



KAGRA 実験による重力波観測が拓く マルチメッセンジャー天文学

神田展行（大阪市立大学）, KAGRAコラボレーション

Nobuyuki Kanda on behalf of the KAGRA collab.

日本物理学会2021年秋季大会

シンポジウム：ニュートリノ・重力波時代のマルチメッセンジャー天文学の展望

講演番号：17aW1-6

重力波検出のこれまで・これから

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)

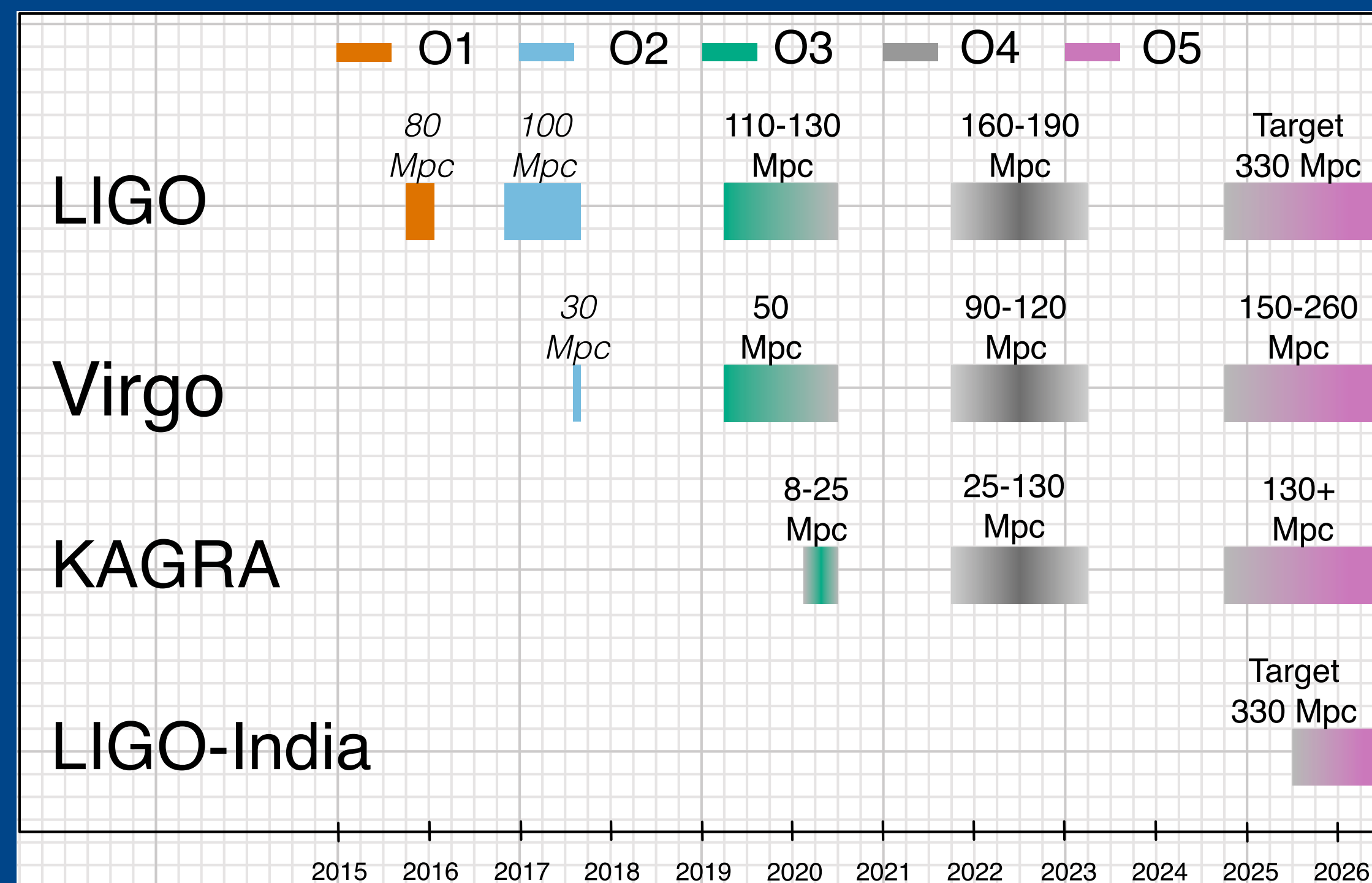


Fig. 2 The planned sensitivity evolution and observing runs of the aLIGO, AdV and KAGRA detectors

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

重力波検出のこれまで・これから

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)

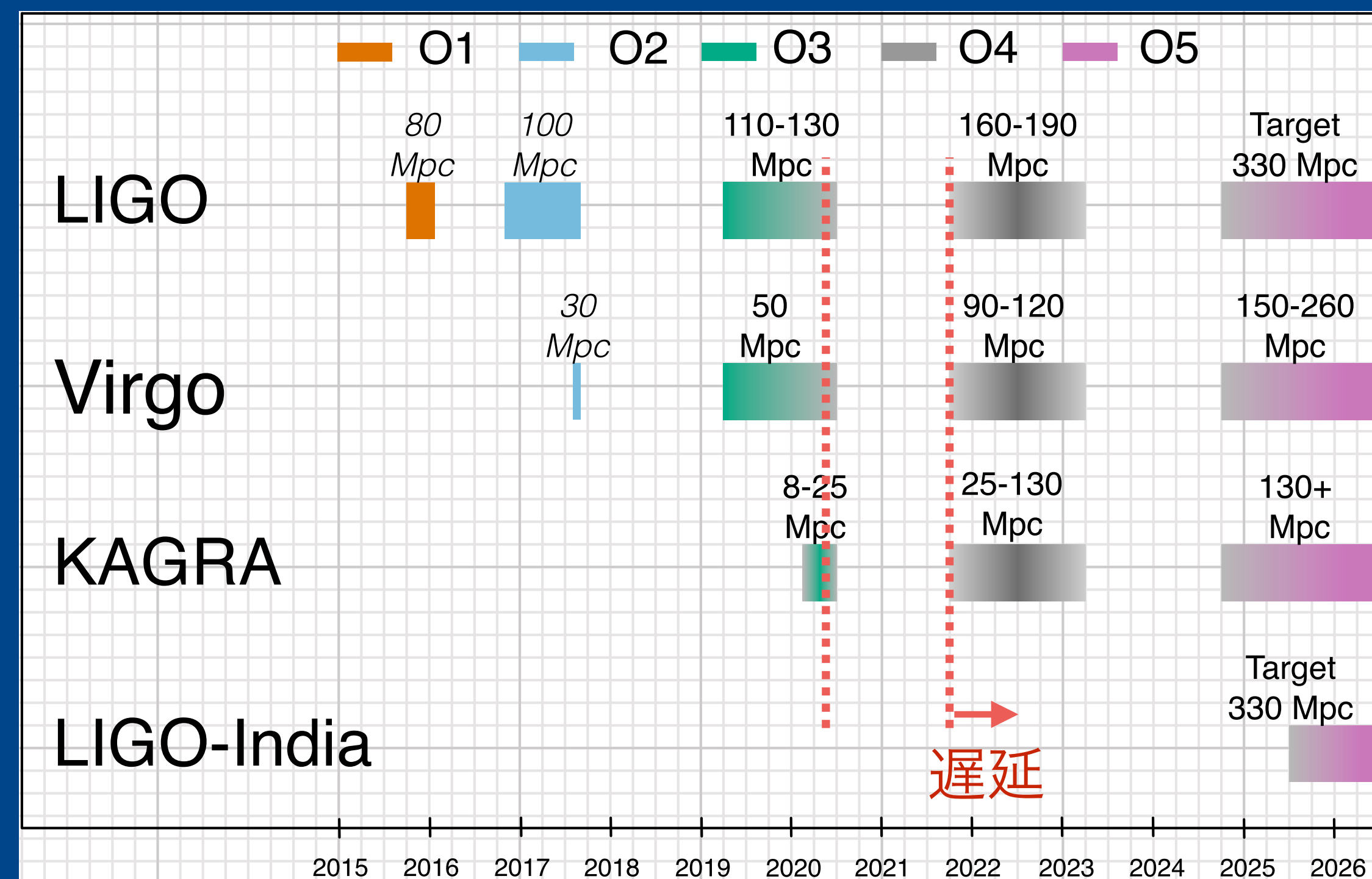
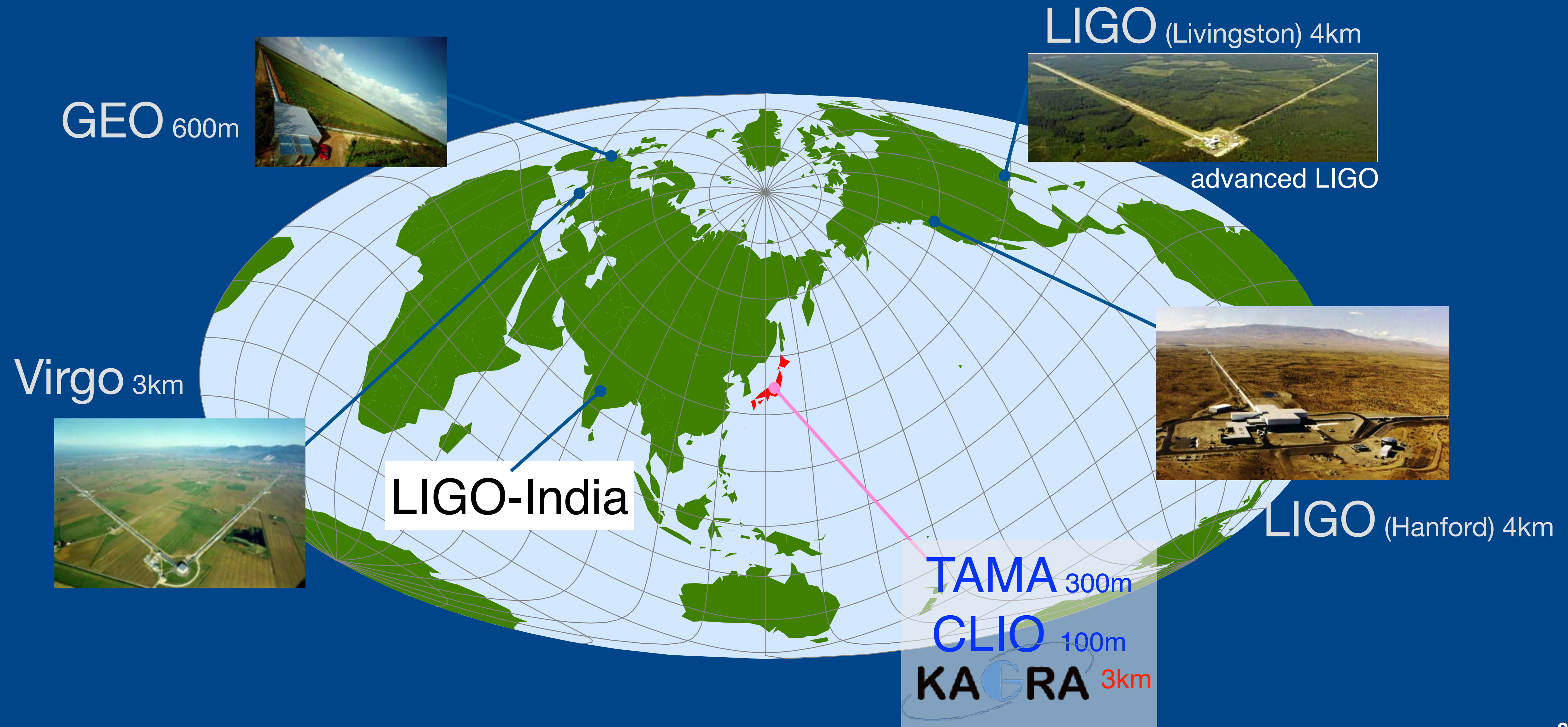


Fig. 2 The planned sensitivity evolution and observing runs of the aLIGO, AdV and KAGRA detectors

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

世界の重力波検出器（レーザー干渉計型）



KAGRAの現状～O4へ

O3/O3-GK におけるKAGRA

現状＝O4準備

O5にむけて

マルチメッセンジャー観測で期待される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が重力波観測に一層寄与するための検討

高周波の改良案

NS-NS合体フェーズの波形

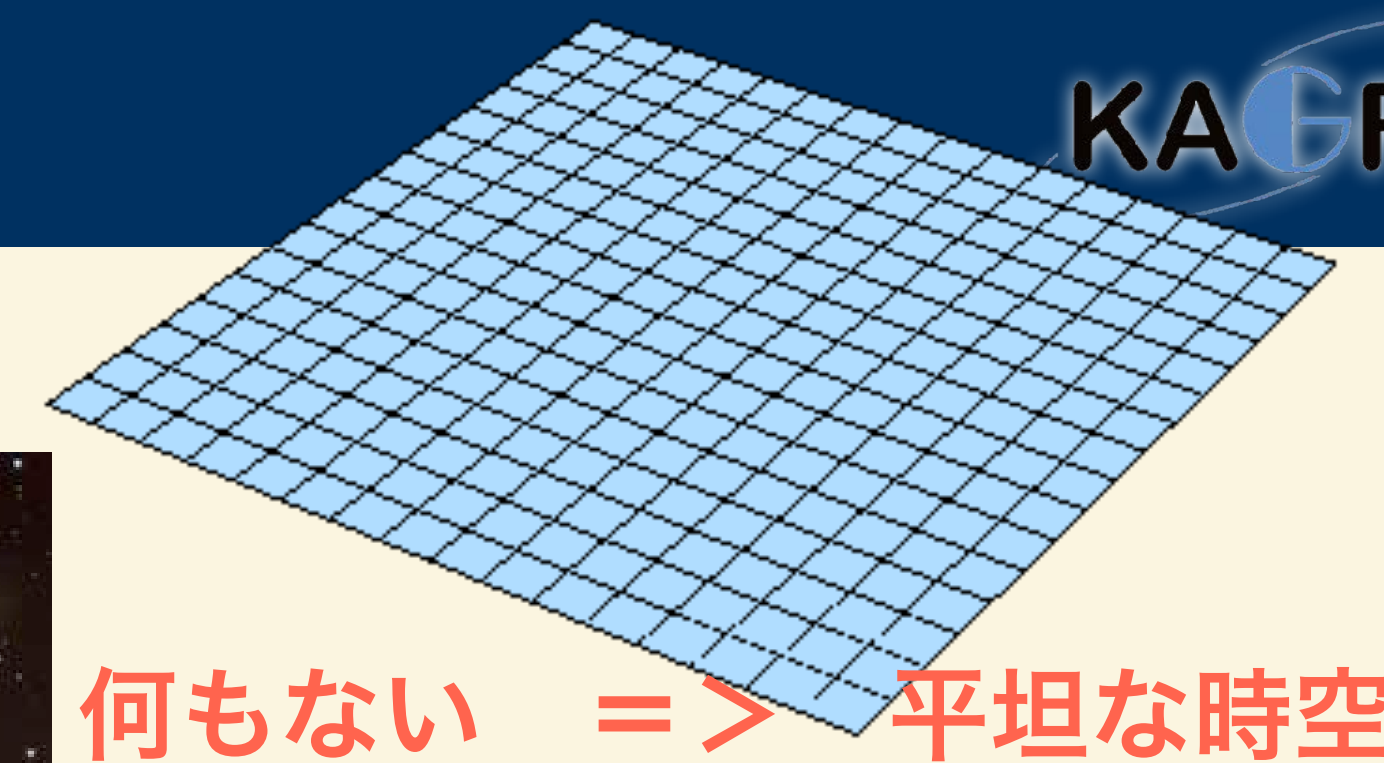
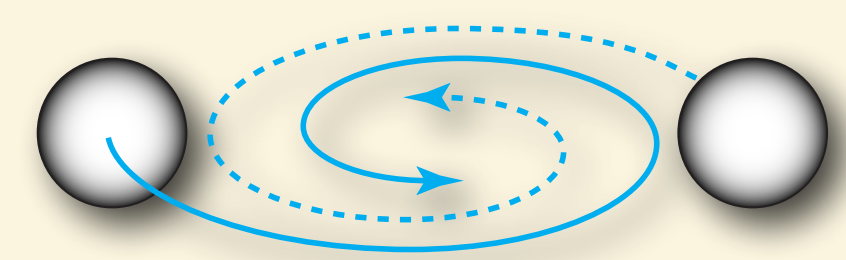
ファイバー共鳴改良案

BH準固有振動の重力波

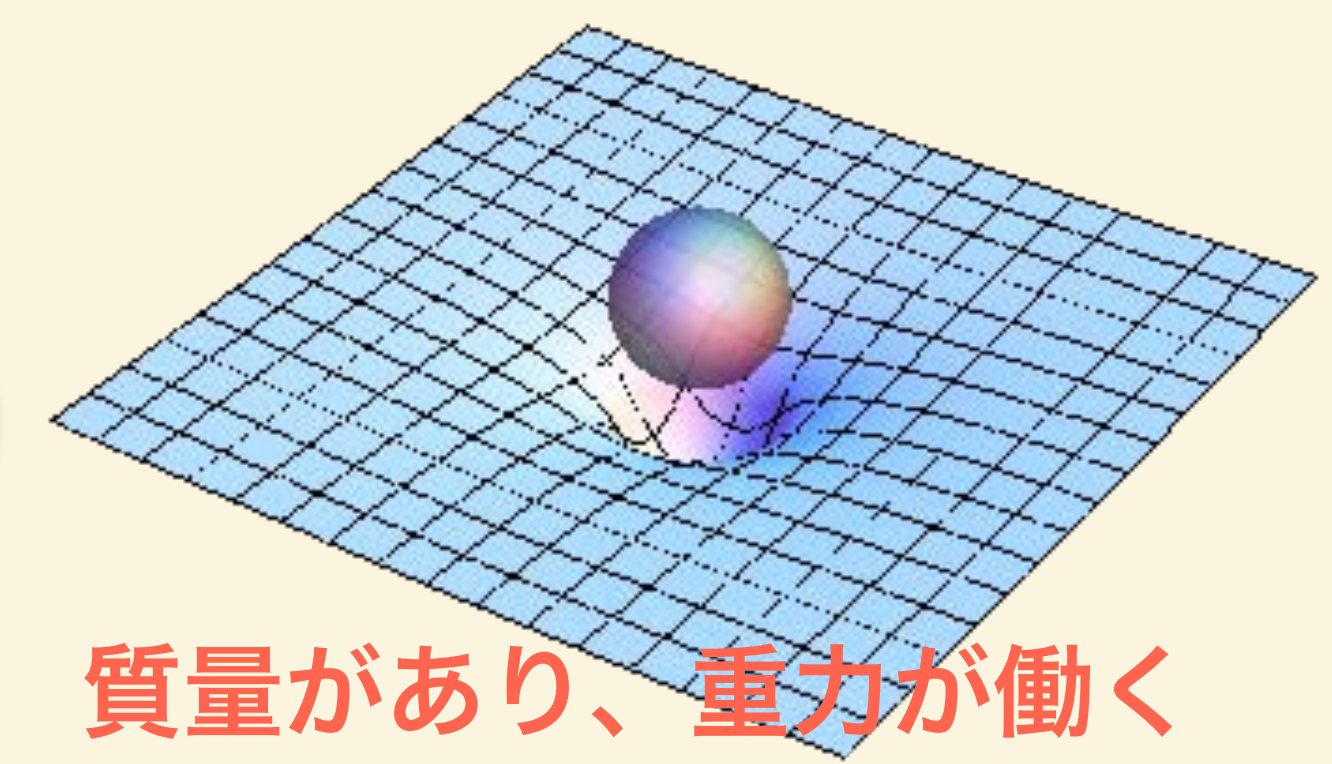
重力波とその観測方法

重力波とは？

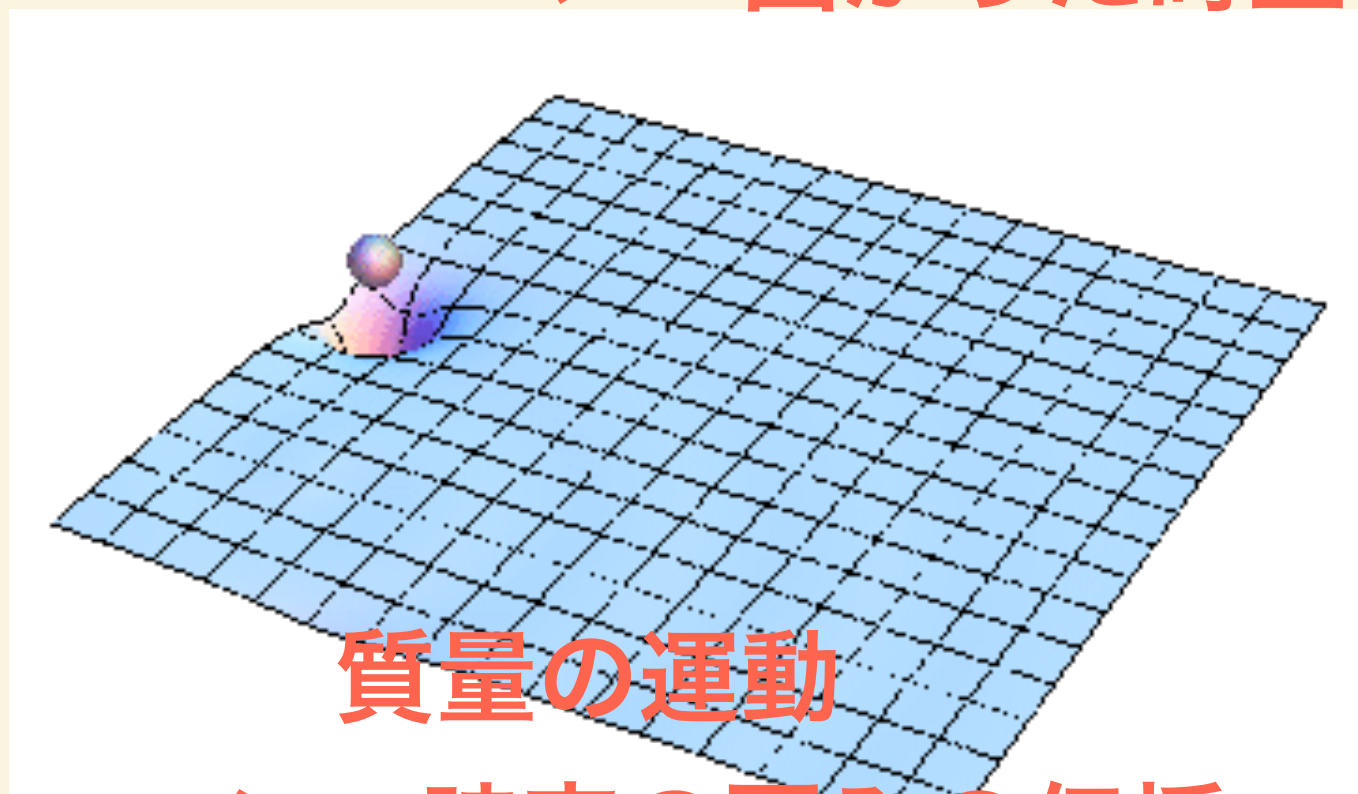
アインシュタインが一般相対性理論で予言した時空の歪みの波
ブラックホールのように、強い重力場から発生する。
超新星爆発やコンパクト連星などの劇的な天体現象で発生する



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

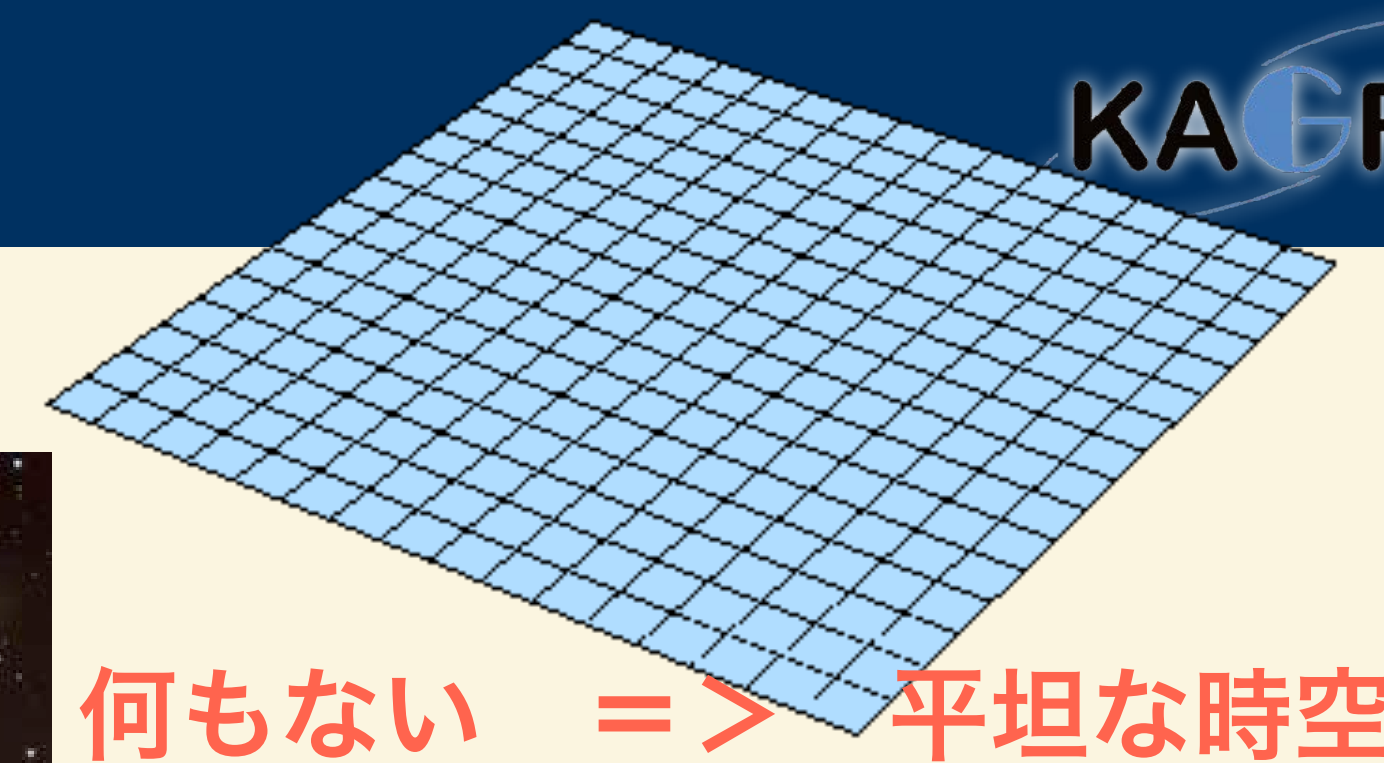
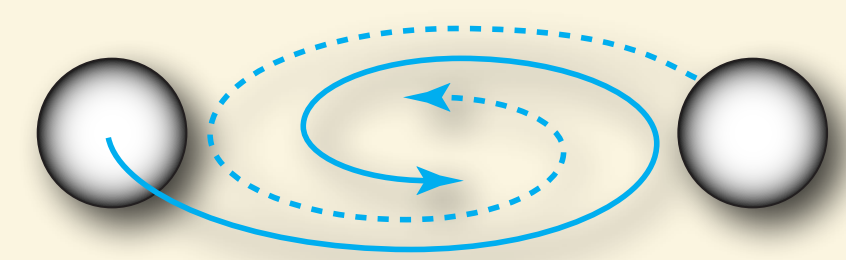


質量の運動
=> 時空の歪みの伝播
重力波

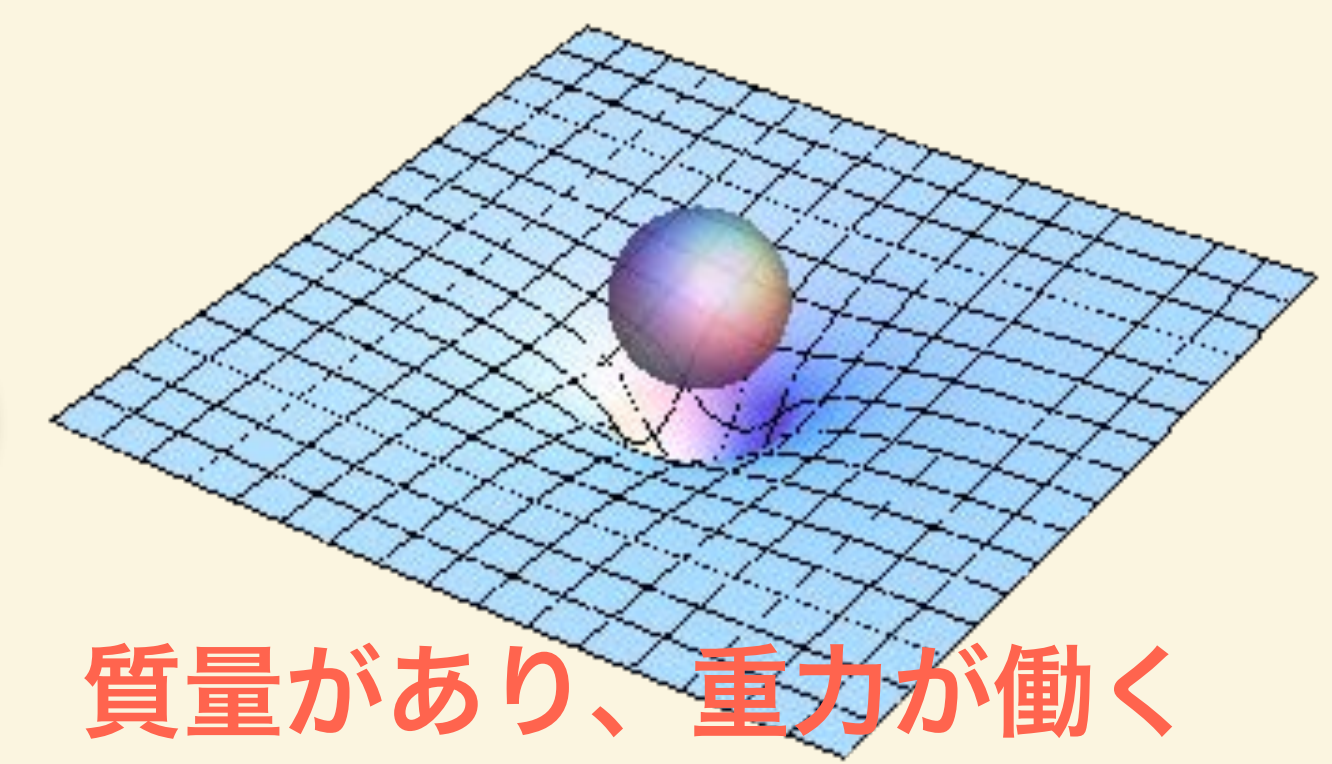
重力波とその観測方法

重力波とは？

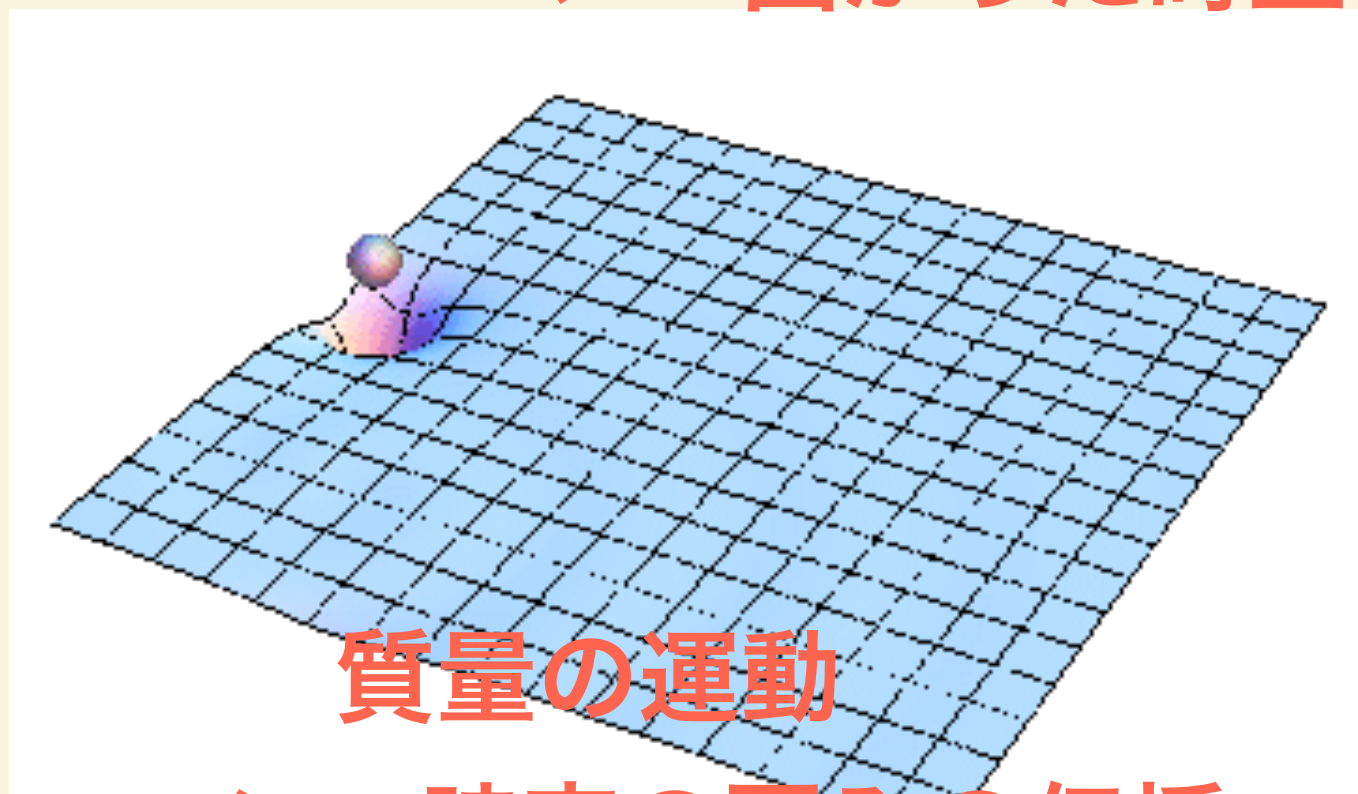
アインシュタインが一般相対性理論で予言した時空の歪みの波
ブラックホールのように、強い重力場から発生する。
超新星爆発やコンパクト連星などの劇的な天体現象で発生する



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



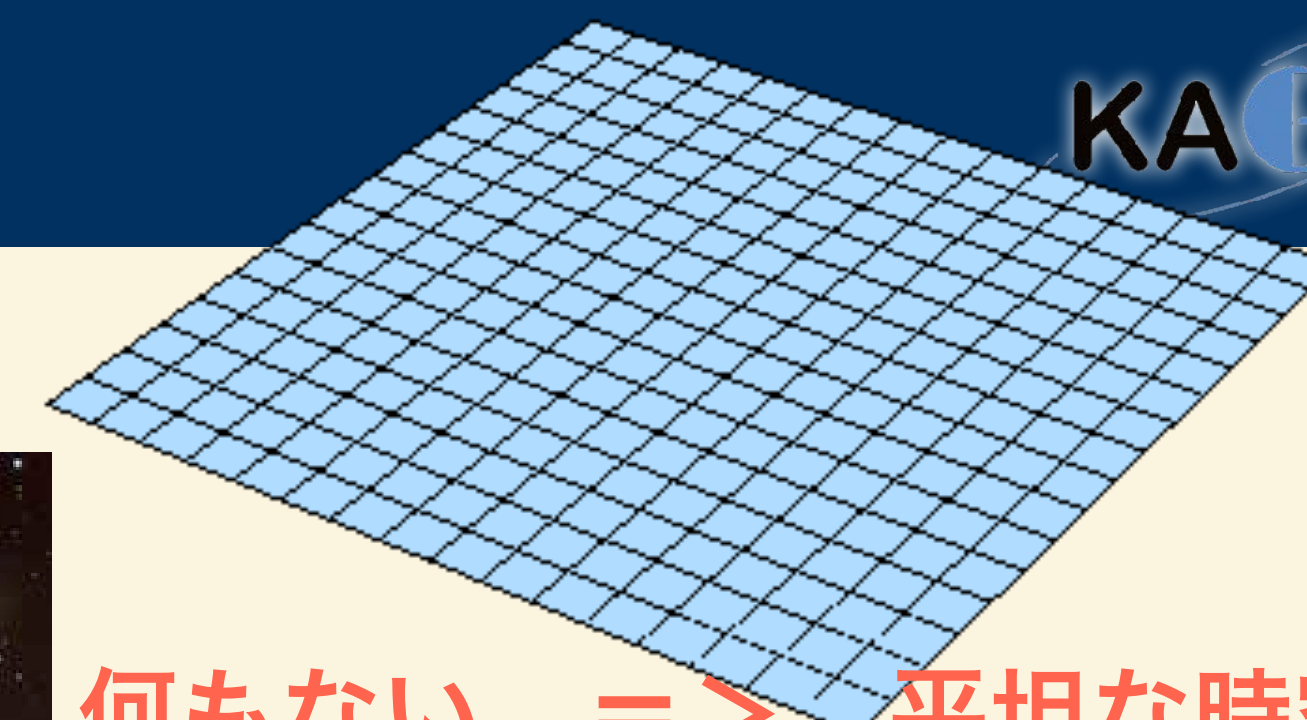
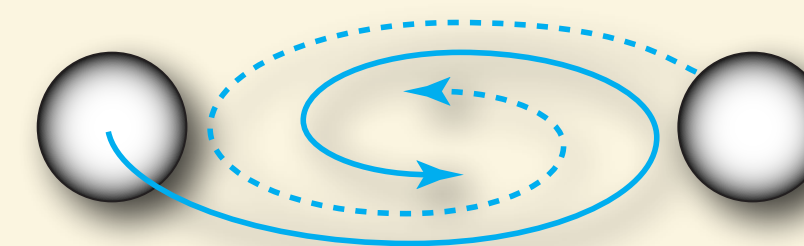
質量の運動
=> 時空の歪みの伝播
重力波

重力波とその観測方法

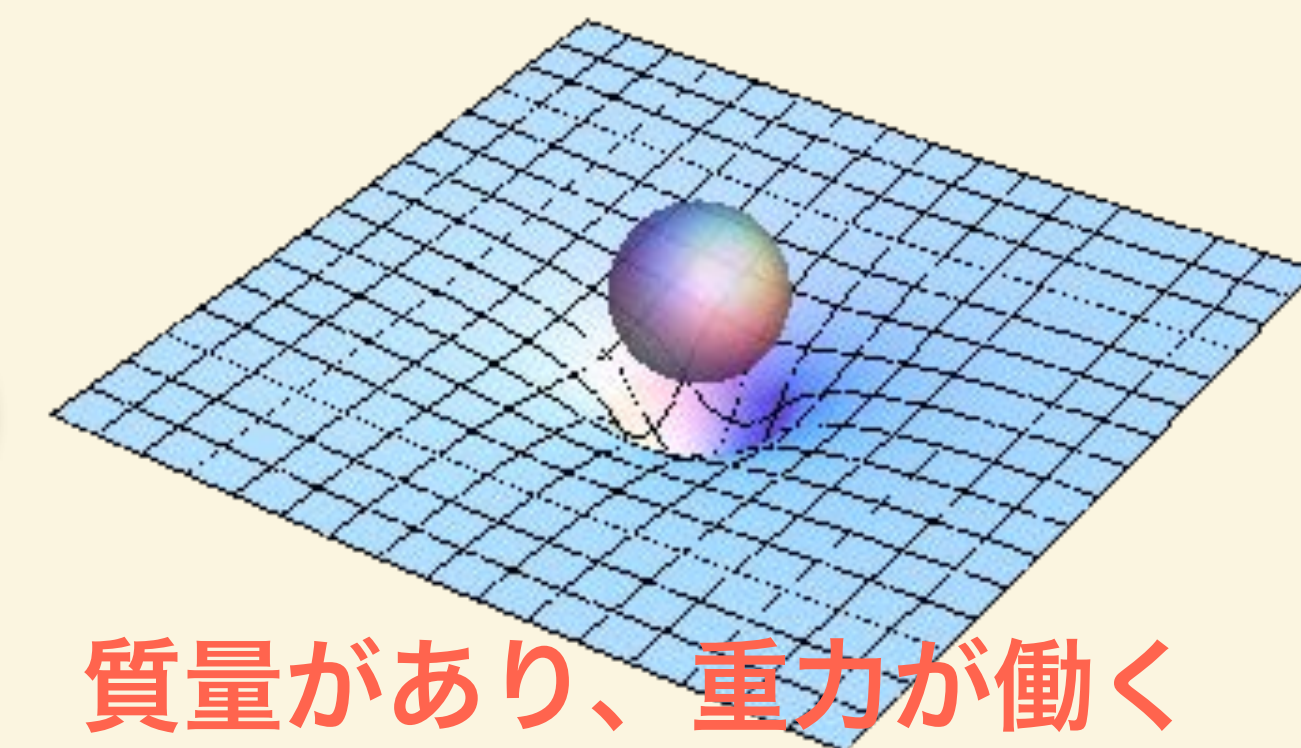
重力波とは？

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

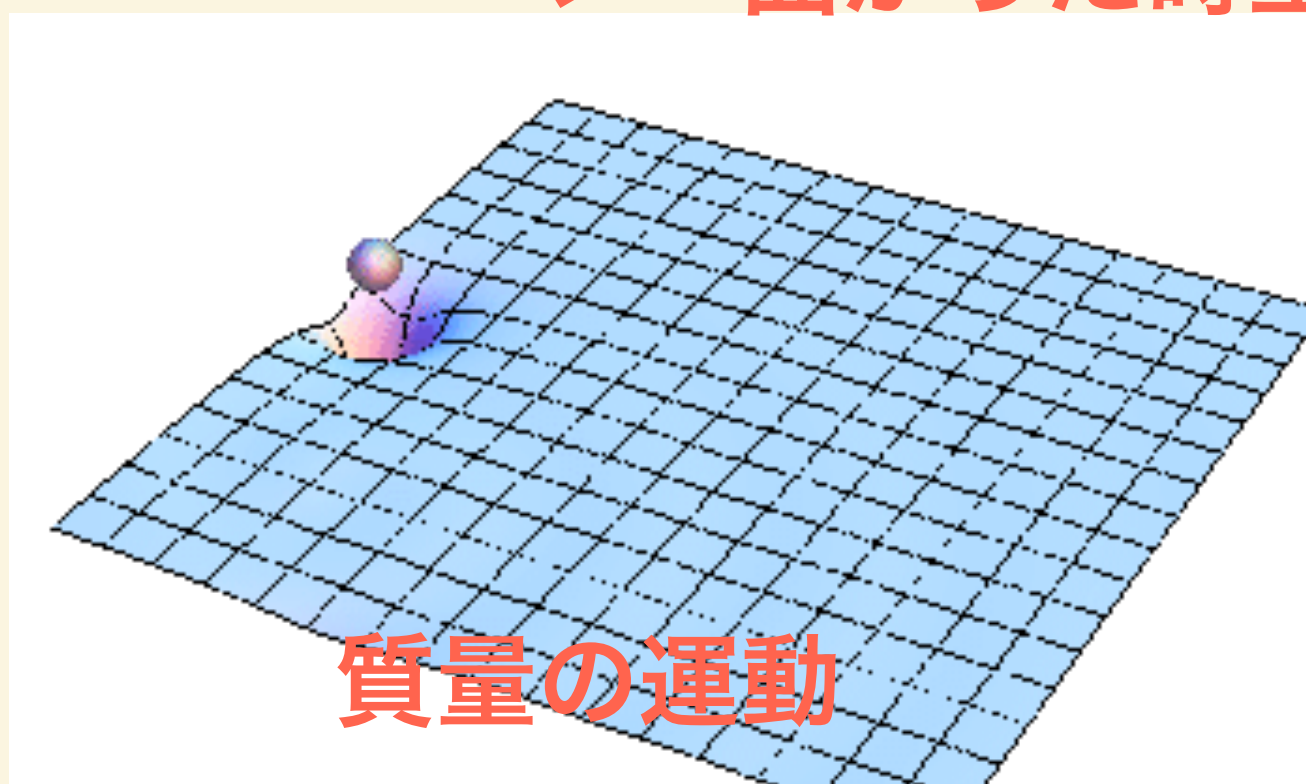
ブラックホールのように、強い重力場から発生する。
超新星爆発やコンパクト連星などの劇的な天体現象で発生する



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



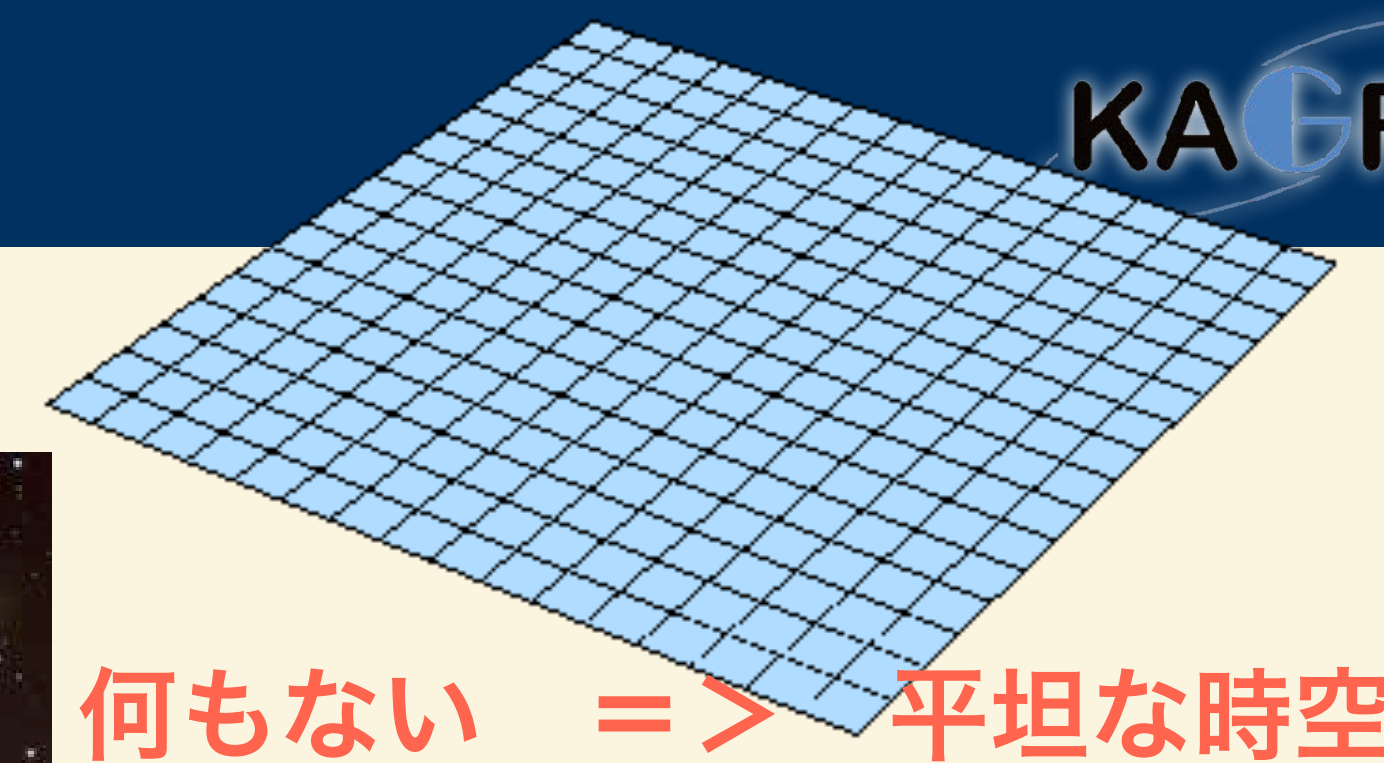
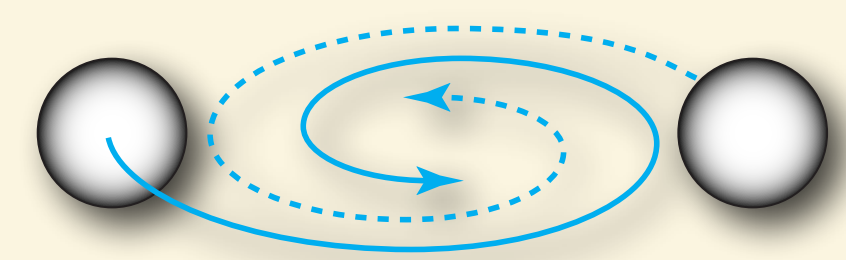
質量の運動
=> 時空の歪みの伝播
重力波

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。

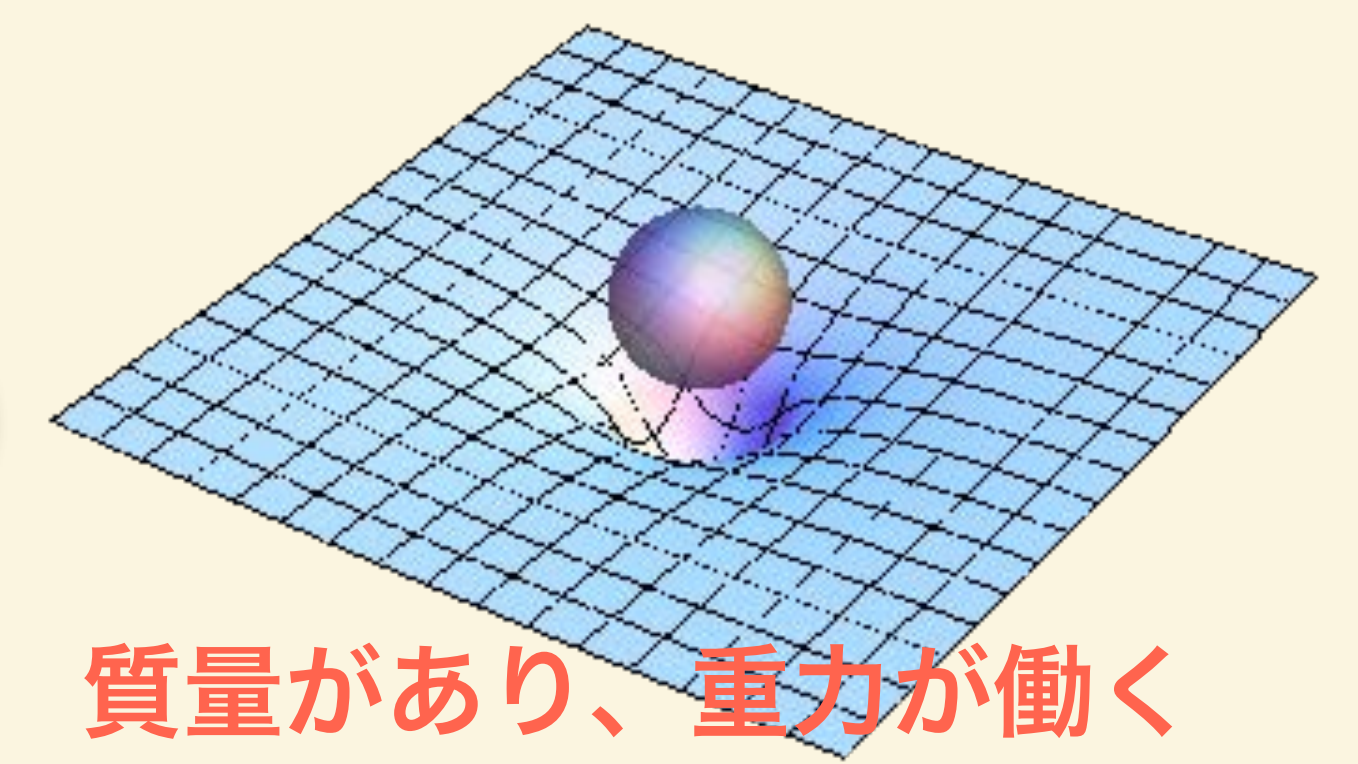
重力波とその観測方法

重力波とは？

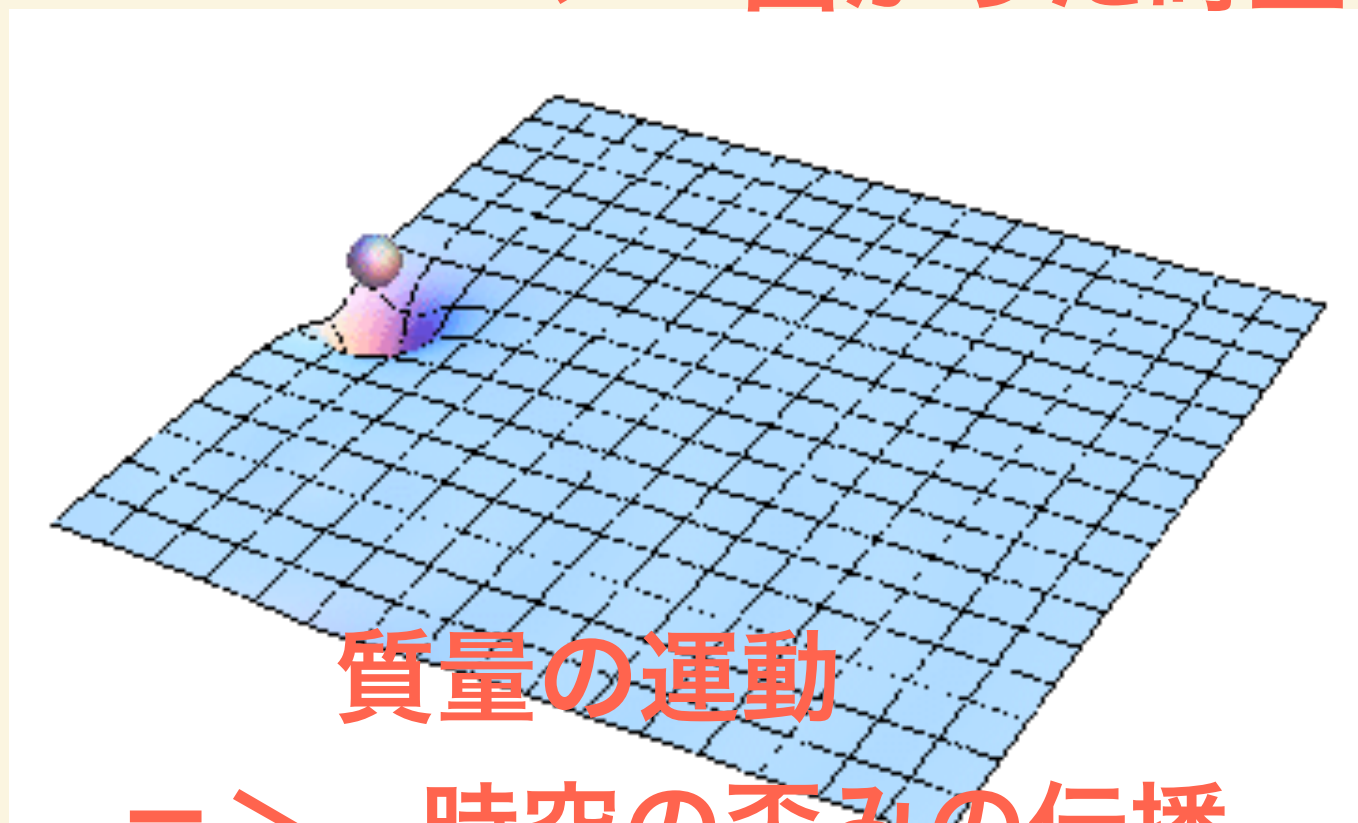
アインシュタインが一般相対性理論で予言した時空の歪みの波
ブラックホールのように、強い重力場から発生する。
超新星爆発やコンパクト連星などの劇的な天体現象で発生する



何もない => 平坦な時空

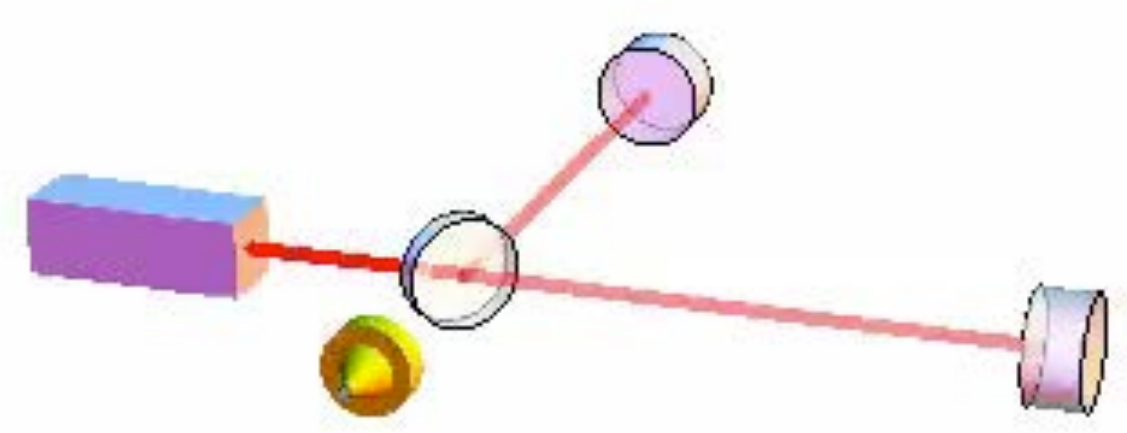


質量があり、重力が働く
=> 曲がった時空



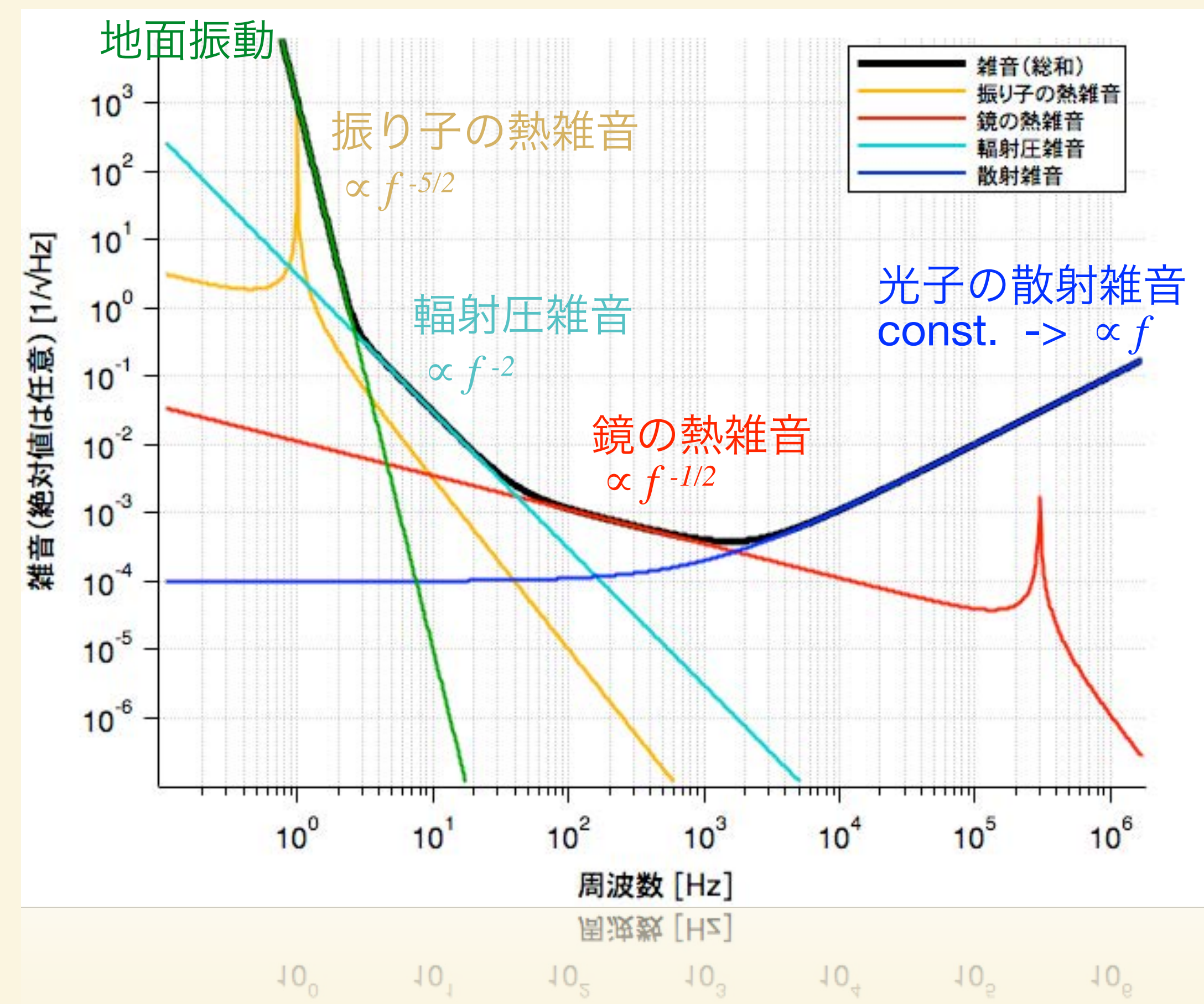
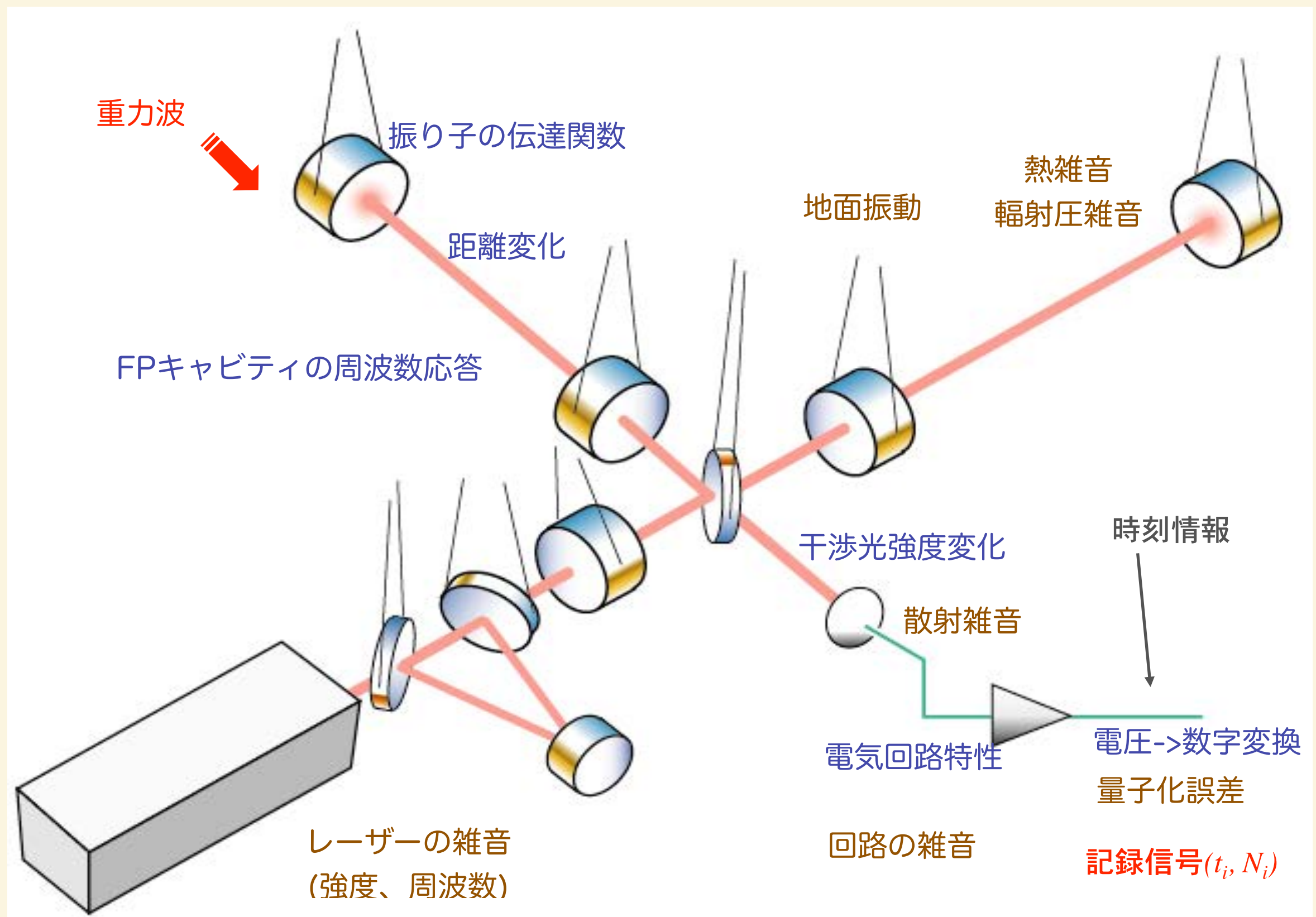
質量の運動
=> 時空の歪みの伝播
重力波

重力波



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

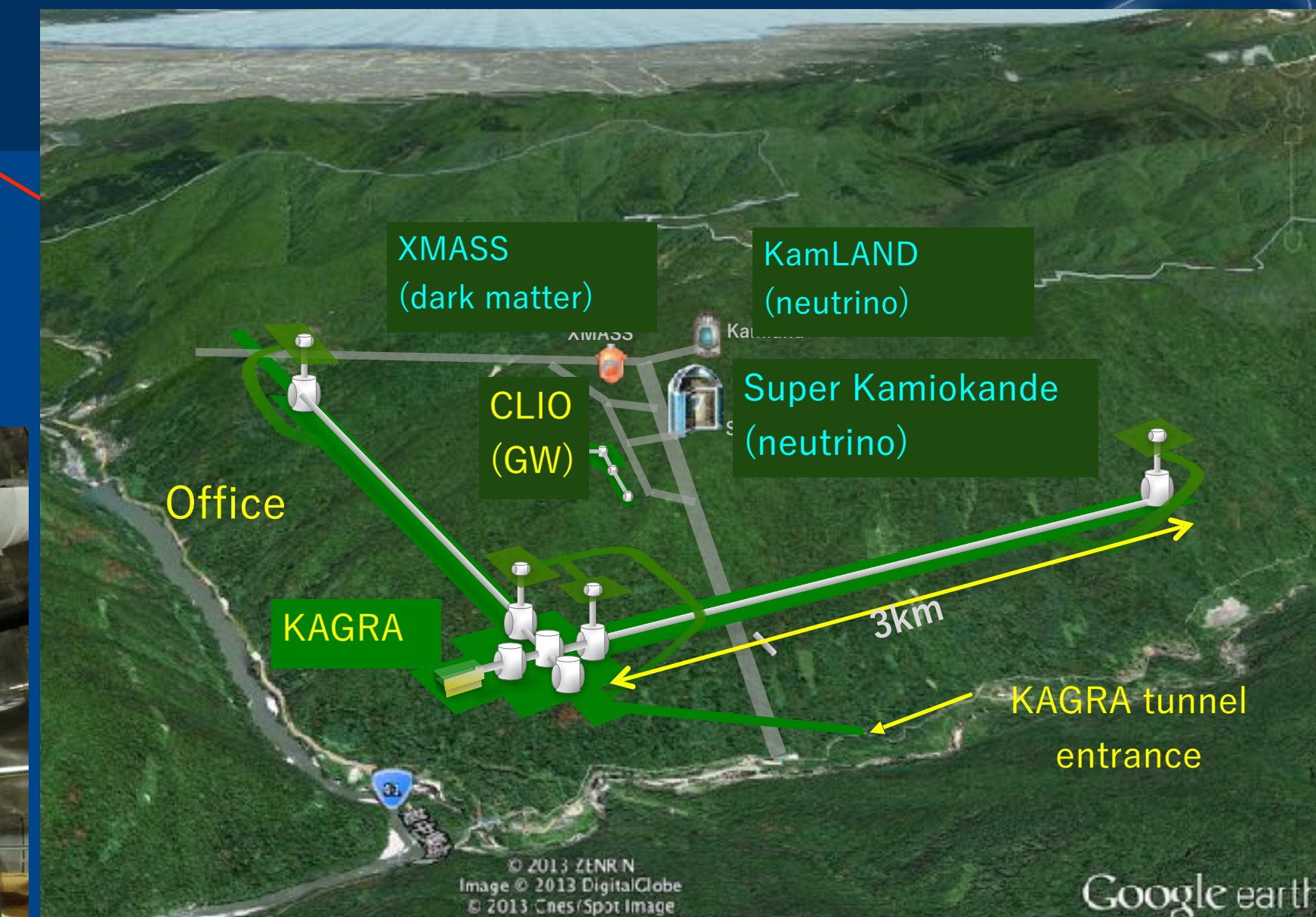
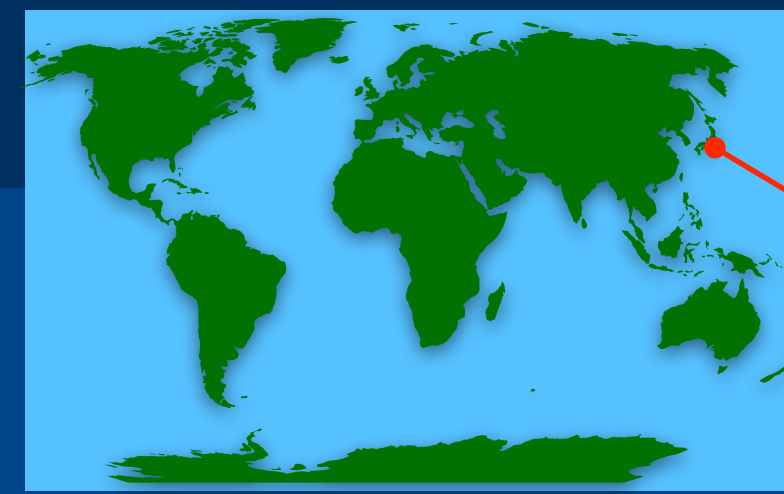
低温鏡(~20K, サファイヤ基材) ← 熱雑音、将来の第3世代重力波検出器も低温鏡が考えられている。

地下サイト ← 地面振動

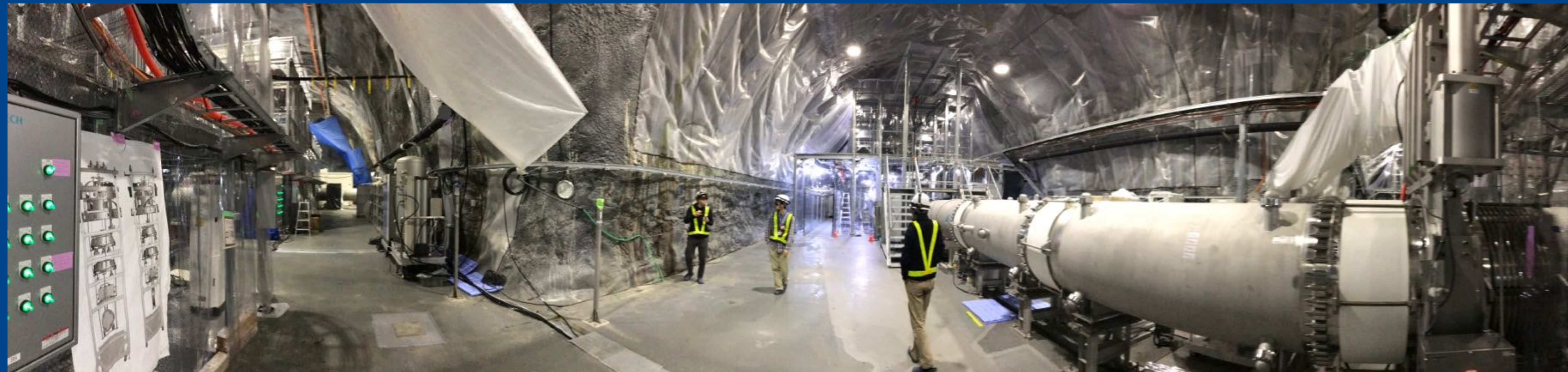
重力波観測実験 KAGRA

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。

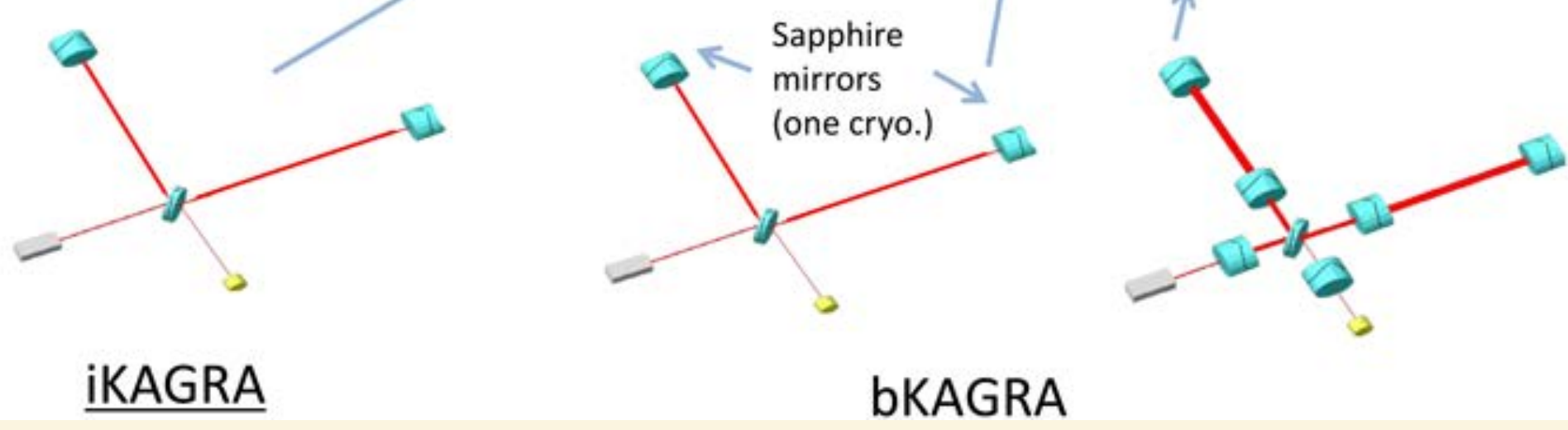
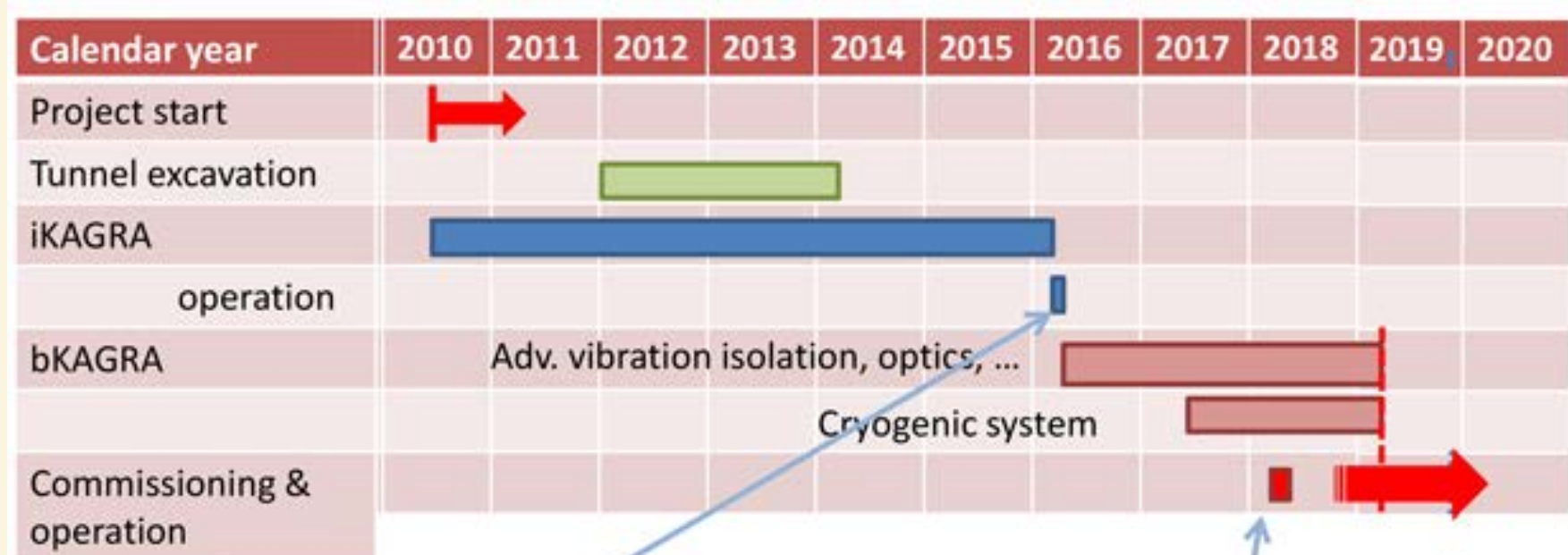
+

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。

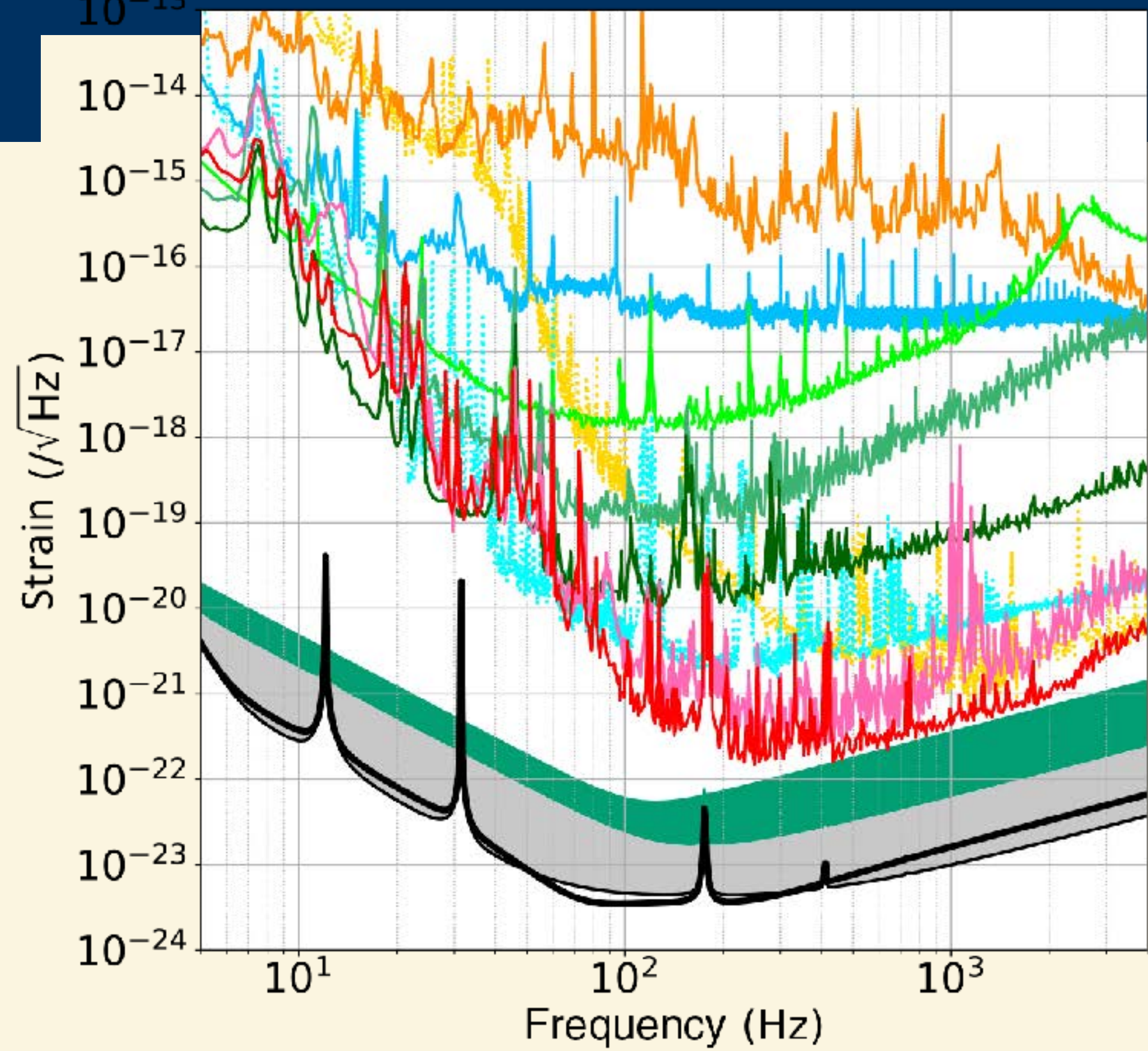


コラボレーションミーティング2018春@大阪市立大

Milestones of KAGRA



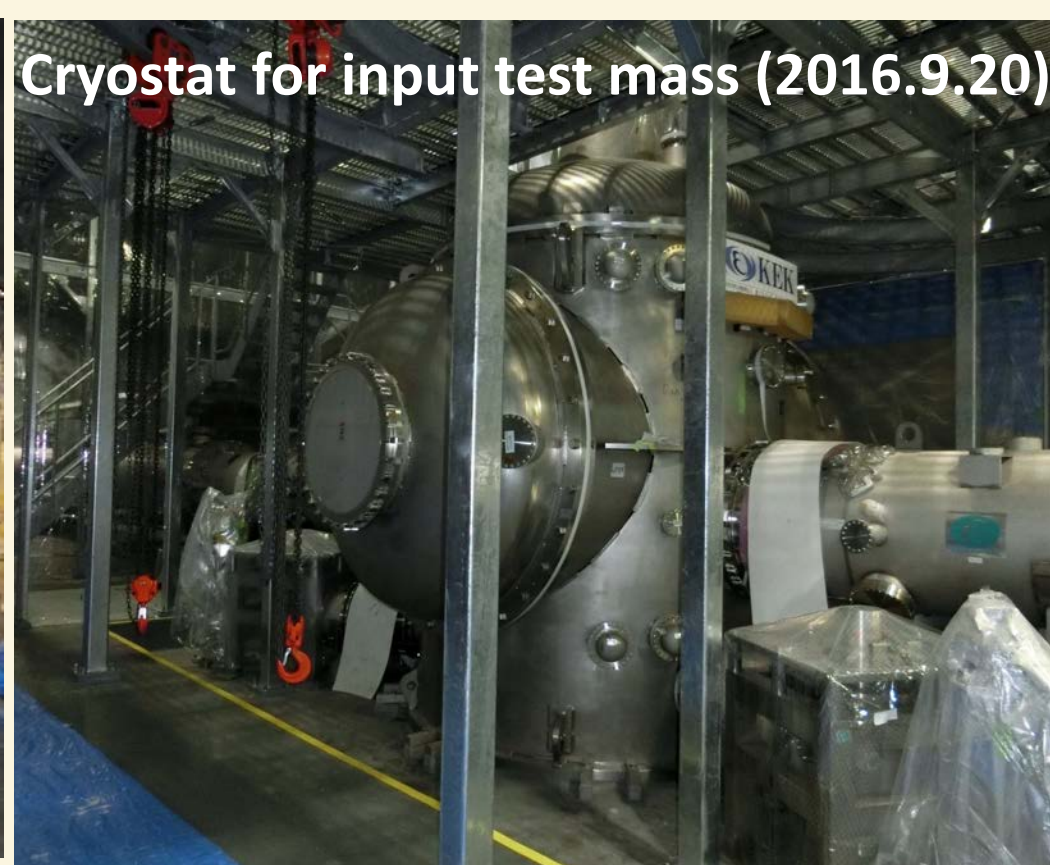
重力波相当の雑音レベル



- TAMA (2008)
- CLIO (2010)
- iKAGRA (2016)
- bKAGRA Phase 1 (2018)
- FPMI (Aug 2019)
- FPMI (Nov 2019)
- FPMI (Dec 2019)
- PRFPMI (Feb 2020)
- PRFPMI (Mar 2020)
- bKAGRA Design BRSE
- bKAGRA Design DRSE
- O3 target (8-25 Mpc)
- O4 target (25-130 Mpc)

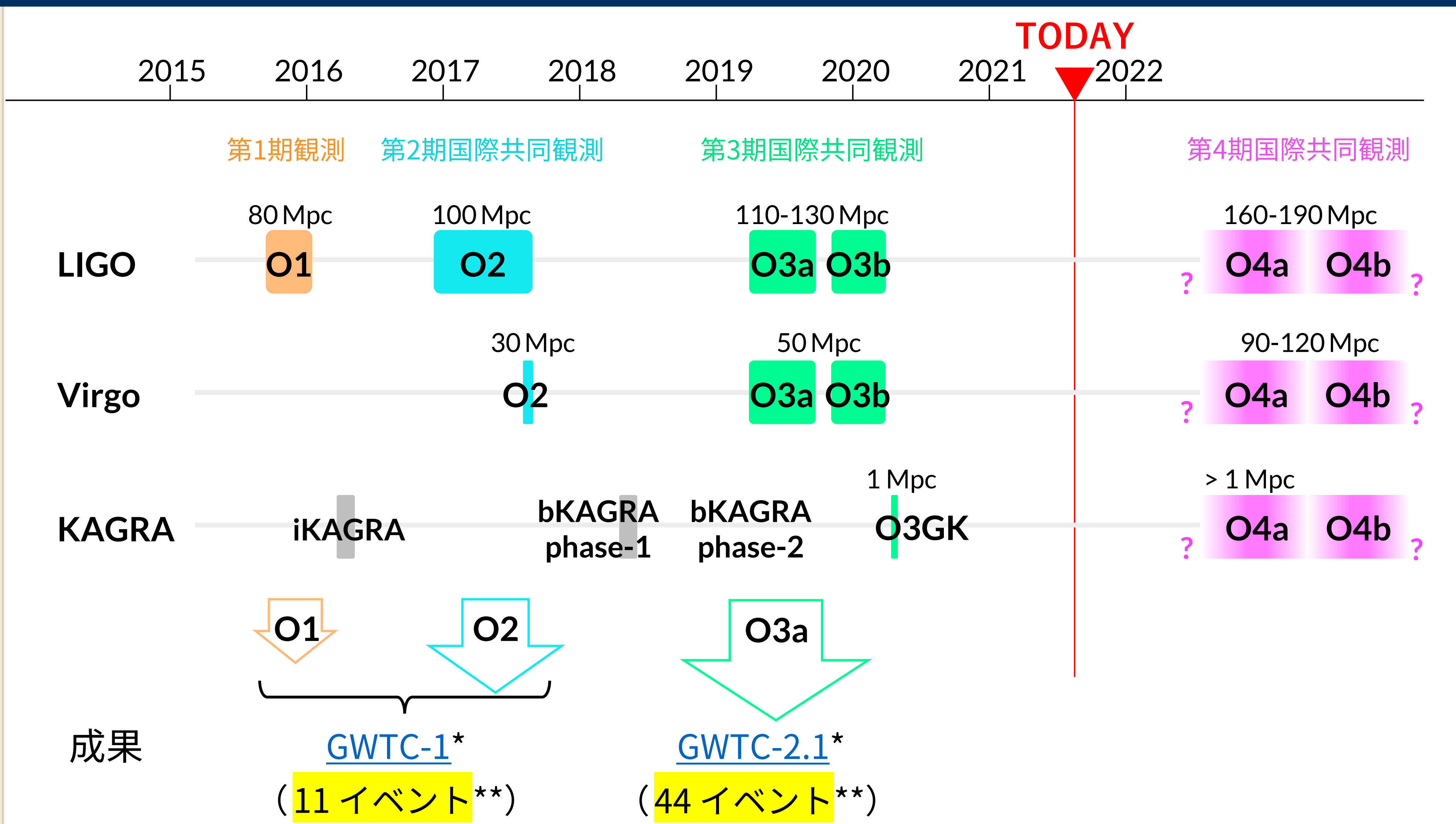
PTEP 2020, 05A101

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）



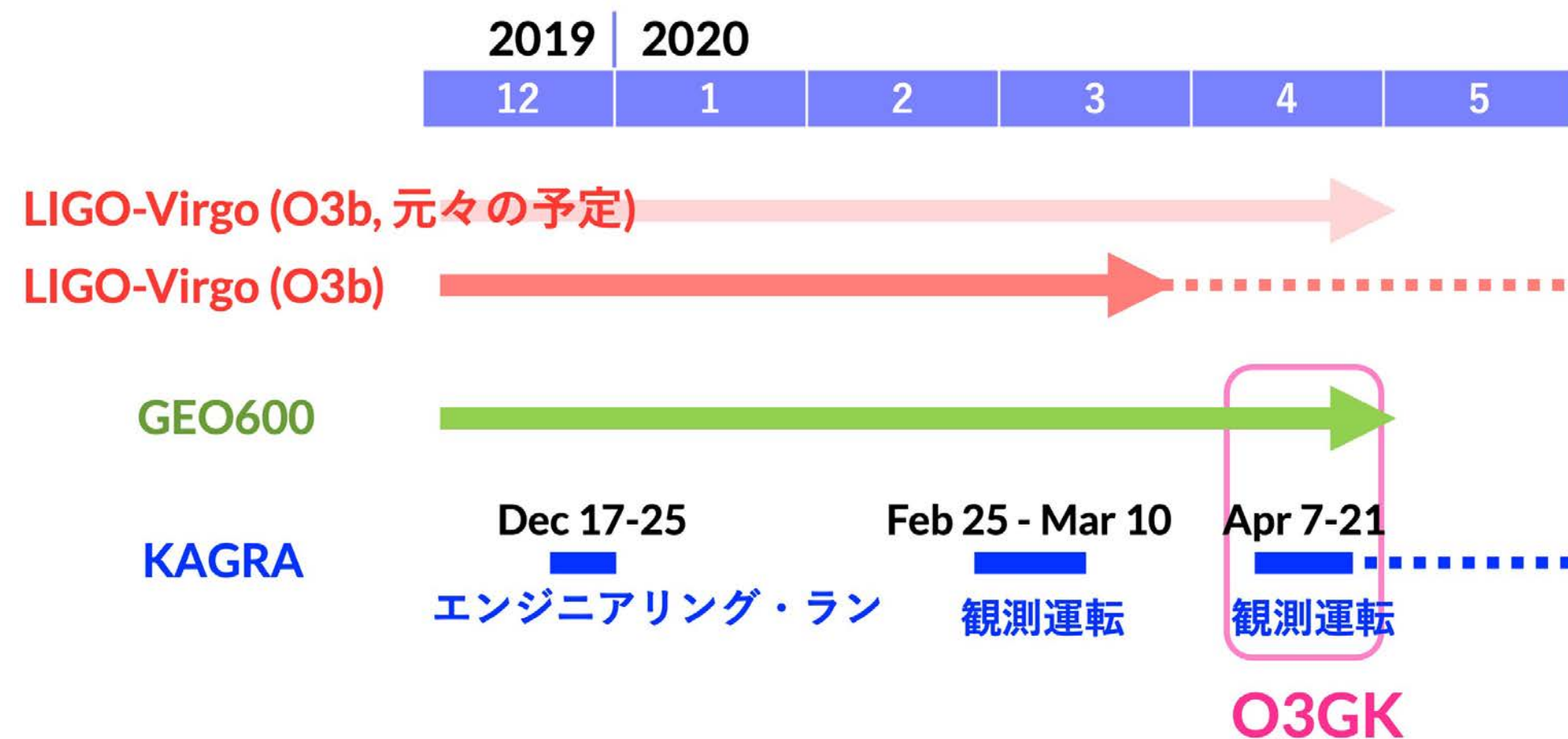
* GWTC: Gravitational-Wave Transient Catalog (突発性重力波カタログ)

** 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.

T.Sawada(14pW3-1)

O3GK

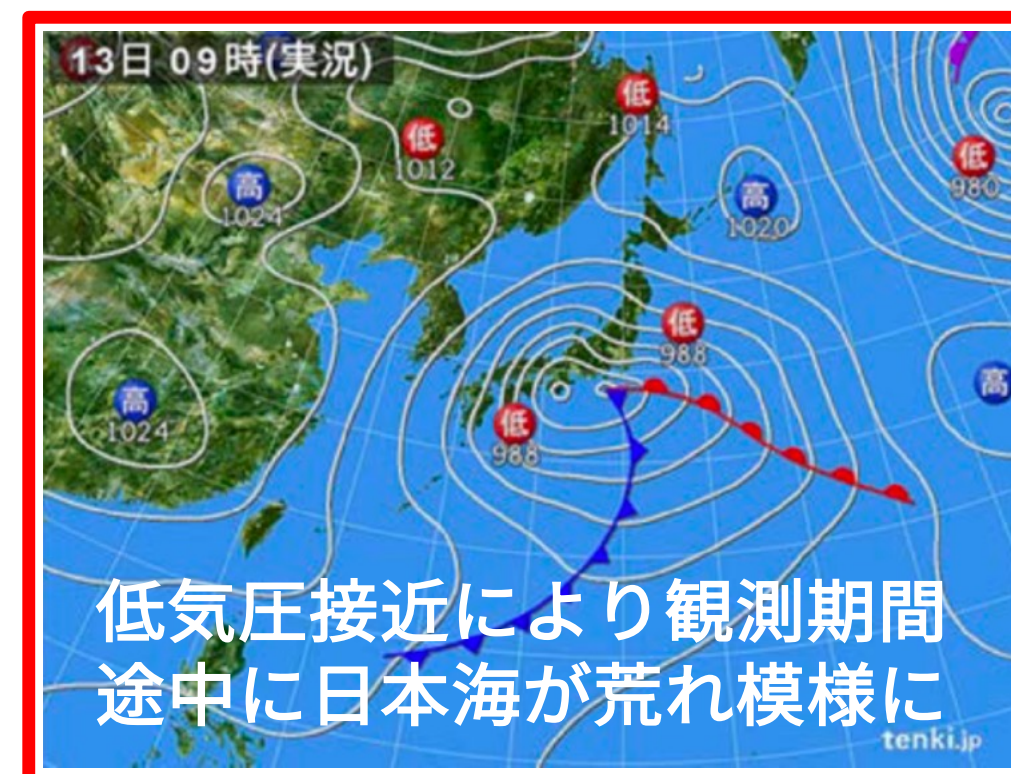
第3期国際共同観測 (Observation 3) 期間の
GEO600-KAGRAによる共同観測



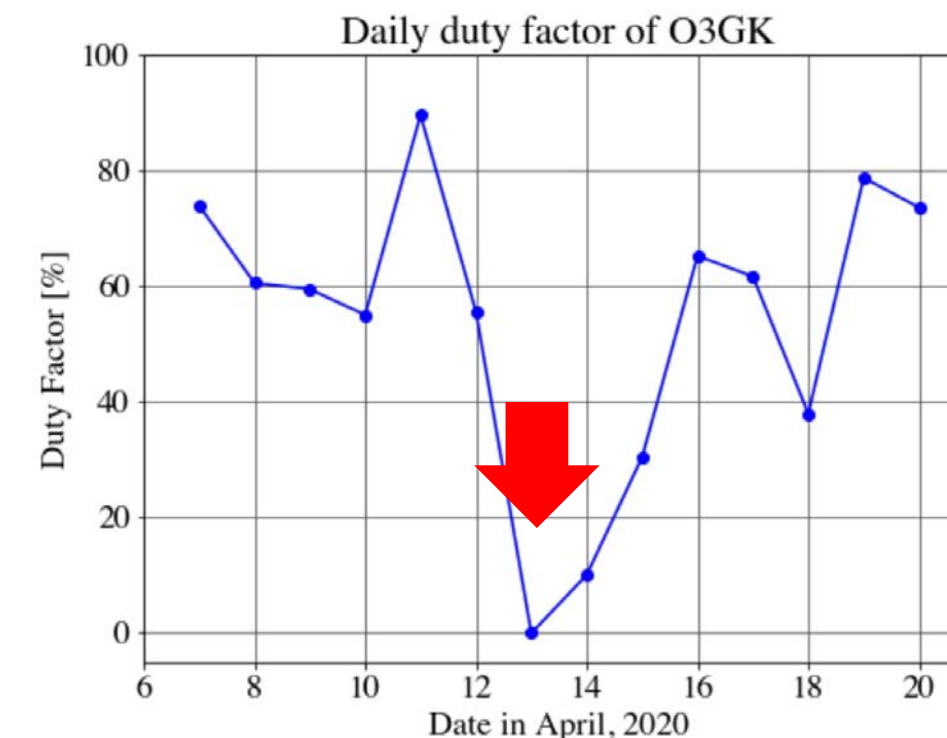
- LIGO-Virgo: COVID-19の影響により、2020年3月に予定を早めての観測終了
- GEO600-KAGRA: 共同観測を実施
2020年4月7日 8:00 UTC - 4月21日 0:00 UTC

到達感度

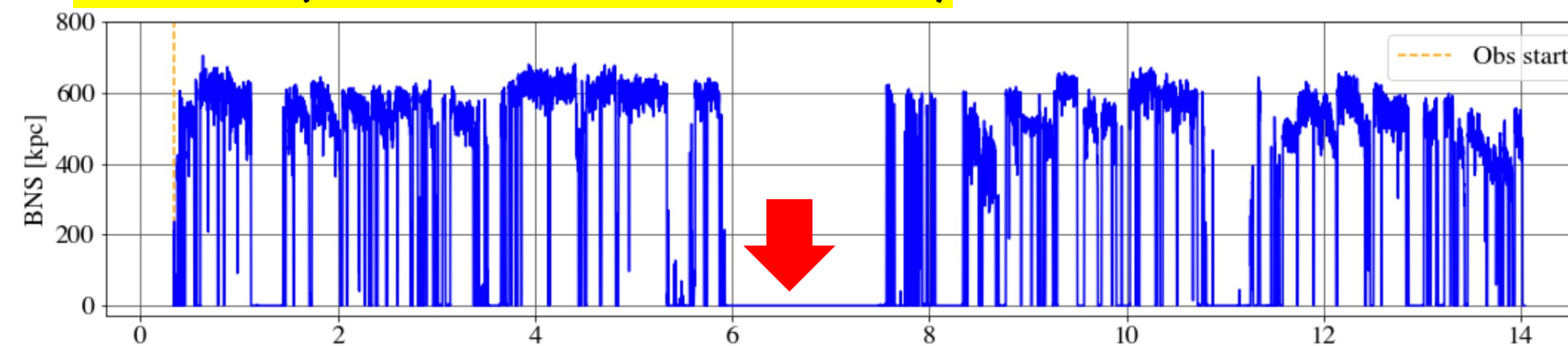
- 平均 0.5 ~ 0.6 Mpc 程度
(連星中性子星の合体に換算)
- 最大 ~ 1 Mpc
(ただし、試験運転中)



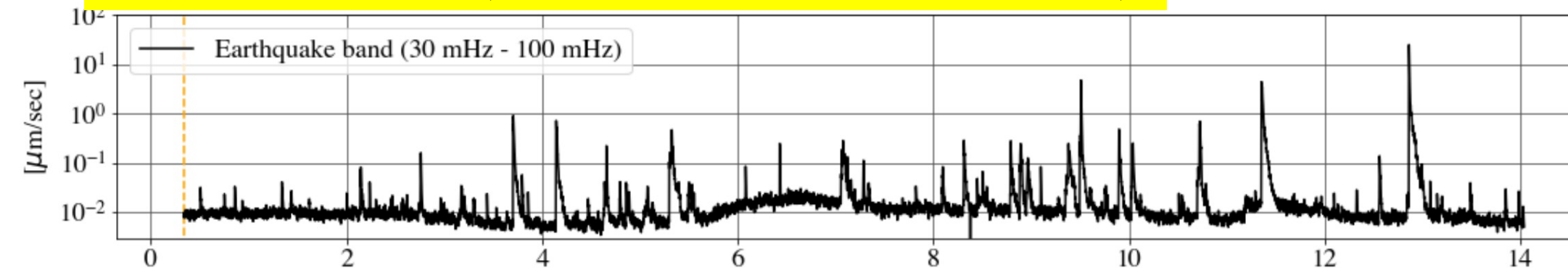
有効観測時間: 約60%程度



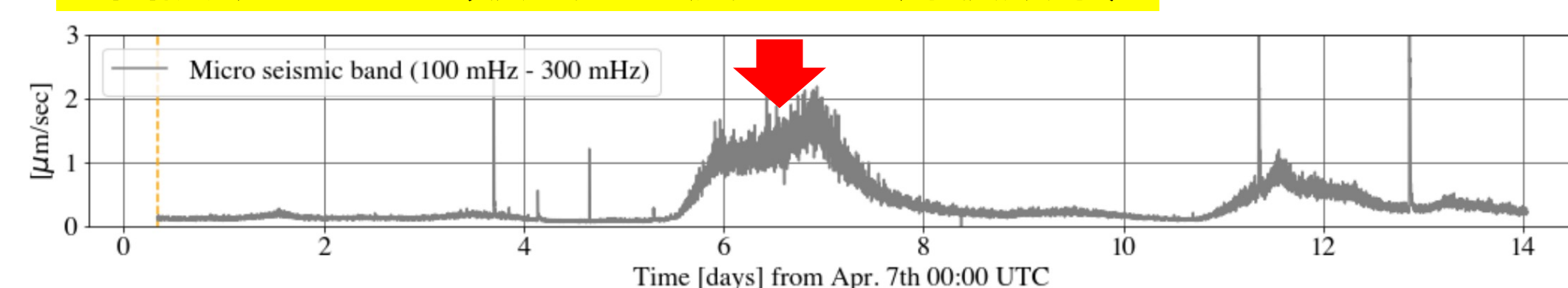
観測感度 (連星中性子星合体に対して)



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、

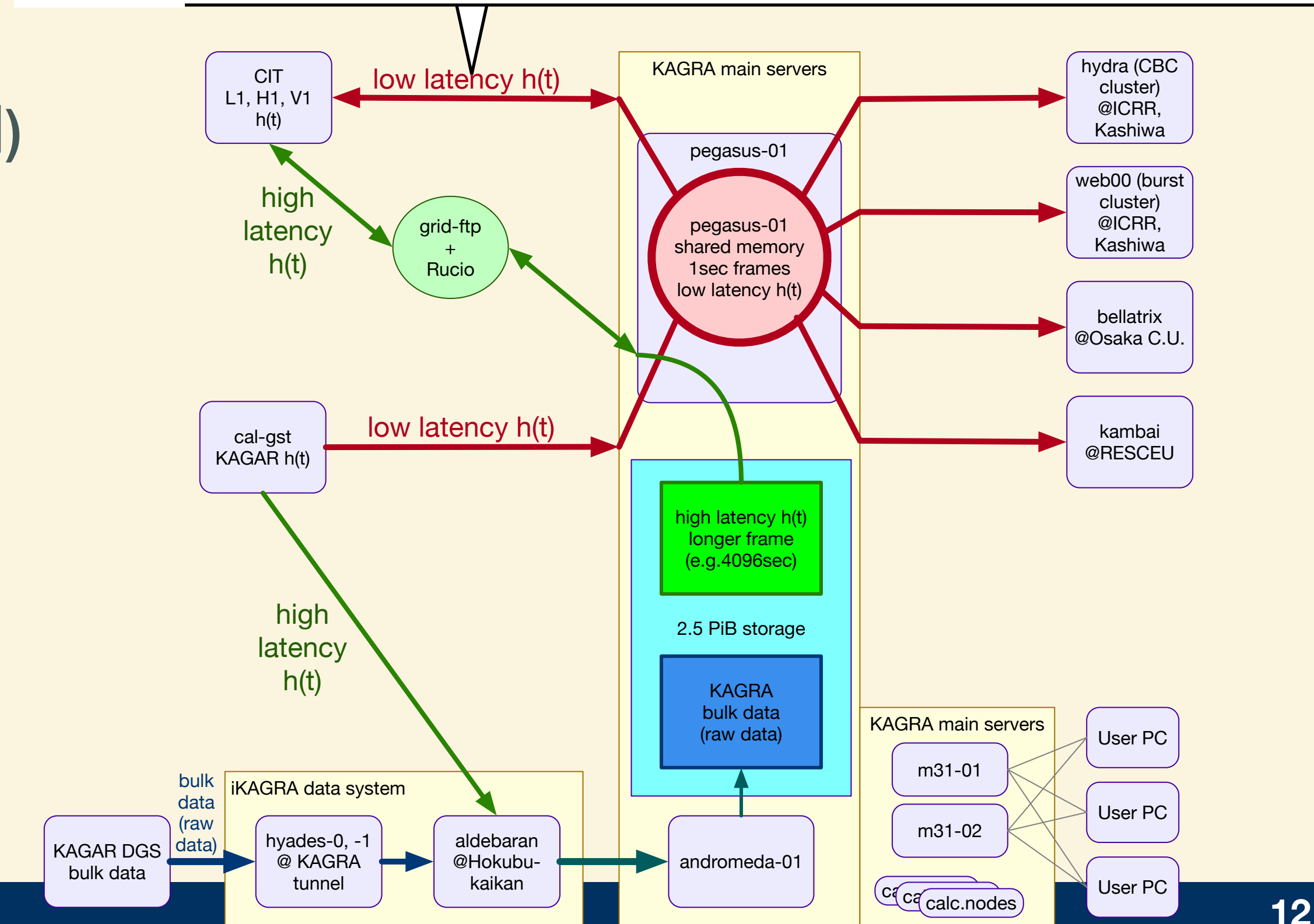
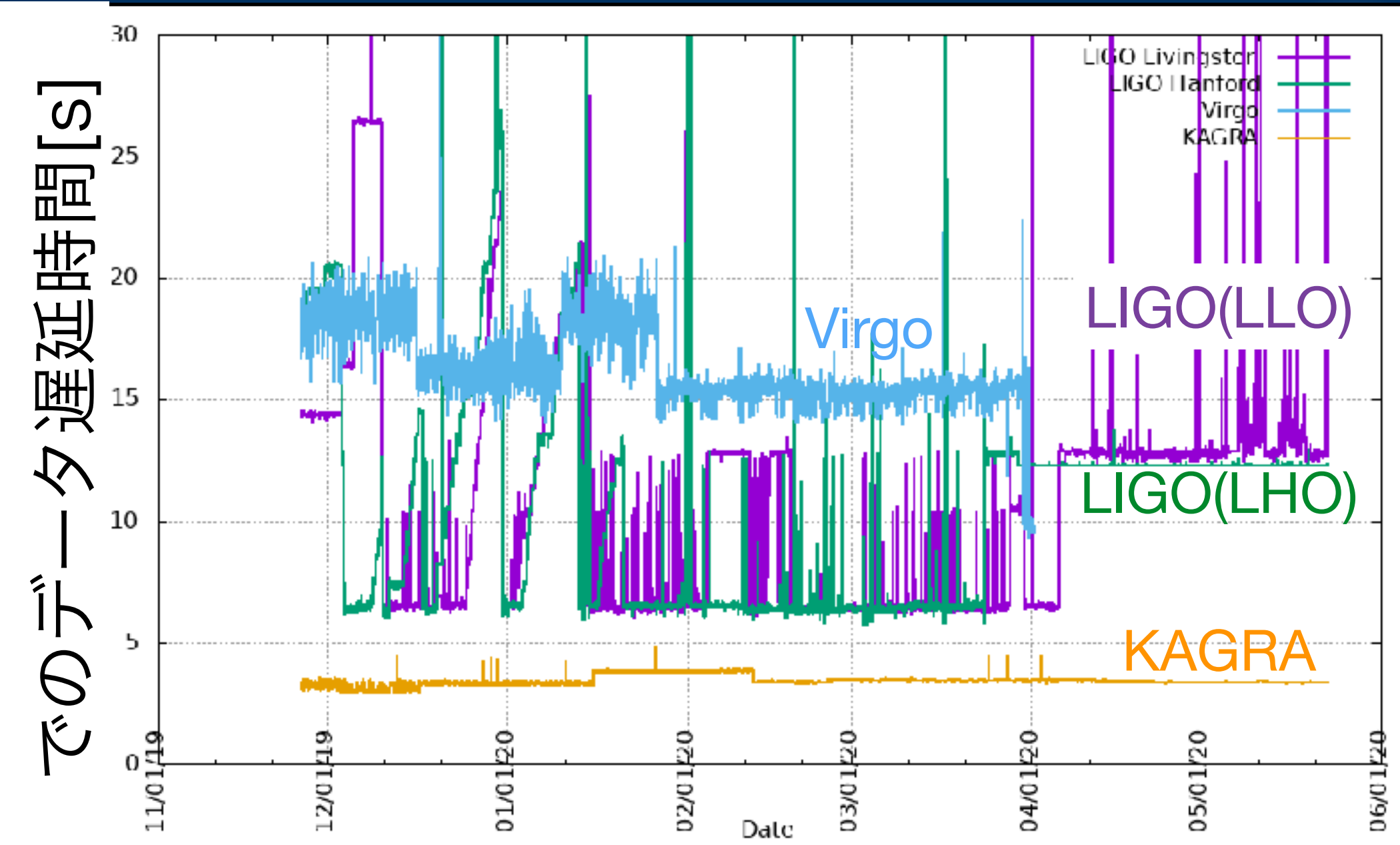
高遅延でのデータ共有

- 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



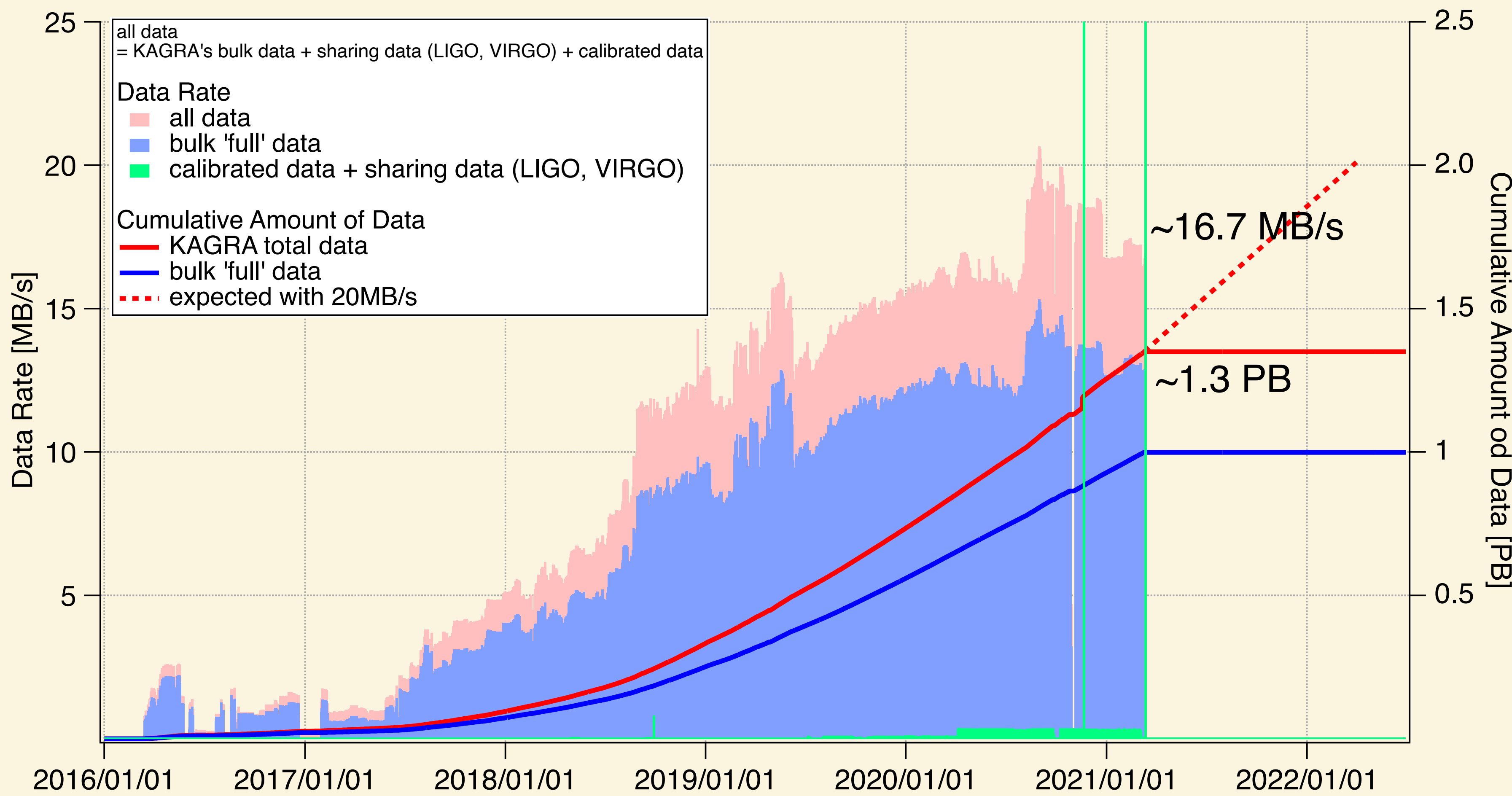
KAGRAの生データ

~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。



O4 & O5 に向けて

O4

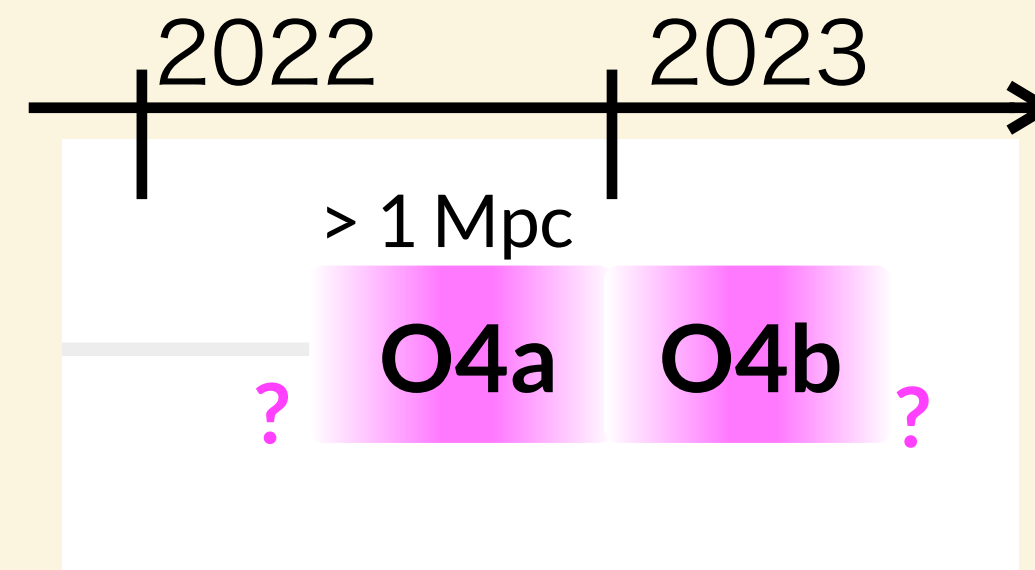
O3GKで明らかとなった雑音の対策

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



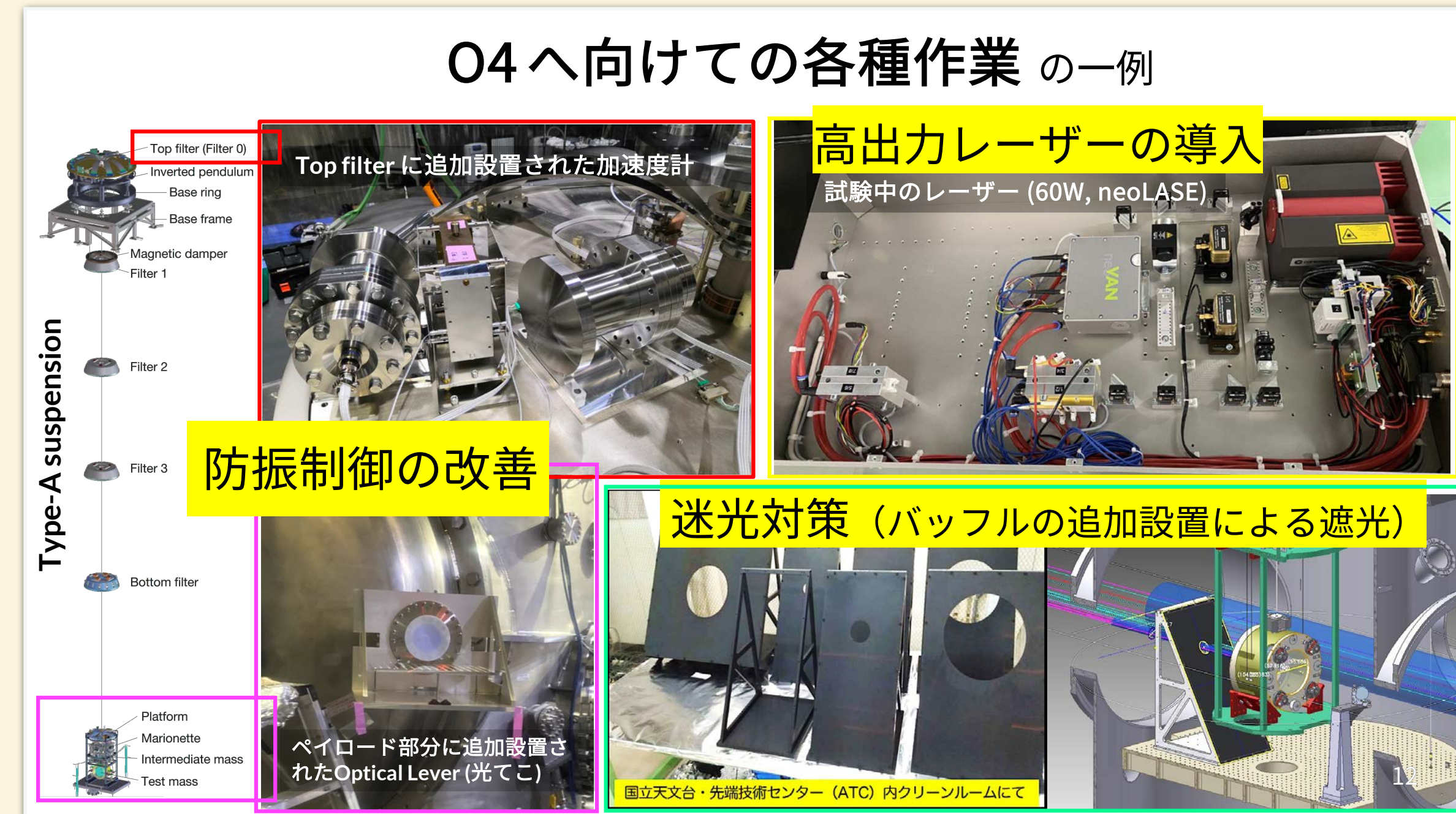
O4b (後半)

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



T.Sawada(14pW3-1)

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*)

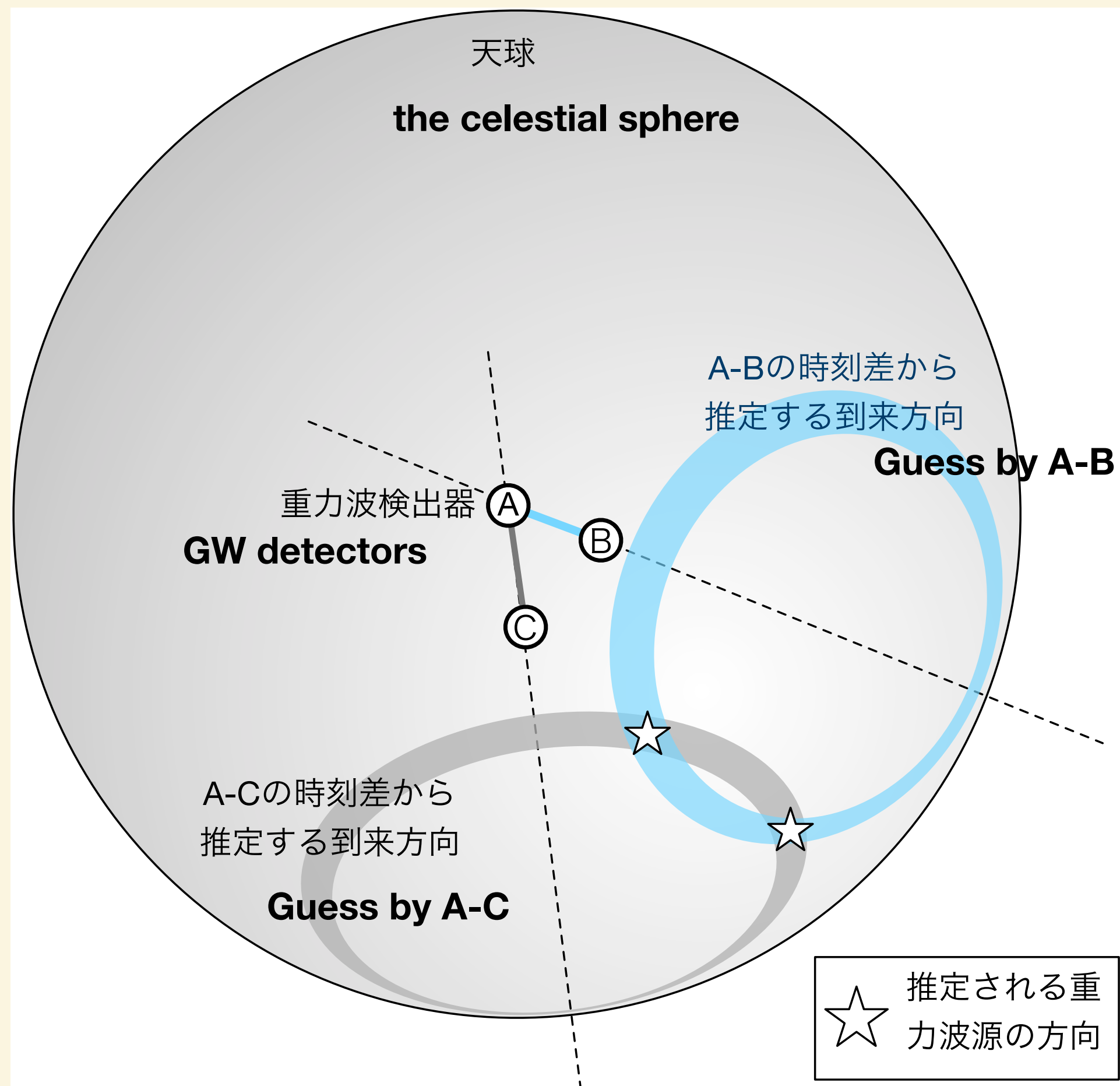
← 検出器の信号校正精度

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



"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>

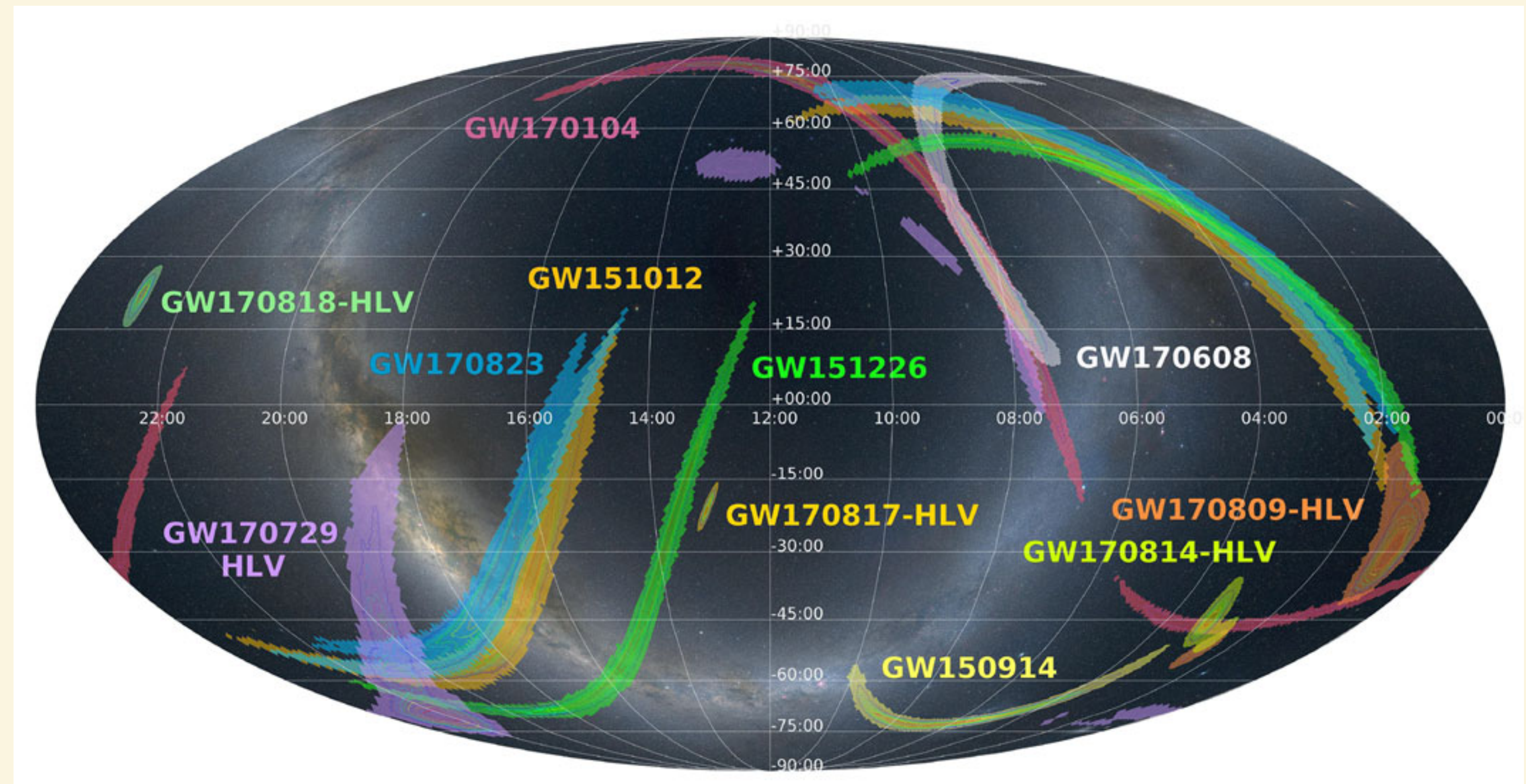


Fig.5より。O1,O2での位置決定。C.L.90%

"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>

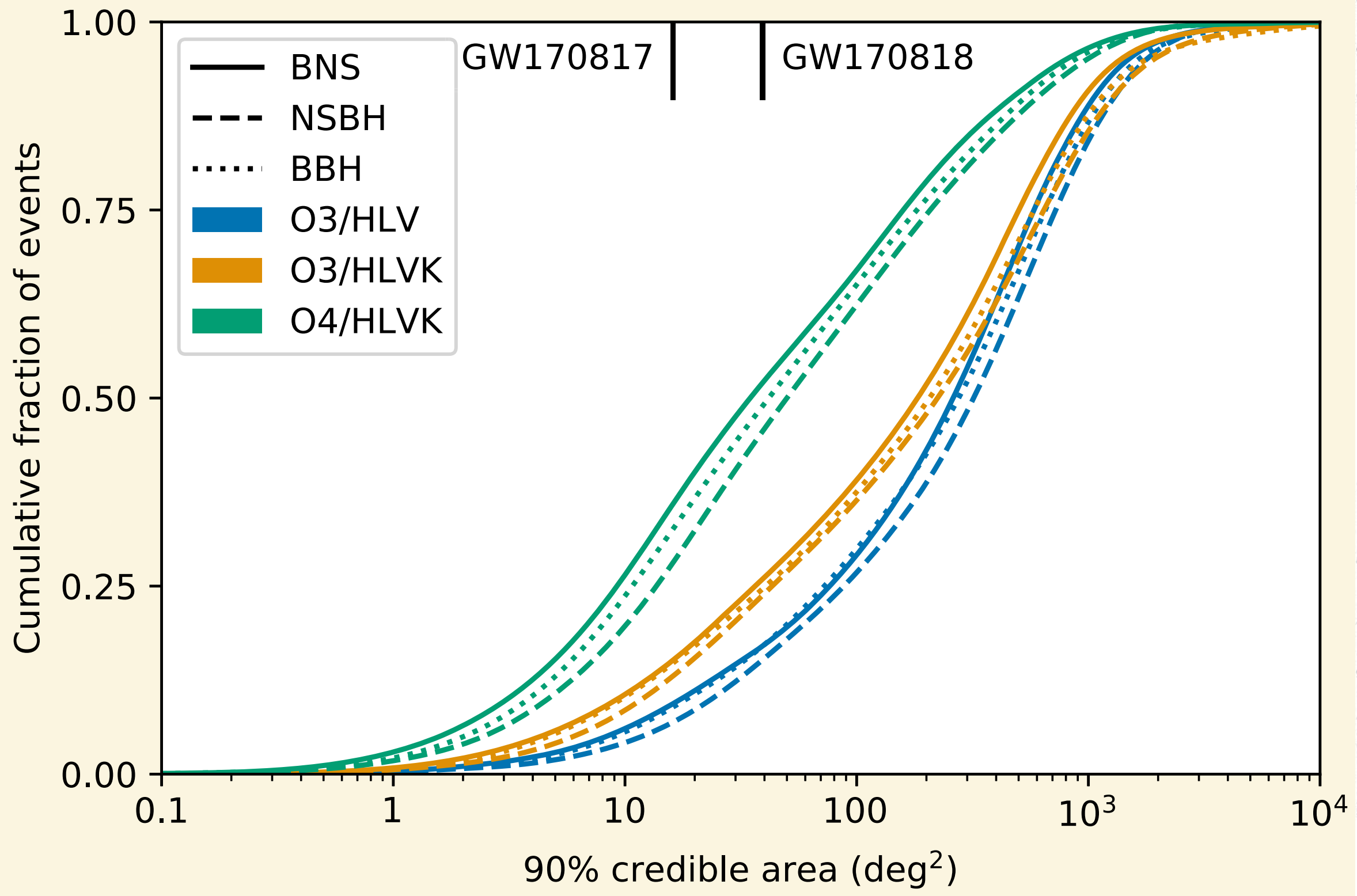


Fig.6 O3,O4デザイン感度での連星合体イベントに対する位置決定精度予想

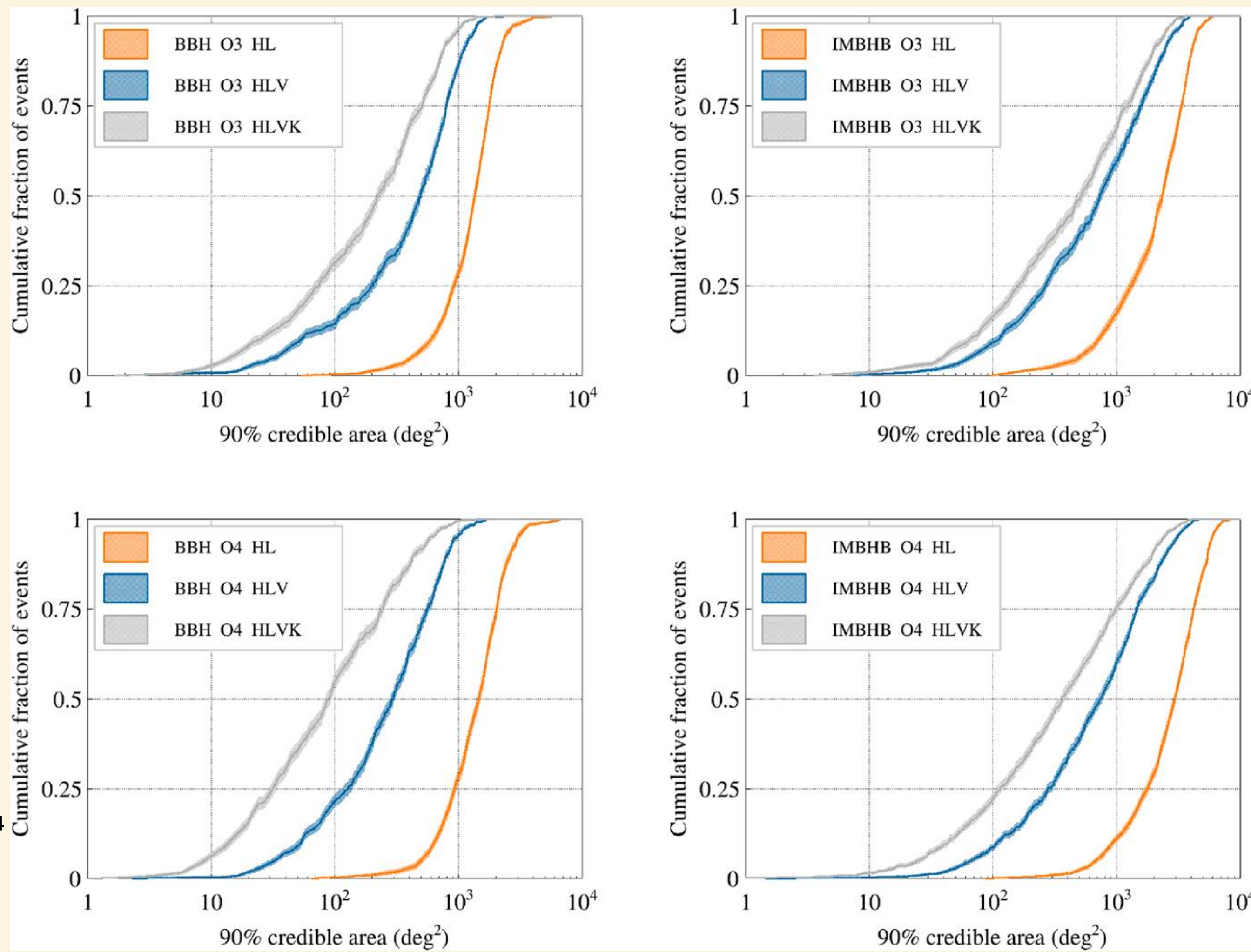


Fig.7 O3,O4デザイン感度でのBH-BHイベントに対する位置決定精度予想

"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>

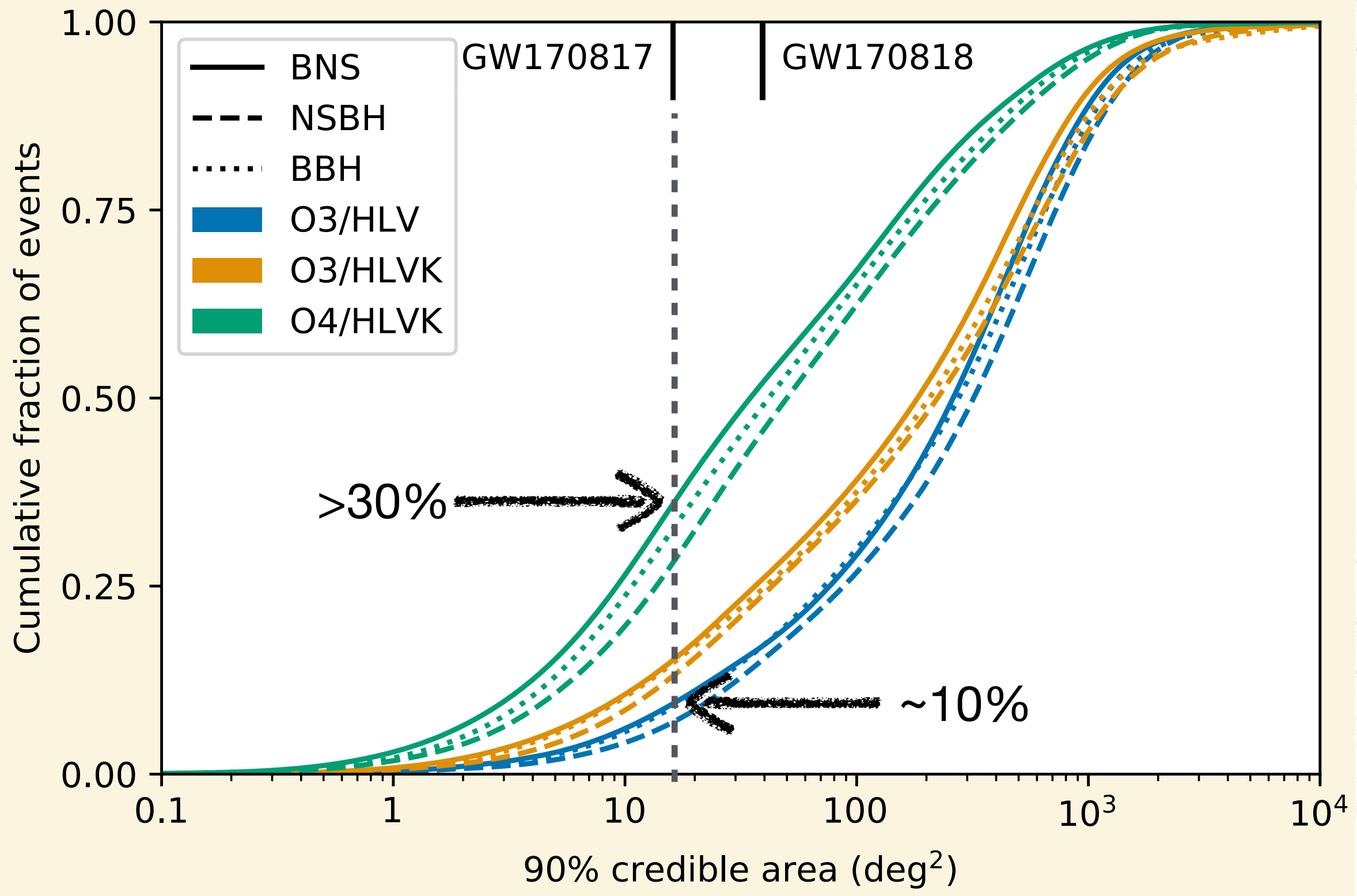


Fig.6 O3,O4デザイン感度での連星合体イベントに対する位置決定精度予想

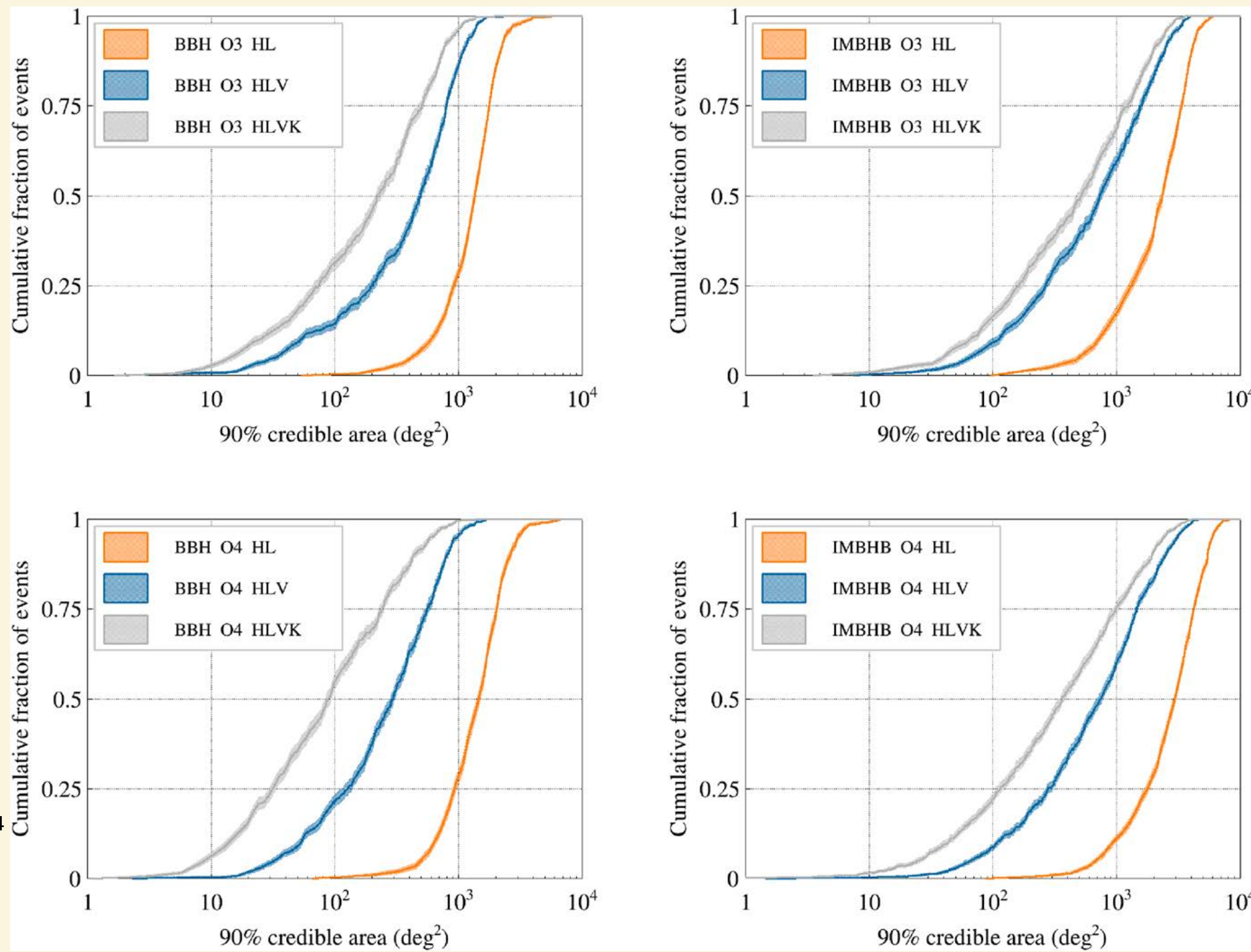


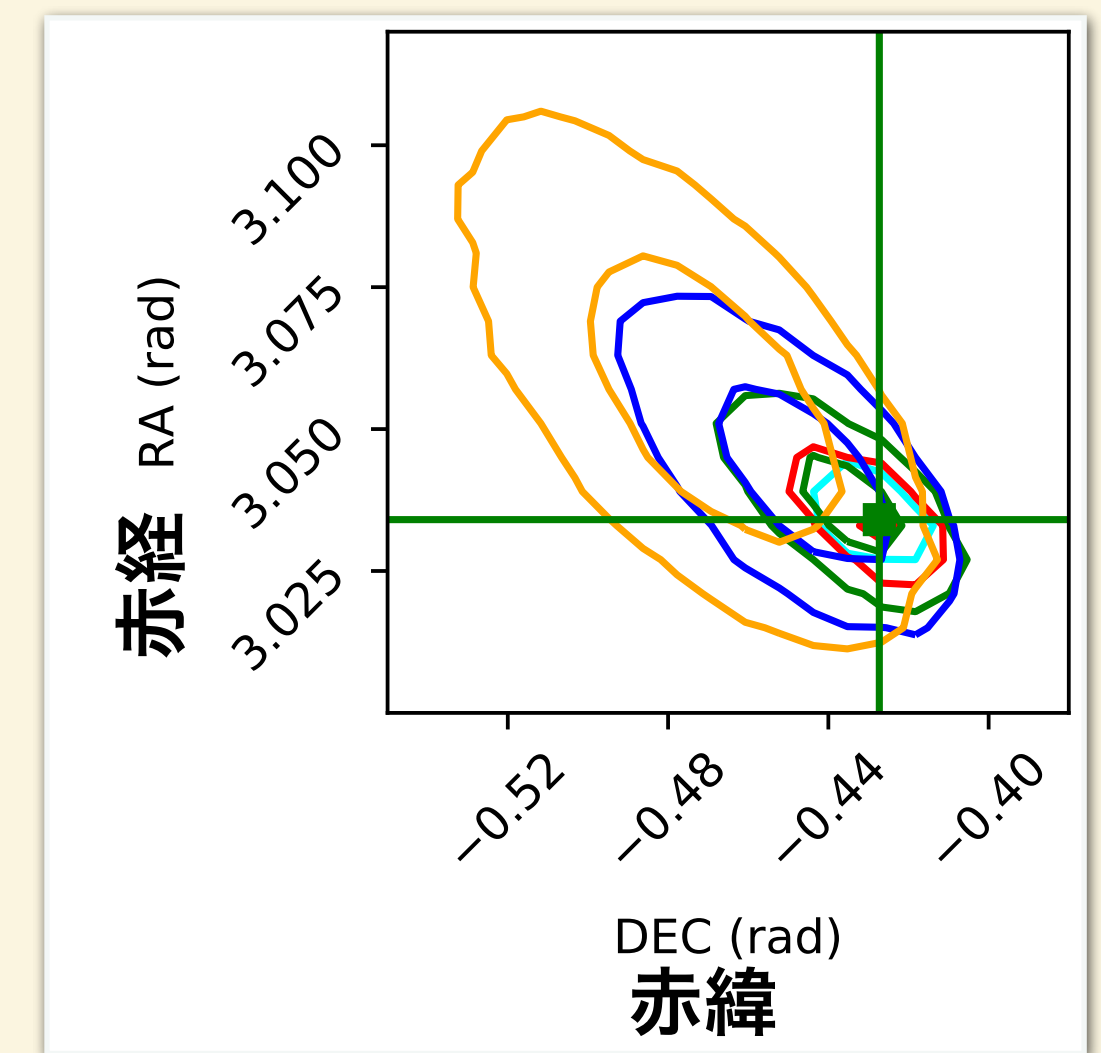
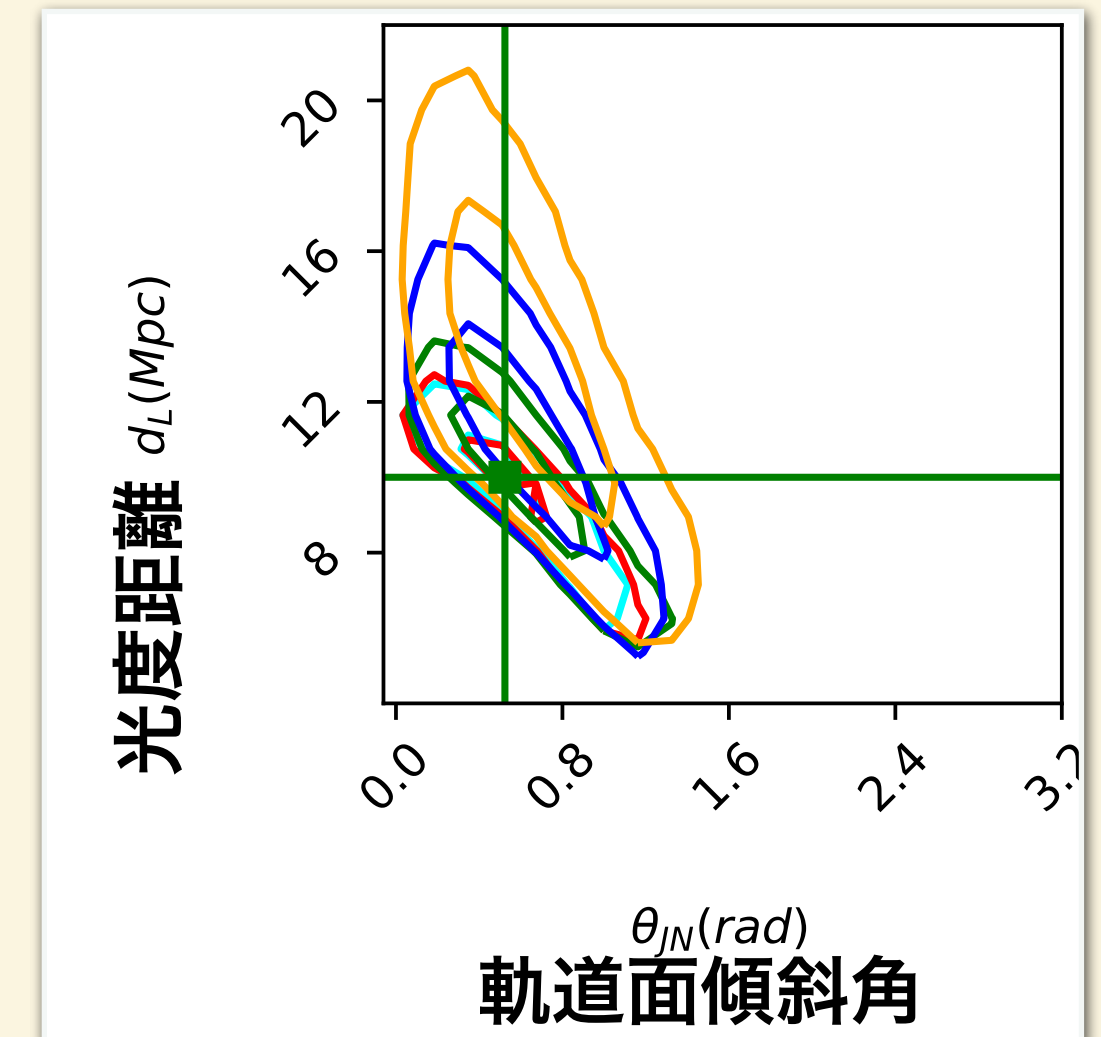
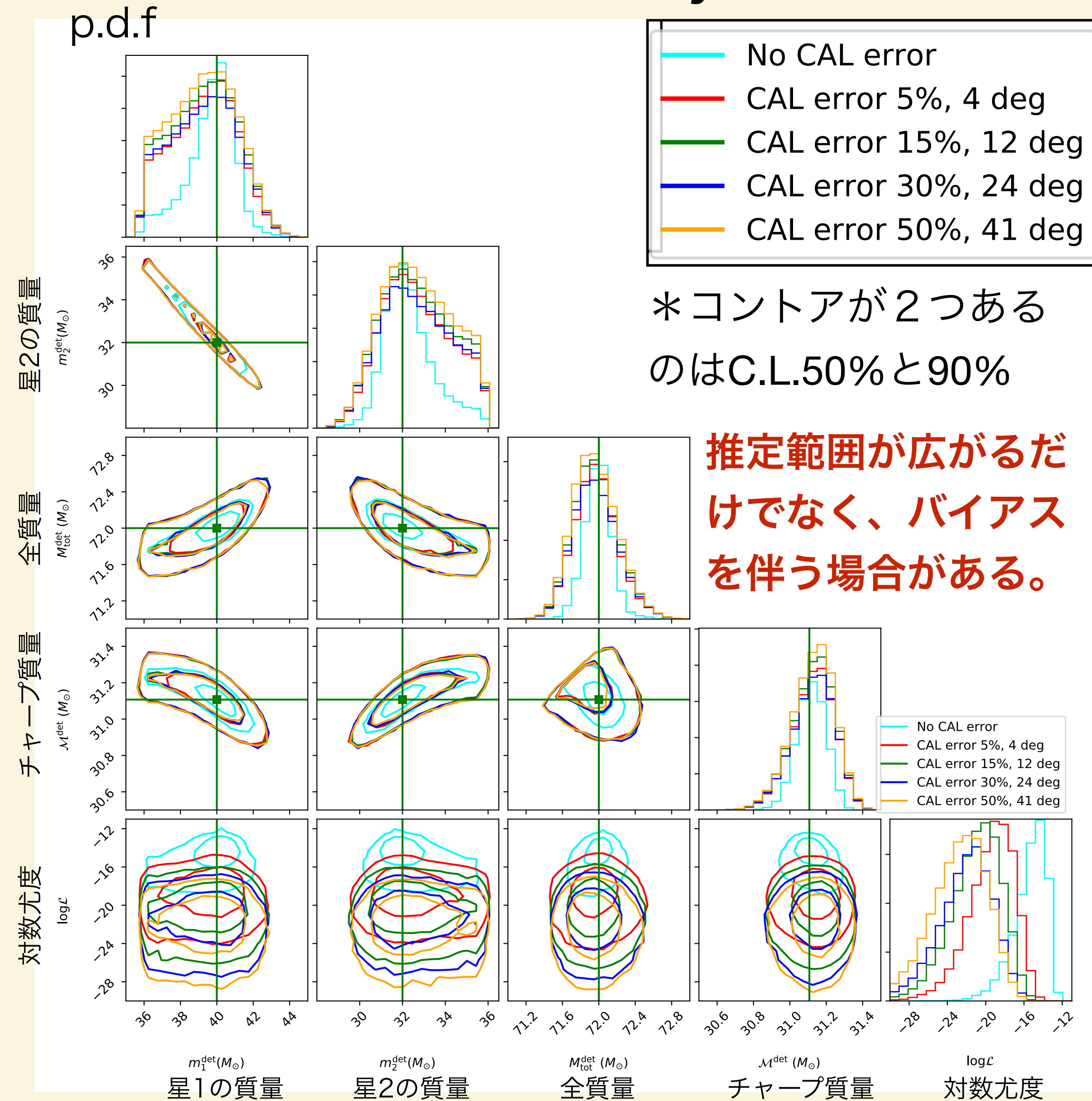
Fig.7 O3,O4デザイン感度でのBH-BHイベントに対する位置決定精度予想

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: masses, spins, distance, sky-location, inclination, 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, $\text{spsal-nodes}=10$, $\text{amp-error}=0.05$, $\text{phase-error}=4.1\text{ deg}$ for Virgo (when GW200105)

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



by T.Narikawa (ICRR)

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:

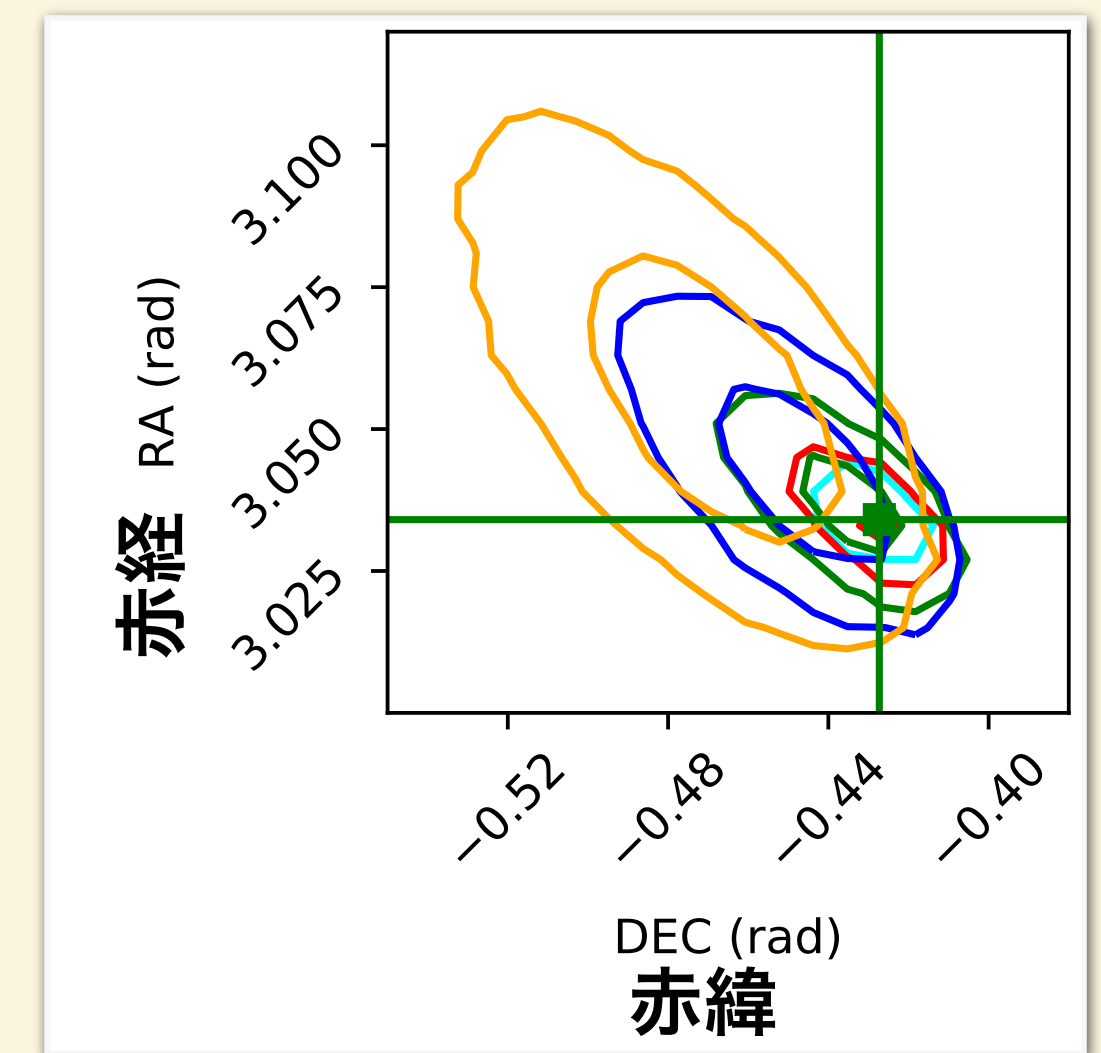
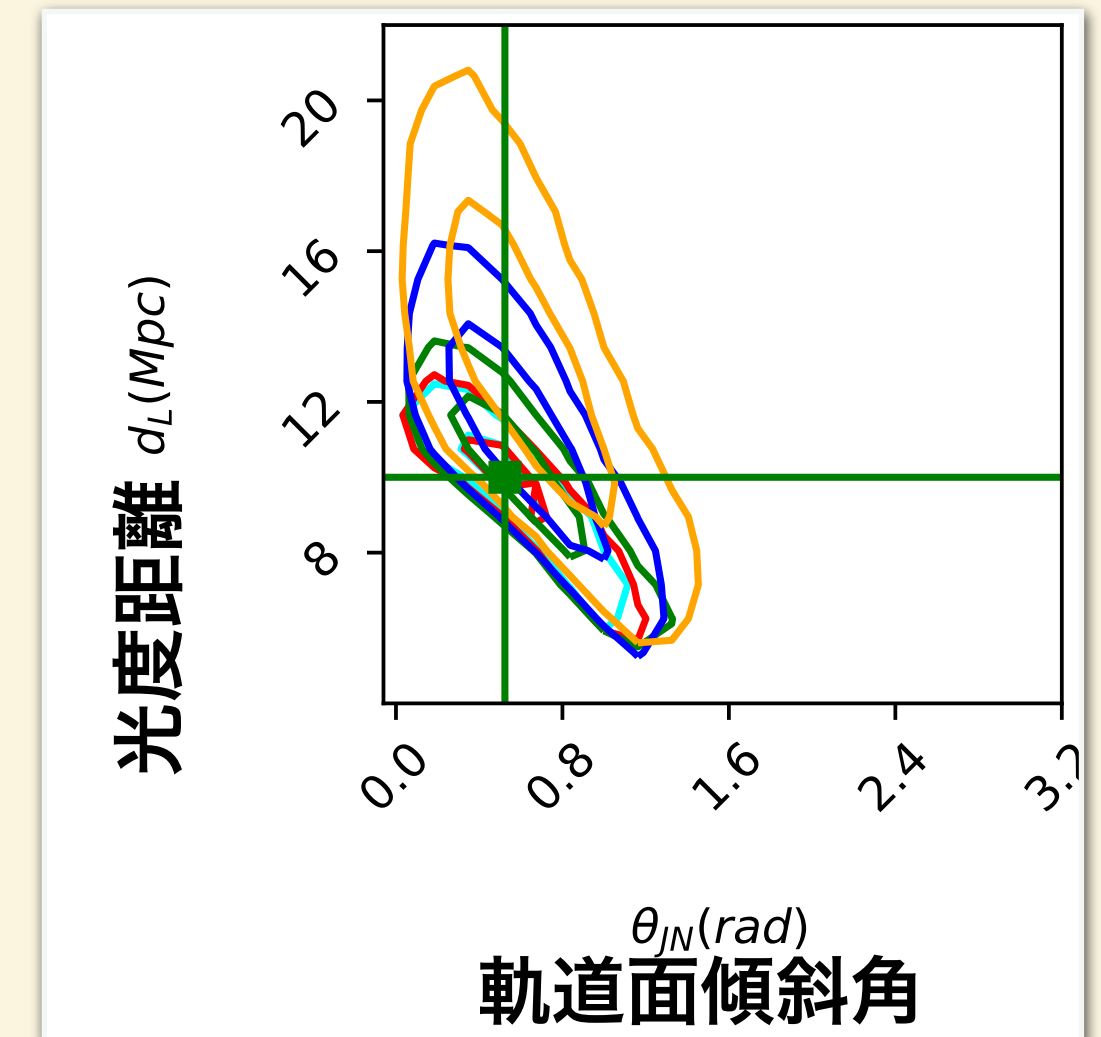
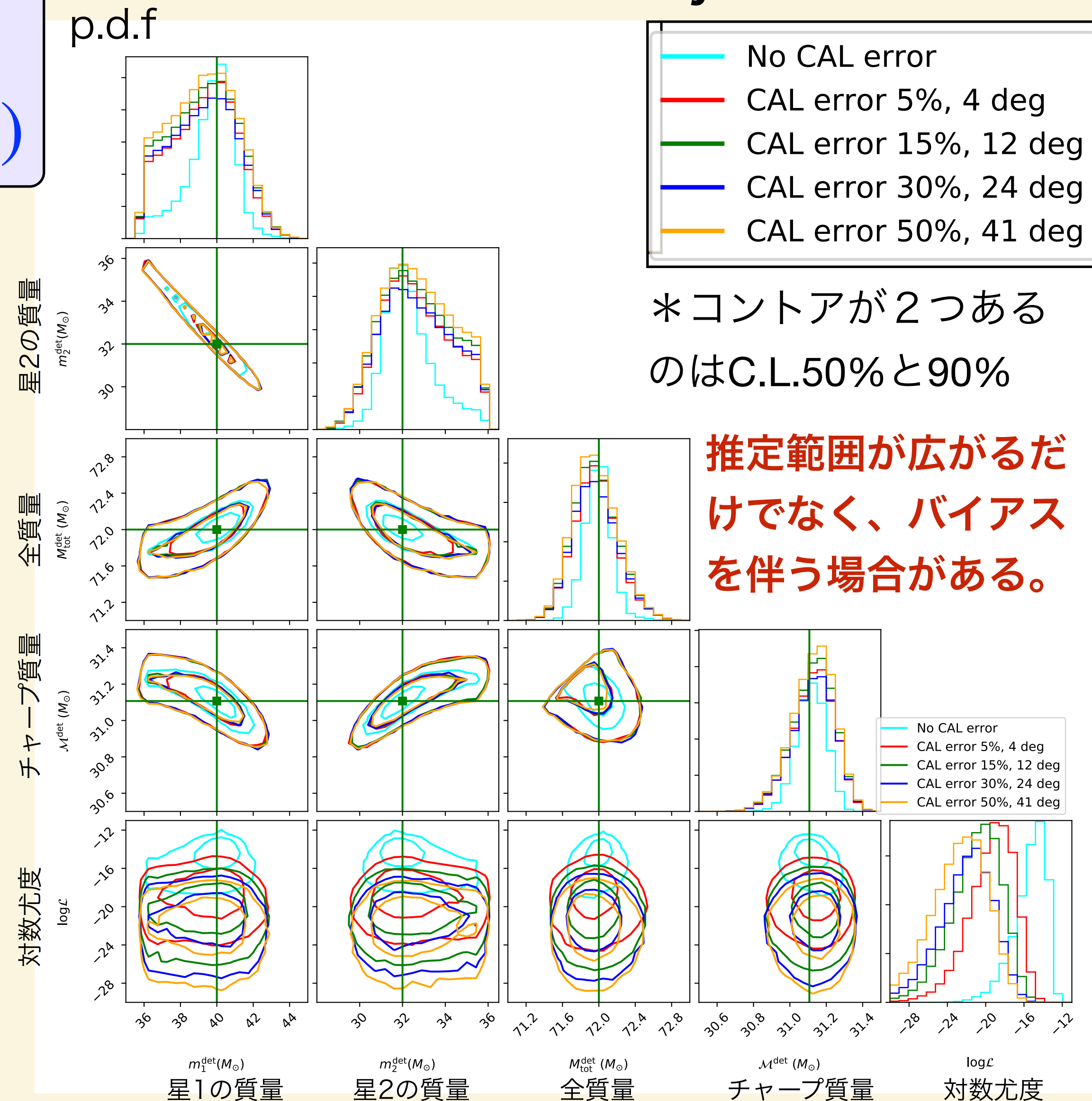
- Source parameters: distance, sky-location, polarization angle

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

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

- 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, $\text{spscal-nodes}=10$, $\text{amp-error}=0.05$, $\text{phase-error}=4.1\text{ deg}$ for Virgo (when GW200105)

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



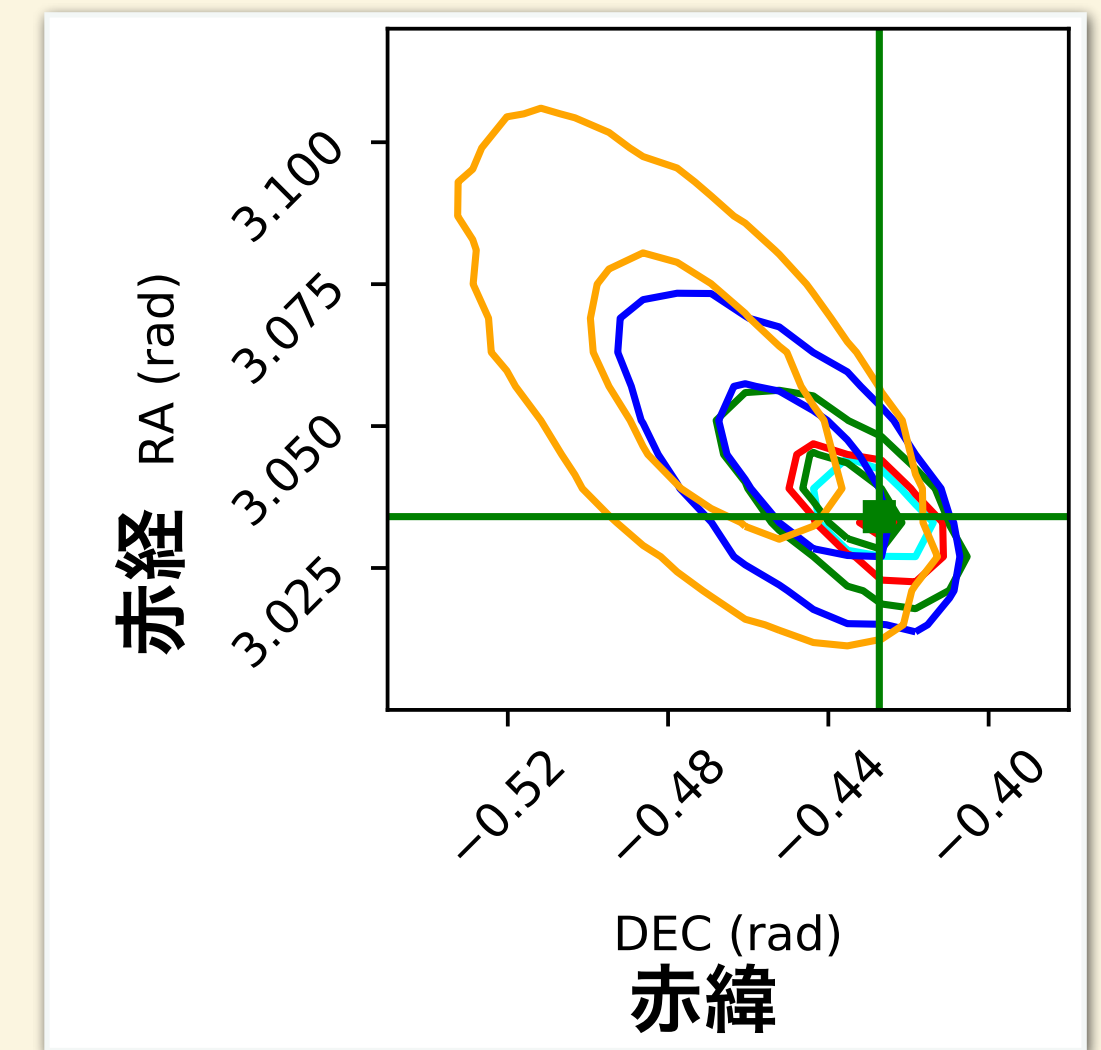
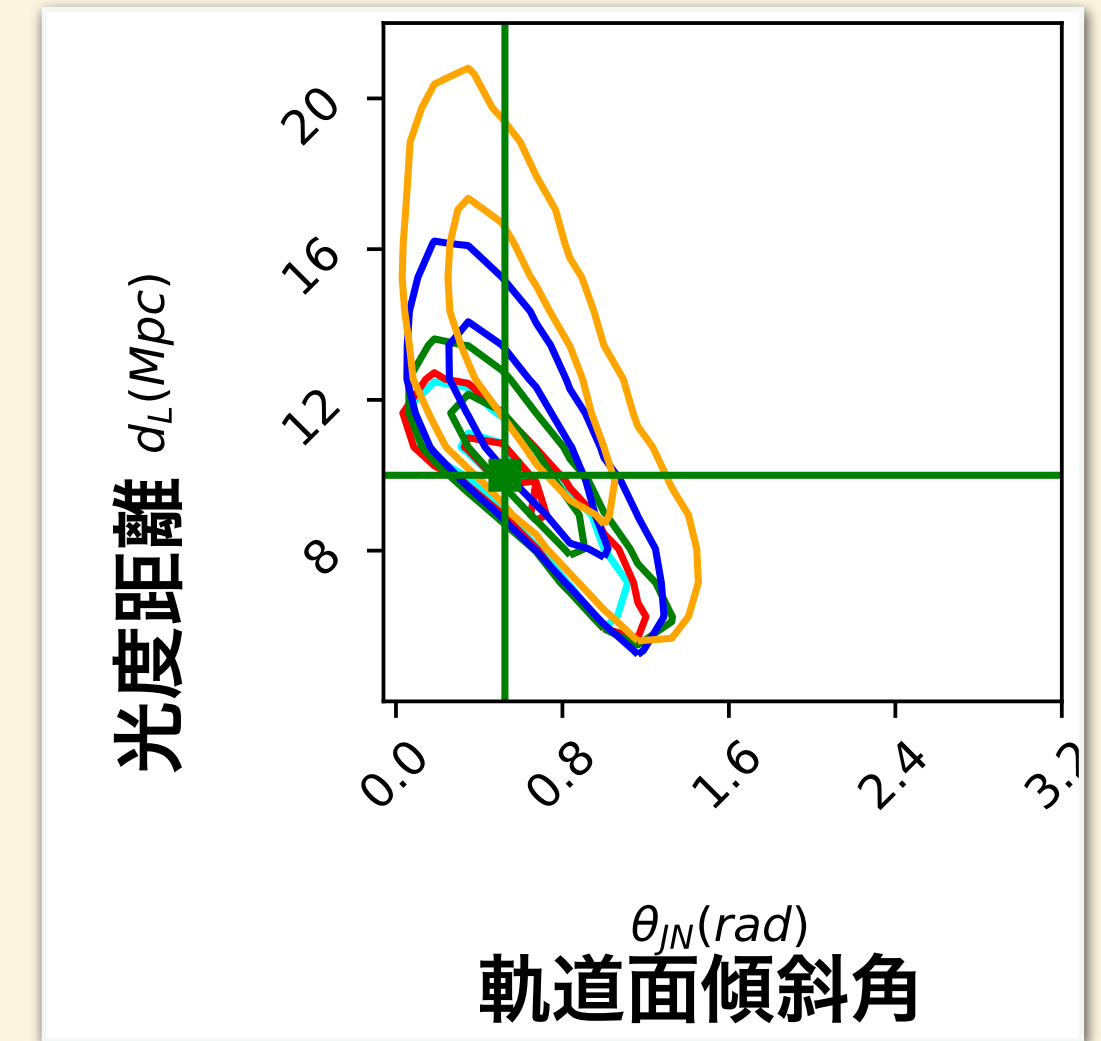
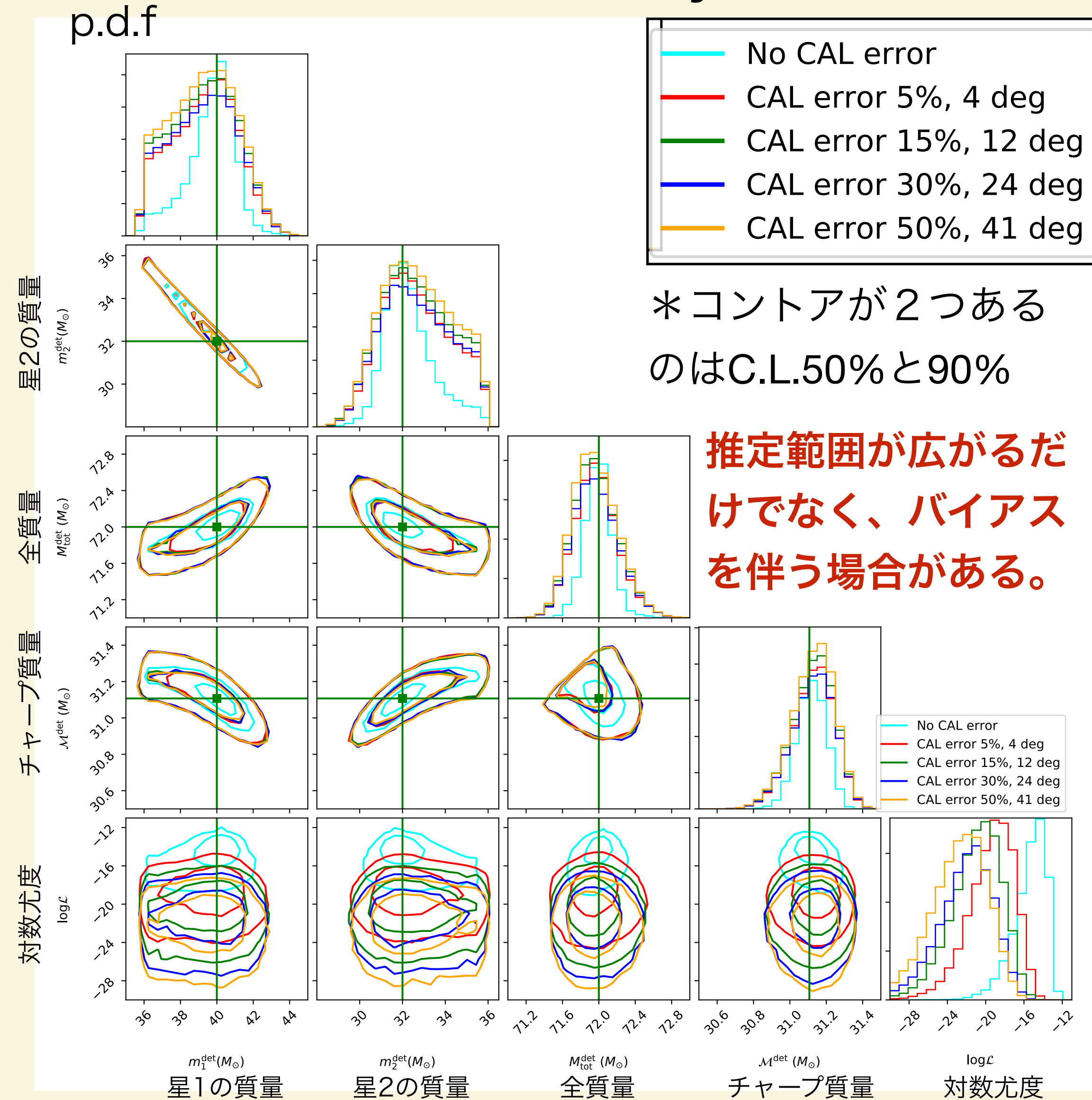
by T.Narikawa (ICRR)

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: masses, spins, distance, sky-location, inclination, 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, $\text{spsal-nodes}=10$, $\text{amp-error}=0.05$, $\text{phase-error}=4.1\text{ deg}$ for Virgo (when GW200105)

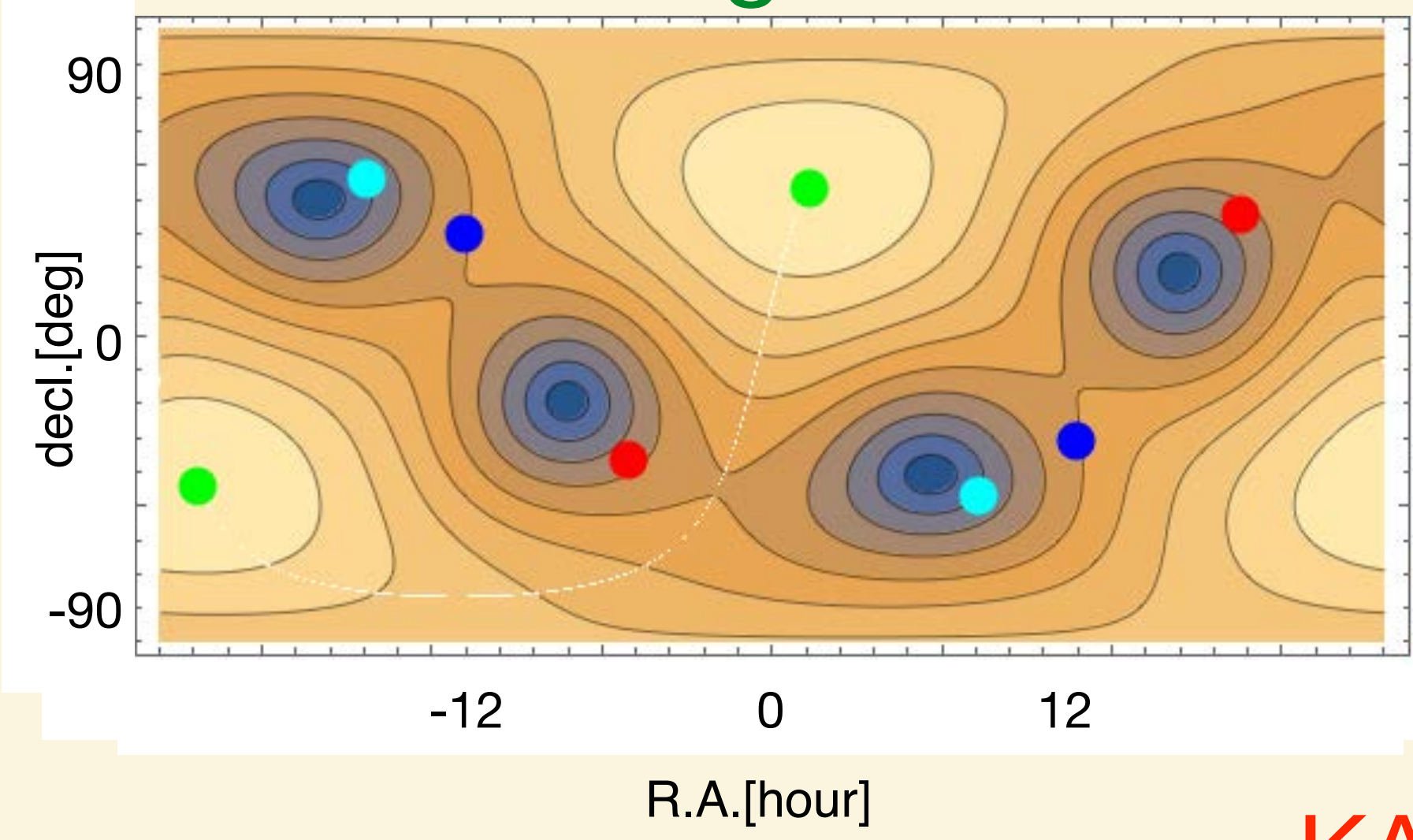
unknown sky-location SNR V1:130.29, K1:26.47



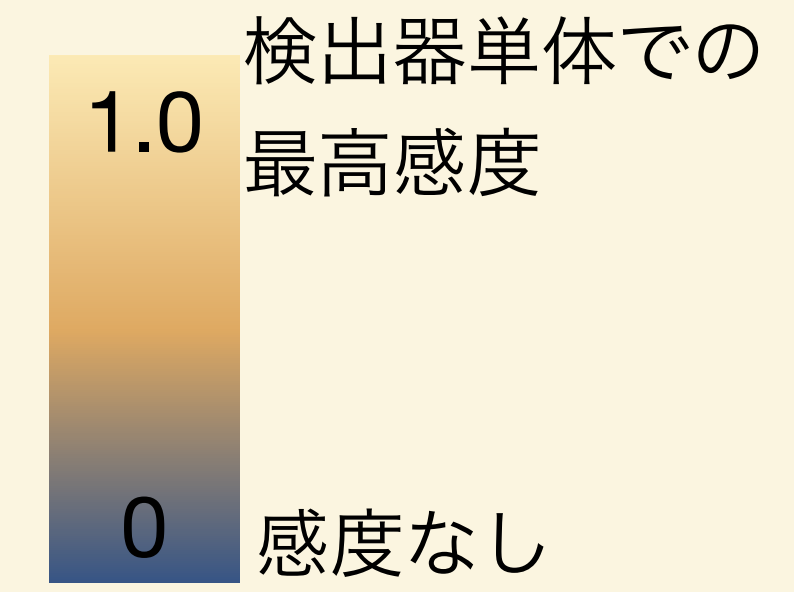
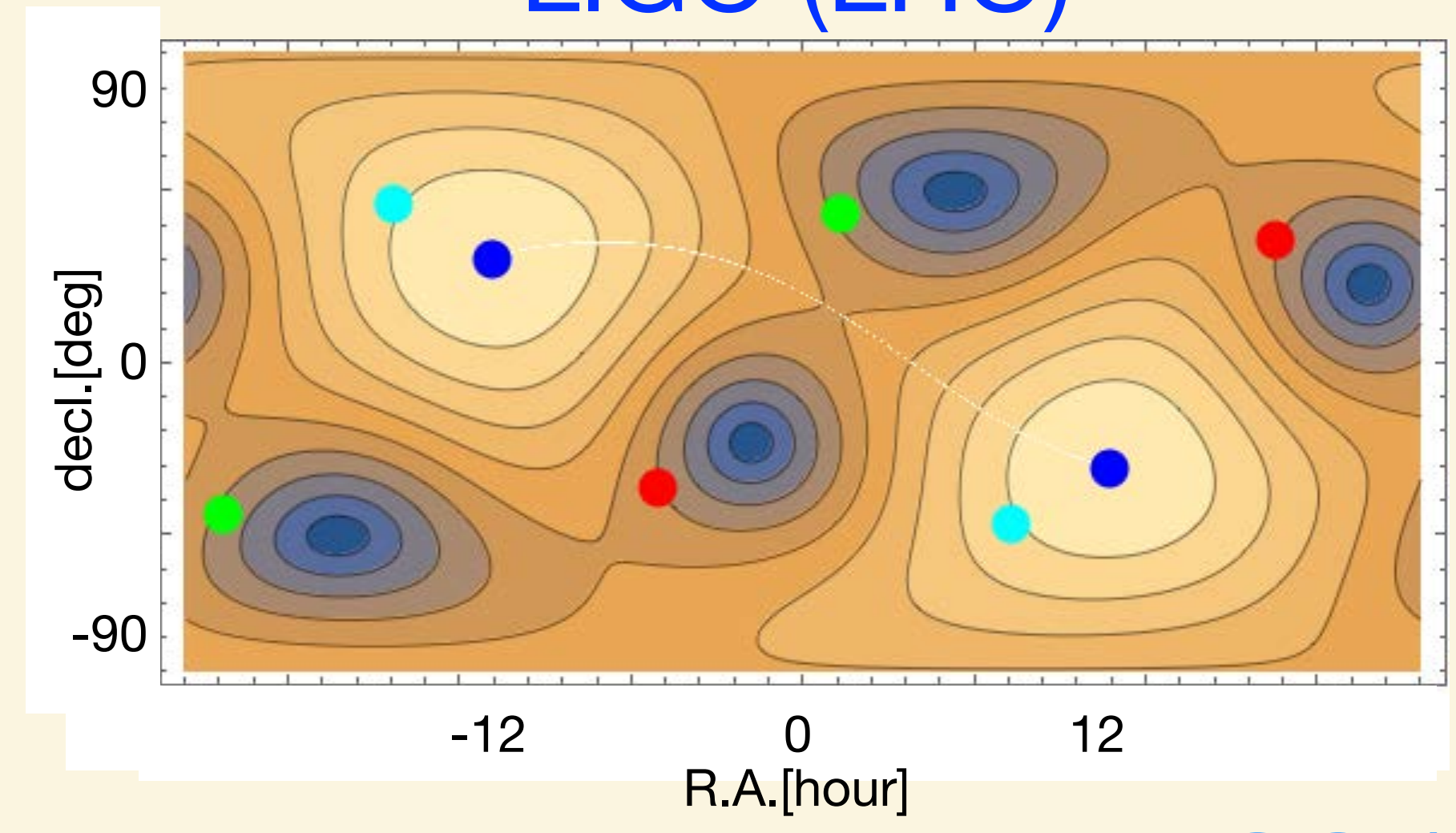
by T.Narikawa (ICRR)

KAGRAの高感度方向は、LIGO, Virgoと相補的

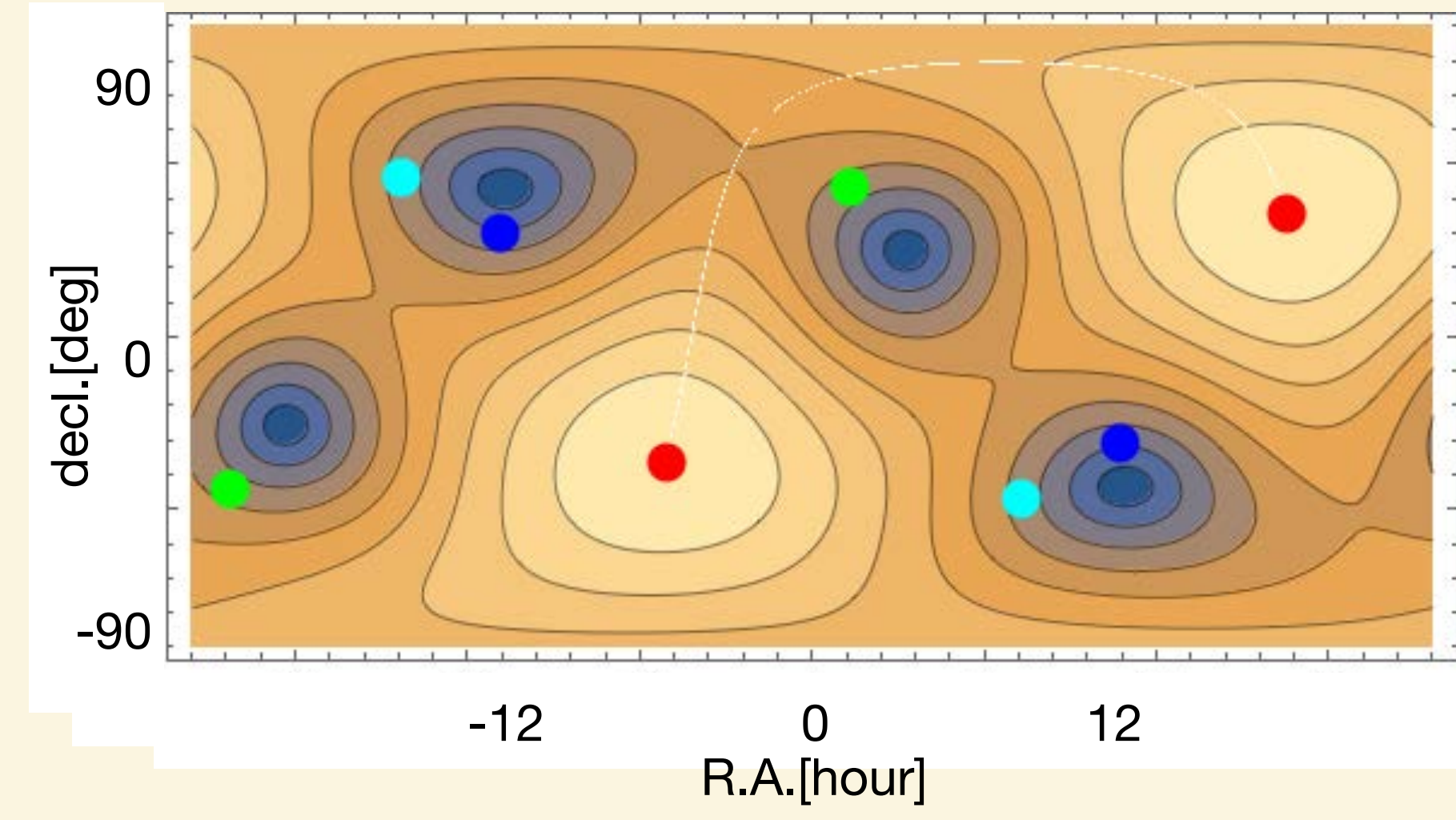
Virgo



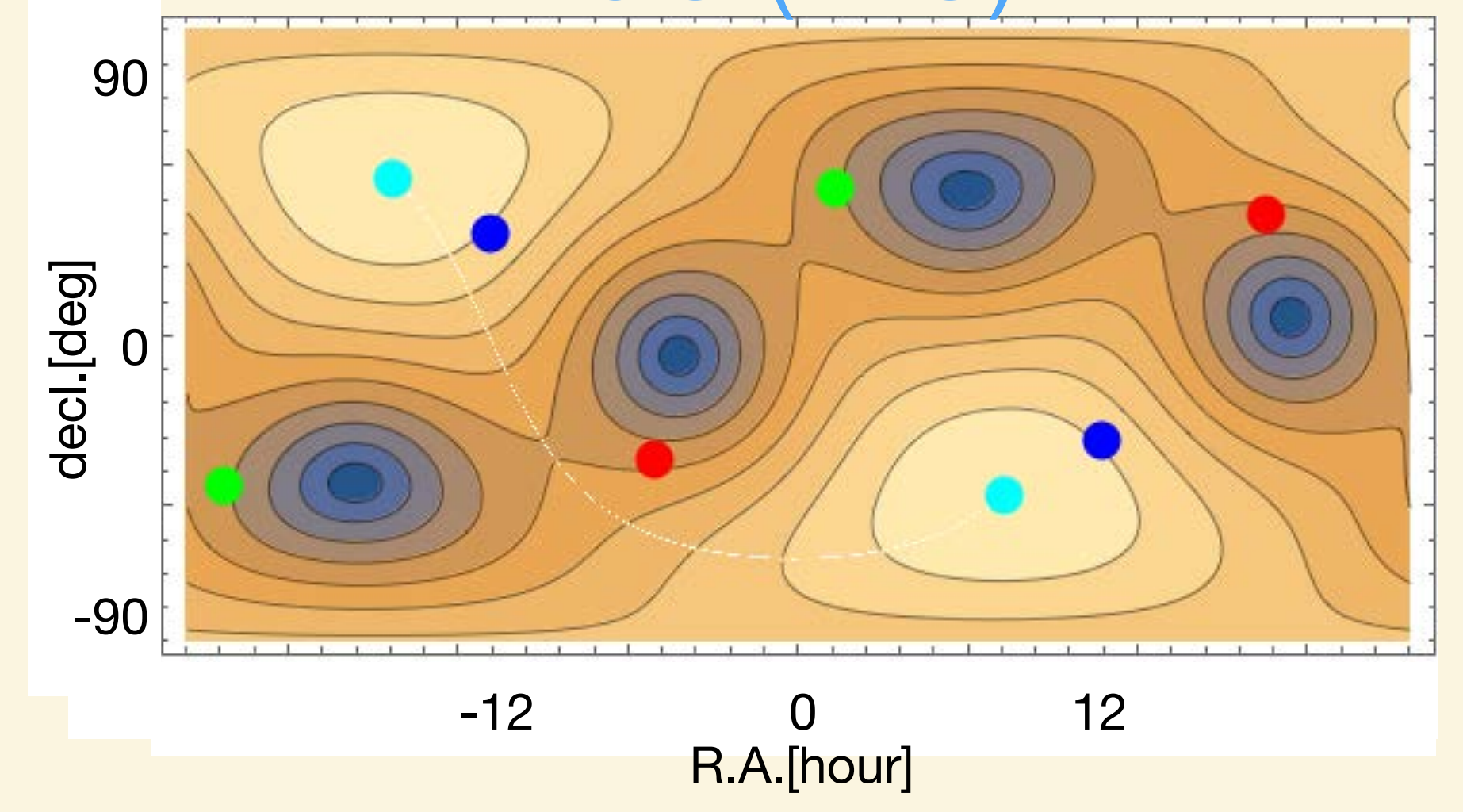
LIGO (LHO)



KAGRA



LIGO (LLO)



- zenith direction of detectors
- LIGO Hanford
- LIGO Livingston
- VIRGO
- KAGRA

KAGRAが重力波観測に一層寄与するための検討
もう一工夫の検討中の案

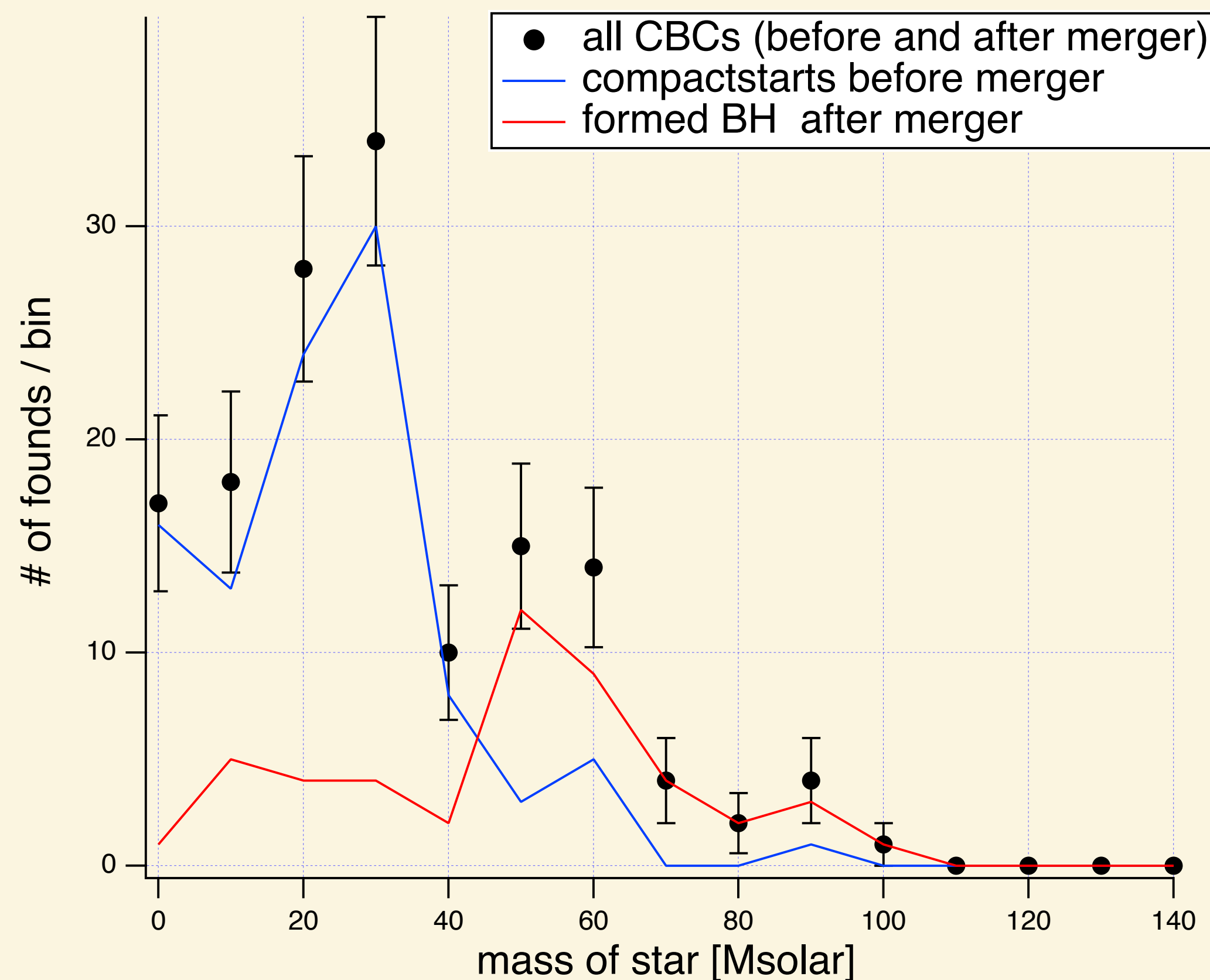
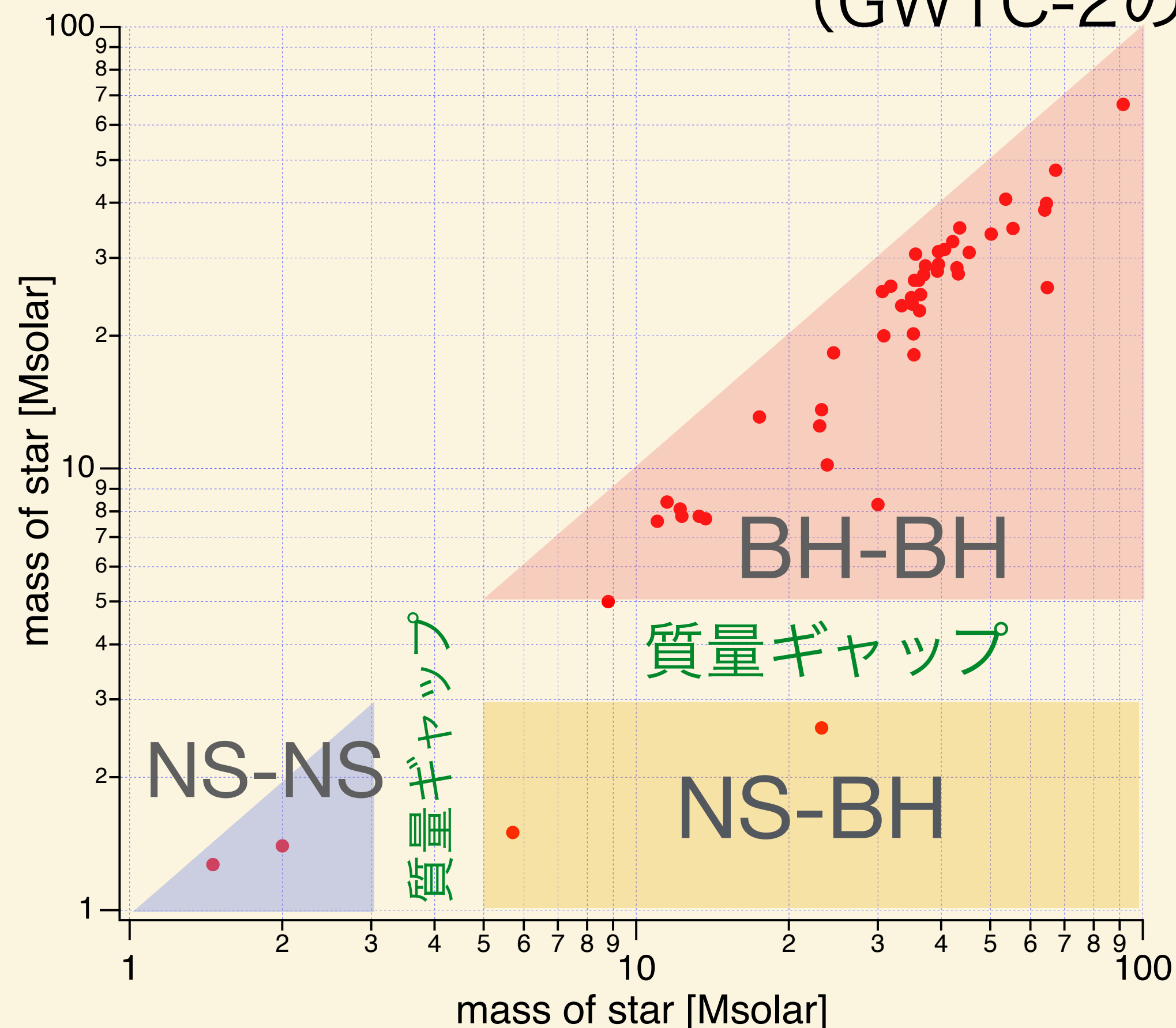
KAGRAの初イベントは？

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！

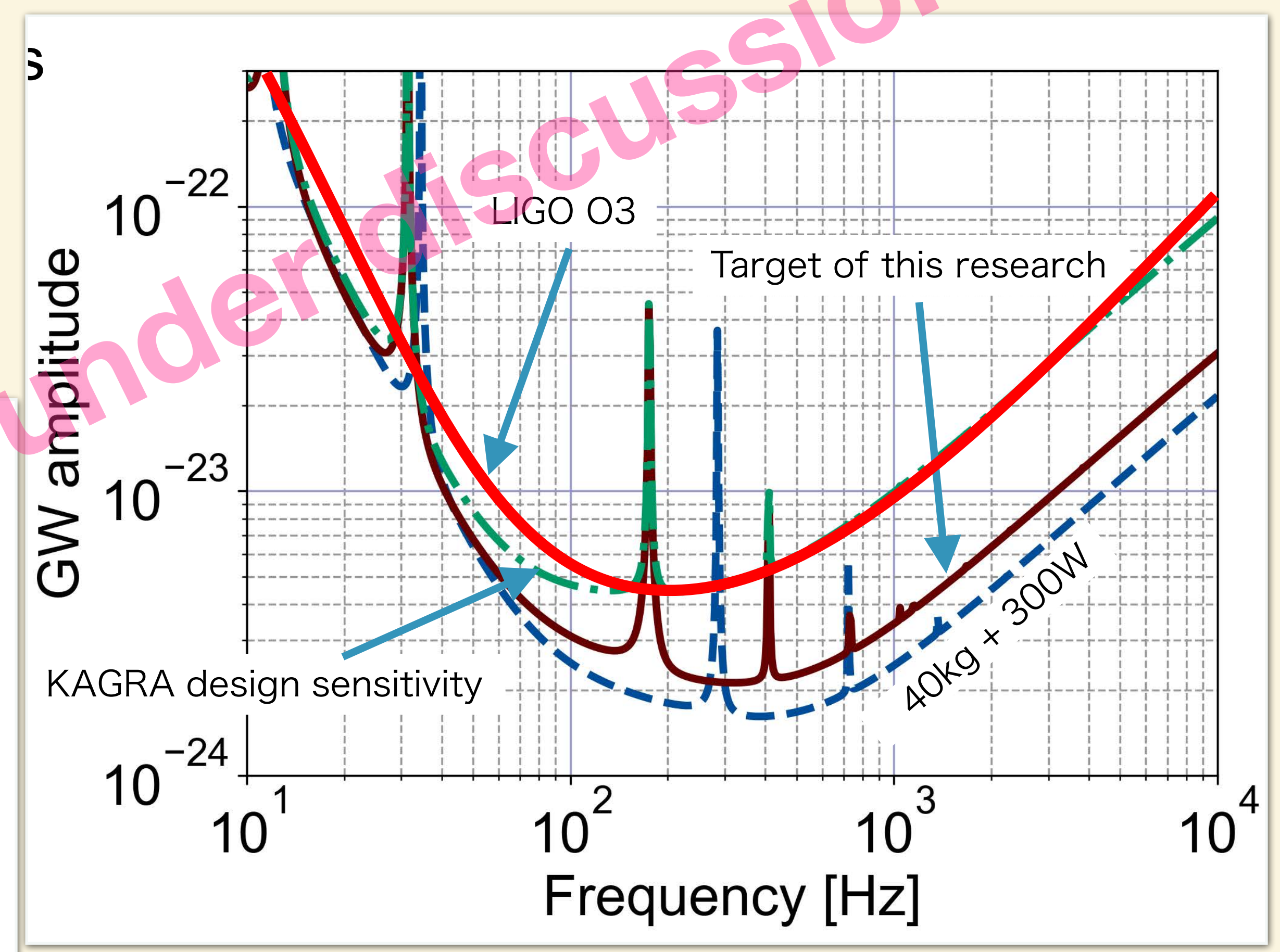
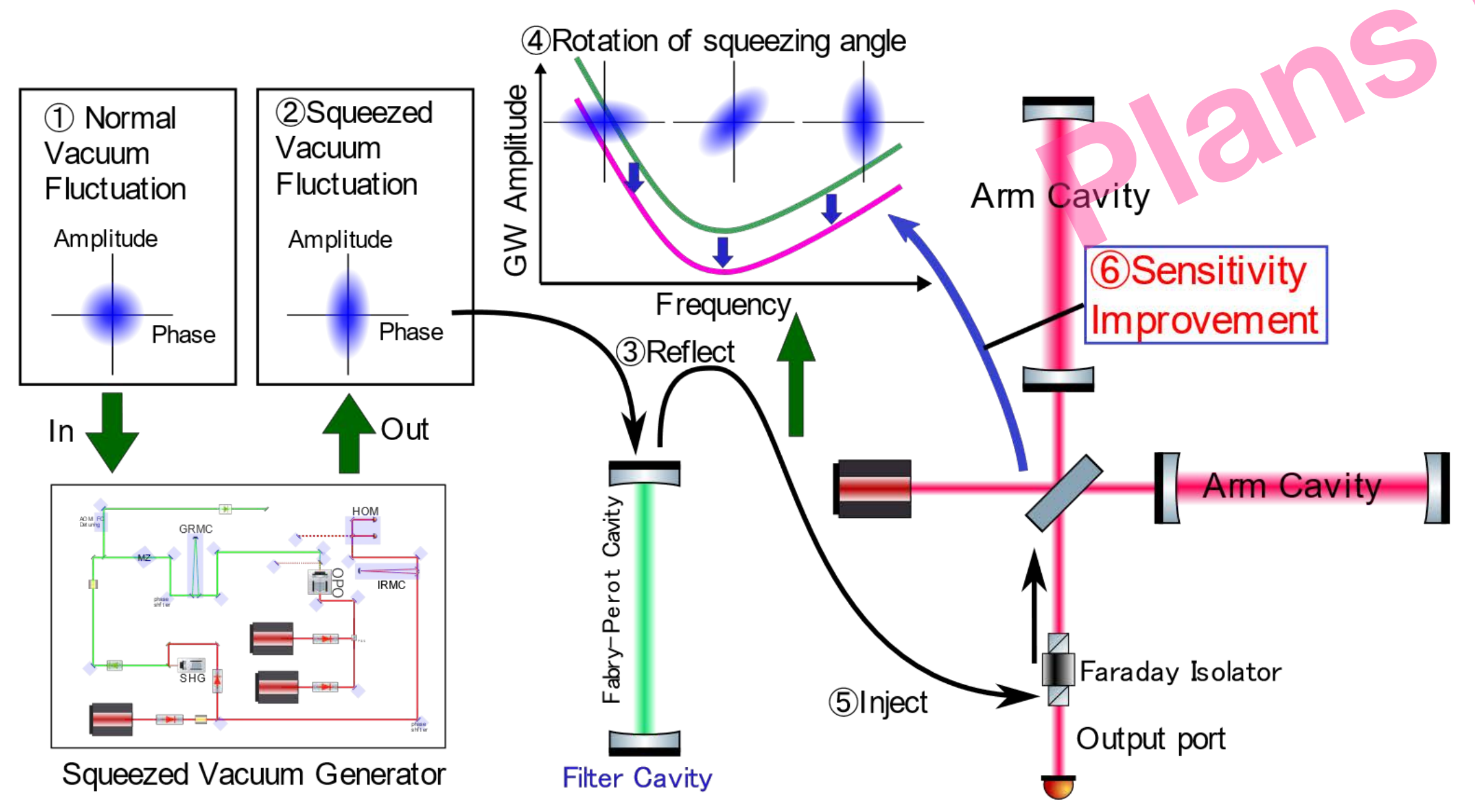
(GWTC-2のデータから作成)



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

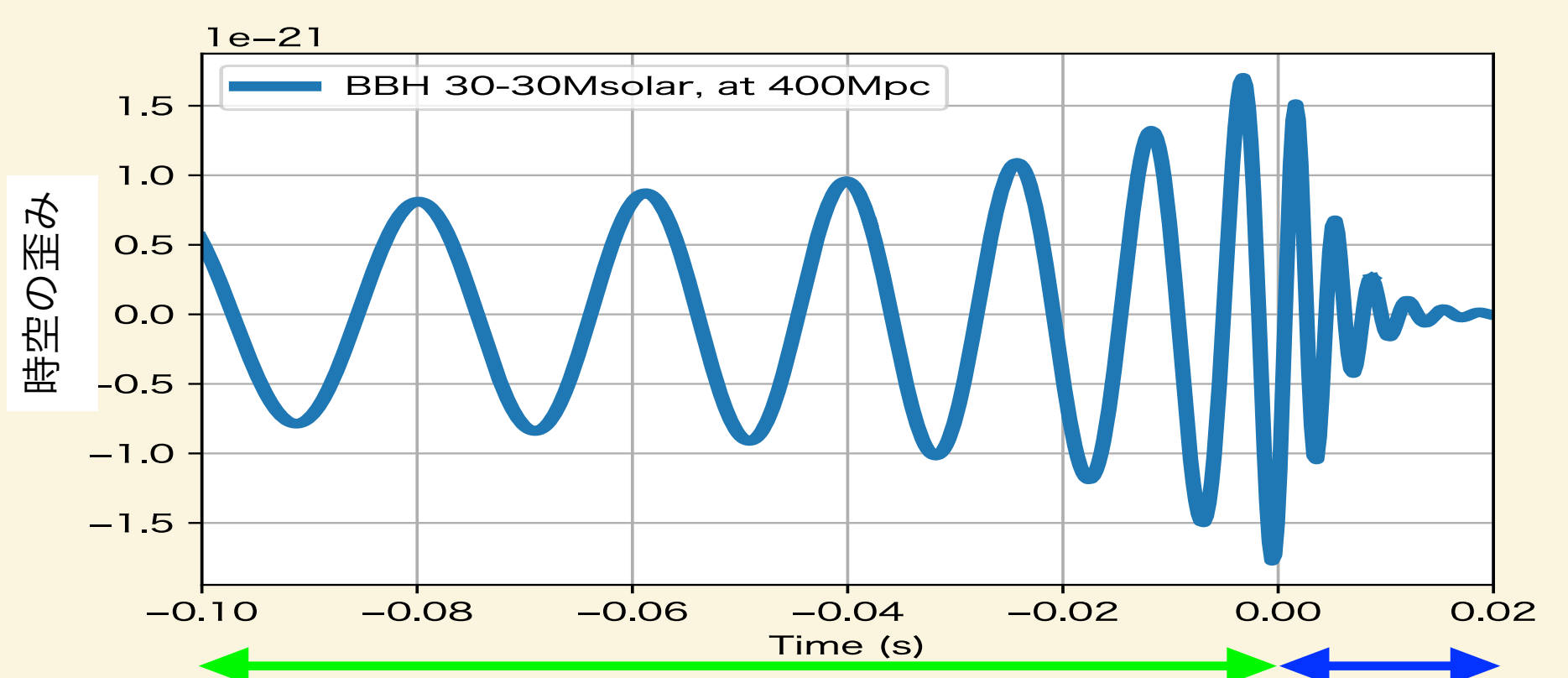
→ 散雑雑音で3倍改善



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

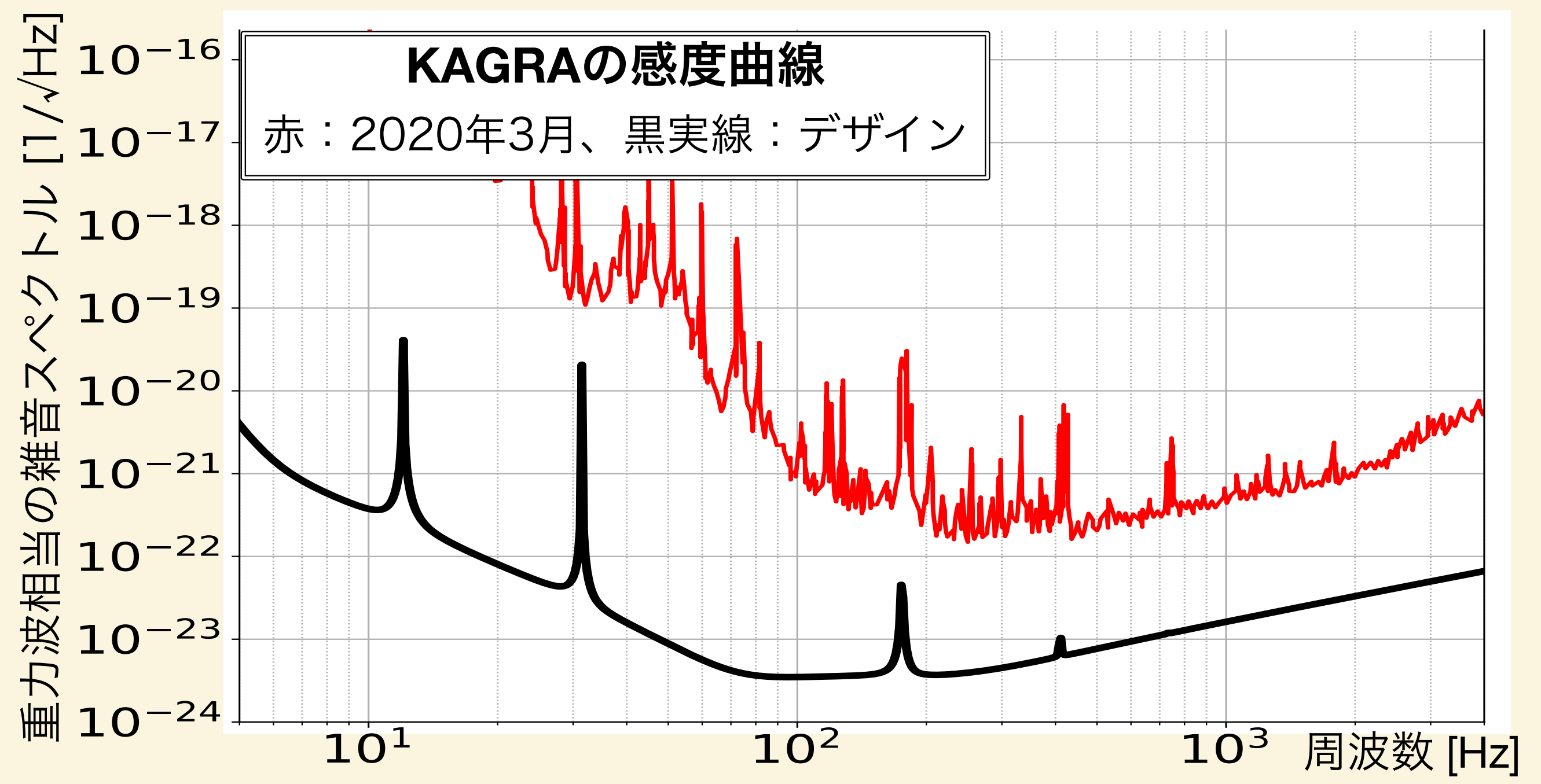
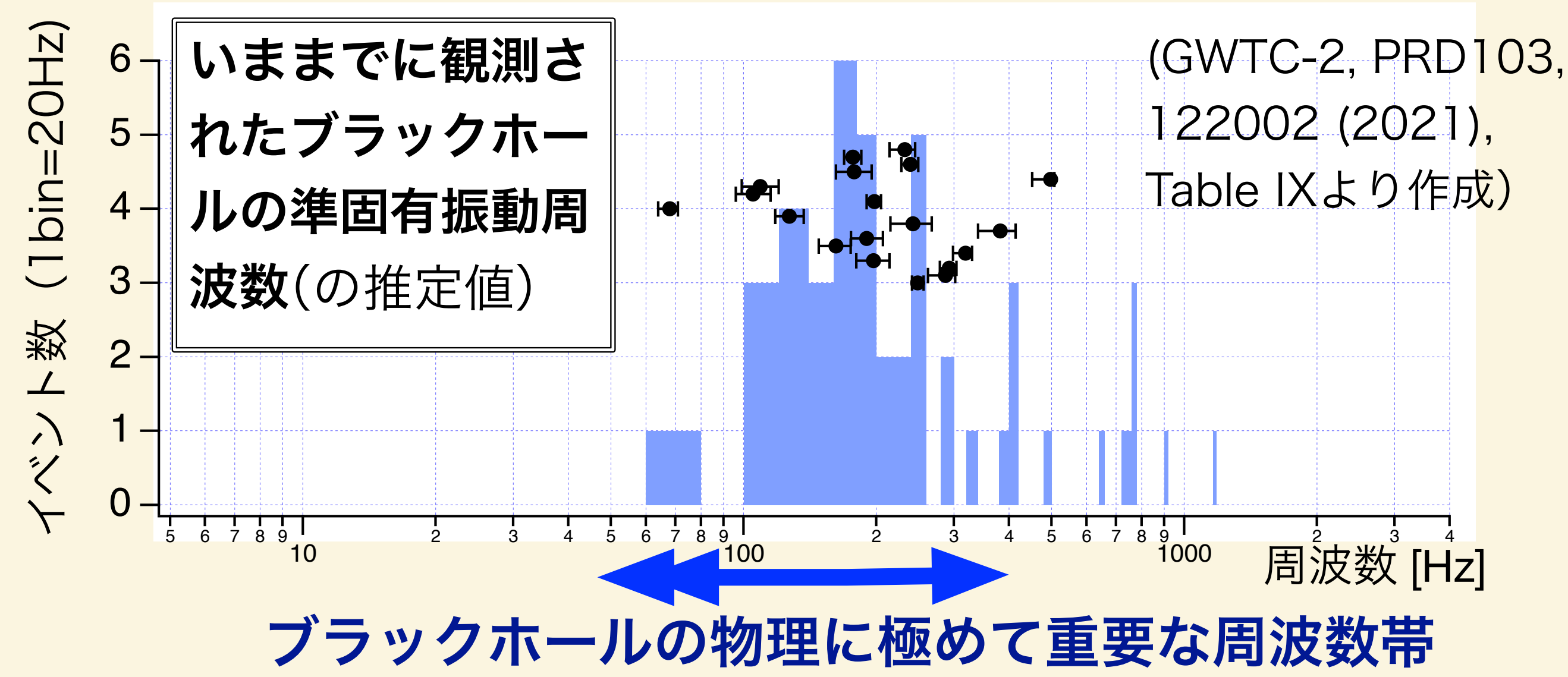
期待が大きいのはBH-BH。
超新星爆発も数100Hz帯が重要。



← インスパイラル波形
連星の質量、
距離、到来方向

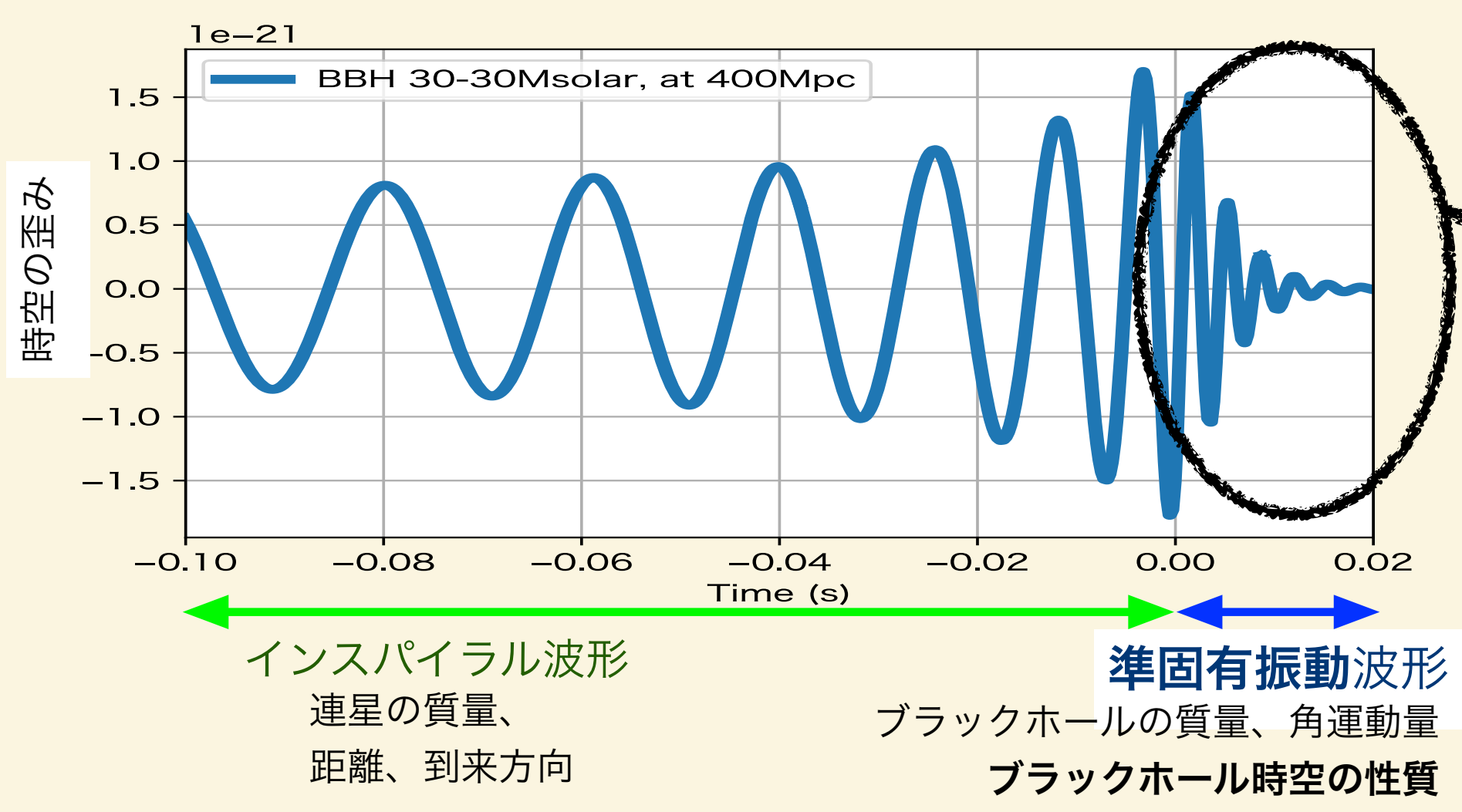
→ 準固有振動波形
ブラックホールの質量、角運動量
ブラックホール時空の性質

ところが...

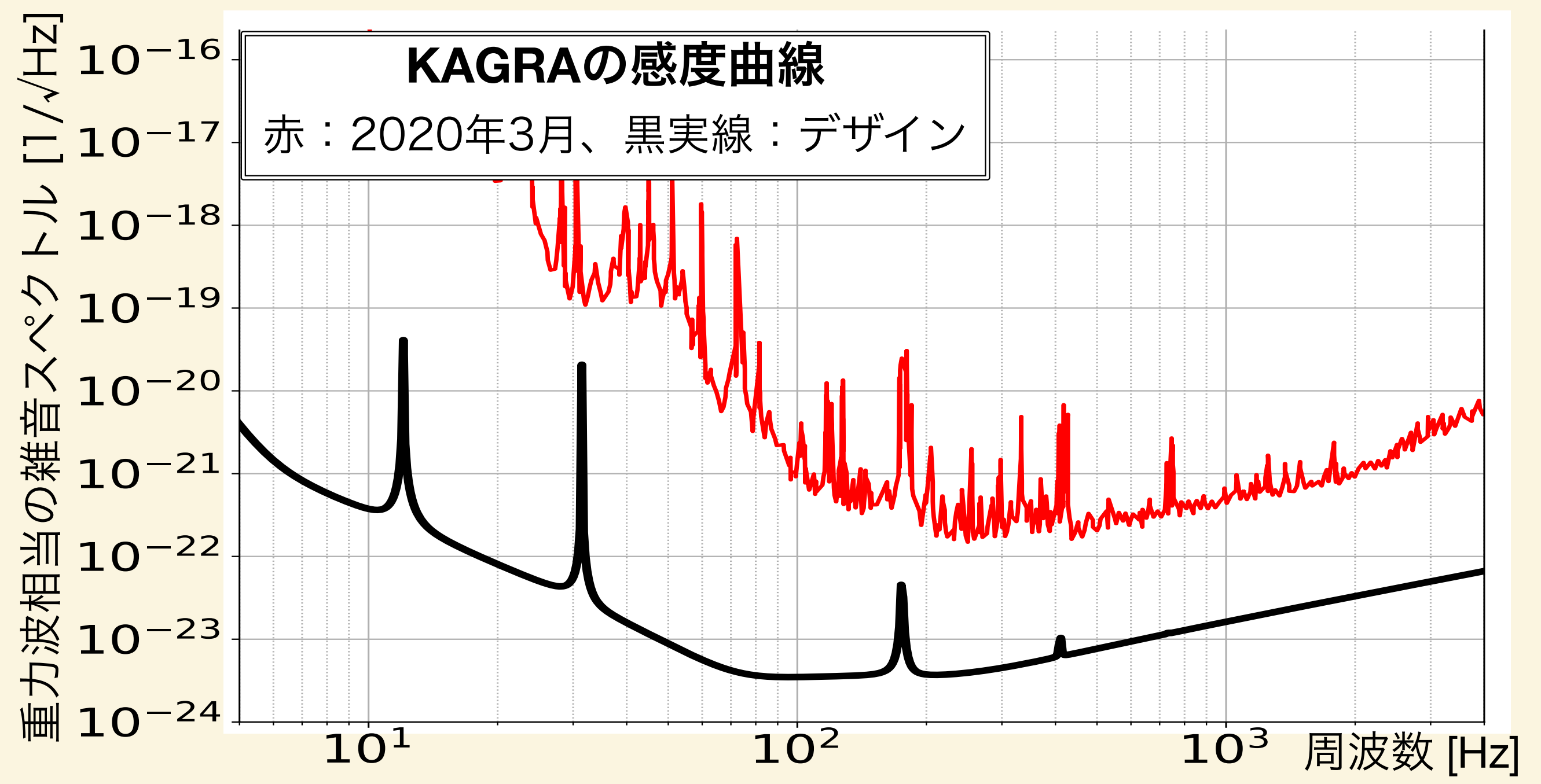
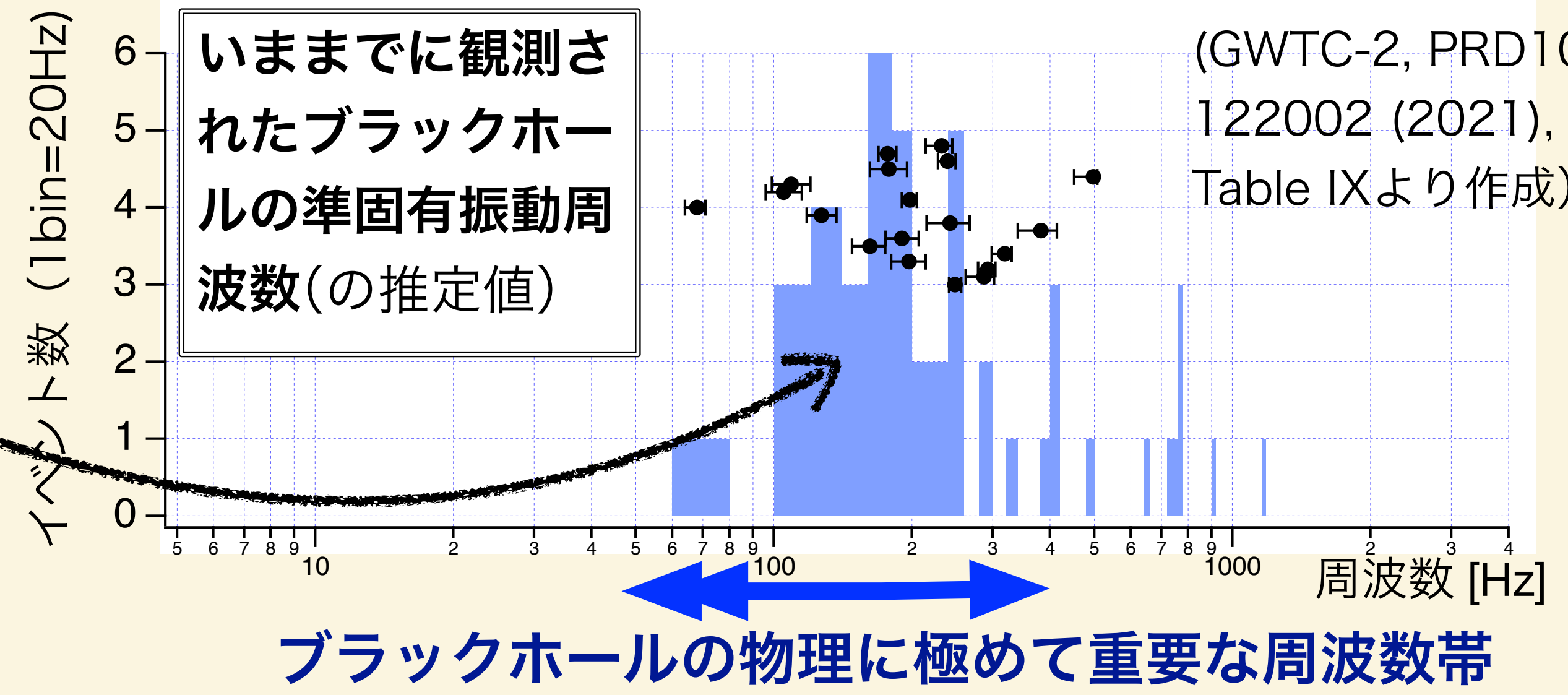


鏡懸架ファイバーのヴァイオリン雑音 & BH準固有振動

期待が大きいのはBH-BH。
超新星爆発も数100Hz帯が重要。

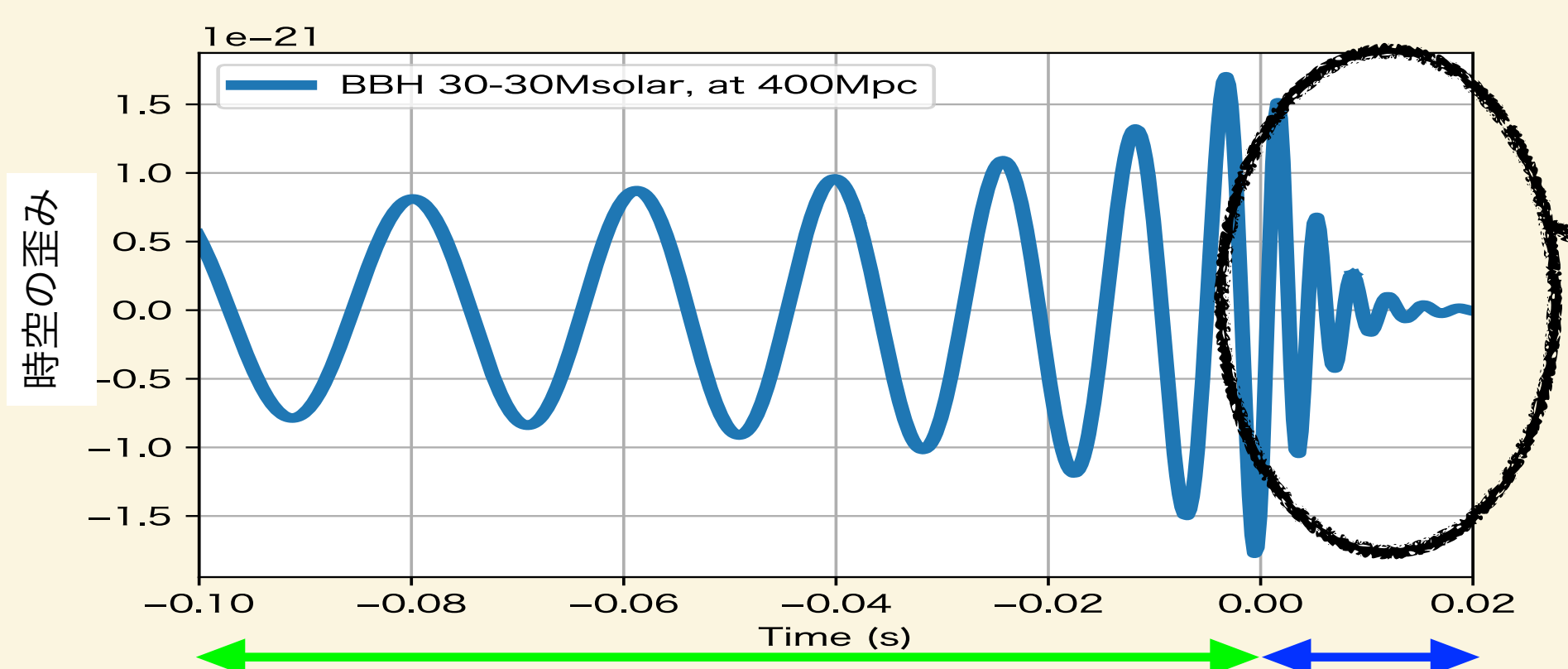


ところが...



鏡懸架ファイバーのヴァイオリン雑音 & BH準固有振動

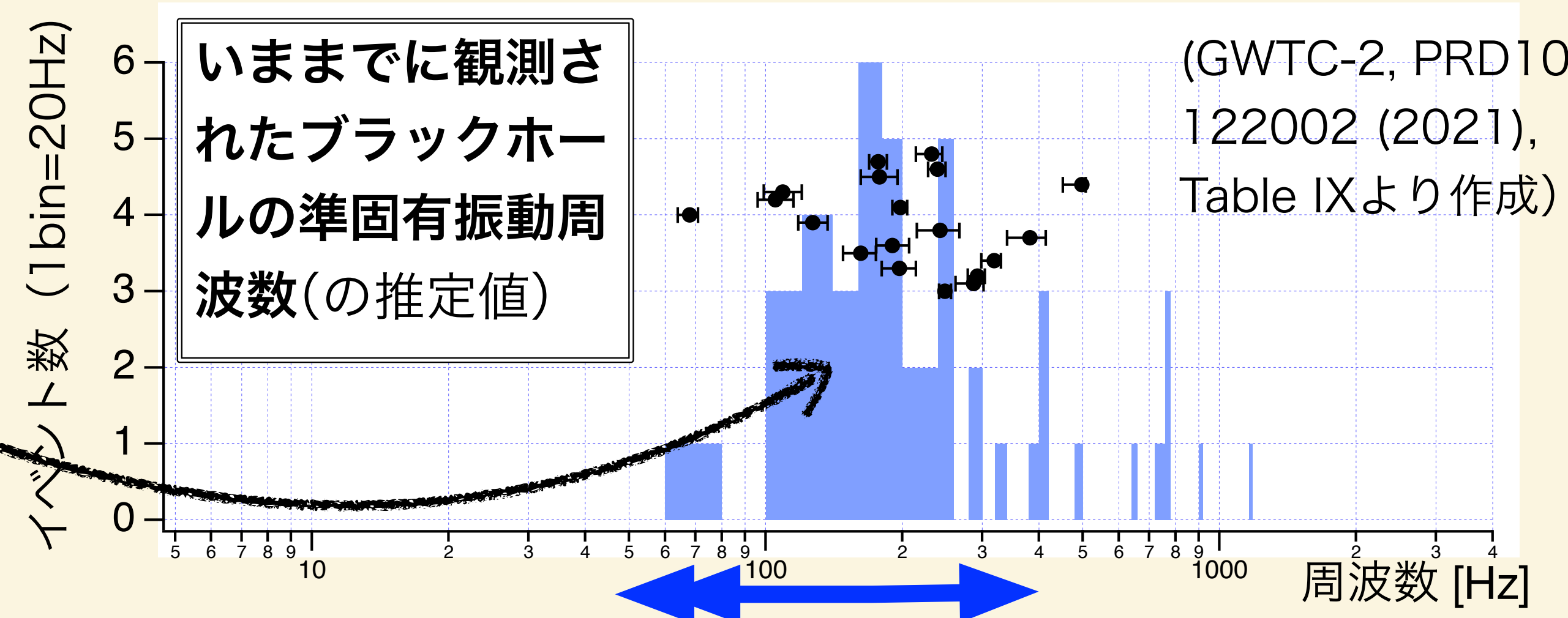
期待が大きいのはBH-BH。
超新星爆発も数100Hz帯が重要。



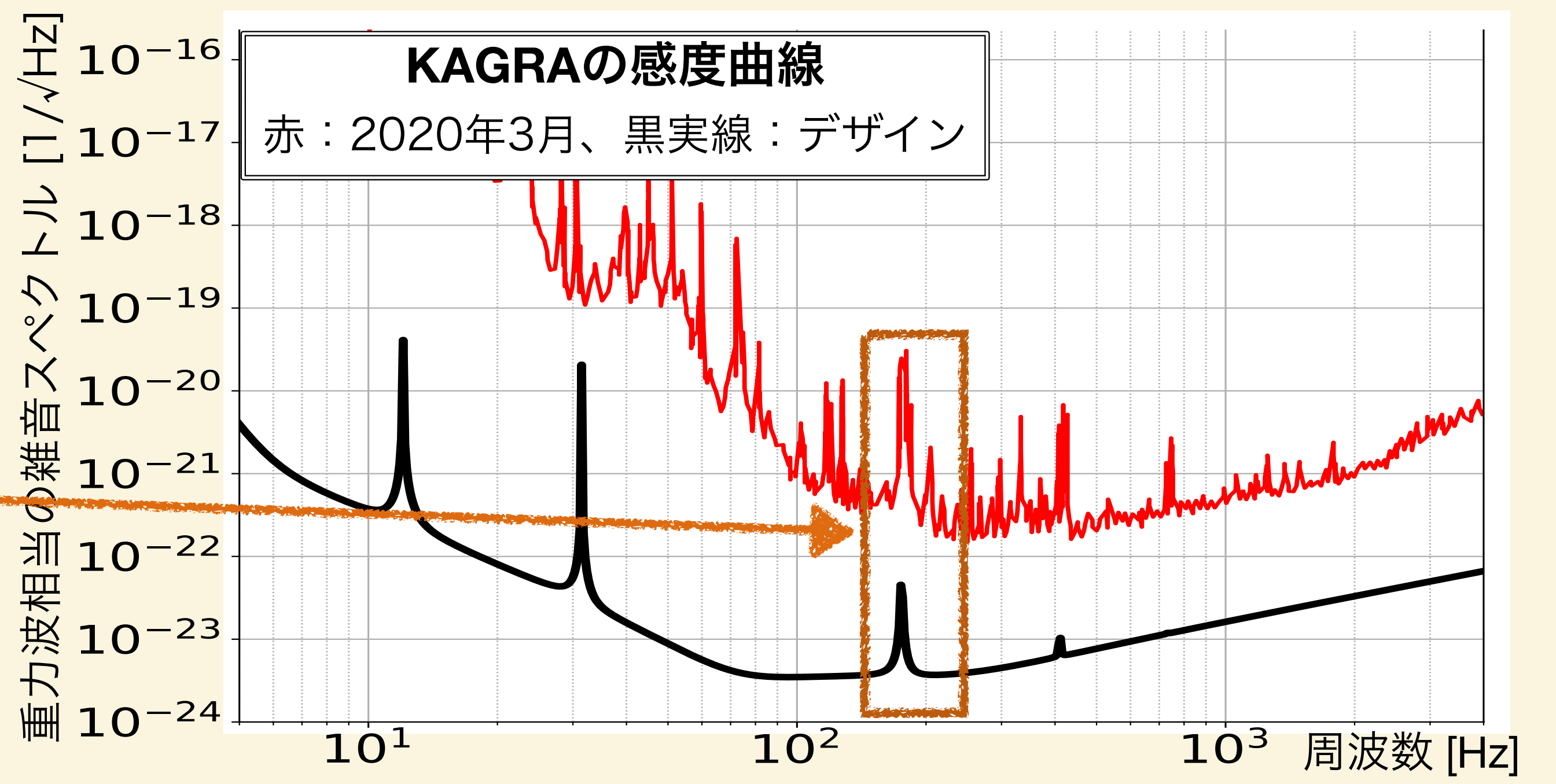
インスパイラル波形
連星の質量、
距離、到来方向

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

ところが...

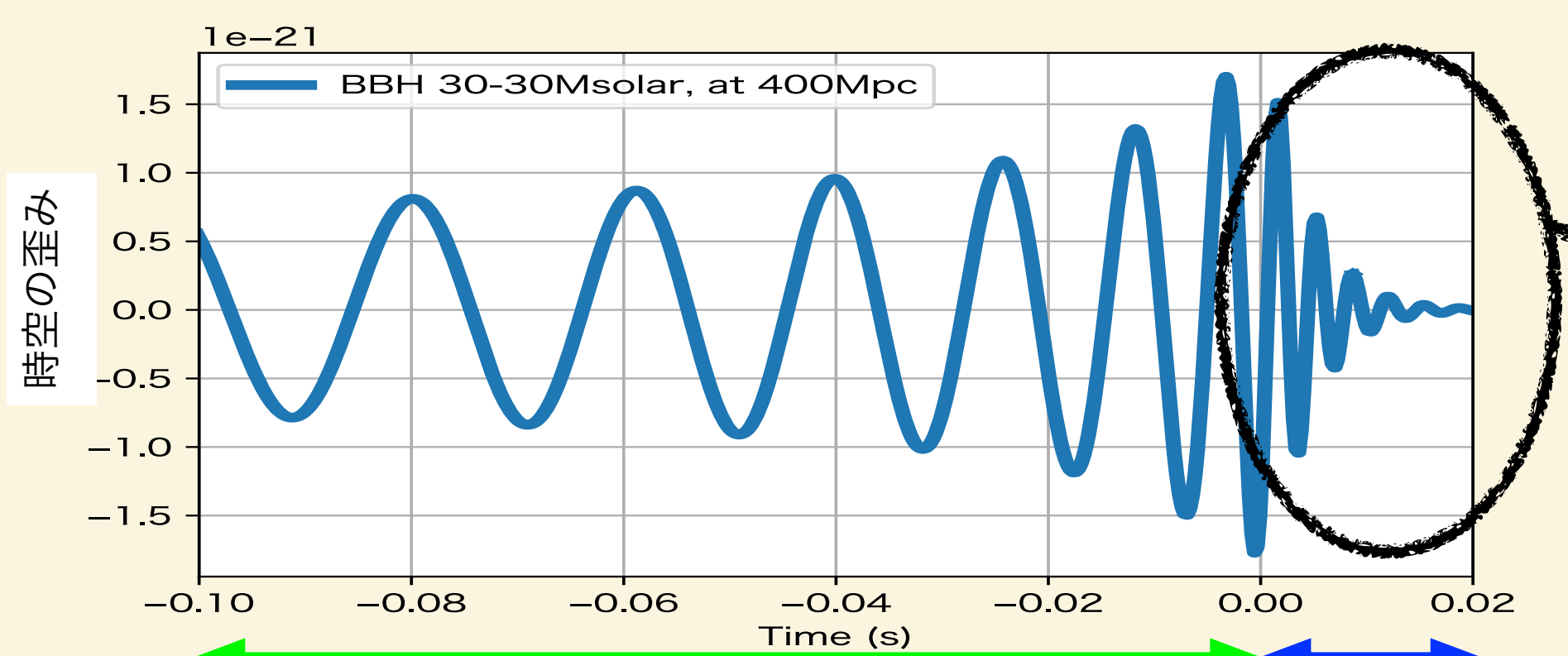


ブラックホールの物理に極めて重要な周波数帯



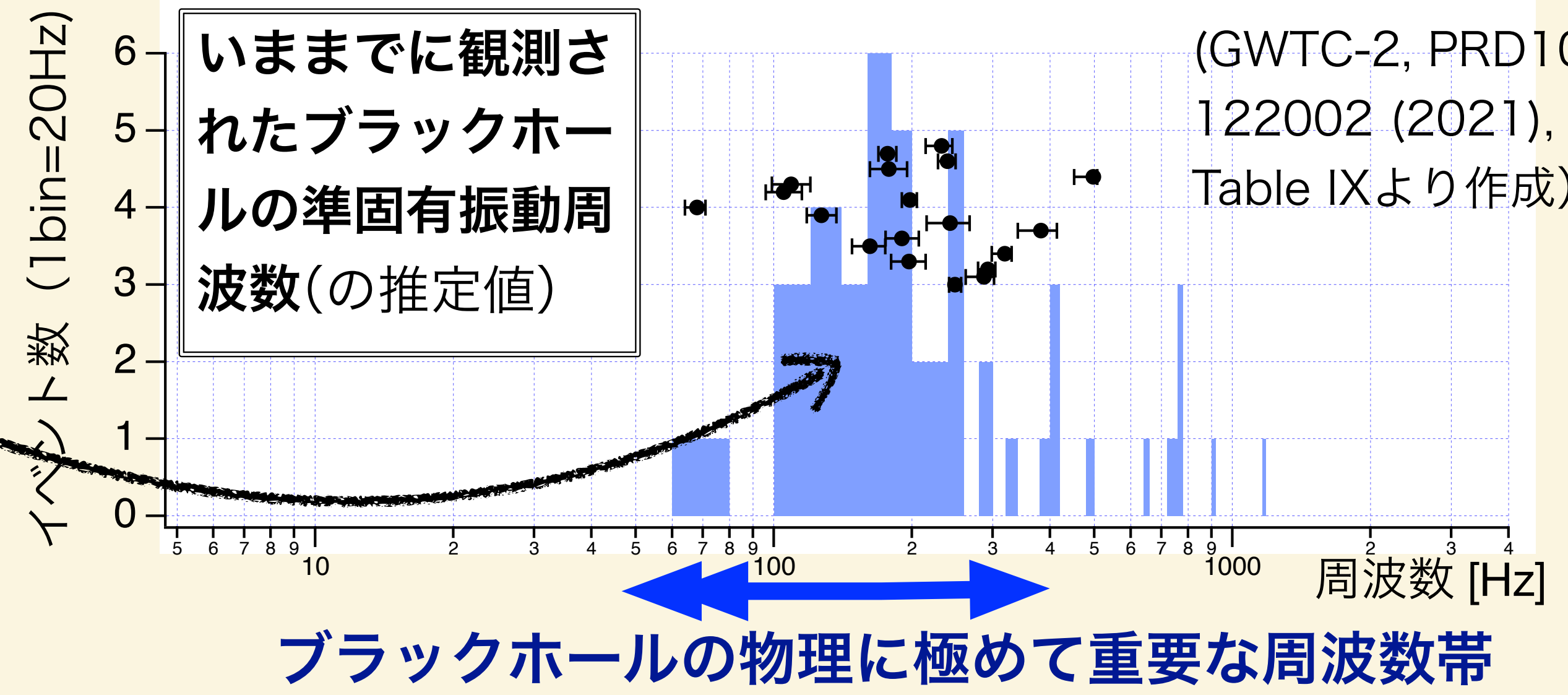
鏡懸架ファイバーのヴァイオリン雑音 & BH準固有振動

期待が大きいのはBH-BH。
超新星爆発も数100Hz帯が重要。

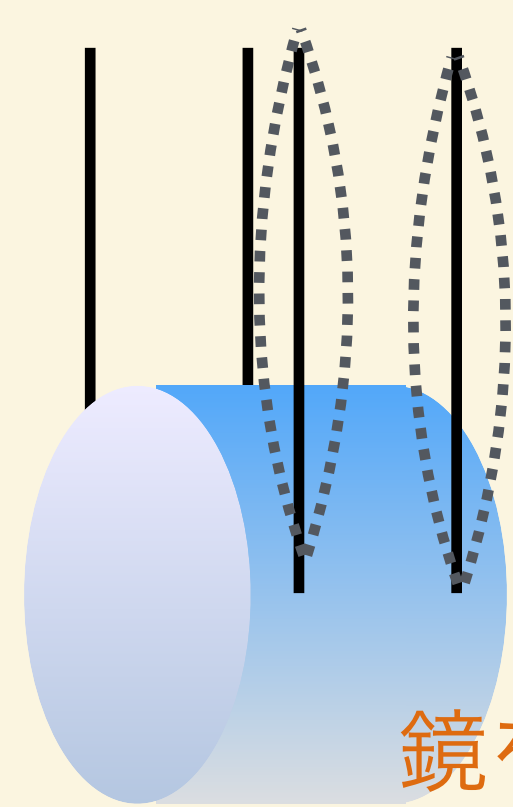


← インスパイラル波形
連星の質量、
距離、到来方向

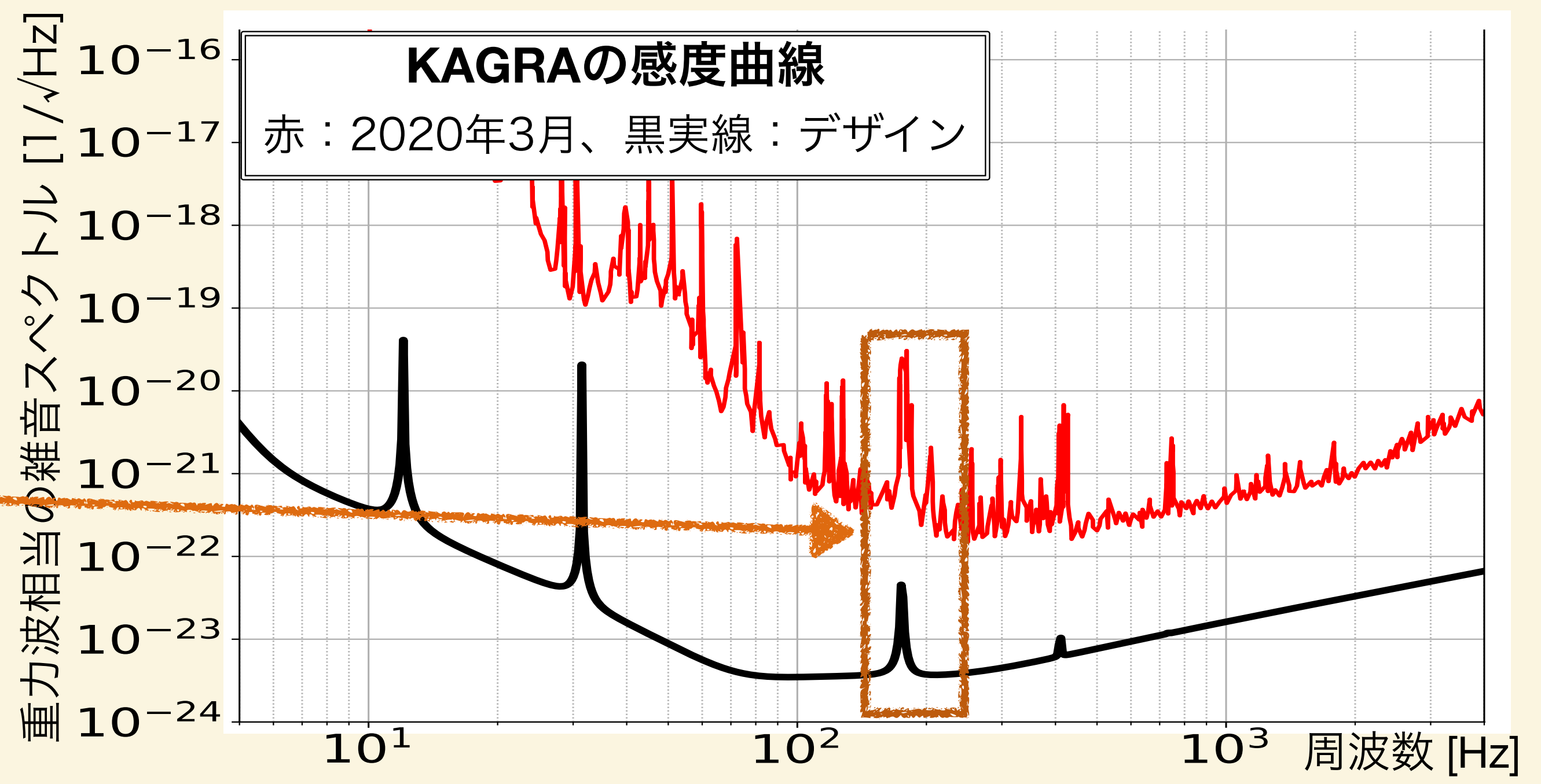
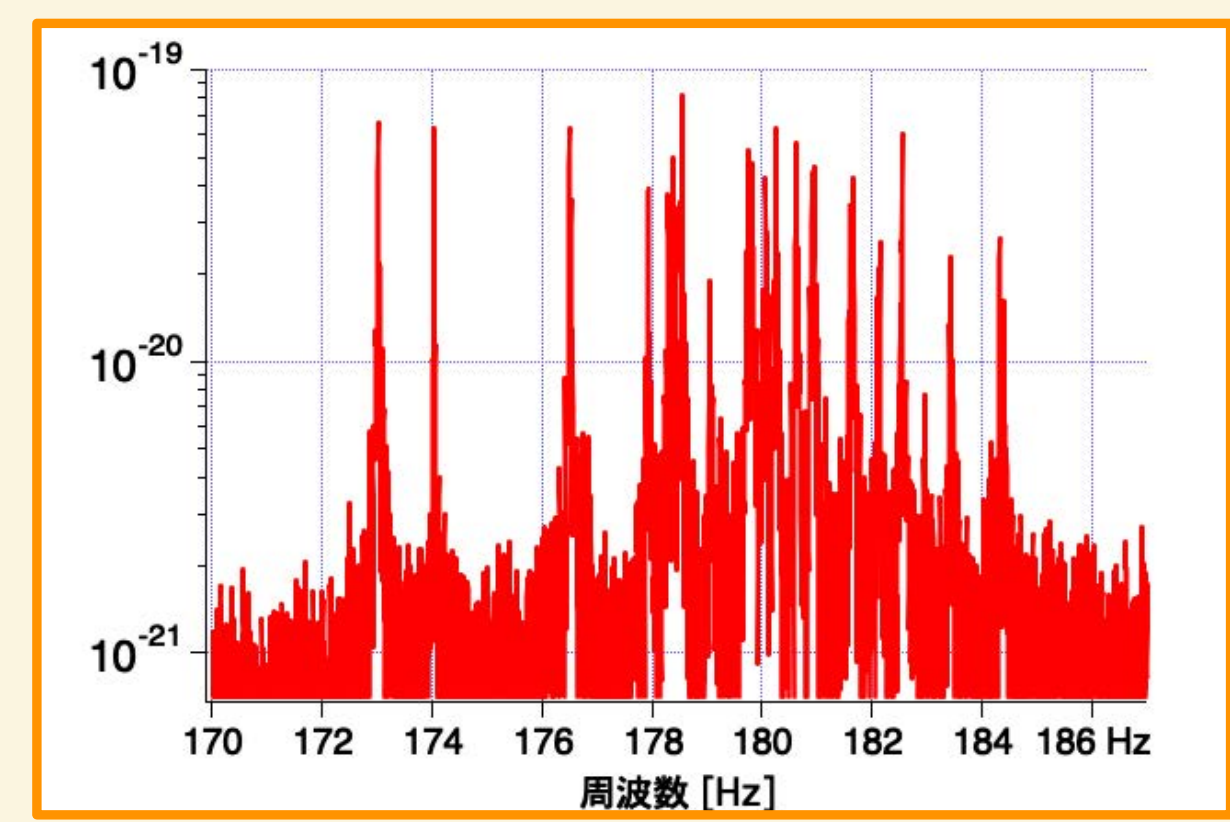
→ 準固有振動波形
ブラックホールの質量、角運動量
ブラックホール時空の性質



ところが...



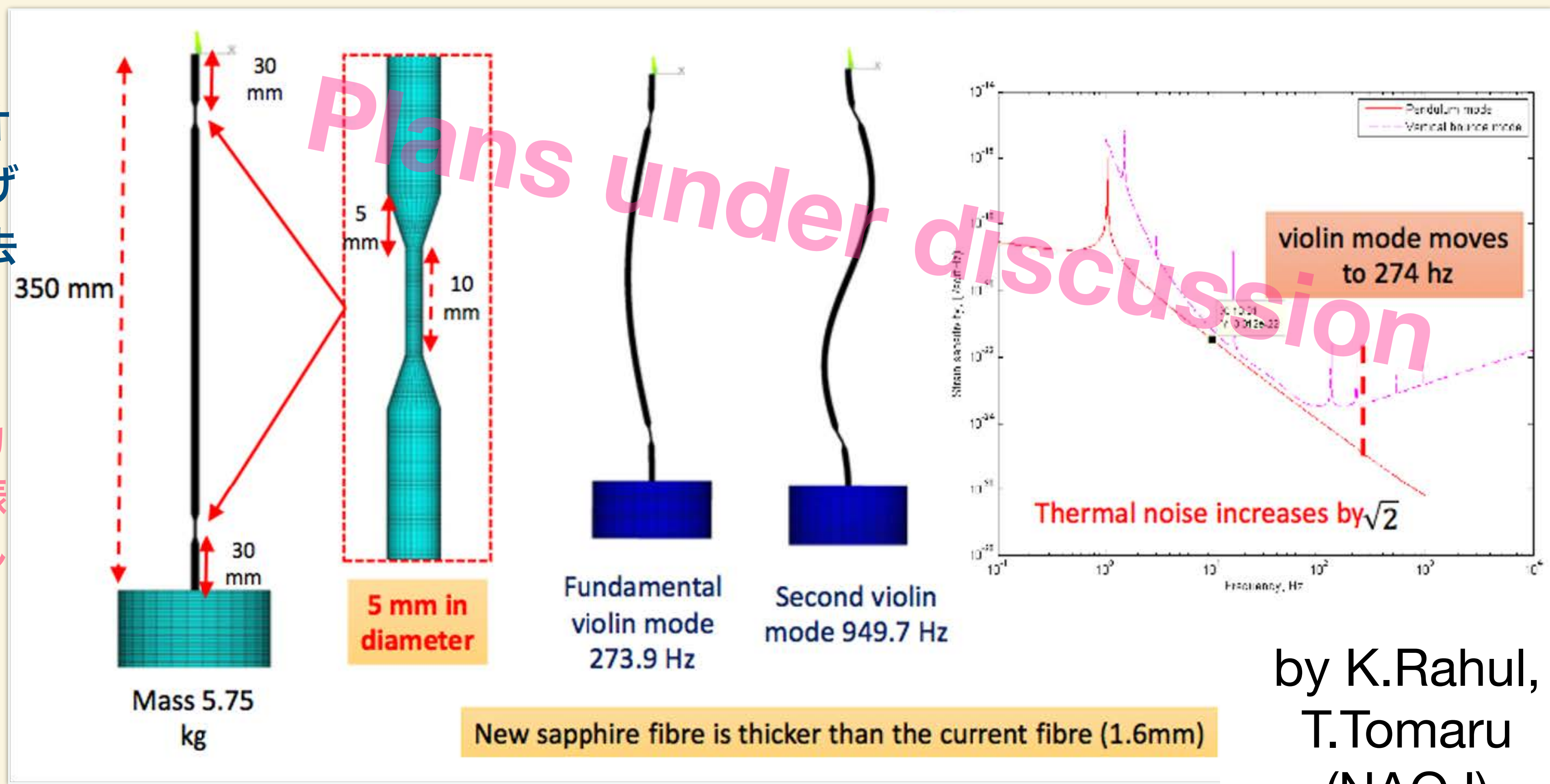
鏡を懸架するファイバーの共鳴振動



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))

展望（ただし、多分に神田の私見...）

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)にどこまで感度をよくできるか？

O5にはKAGRAの重力波イベントが見れるはず。

KAGRAのマルチメッセンジャーへの貢献

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。

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。

これらのためには、高感度だけでなく、安定運転とキャリブレーション精度の達成が鍵。（要するに、検出器としての信頼性）