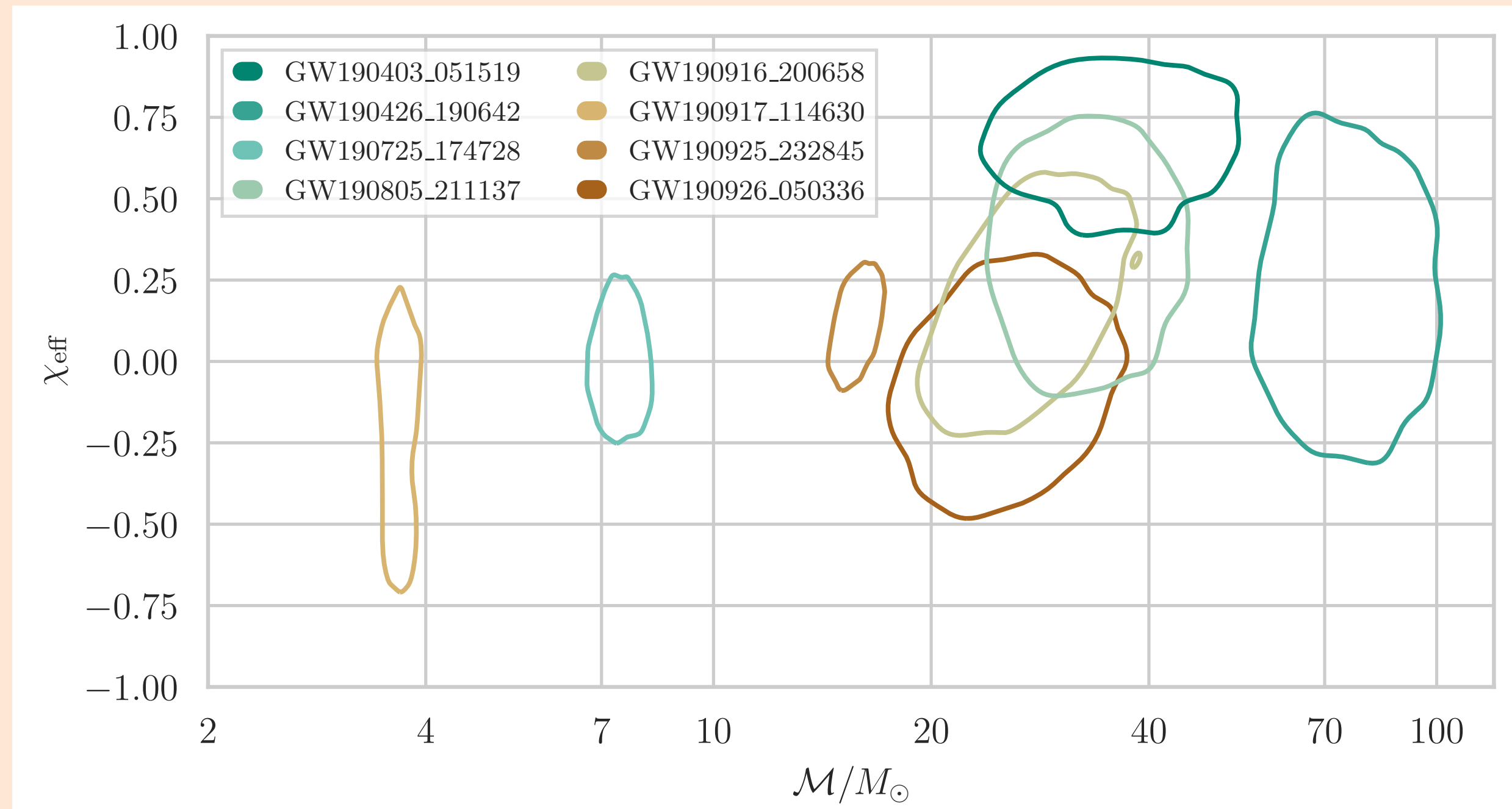
GWTC-2 arXiv:2010.14527



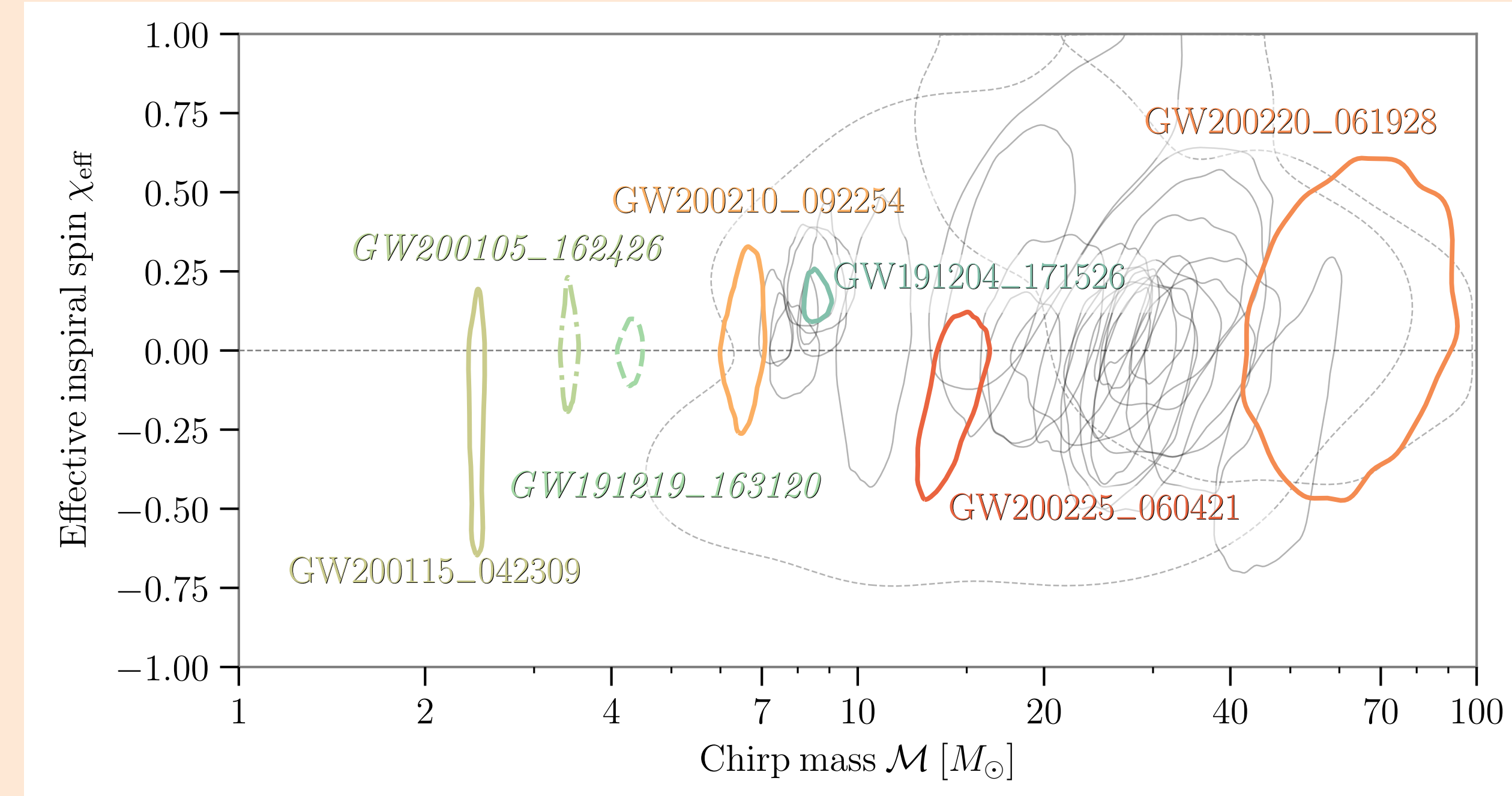
GWTC-3 arXiv:2111.03606

チャープ質量と有効スピン

$$\mathcal{M} = \frac{(m_1 m_2)^{3/5}}{(m_1 + m_2)^{1/5}}, \quad \chi_{\text{eff}} = \frac{(m_1 \vec{\chi}_1 + m_2 \vec{\chi}_2) \cdot \hat{L}_N}{M},$$

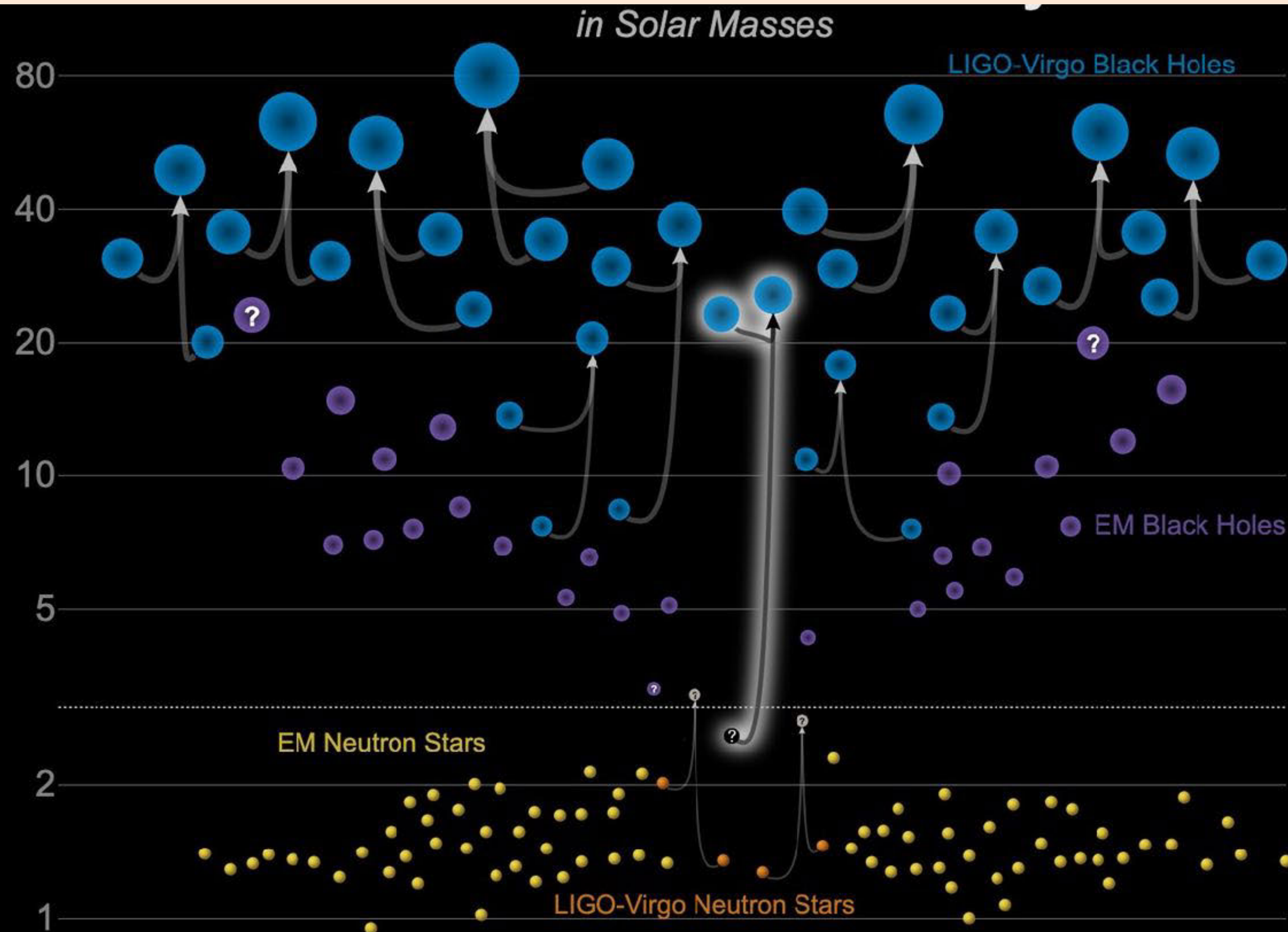


GWTC-2.1 arXiv:2108.01045



GWTC-3 arXiv:2111.03606

Extream mass ratio



Updated 2020-05-16
LIGO-Virgo | Frank Elavsky, Aaron Geller | Northwestern

GW190814 極端な質量比

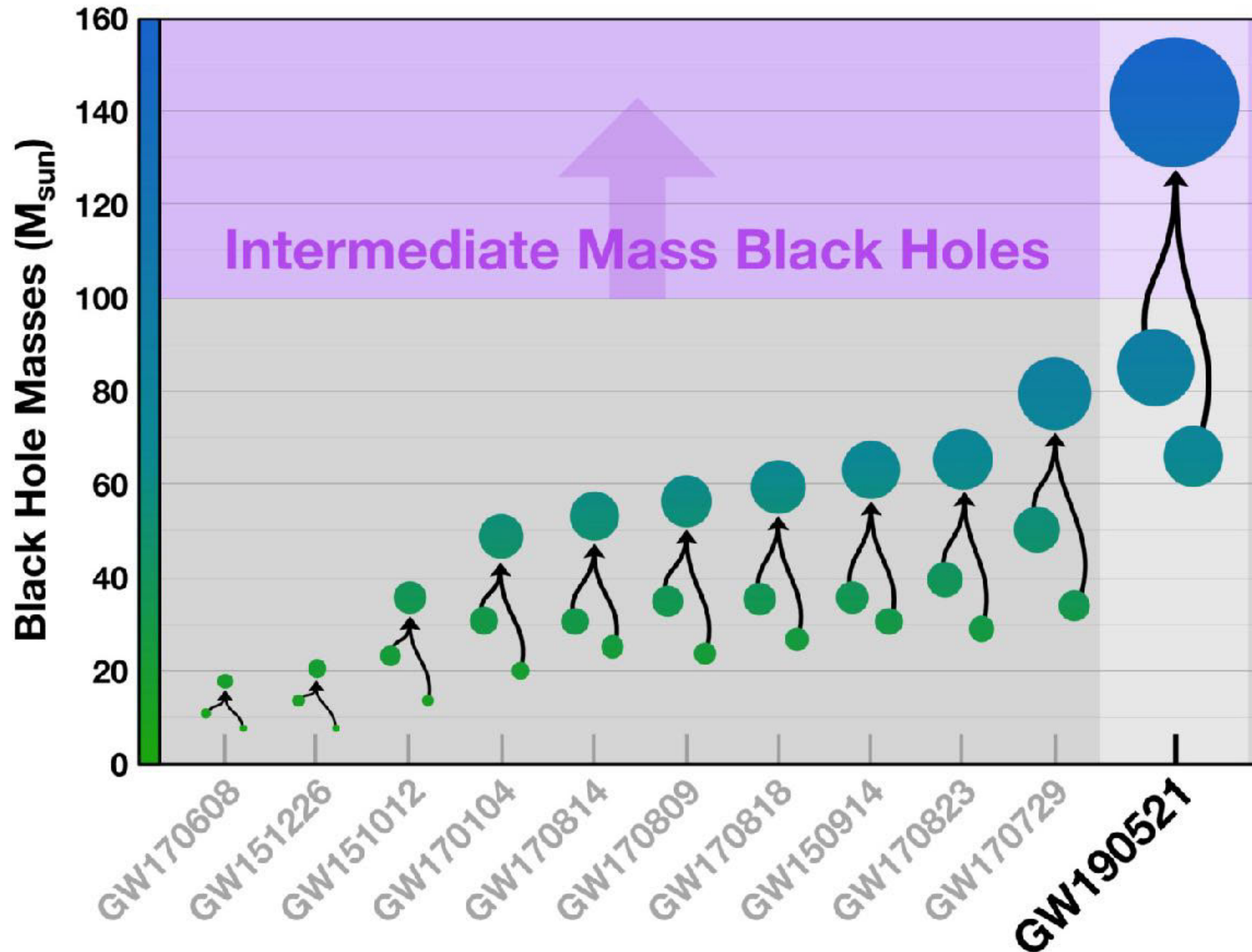
m_1 (M_{\odot})	m_2 (M_{\odot})
$23.2^{+1.1}_{-1.0}$	$2.59^{+0.08}_{-0.09}$

2.6太陽質量...何だ?!?

観測上、最軽量のブラックホールなのか、最重量の中性子星なのか？

IMBH (Intermediate mass black-hole)

LIGO-Virgo Black Hole Mergers



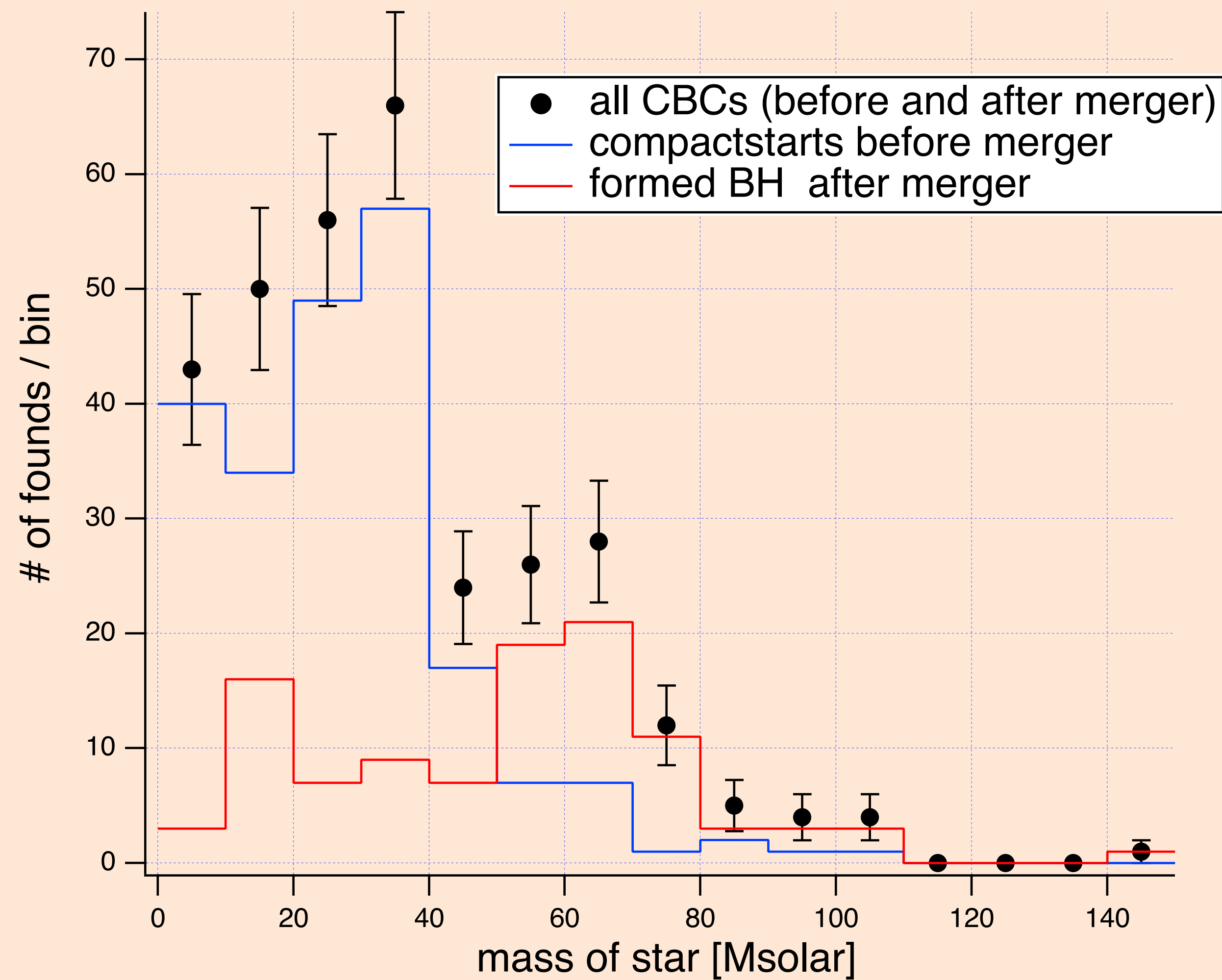
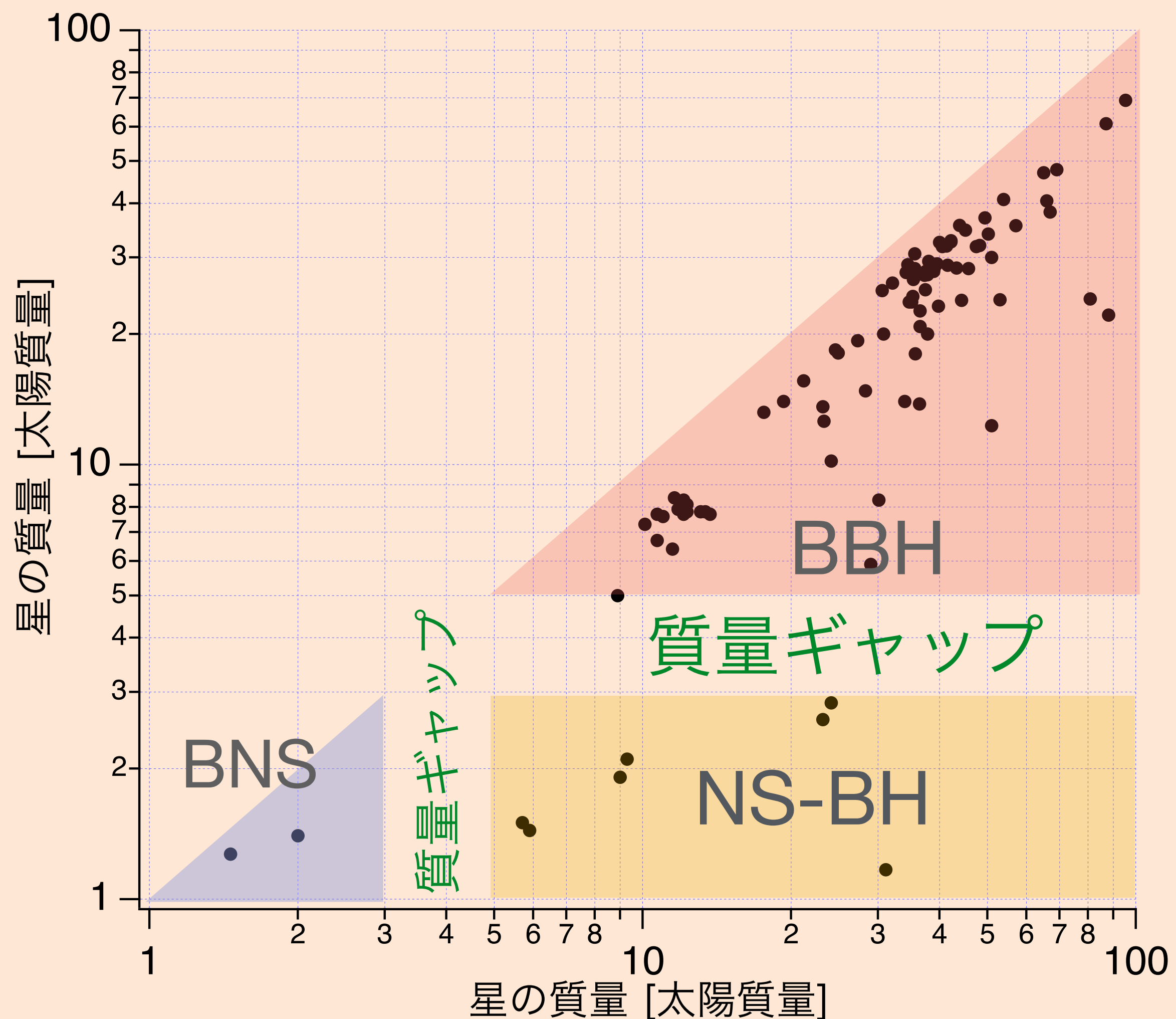
GW190521

中間質量ブラックホール連
星イベント

M (M_{\odot})	\mathcal{M} (M_{\odot})	m_1 (M_{\odot})	m_2 (M_{\odot})	M_f (M_{\odot})
$163.9^{+39.2}_{-23.5}$	$69.2^{+17.0}_{-10.6}$	$95.3^{+28.7}_{-18.9}$	$69.0^{+22.7}_{-23.1}$	$156.3^{+36.8}_{-22.4}$

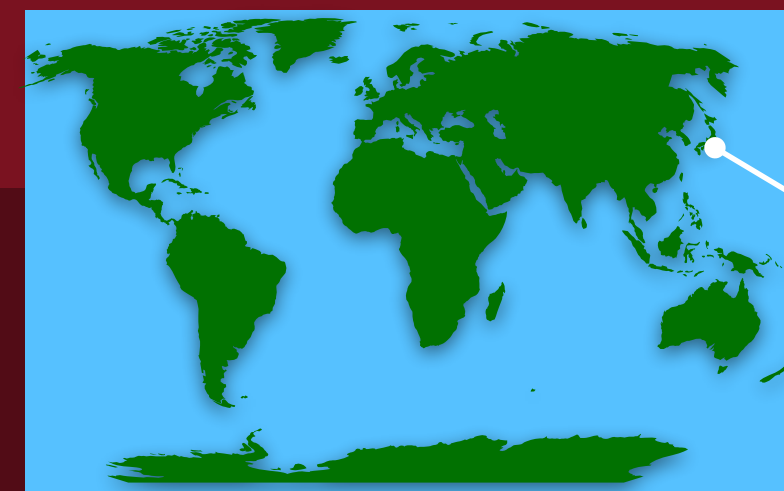
ブラックホールの合体の
「積み上げ」なのか？

GWTC-2, -3 の公開イベントデータから



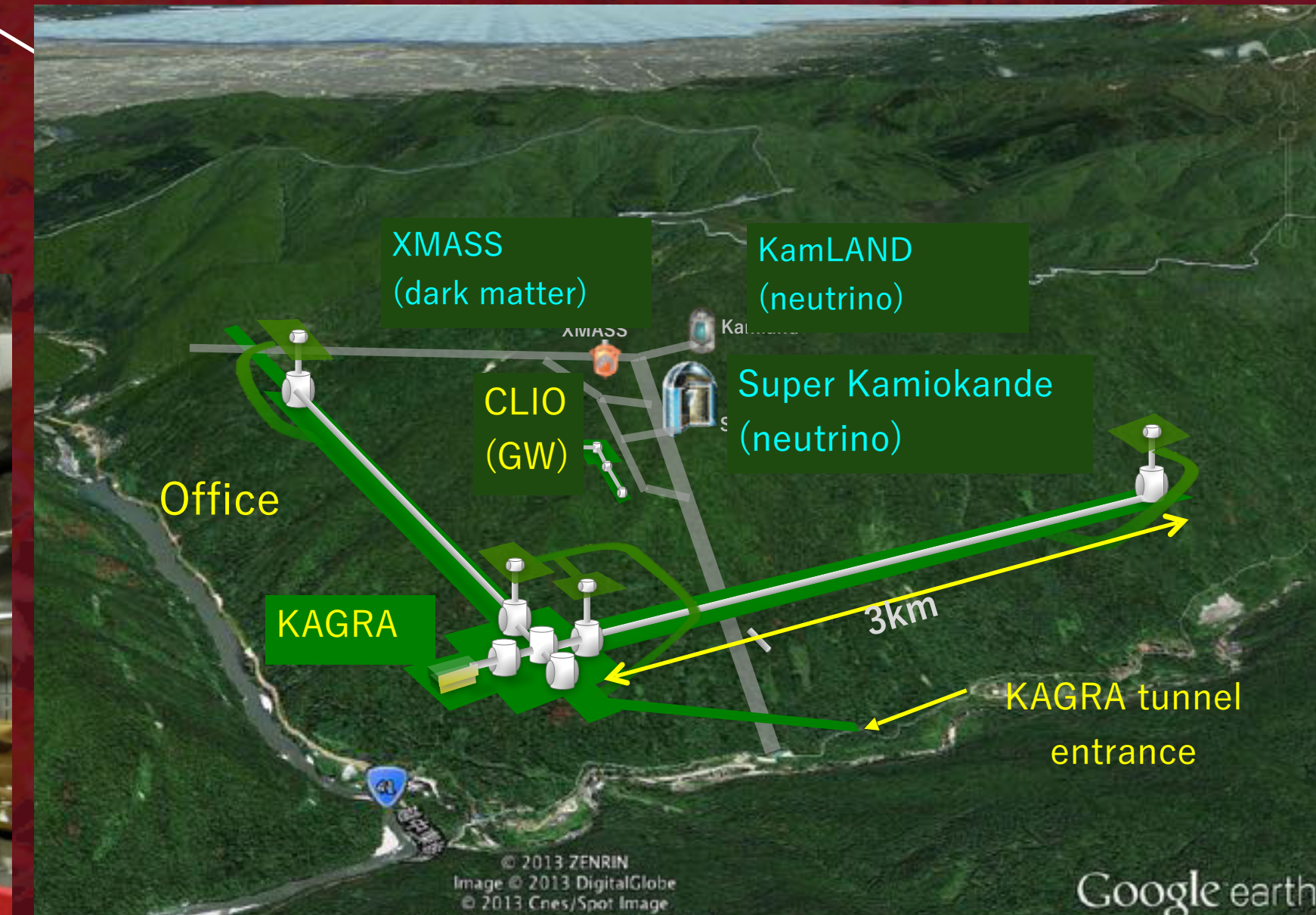
<https://www.gw-openscience.org/eventapi/html/allevents/> を基に作成

重力波観測実験 KAGRA



東京大学宇宙線研究所、高エネルギー加速器研究機構、国立天文台、ほか多数の大学の国際共同研究。

- 地下：岐阜県飛騨市 神岡鉱山
- 干渉系基線長 3km
- 低温鏡：~20K, サファイア基材



Google earth
Courtesy: O. Miyakawa



東大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が建設を担う。

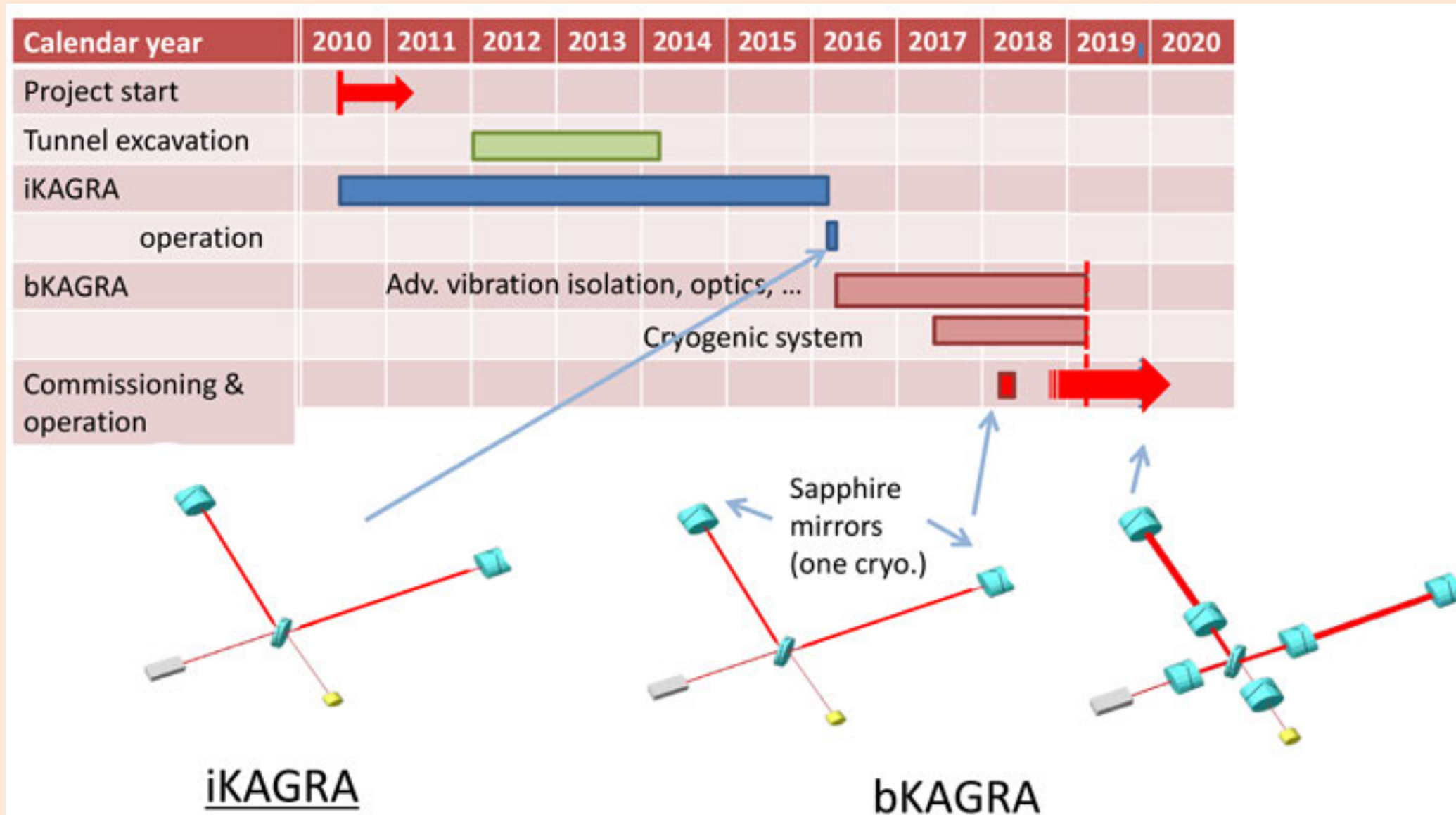
+

国内外（14地域と国）の約110の大学、研究機関から共同研究者400人余り。

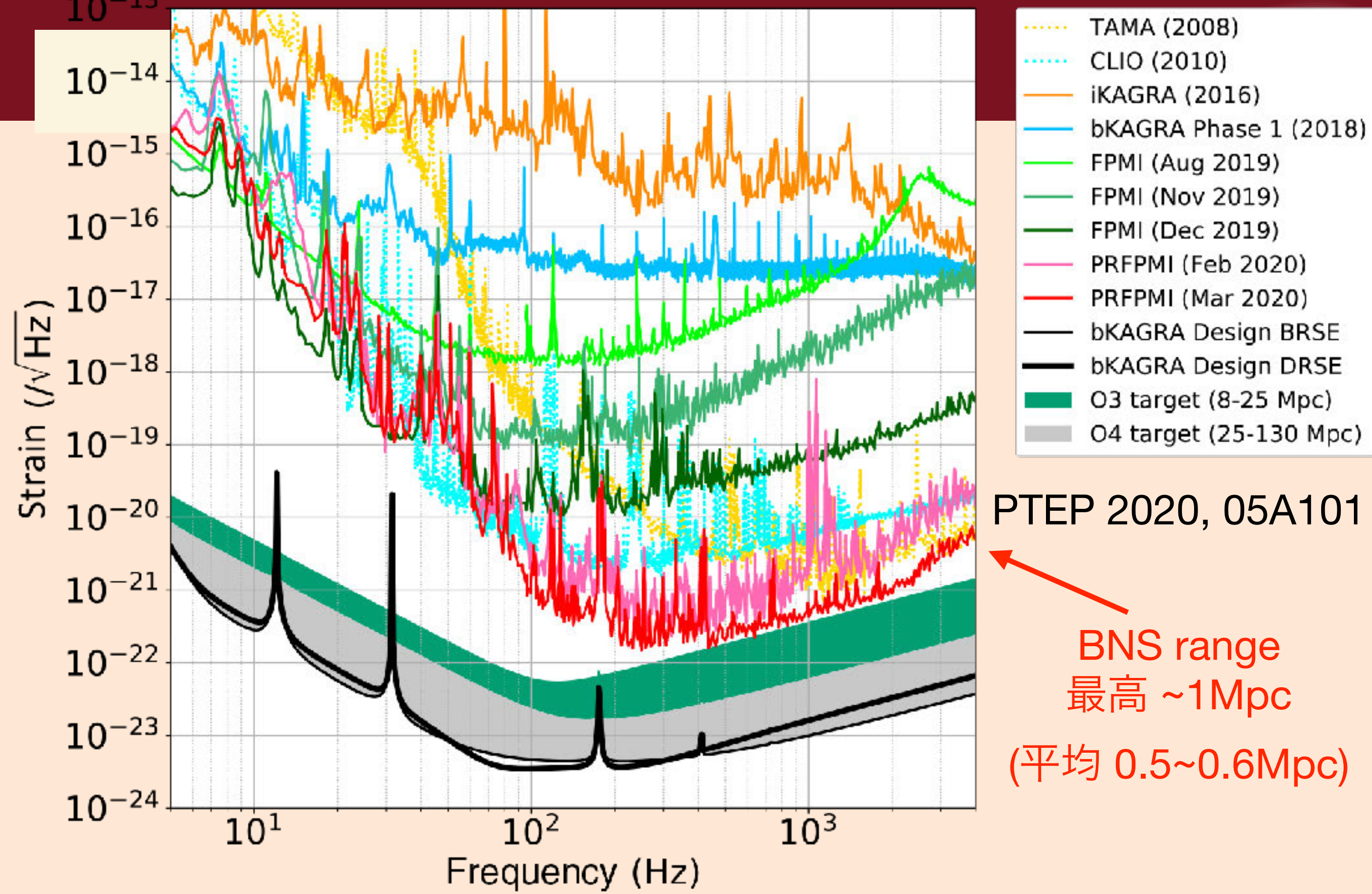


コラボレーションミーティング2018春@大阪市立大

Milestones of KAGRA

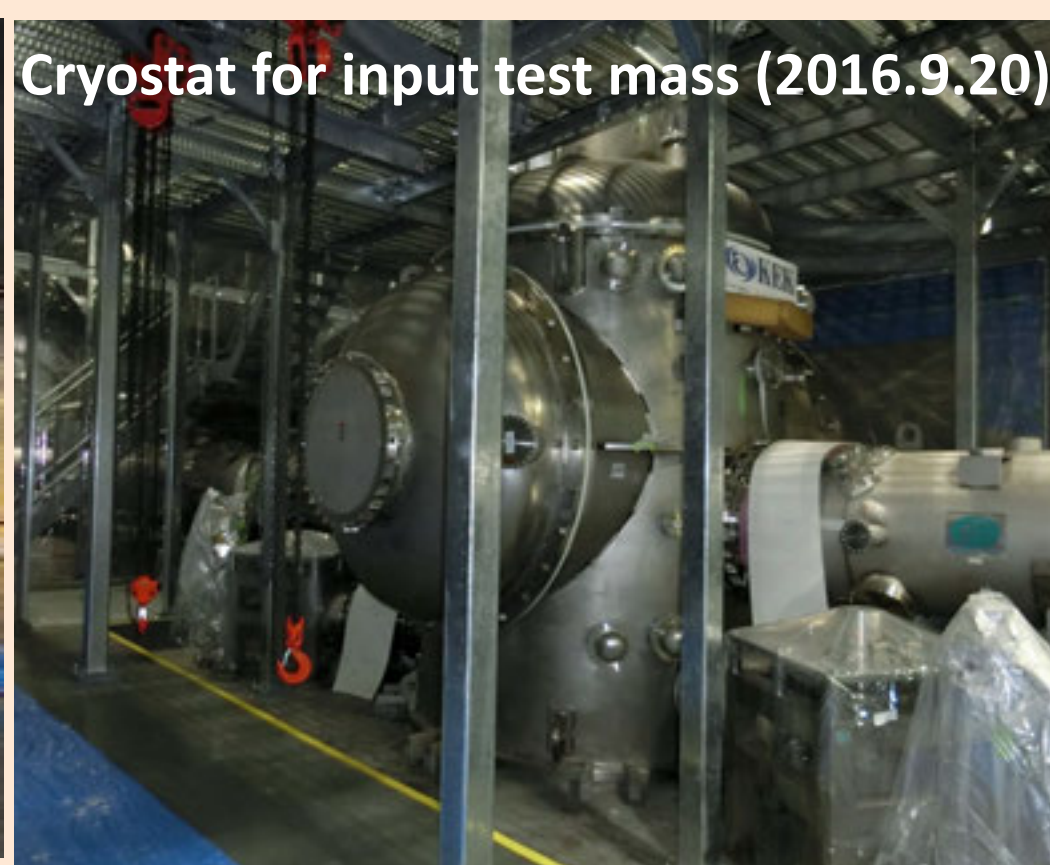


重力波相当の雑音レベル



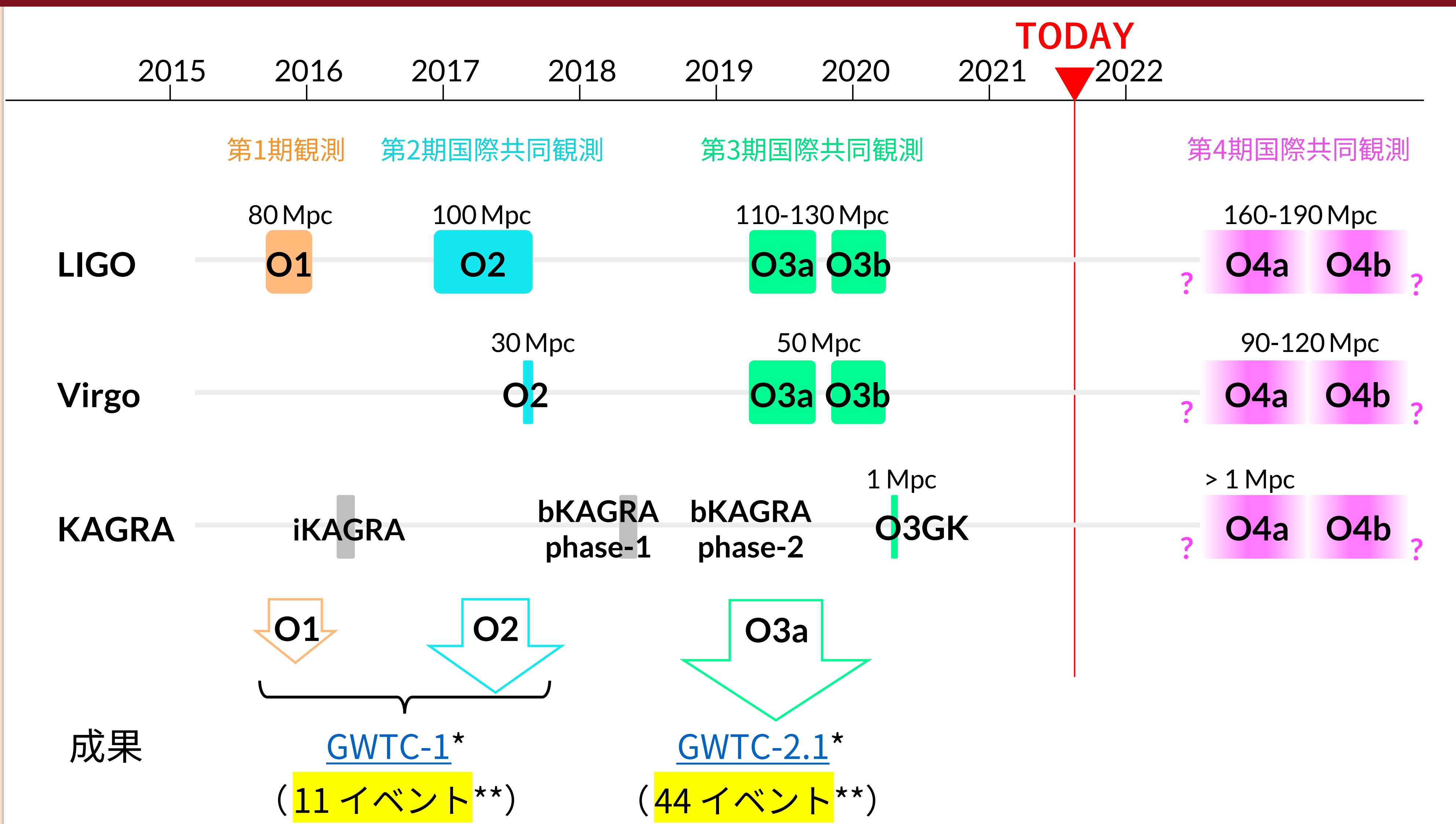
PTEP 2020, 05A101

BNS range
最高 ~1Mpc
(平均 0.5~0.6Mpc)



The moment of declaring the start of observation on February 25, 2020. [Photo from [KAGRA webpage](#)]

観測スケジュール (これまでとこれから)

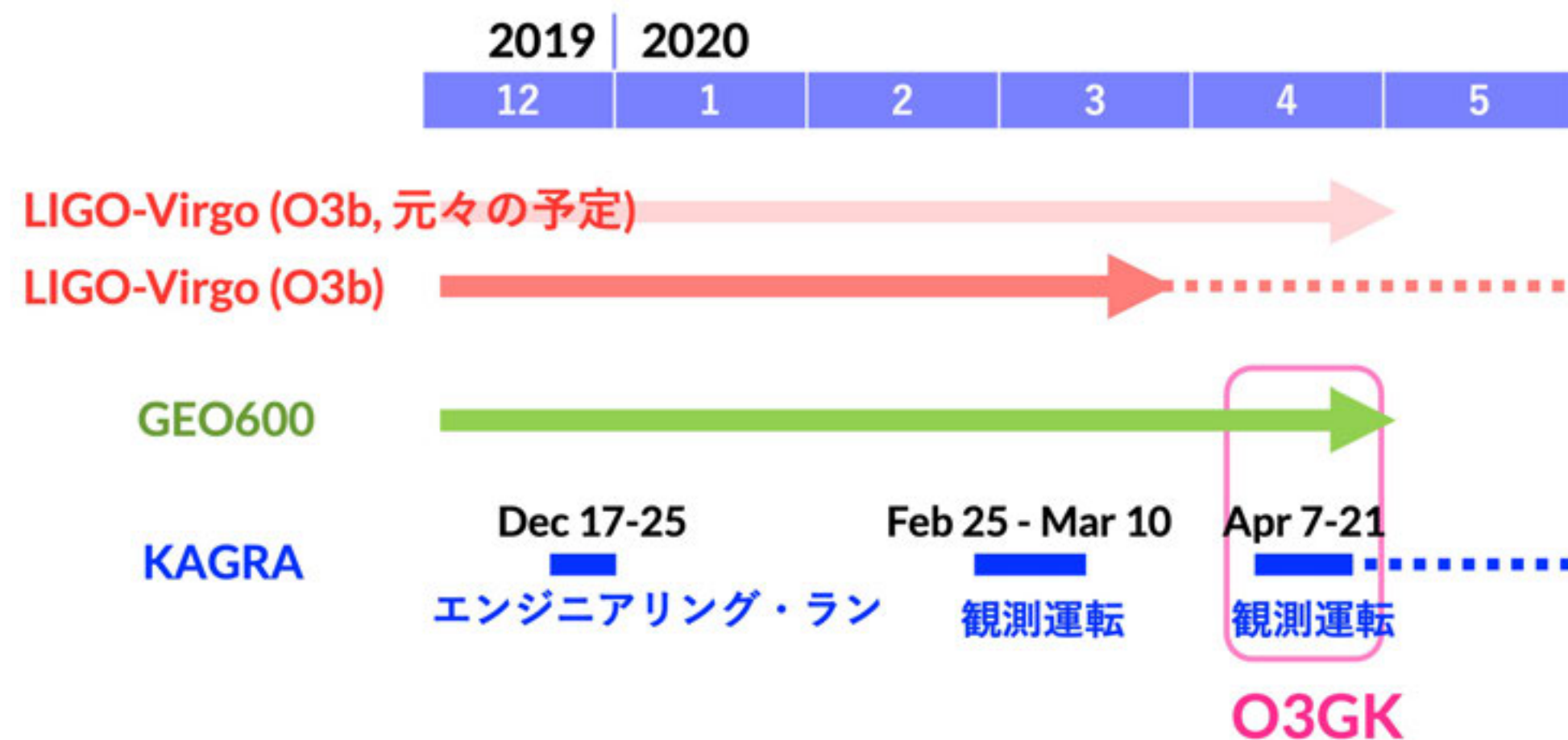


* GWTC: Gravitational-Wave Transient Catalog (突発性重力波カタログ)
 ** 天体物理学的起源である確率が 50% を超える候補重力波源の数。

by T.Sawada

O3GK

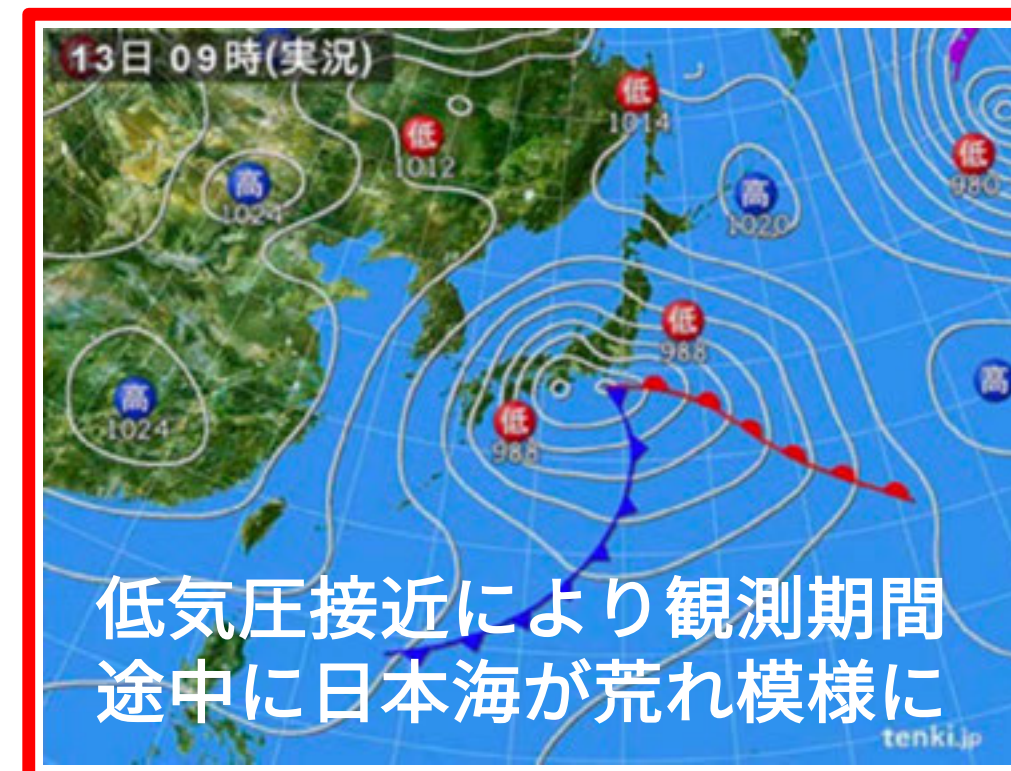
第3期国際共同観測 (Observation 3) 期間の
GEO600-KAGRAによる共同観測



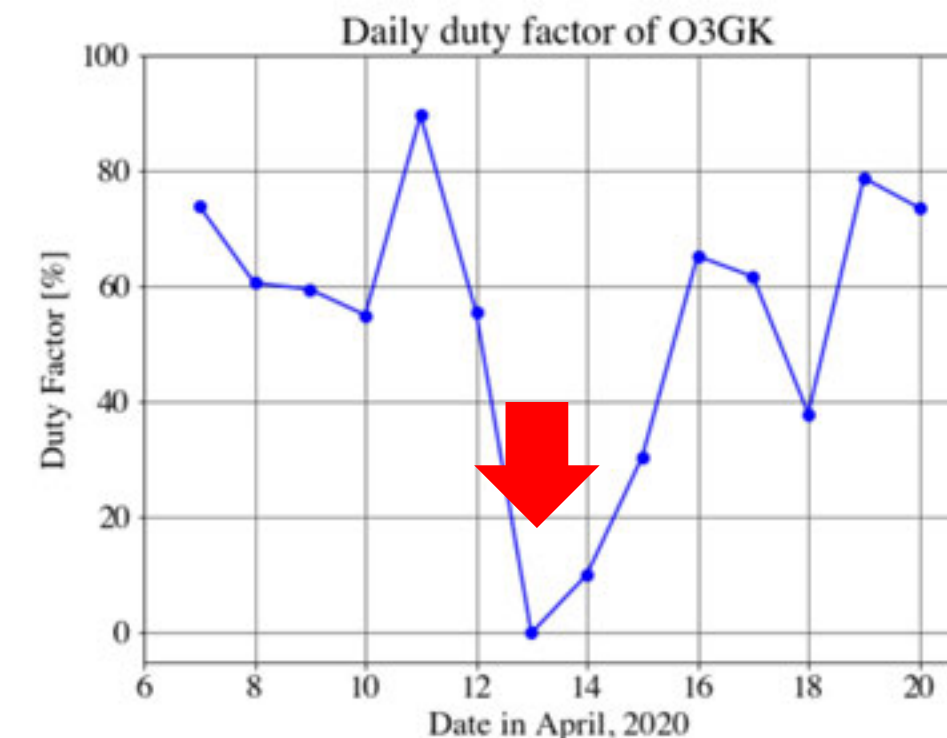
- LIGO-Virgo: COVID-19の影響により、2020年3月に予定を早めての観測終了
- GEO600-KAGRA: 共同観測を実施
2020年4月7日 8:00 UTC - 4月21日 0:00 UTC

到達感度

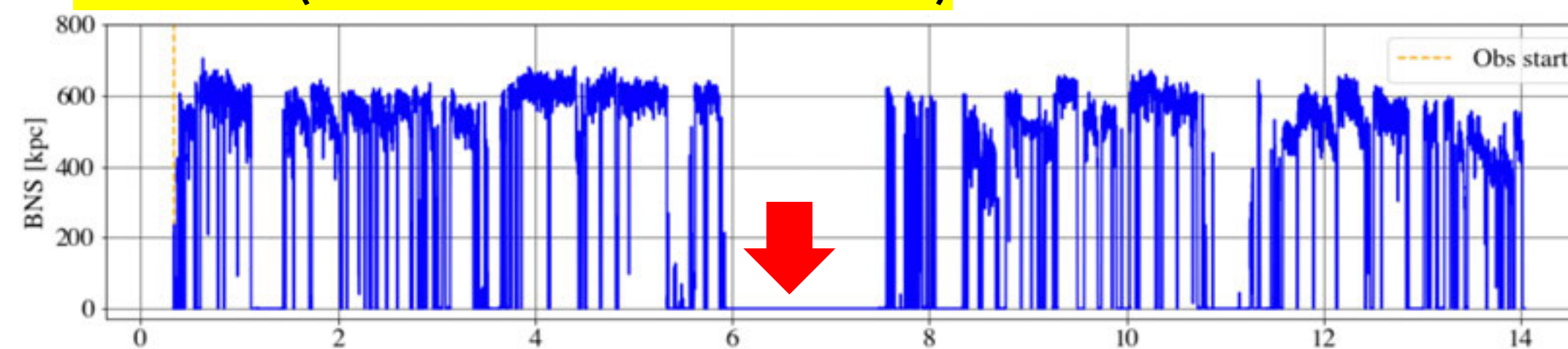
- 平均 0.5 ~ 0.6 Mpc 程度
(連星中性子星の合体に換算)
- 最大 ~ 1 Mpc
(ただし、試験運転中)



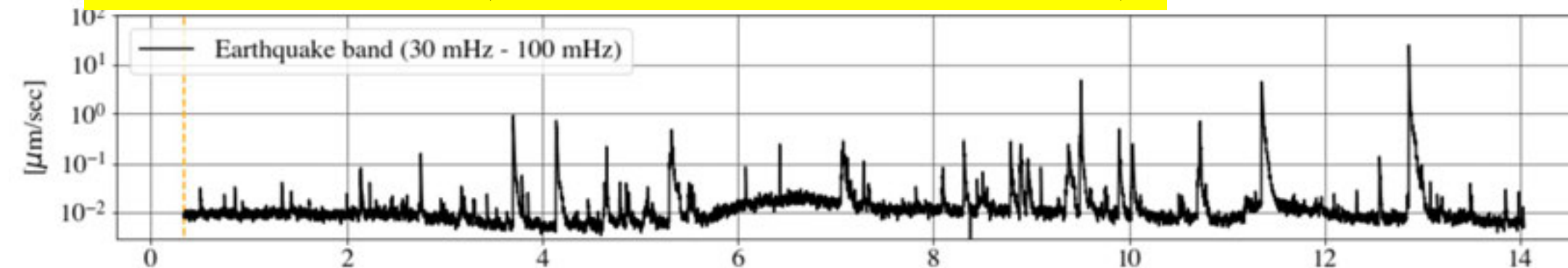
有効観測時間: 約60%程度



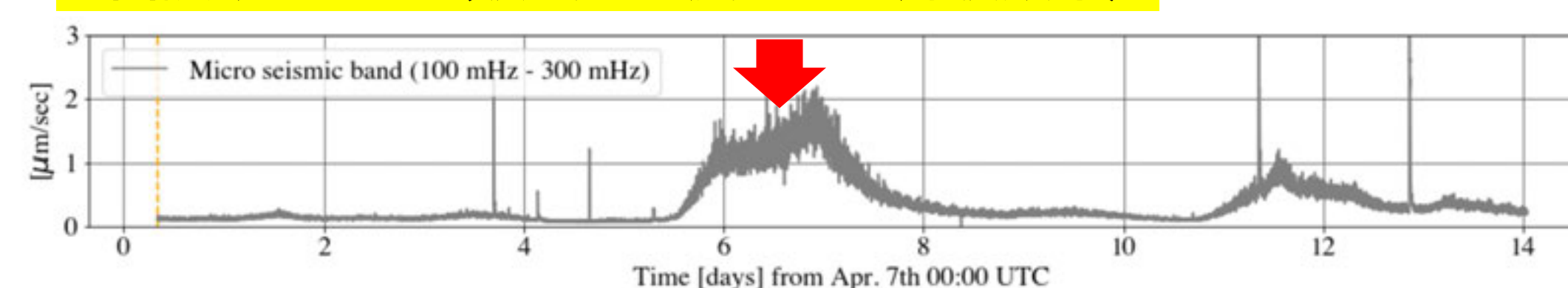
観測感度 (連星中性子星合体に対して)



地面振動モニタ (地震に感度のある周波数帯)



地面振動モニタ (波浪に感度のある周波数帯)



LIGO-Virgoとのデータ共有

低遅延でのデータ共有

較正パイプラインの重力波チャンネル出力

(strain): $h(t)$ + quality flag

1secごとのデータ (frame形式)

LIGO, Virgo, KAGRAで相互に連続送受信

遅延時間：数秒～15秒程度

L,Vサイト→カリフォルニア工科大←→柏←Kサイト(神岡)

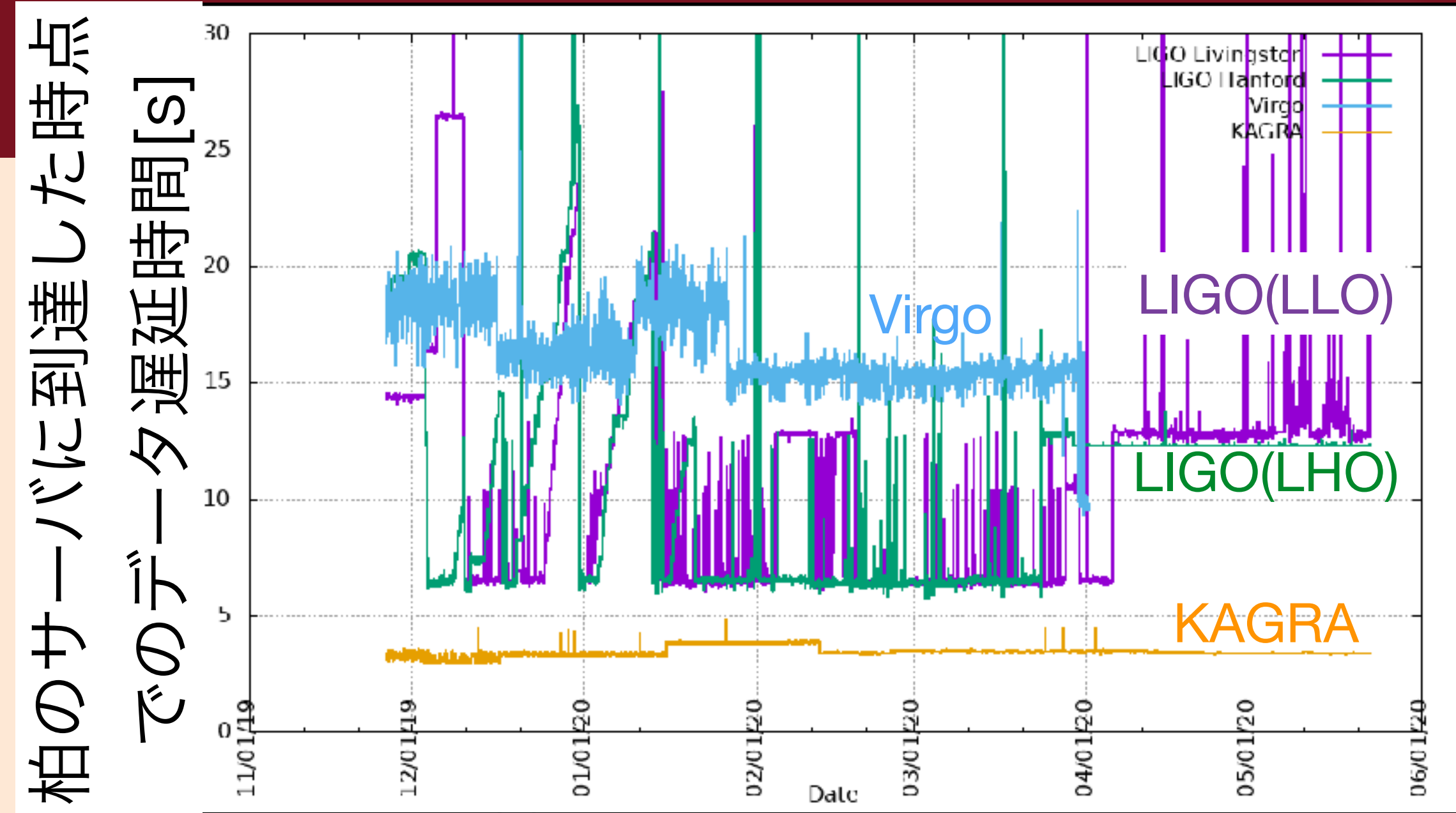
柏→解析用計算機、大阪、

高遅延でのデータ共有

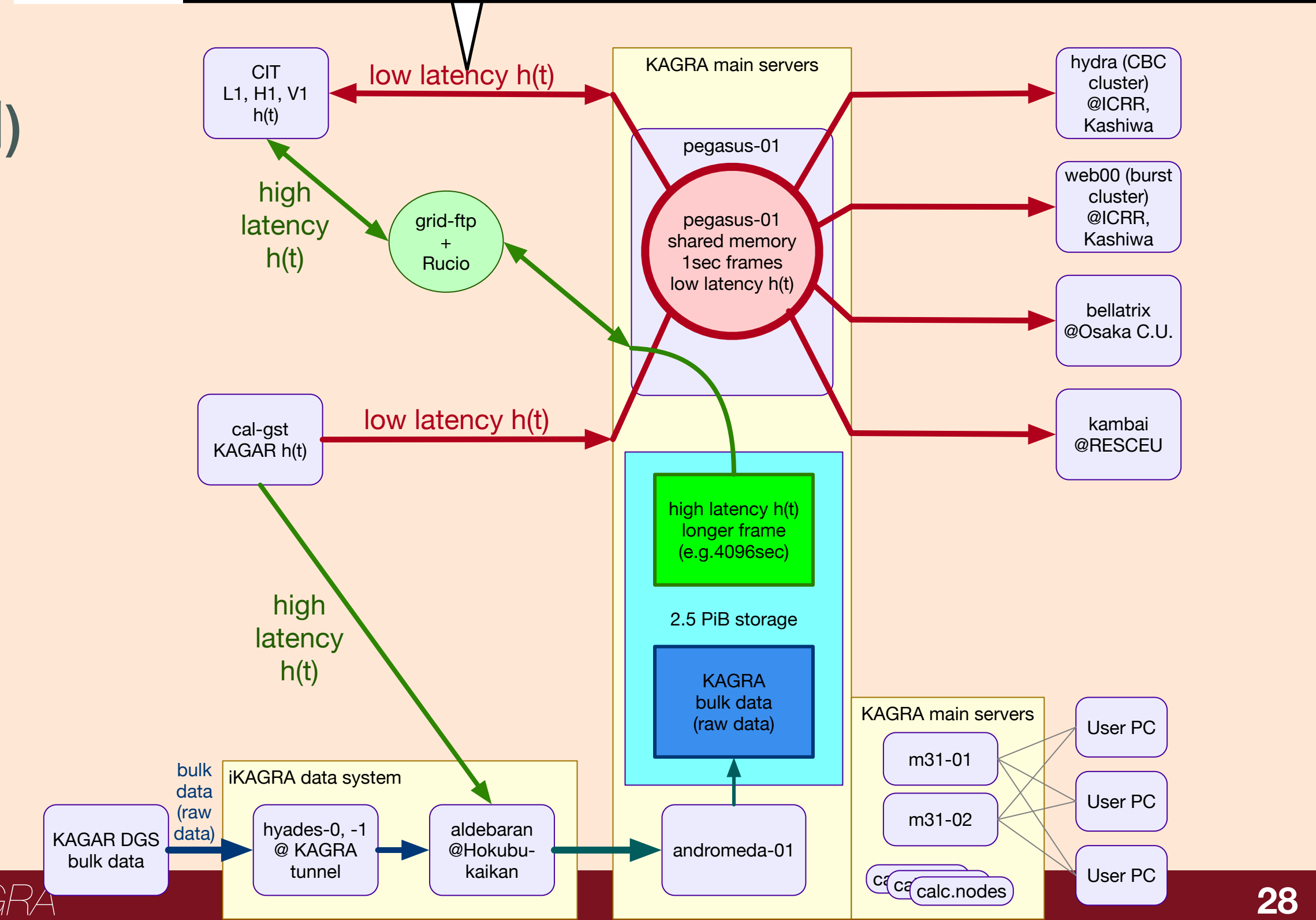
- 数十分～1時間強程度分にまとめたデータファ

イルの共有

- オフラインで較正したデータ



柏のサーバに到達した時点



O3までのKAGRAデータ

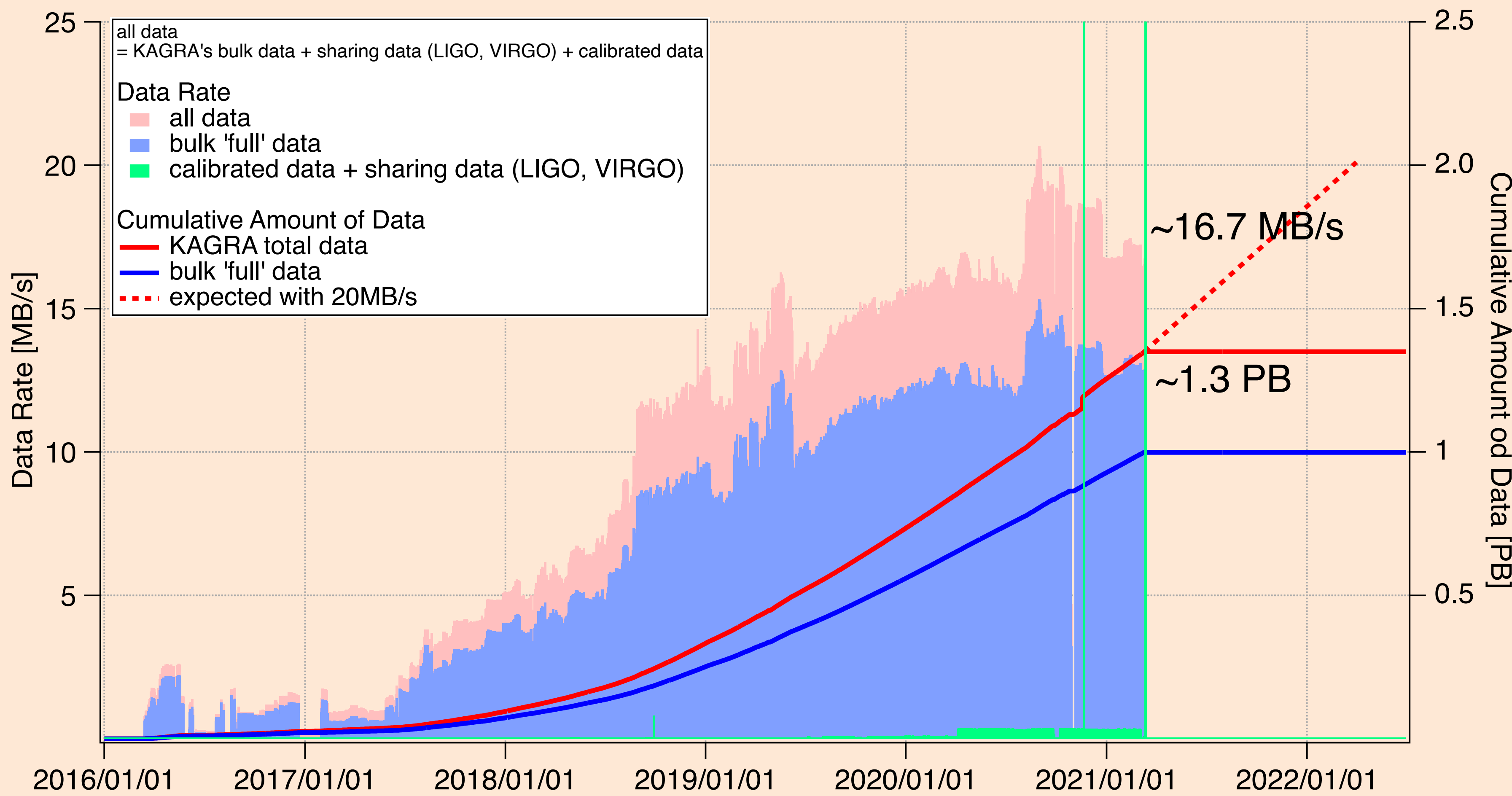
KAGRAの生データ

~20MB/s (=630TB/yr)

較正データ

KAGRA
LIGO, Virgo共有分

2022年春には2PBを
超える。
O4にはストレージを
追加する。



Tier-0 : Main Data Server at [ICRR, U. Tokyo, Kashiwa](#)

2.4 PiB (HHD) for
observational data
storage

gpfs file system

12.8 TFLOPS

since March 2017

Storage:

DDN SFA7700X + SS8460

Servers:

HP ProLiant DL180 G9

HP ProLiant DL20 Gen9

HP ProLiant XL170 Gen9

Internal network:

Infiniband FDR



Also, [KISTI \(Korea\)](#) is in preparation for Tier-1 now.

Some more sites (e.g. [Niigata](#), [Nagaoka](#), [NCU\(Taiwan\)](#), etc..) are contributing.

Tier-0.5 : for low latency analysis at [Osaka City U.](#)



OCU's 'ORION'
cluster consists of :

- 1160 cores
- 324 TB storage
- Scientific Linux 7.5
- HT condor

Low latency data
+ full data (partial)

Tier-1 : full data mirroring at [Academia SINICA, Taiwan](#)

- Academia Sinica Grid Center
(ASGC) serves as KAGRA Tier-1
center to make a full mirror data

- LIGO/Virgo Low latency
data are also mirrored
~20MB/s
Transfer every
100000 sec



O4 & O5 に向けて

O4

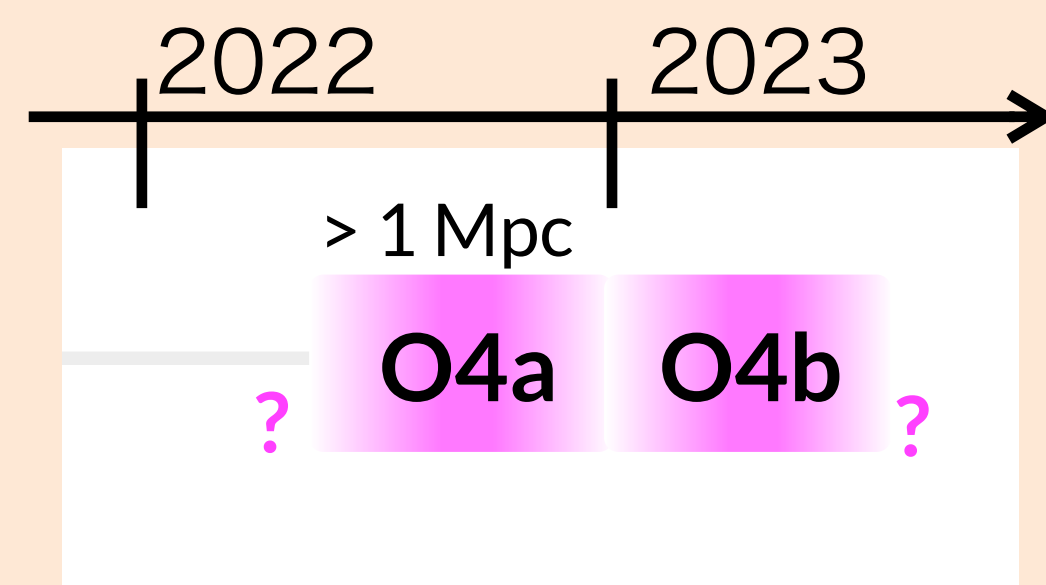
O3GKで明らかとなった雑音の対策

懸架系制御、音響雑音、レーザー散射雑音、周波数雑音、強度雑音

O4a (前半)

2022年8月以降

開始時に1Mpc以上の感度を目指す



O4b (後半)

鏡の冷却

O5

品質改良した新しい鏡

O4 へ向けての各種作業 の一例

Top filter (Filter 0)
Inverted pendulum
Base ring
Base frame
Magnetic damper
Filter 1
Filter 2
Filter 3
Bottom filter

Top filter に追加設置された加速度計

高出力レーザーの導入
試験中のレーザー (60W, neoLASE)

防振制御の改善

迷光対策 (バッフルの追加設置による遮光)

ペイロード部分に追加設置されたOptical Lever (光てこ)

国立天文台・先端技術センター (ATC) 内クリーンルームにて

by T.Sawada

重力波源のパラメータ決定精度

方向決定精度

重力波源のパラメータ

- 距離
- 連星合体ならば、質量、自転、軌道面傾斜角

精度を決める要素 ← 感度曲線、重力波の大きさ (*SNR*)

← 検出器の信号校正精度

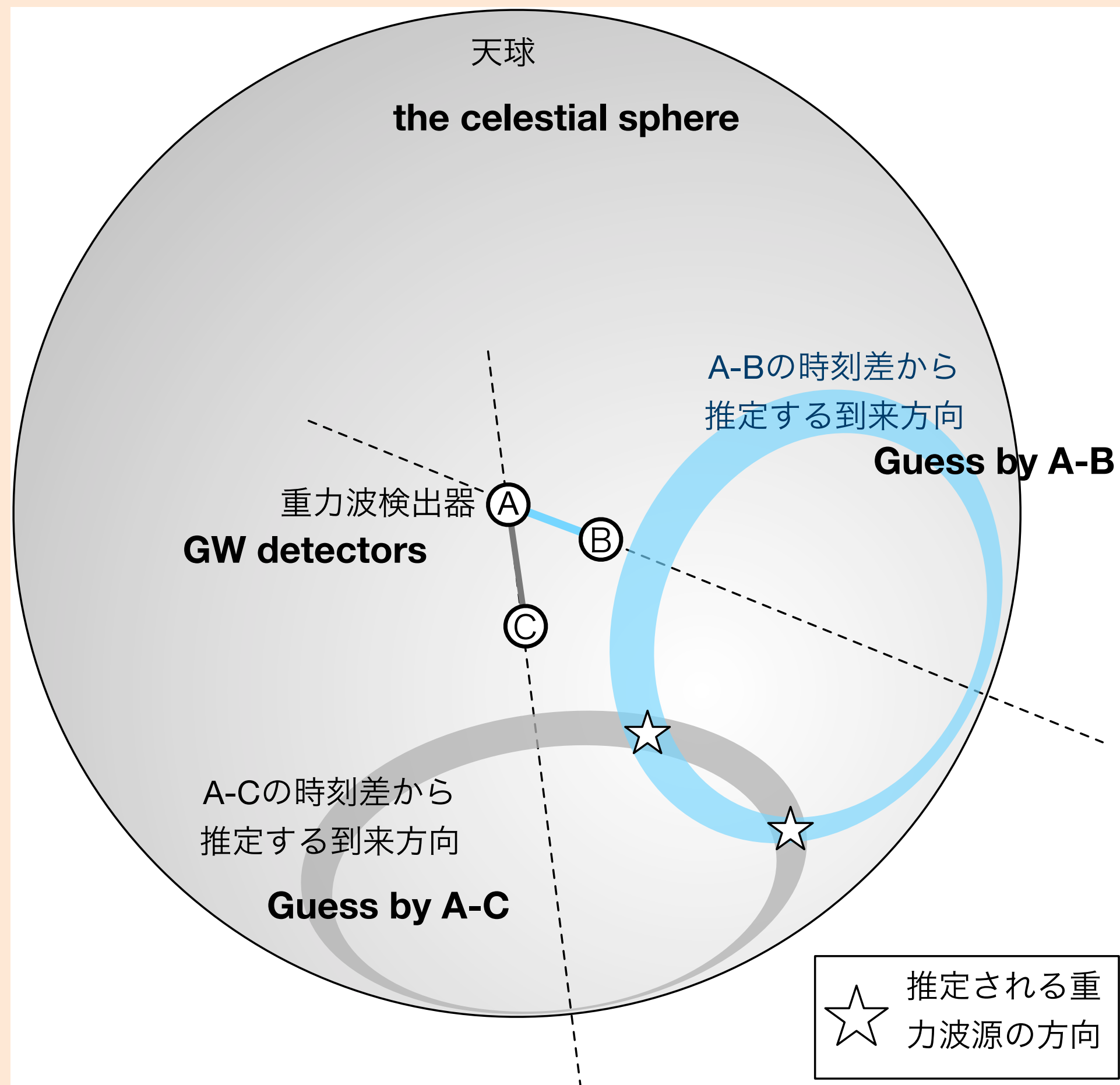
全天に対する応答

検出器の位置・方向関係

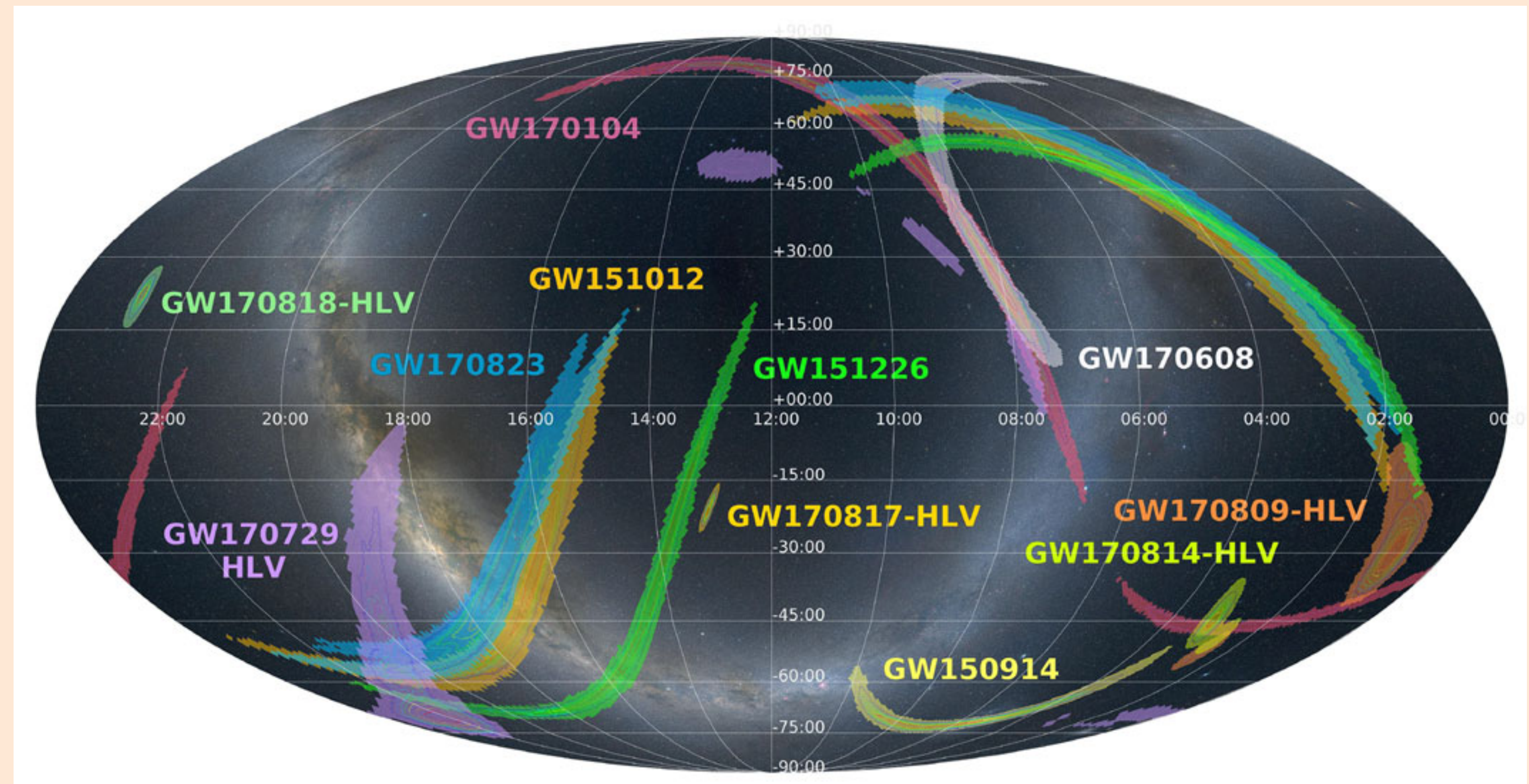
KAGRAの利点は？

Duty Cycle

重力波源の方向決定精度



"Prospects for observing and localizing gravitational-wave transients with Advanced LIGO, Advanced Virgo and KAGRA" ,
KAGRA Collaboration, LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration,
Living Rev Relativ **23**, 3 (2020). <https://doi.org/10.1007/s41114-020-00026-9>



参考文献のFig.5より。O1,O2での位置決定。C.L.90%

方向決定精度

"Prospects for observing and localizing gravitational-wave transients with Advanced LIGO, Advanced Virgo and KAGRA",
KAGRA Collaboration, LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration, Living Rev Relativ **23**, 3 (2020). <https://doi.org/10.1007/s41114-020-00026-9>

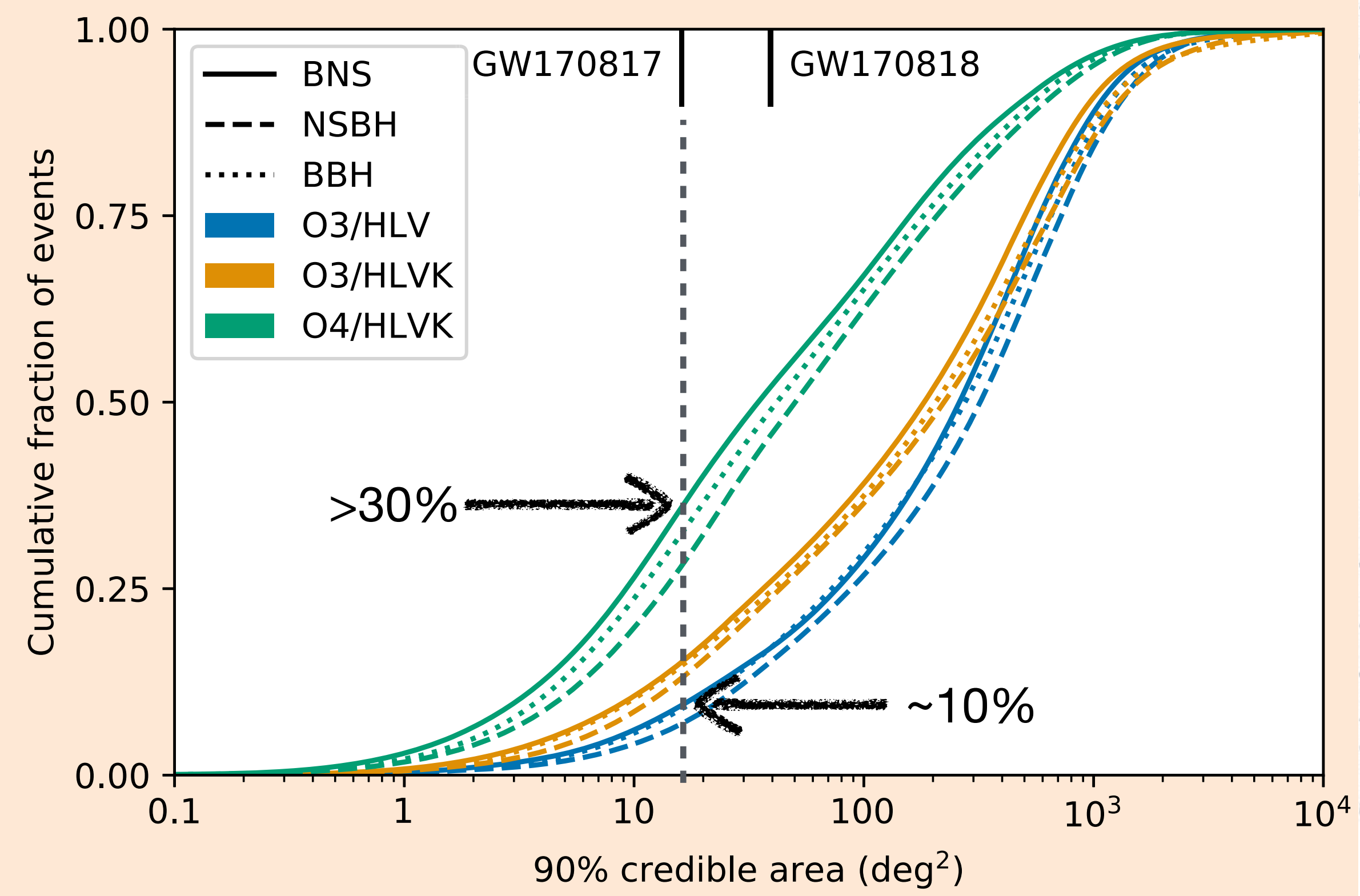


Fig.6 O3,O4デザイン感度での連星合体イベントに対する位置決定精度予想

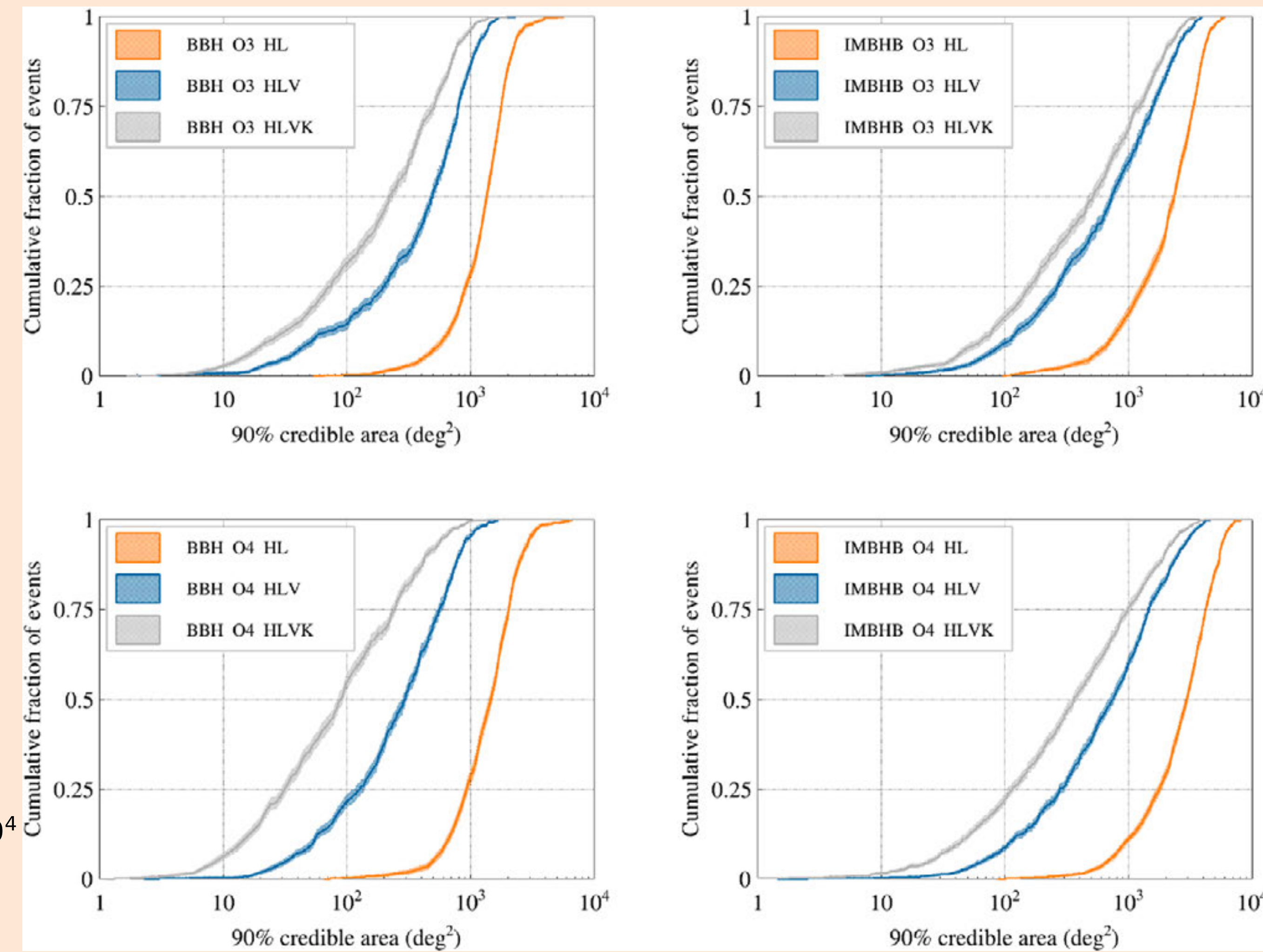


Fig.7 O3,O4デザイン感度でのBH-BHイベントに対する位置決定精度予想

検出器の信号校正精度の影響例 (シミュレーションでの見積)

Conditions:

- Source parameters: distance, sky-location, polarization angle

- BBH GW150914-like 40+32, Non-spin
- 10 Mpc, $i=30\text{deg}$ sky-location: any location (uniform distribution)

• Detector network:

- Virgo: Late_Low (BNS range=65 Mpc), KAGRA: BNS range=1 Mpc

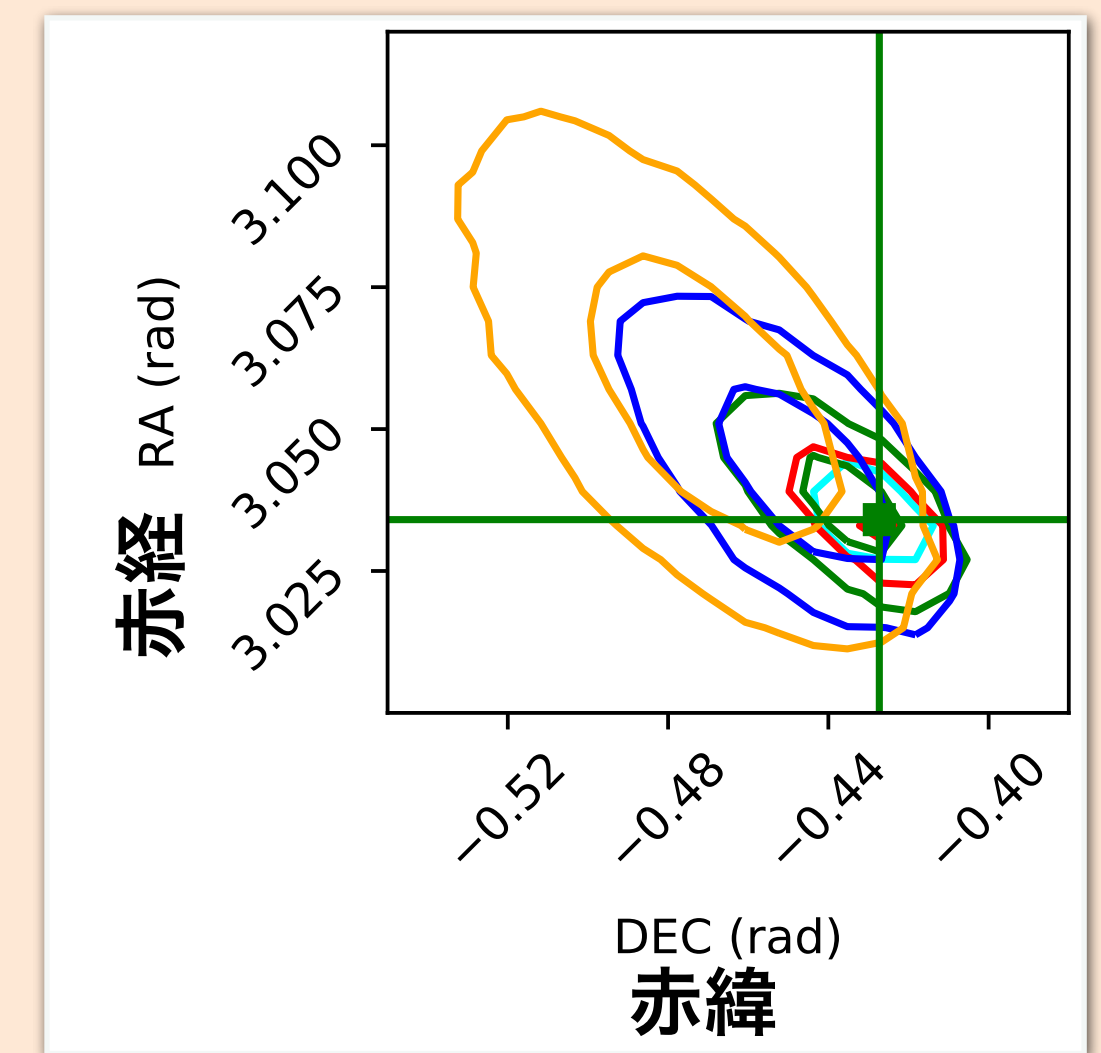
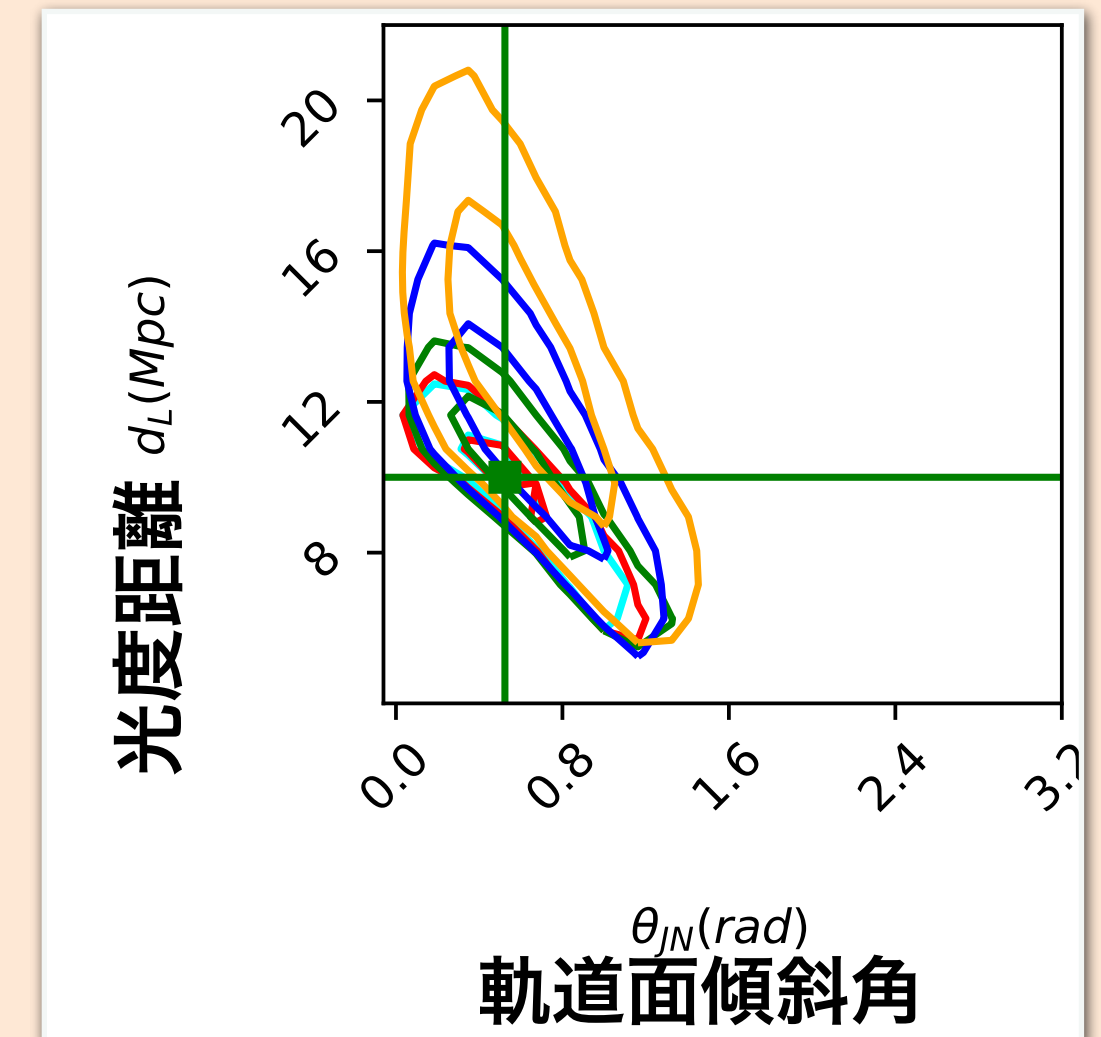
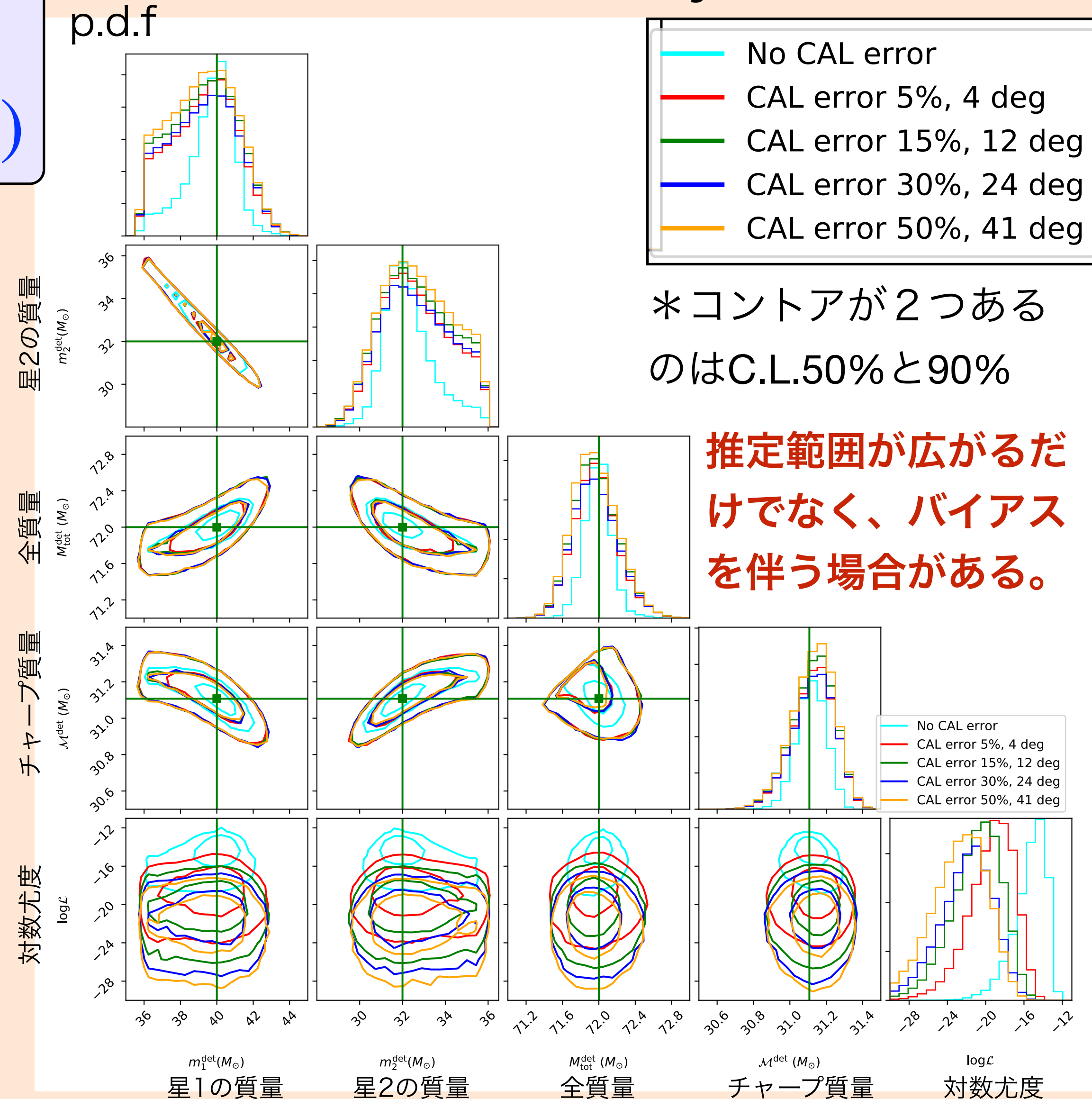
• Calibration errors

- CAL error parameters, spcal-nodes=10, amp-error=0.05, phase-error=4.1 deg for Virgo (when GW200105)

$$v(t) \rightarrow h(t)$$

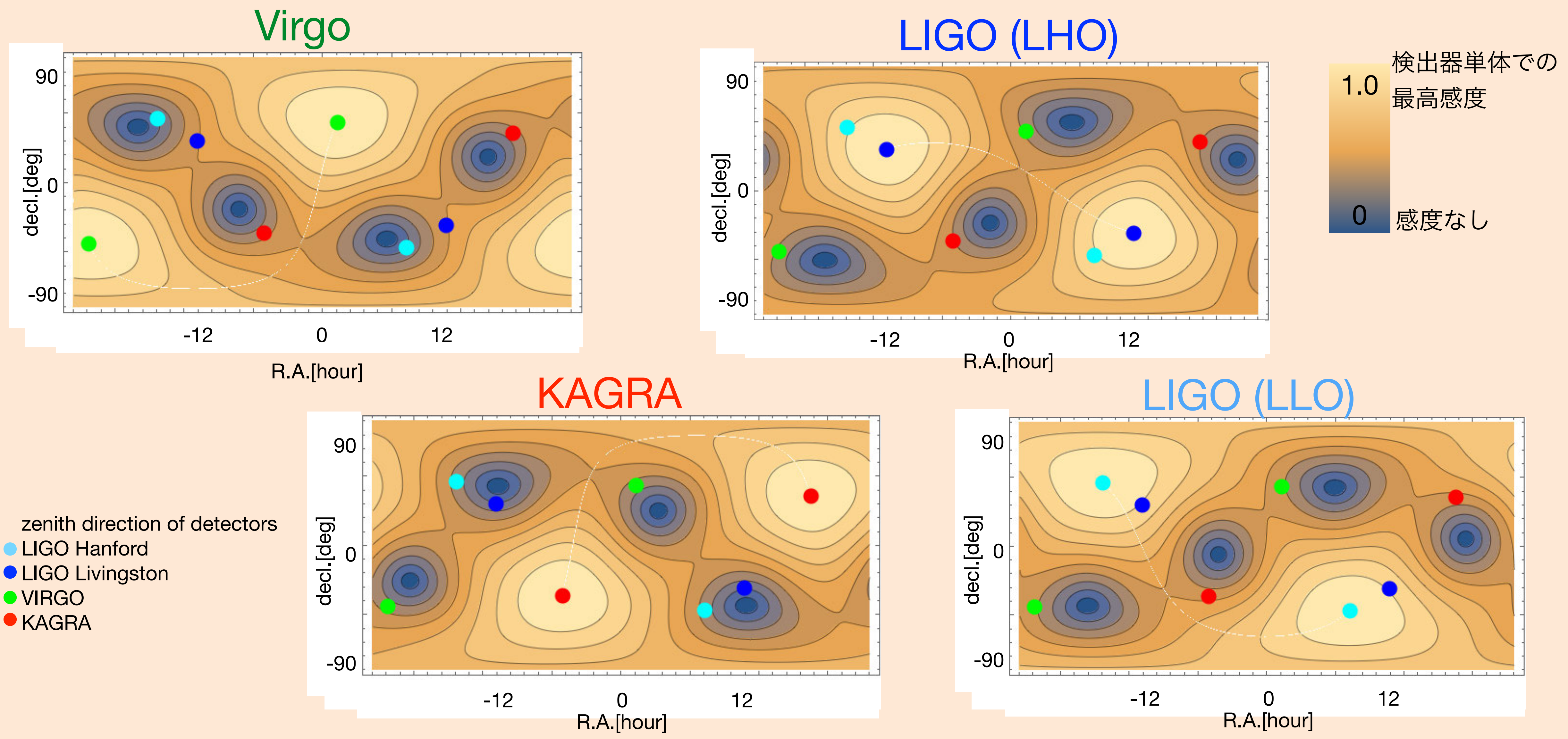
$$\tilde{v}(f) \rightarrow \tilde{h}(f)$$

unknown sky-location SNR V1:130.29, K1:26.47



by T.Narikawa (ICRR)

KAGRAの高感度方向は、LIGO, Virgoと相補的



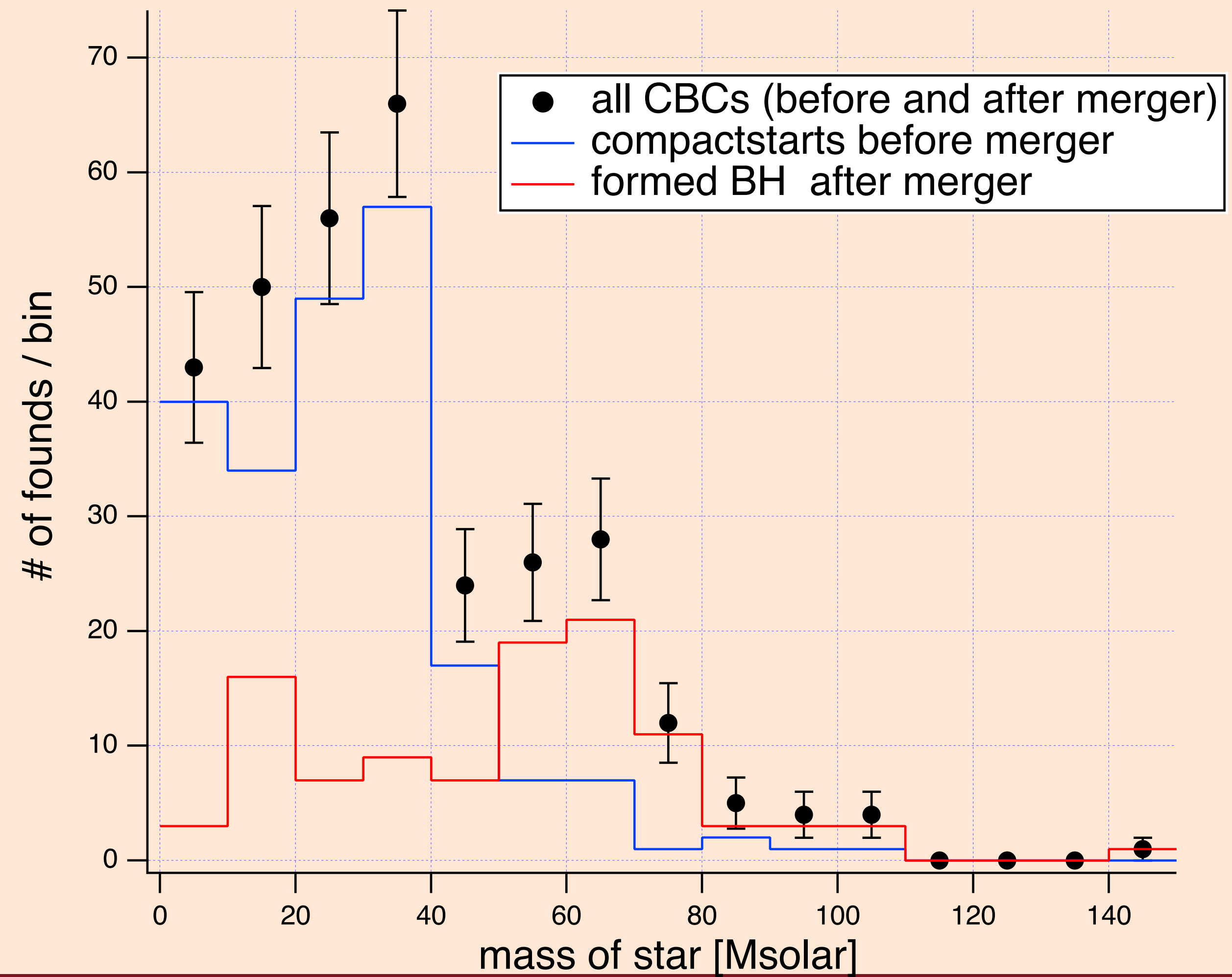
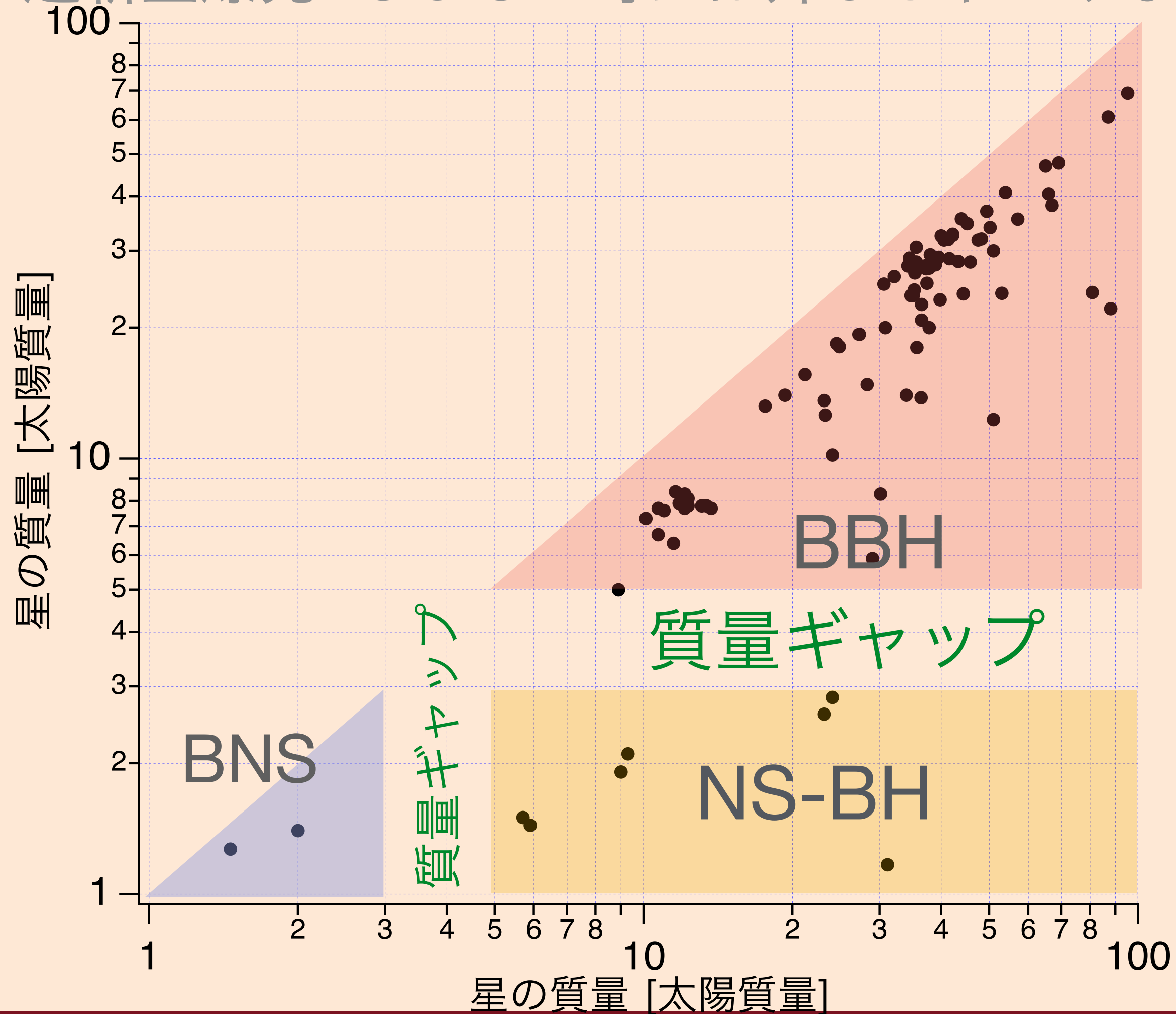
KAGRAが寄与するために
もう一工夫の検討案

KAGRAの初イベントは？

BH-BH detection rateの上で最有力候補。ブラックホールの物理、重力理論の検証。

NS-NS マルチメッセンジャーとして重要

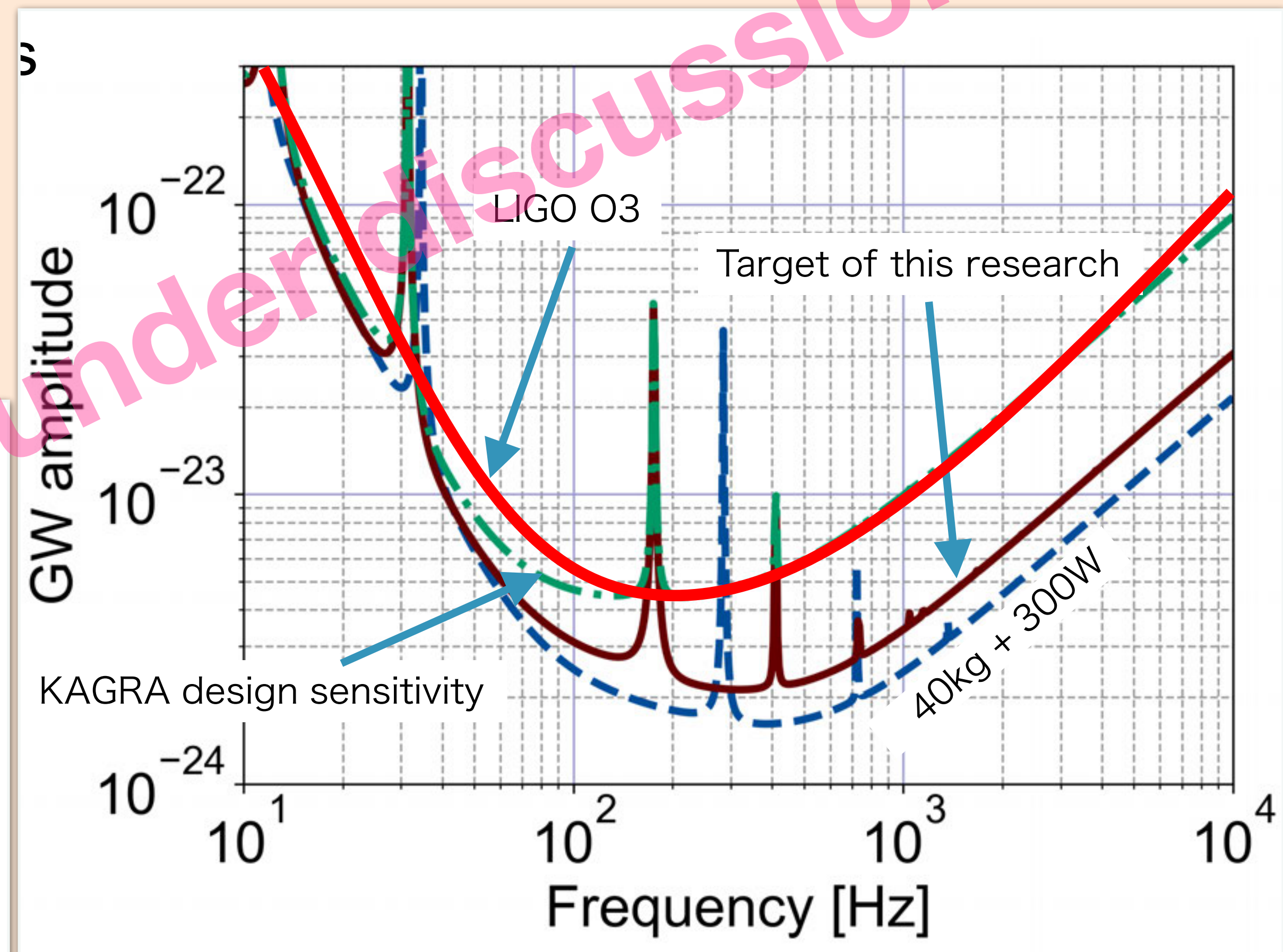
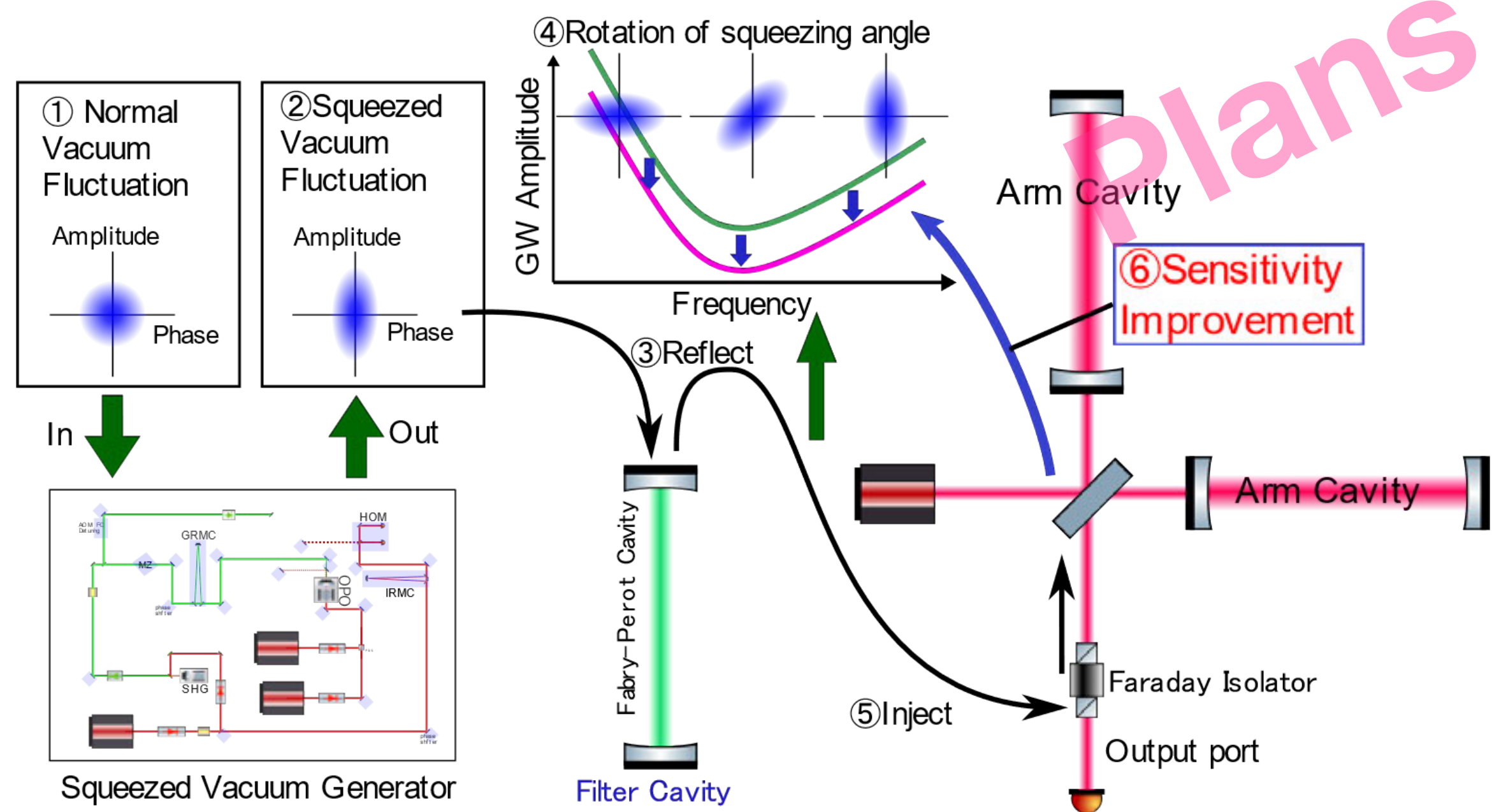
超新星爆発 もしもの時には外しちゃいけない！



高周波(kHz)帯域の改良 → NS-NSの合体期や合体後の物理

- 高出力レーザー
- 周波数依存スクイーミング
- より大きく、低損失(吸収)の鏡

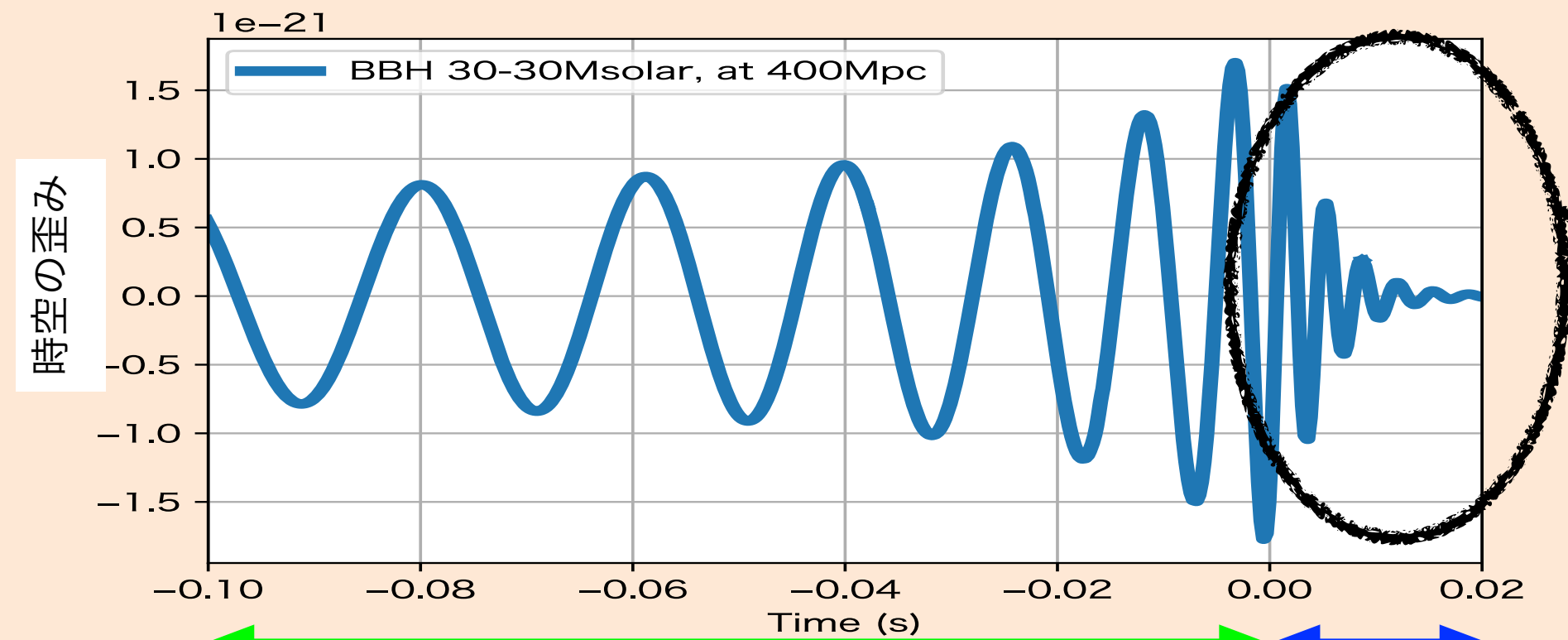
→ 散雑雑音で3倍改善



Draw/Estimation by Y.Aso (NAOJ)

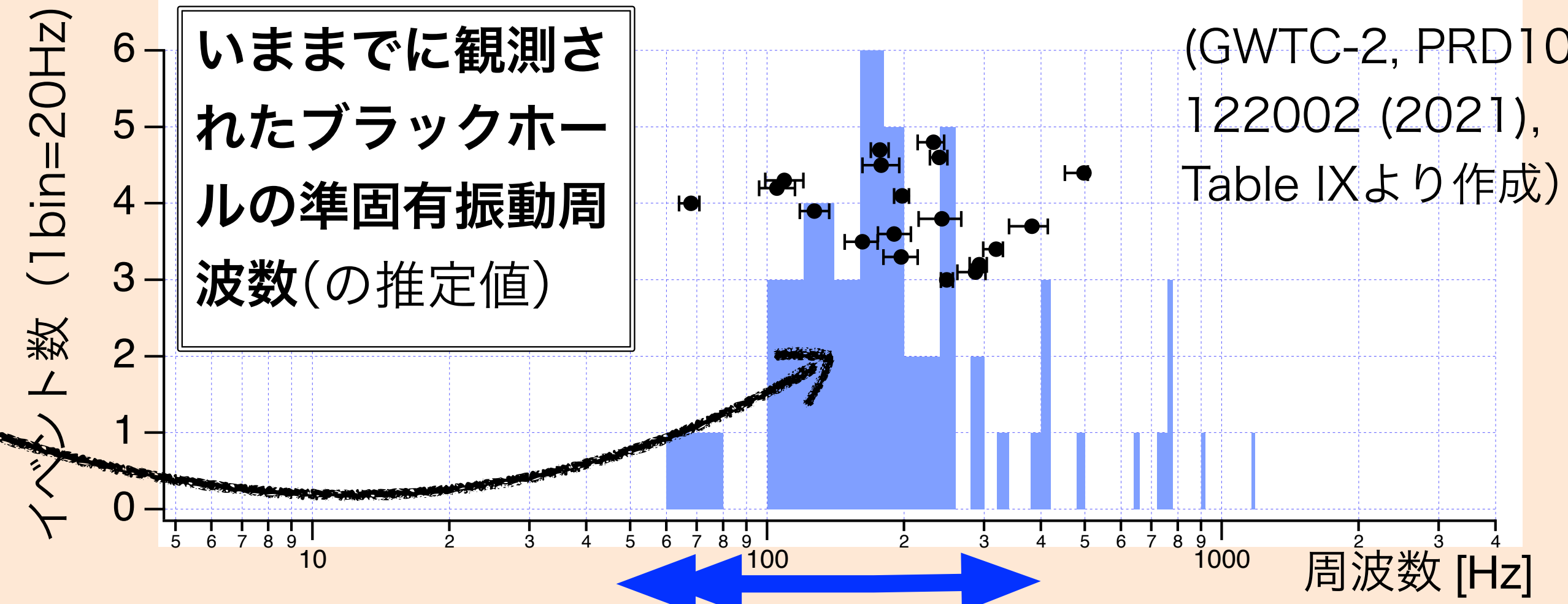
鏡懸架ファイバーのヴァイオリン雑音 & BH準固有振動

期待が大きいのはBH-BH。
超新星爆発も数100Hz帯が重要。



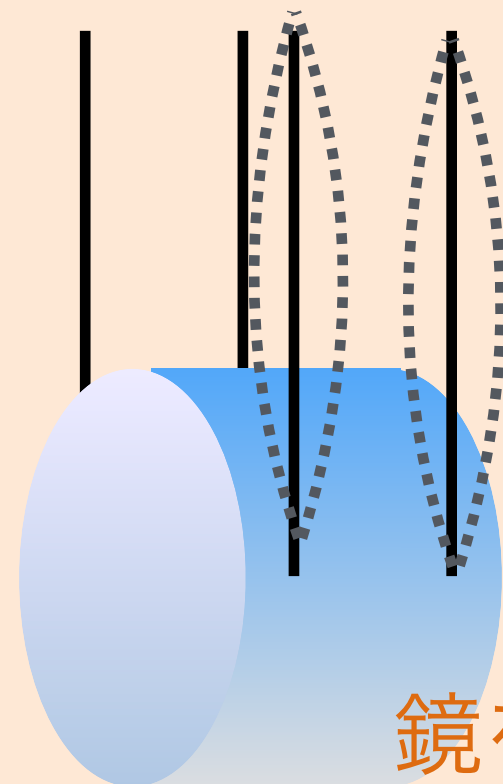
インスパイラル波形
連星の質量、
距離、到来方向

準固有振動波形
ブラックホールの質量、角運動量
ブラックホール時空の性質

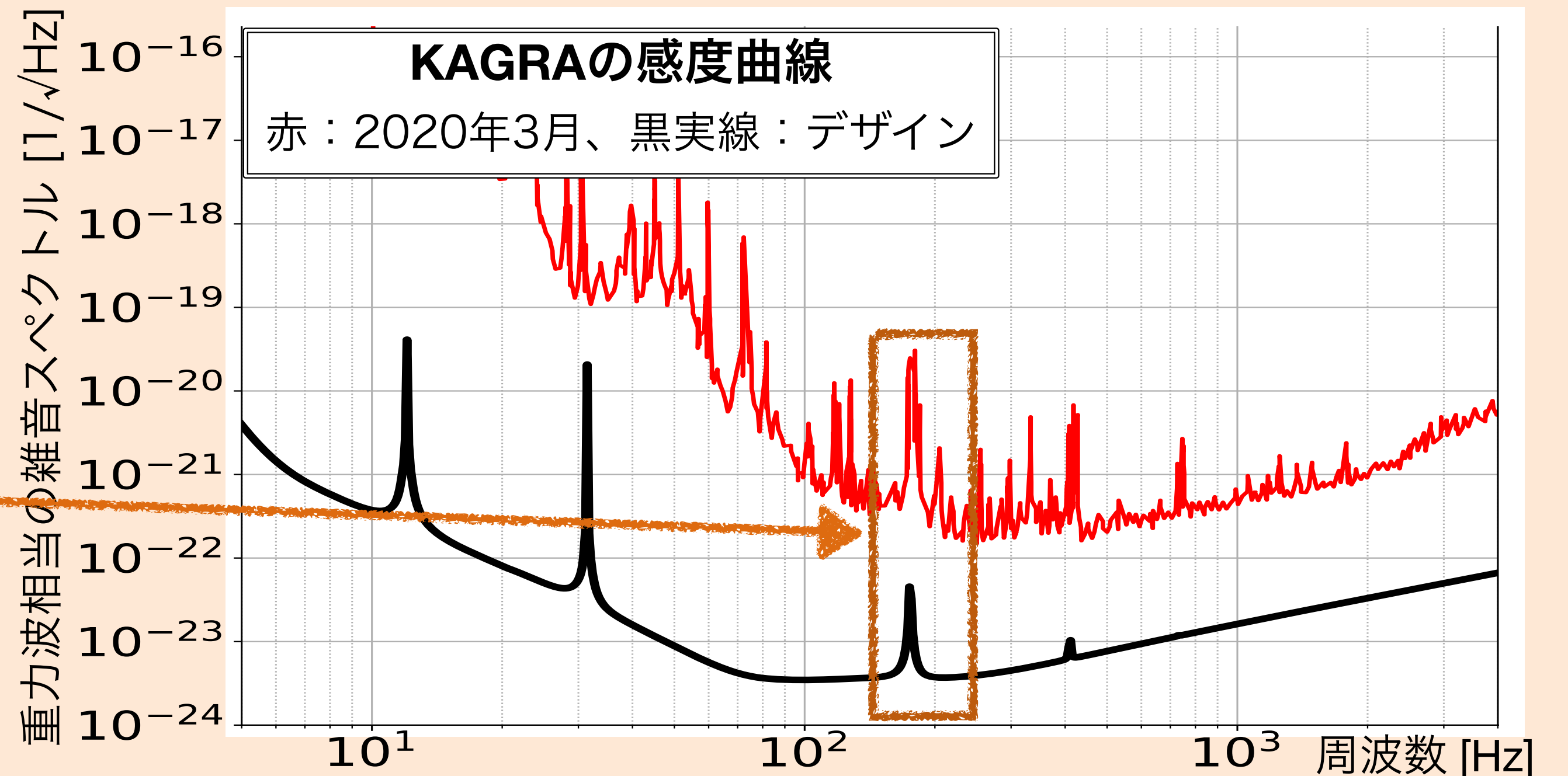
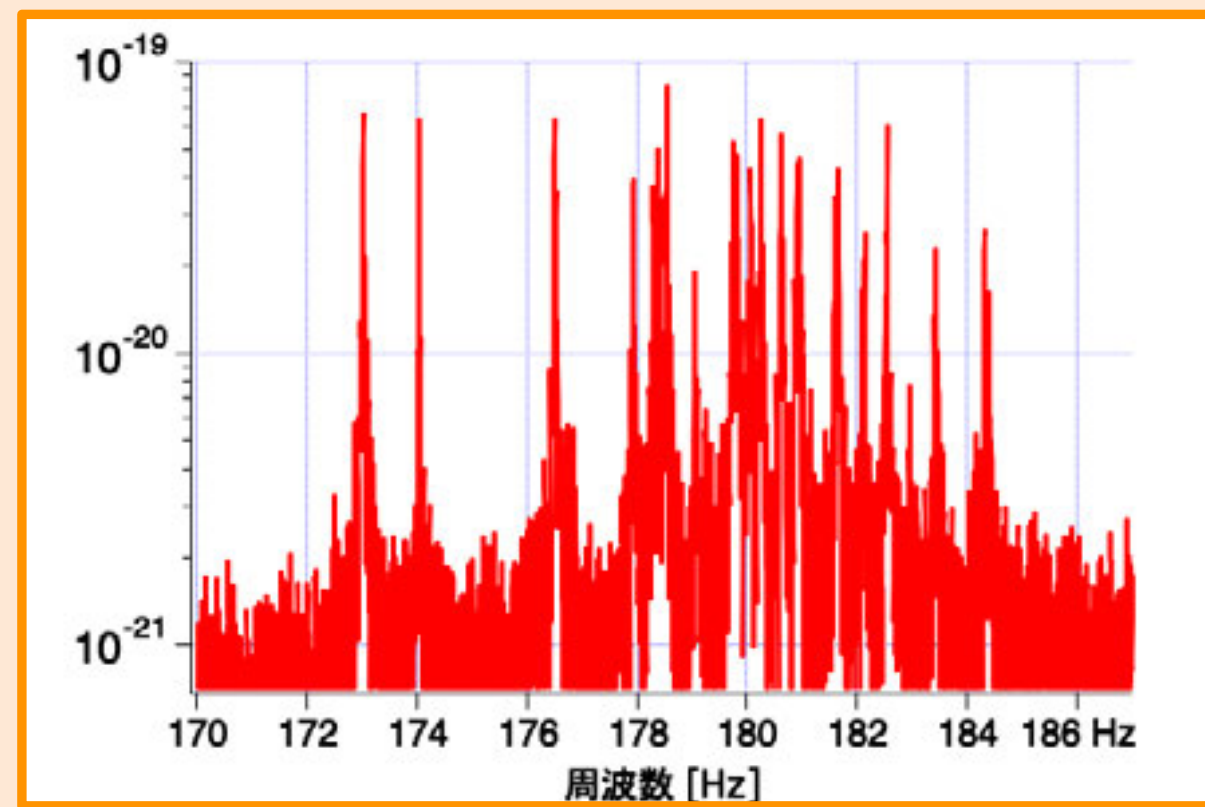


ブラックホールの物理に極めて重要な周波数帯

ところが...



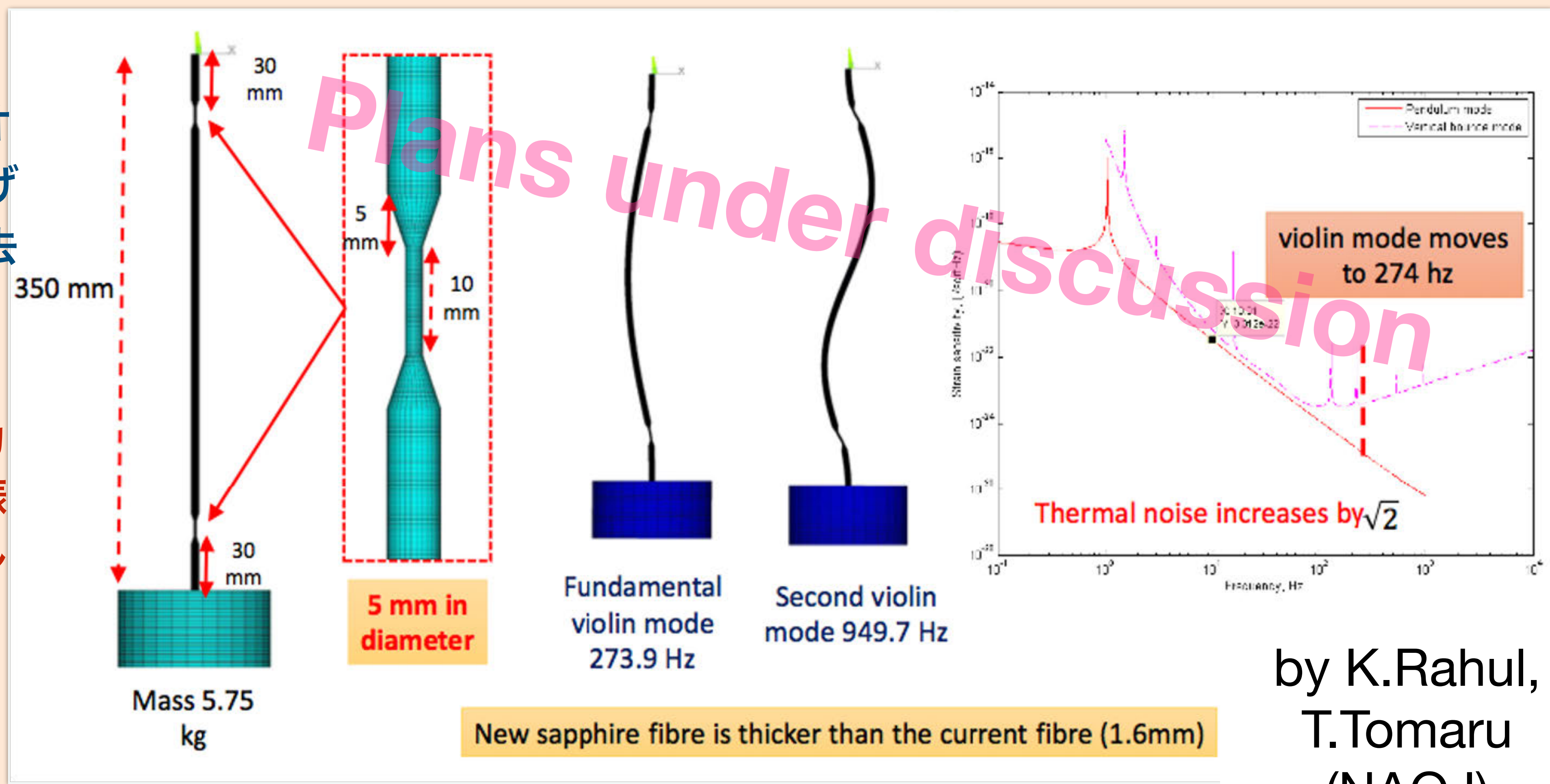
鏡を懸架するファイバーの共鳴振動



ファイバーの改良案

ファイバー改良でヴァイオリンモードの周波数を上げる+データ処理による除去 (+冷却による低減)

→ブラックホールの重力波解析の向上、準固有振動によるブラックホール時空の検証



by K.Rahul,
T.Tomaru
(NAOJ)

さらに低周波の感度を向上してIMBHの準固有振動を狙えるか?

2000Msolarくらいまではいける.(Shinkai, Kanda, Ebisuzaki, APJ 835, no.2, 276 (2017))

まとめ

重力波観測時代

もはや観測運転を行えば必ず見つかる。

週1から毎日へ？

O4開始：2022年12月の予定

多数の観測結果 → 観測例の質量帯が広がってきた。

KAGRAは初イベント(first light)を目指すべき状況！

O4b(第4次観測後半)にどこまで感度を良くできるか？

KAGRAのマルチメッセンジャーへの貢献は十分チャンスがある。

全天探査、実効的な観測時間（3台以上同時）には必ず寄与できる。

感度が上がれば、パラメータ（方向、重力波源の物理量）決定精度の向上にも寄与できる。