

宇宙線研重力波グループの研究



宇宙線研重力波グループ



田越秀行教授

データ解析・理論

「重力波検出器のデータ解析や重力波に関係する宇宙物理学の理論的研究を行っています」

A5 サブコース



三代木伸二教授



内山 隆准教授

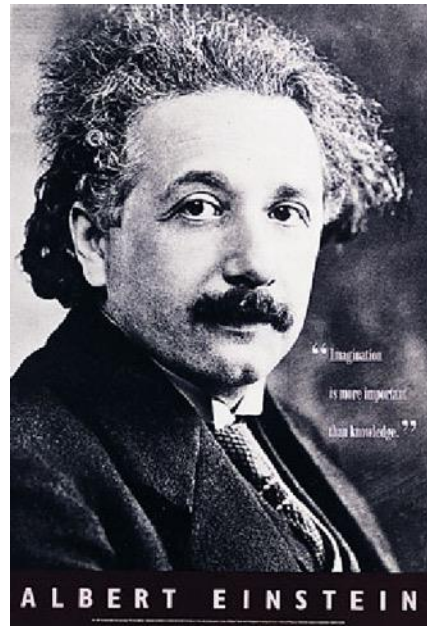


宮川 治准教授

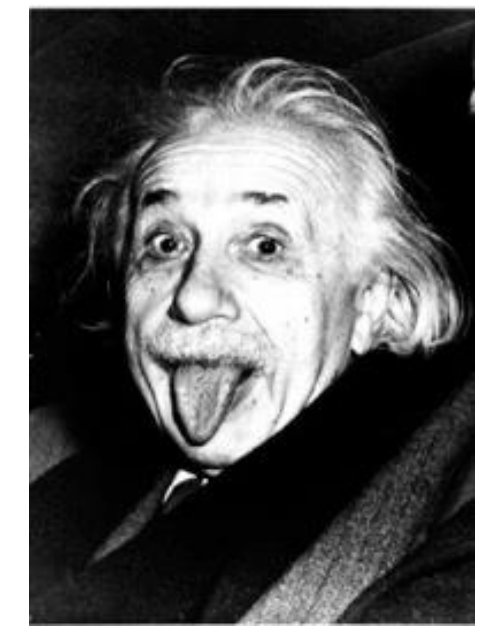
重力波実験

「岐阜県飛騨市にある神岡鉱山に建設した低温重力波望遠鏡KAGRAを用いて宇宙から届く重力波の検出を目指しています」

A8 サブコース

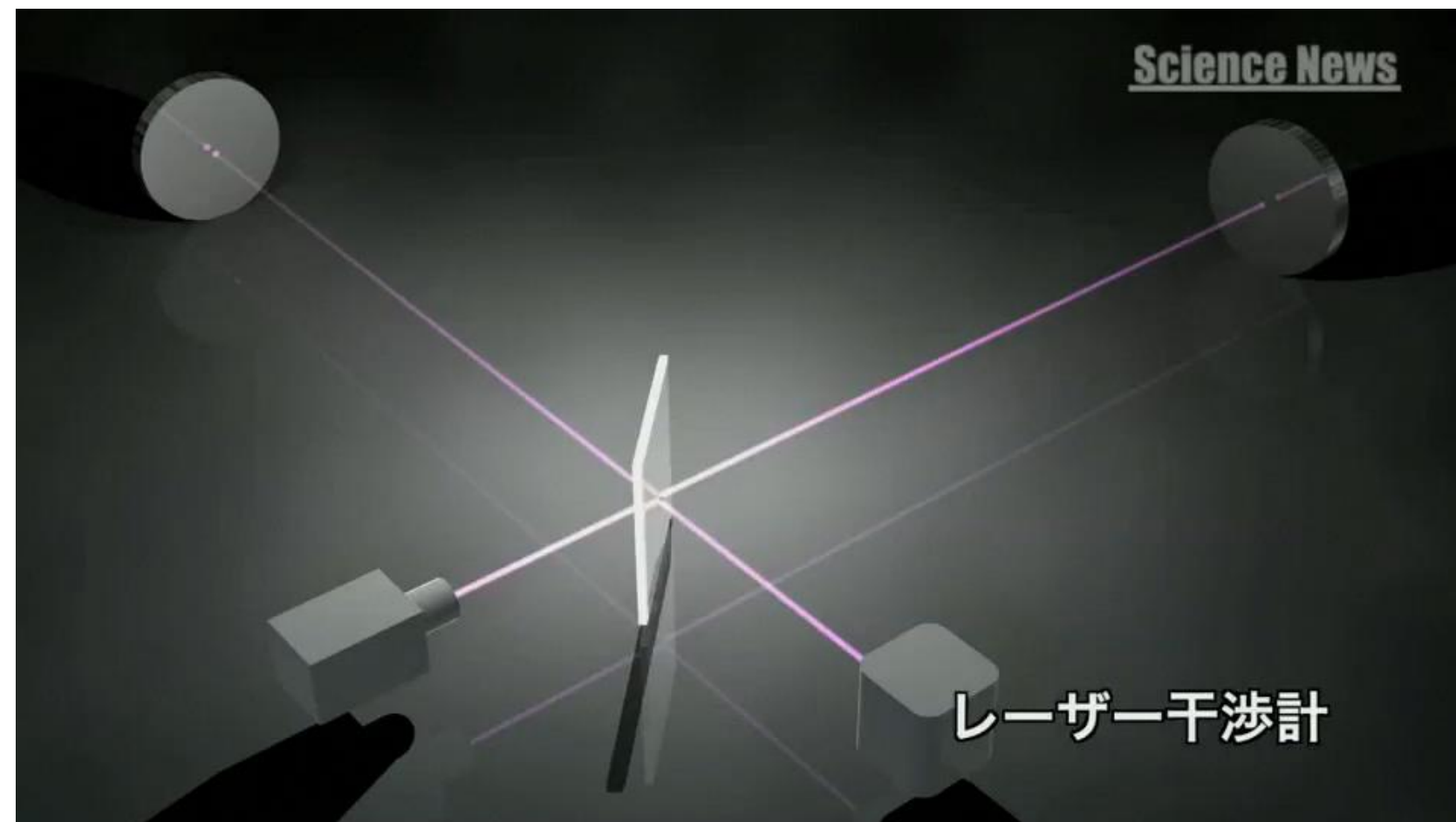


重力波と重力波検出



- アインシュタイン博士が1916年に一般相対性理論で予言。
- 時間と空間(時空)のひずみを光速で伝える波動現象。
- 質量の非球対象な運動により発生。実験室内で検出可能な強度の重力波の発生は実質的に不可能。→宇宙から届く重力波を検出しよう
- 2015/9/14にLIGO(米国)により初検出。発生源はBHの連星合体。
- 初期宇宙から中性子連星の合体、超新星爆発、パルサーなど様々な天体現象が重力波源になる。
- 大型レーザー干渉計が現在の主流。KAGRA, LIGO, VIRGO etc.
 - 重力波検出の意義その1：一般相対性理論の実験的検証。
 - 重力波検出の意義その2：重力波天文学。

重力波検出の原理 光路長変化の精密測定

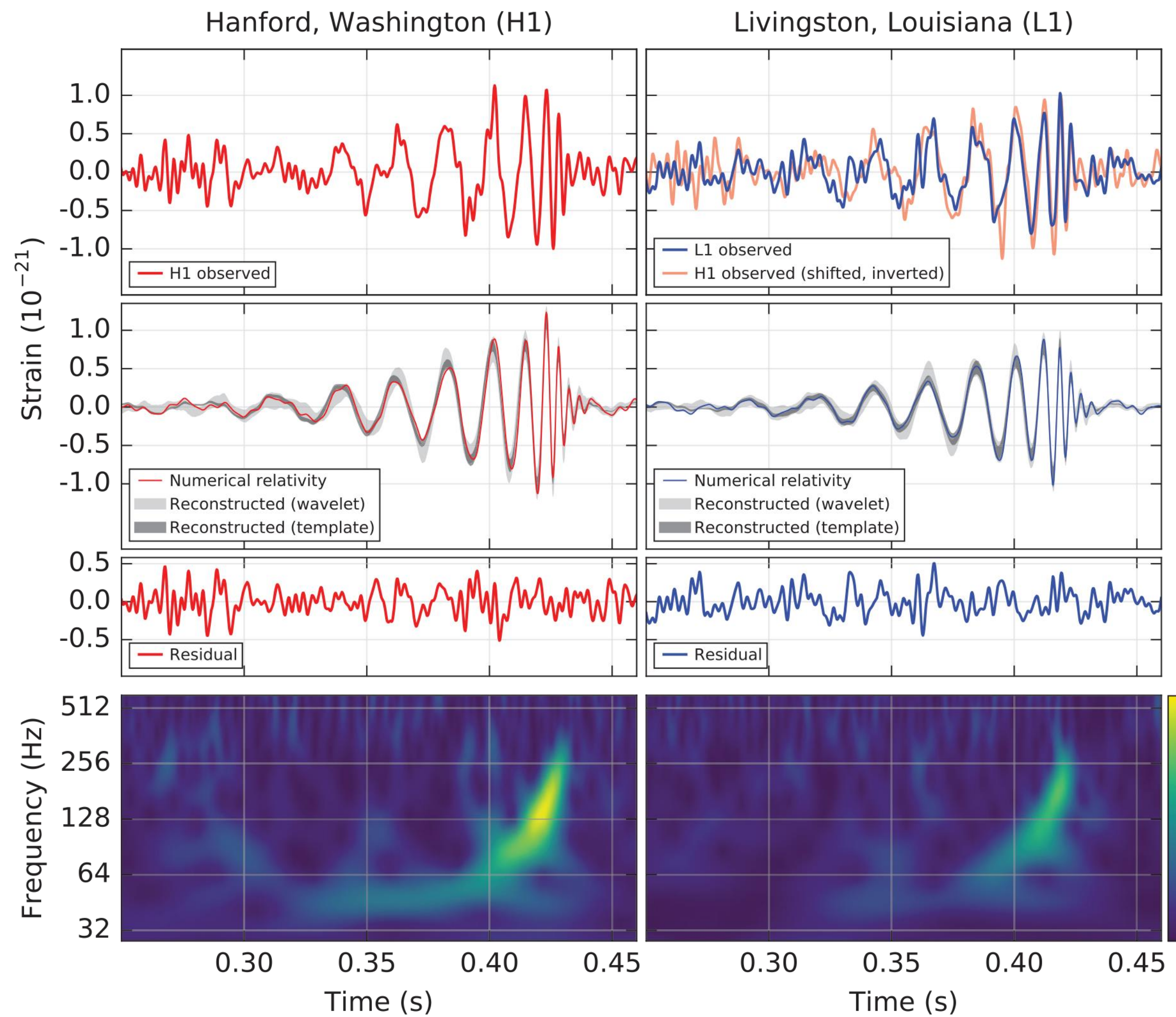


重力波検出のため
一辺3~4kmの巨大レーザー干渉計を建造し

$\frac{1}{100,000,000,000,000,000,000,000}$ m 注：0が20個あります
この微小距離変化測定の実現を目指します。

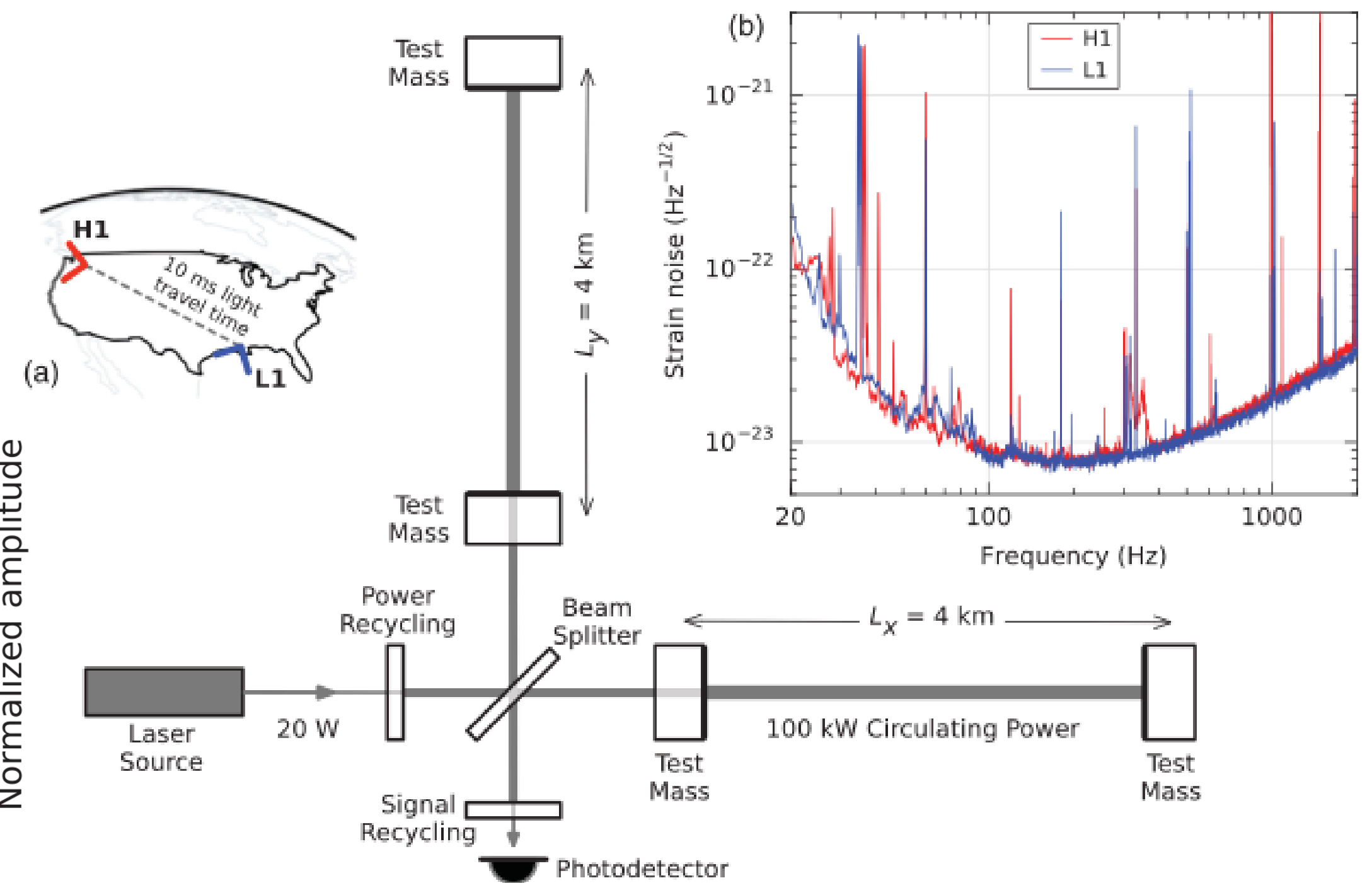
歴史的重力波観測その 1 GW150914

重力波の初検出



発見の重要性

- 初めての重力波検出である。
- 初めて BH 連星を発見し、その合体を観測した。
- 最も重い恒星型 BH を発見した。
- 強い重力場において、一般相対性理論の検証を行った。



重力波国際ネットワーク

複数の重力波望遠鏡による同時観測網

- LIGO Livingston (LLO): アメリカ ルイジアナ州
- LIGO Hanford (LHO): アメリカ ワシントン州
- Virgo: イタリア ピサ カッシーナ
- KAGRA: 日本 岐阜県飛騨市神岡町

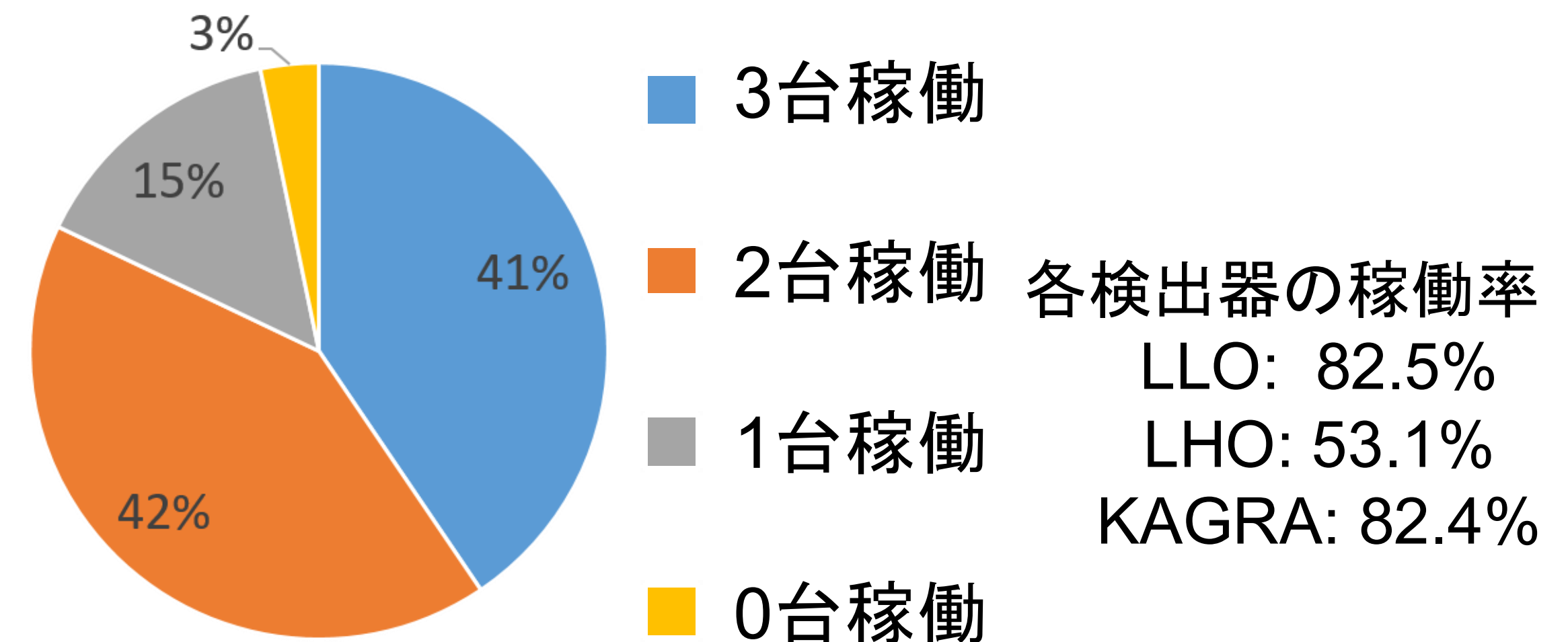
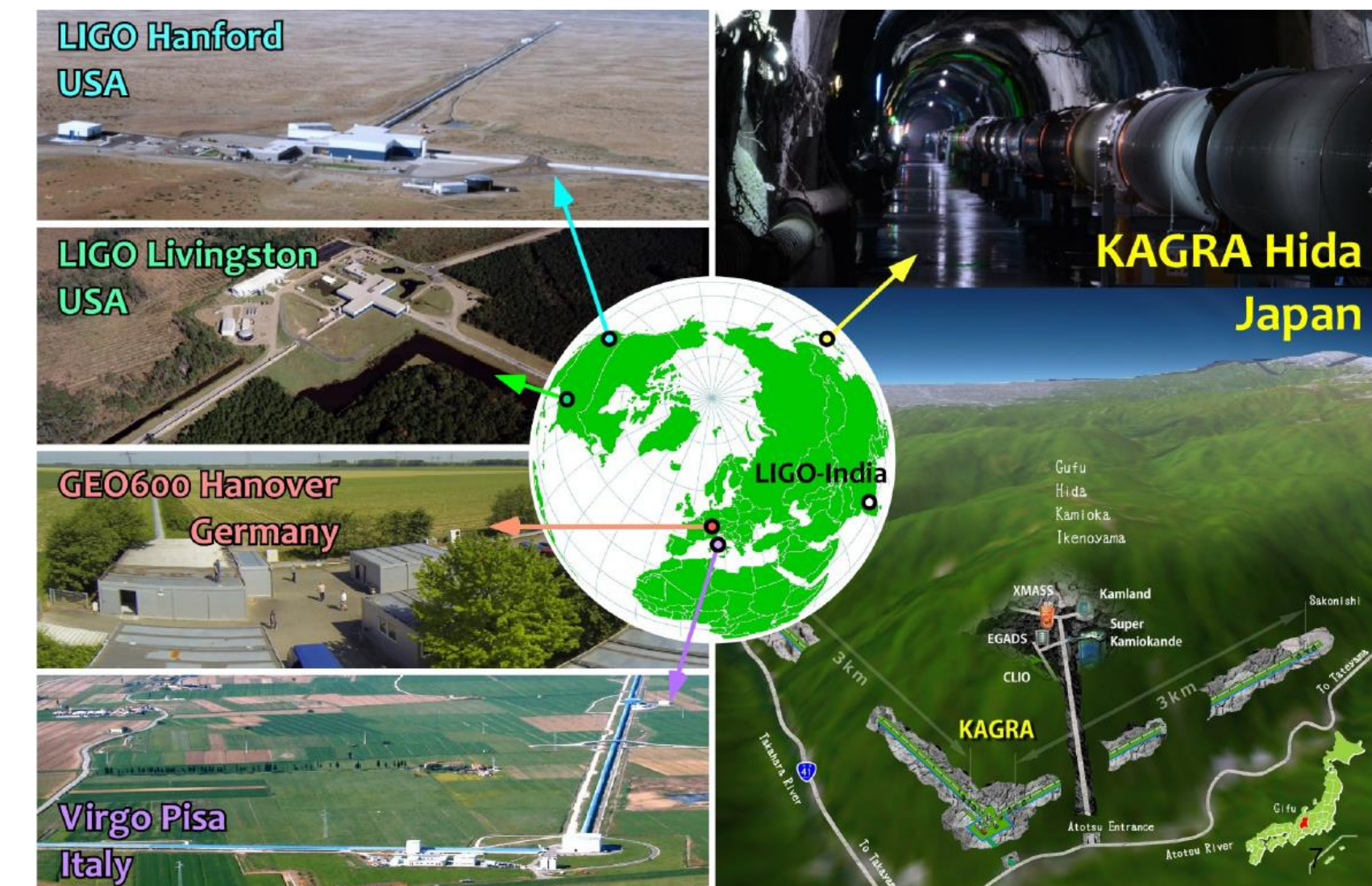
重力波の観測に複数の検出器が必要となる理由

- 方向決定精度の向上
- パラメータ決定精度の向上
- 複数台稼働率の向上

今までに4回の国際共同観測(O1 – O4)

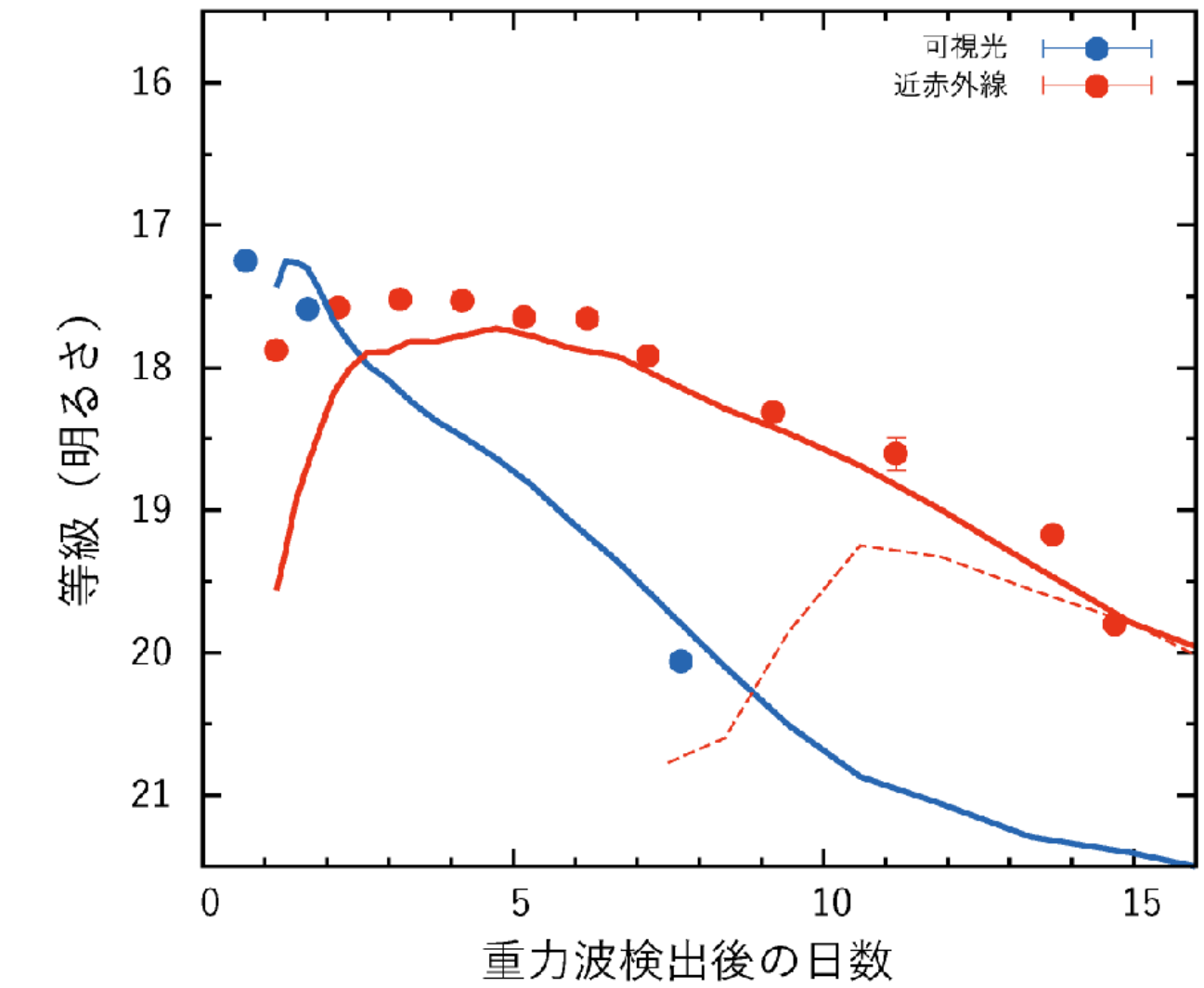
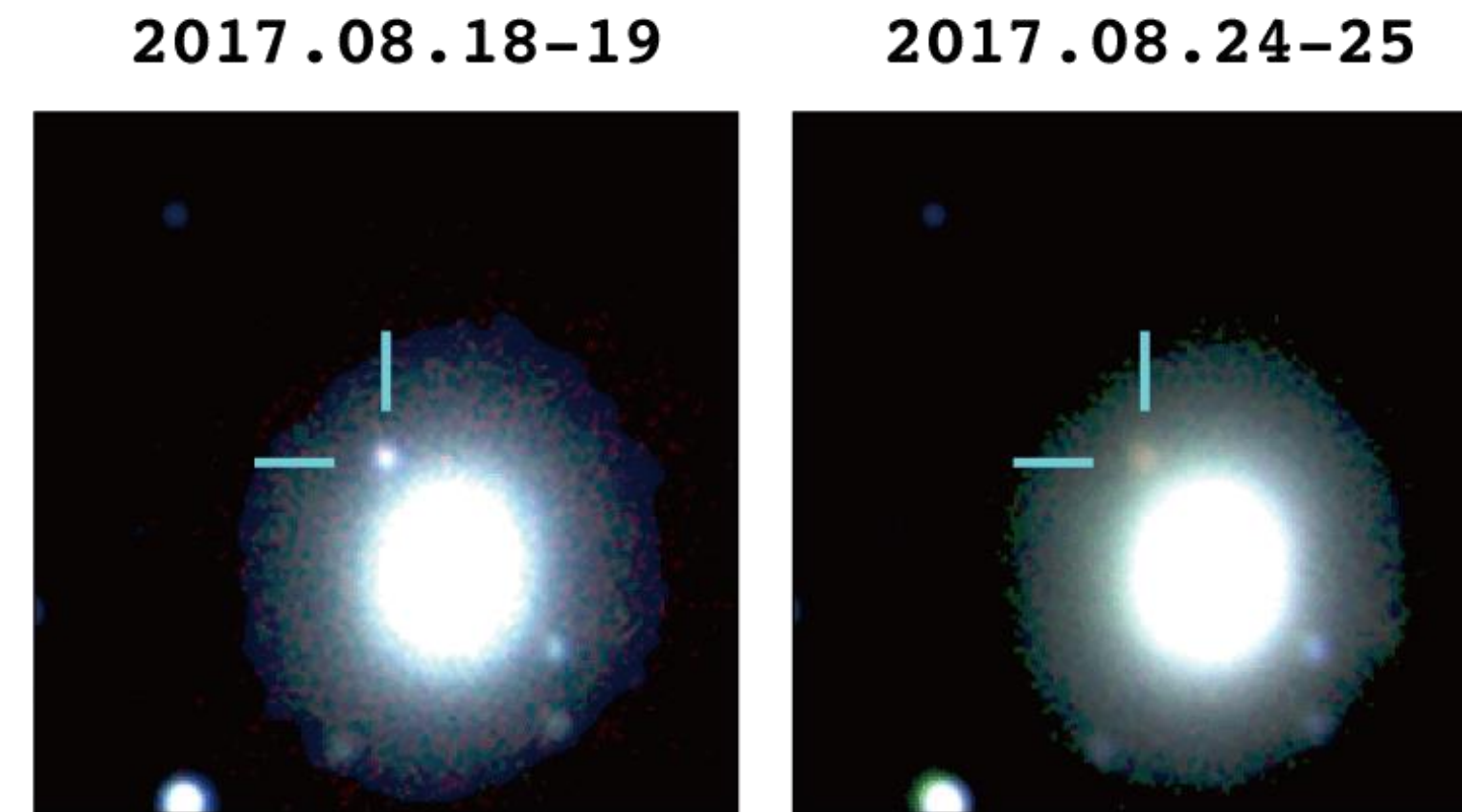
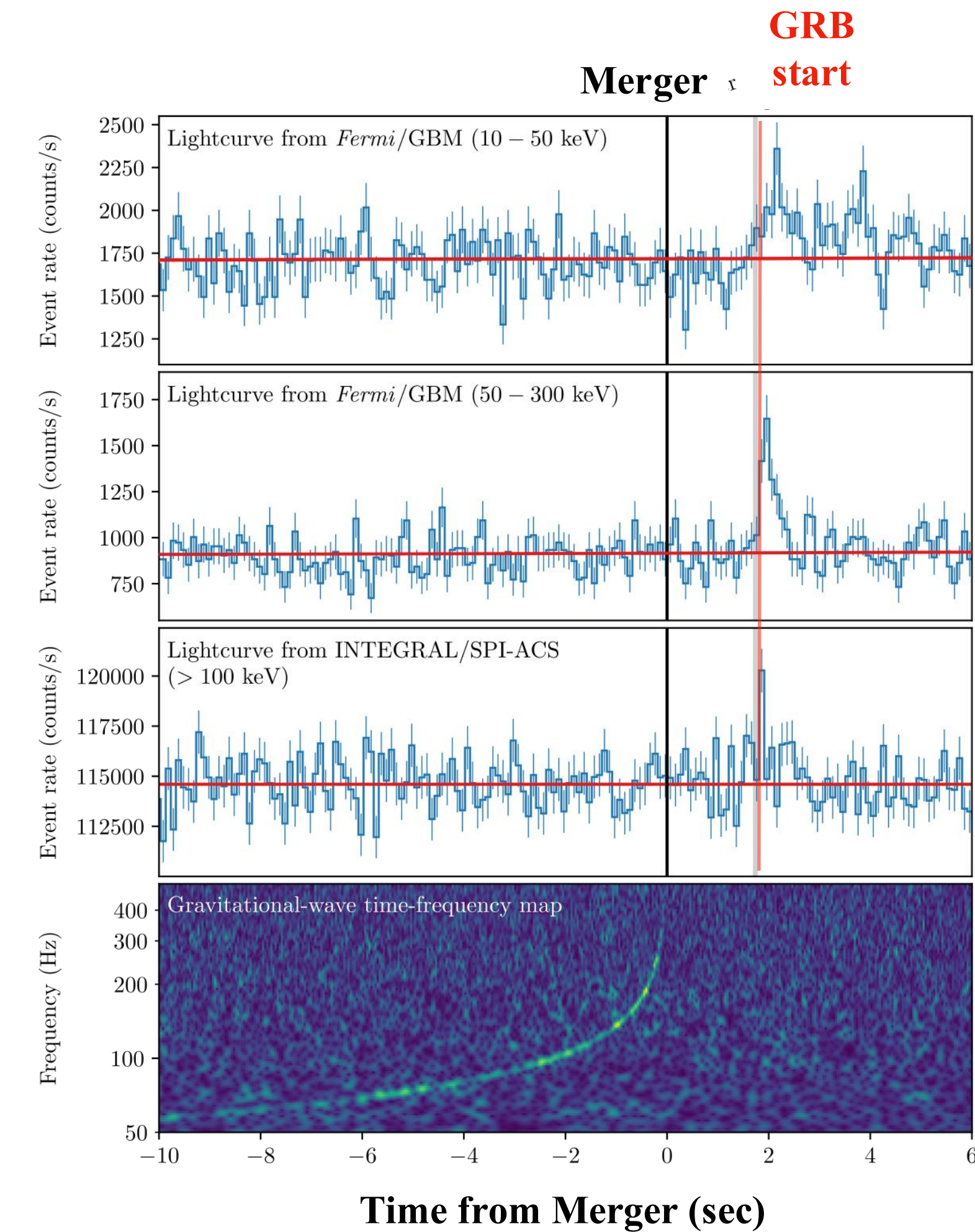
現在はO4観測期間中で2025年10月までの予定

KAGRAの参加は非常に重要



2023年5月24日15:00UTCから
2023年6月20日23:00UTCのネットワーク稼働率

歴史的重力波観測その2 GW170817 連星中性子星合体による重力波の初観測



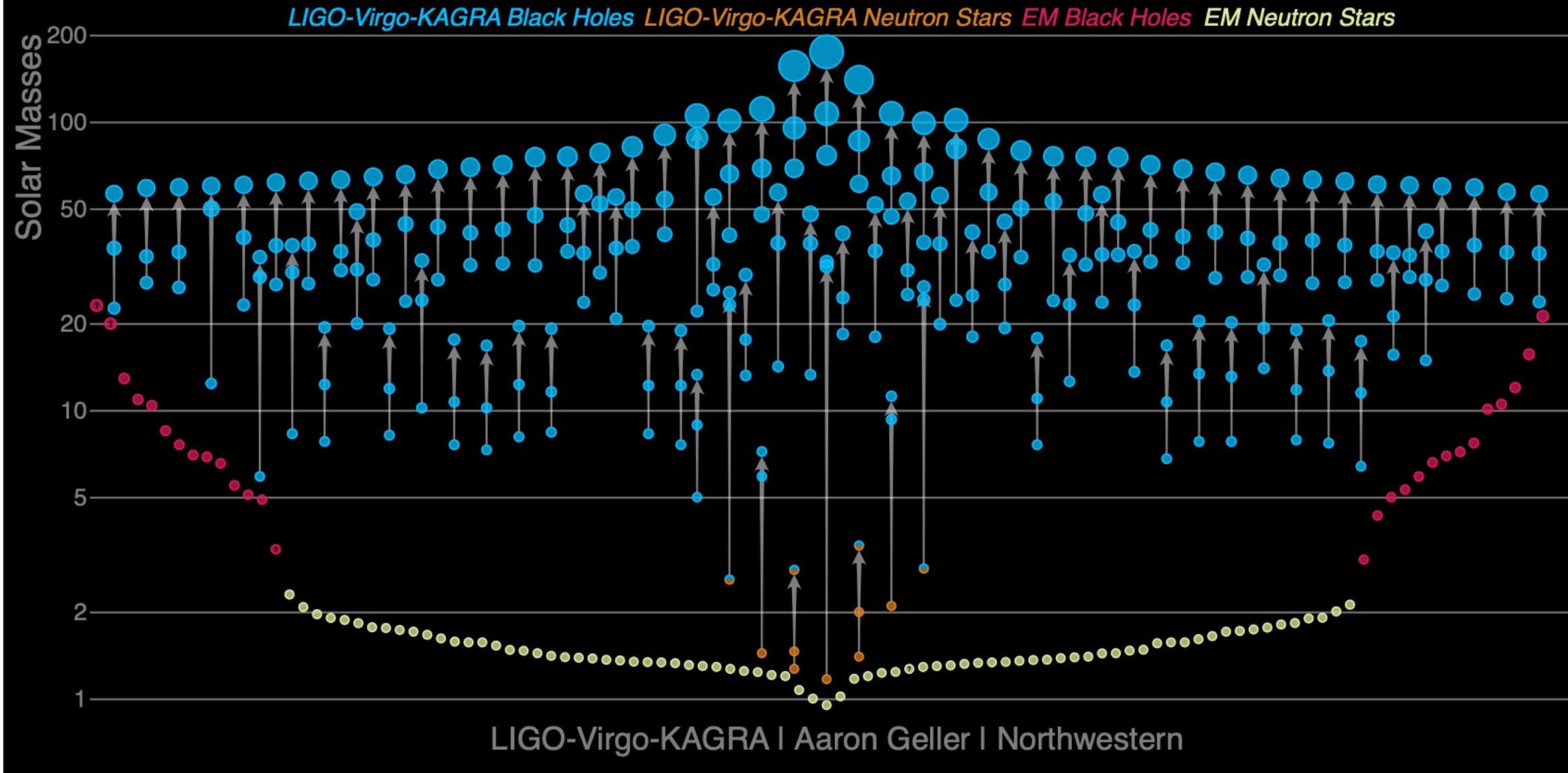
Importance of the discovery

- 初めての中性子連星合体からの重力波検出。
- 電磁波観測によるフォローアップ観測に成功。
 - 精度の高い波源方向の決定。
 - ショートガンマ線バーストを観測。→ 起源を確認。
 - r-プロセスに伴うキロノヴァを観測。→ 重金属の起源を確認。
- ハッブル定数の導出。
- 中性子星の半径と状態方程式の導出。
- 一般相対性理論の検証。→ 理論とよく一致した。

Short Gamma Ray Burst 1.7sec after GW170817

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL LETTERS, 848:L13 (27pp), 2017 October 20

Masses in the Stellar Graveyard



これまでに重力波および電磁波観測により発見された中性子星とブラックホール

- 重力波観測O1(2015/9-2016/1), O2(2016/11-2017/8), O3(2019/4-2020/3)
- これまでに90回の連星合体による重力波観測を実現(O3では50回！！)
- BH-BH: 84, NS-NS: 2, BH-NS: 2, BH-BH/NS: 2
- 電磁波追観測に成功したのはGW170817のみ

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

大型低温レーザー干渉計KAGRA

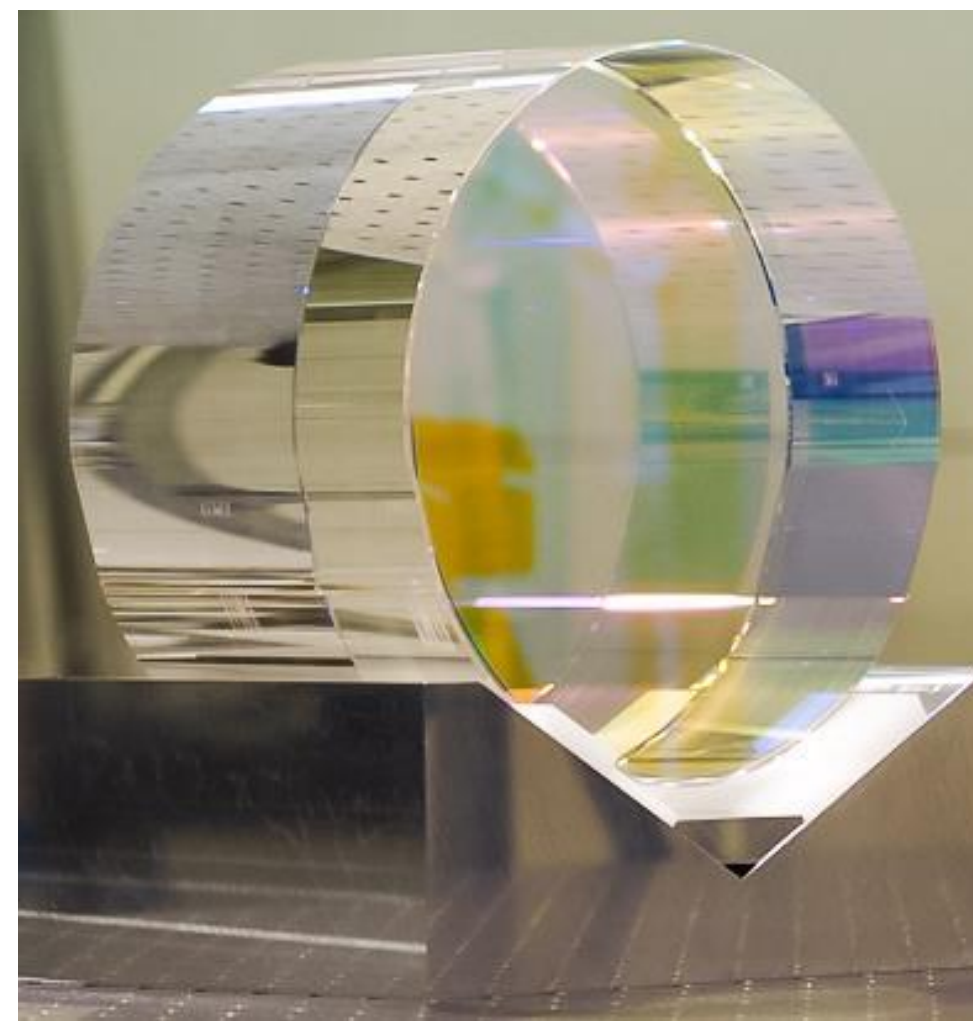
岐阜県飛騨市に建設された3kmの腕共振器を持つ
干渉計型重力波望遠鏡

他の重力波望遠鏡にはない2つの特徴

- 地下サイトの利用 → 地面振動雑音の低減
- 鏡の低温化 → 熱雑音の低減



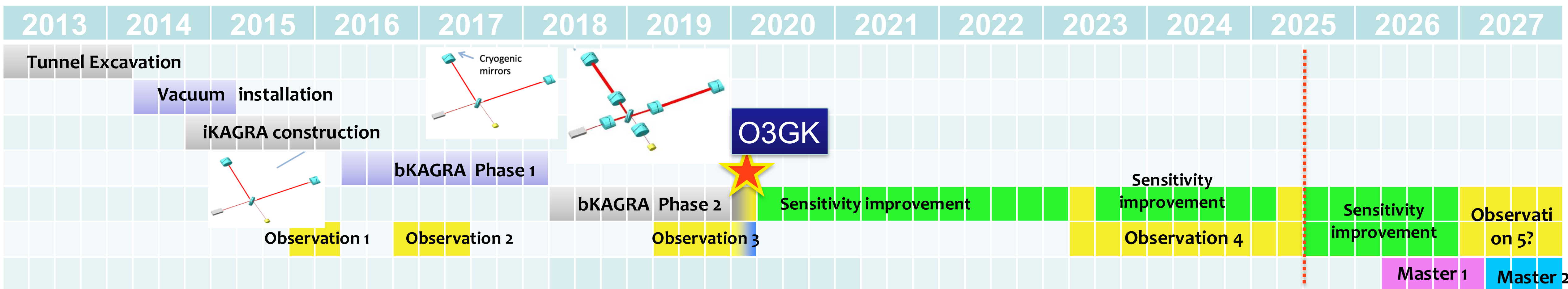
掘削直後のトンネル



サファイア鏡



KAGRA ROAD MAP



- KAGRAプロジェクトは2010年より始まった。段階的に巨大干渉計の建設を進めた。
- iKAGRA: 常温マイケルソン干渉計。km-class干渉計のテスト運転。約3週間の試験観測を完了。
- bKAGRA Phase 1: 低温マイケルソン干渉計。低温技術、大型防振装置の導入
- bKAGRA Phase 2: フルスペック。全ての要素がインストール。
- O3GK : 2020年4月に国際共同観測を実施。
- 現在はObservation 4実施中（2025年11月ごろまで）。
- KAGRAは地震からの復旧と感度向上作業を実施し、6月から観測に参加予定。
- 皆さんが修士の時には、次の観測に向けた感度向上作業に参加可能。

O4a観測とKAGRAの感度

低周波数：

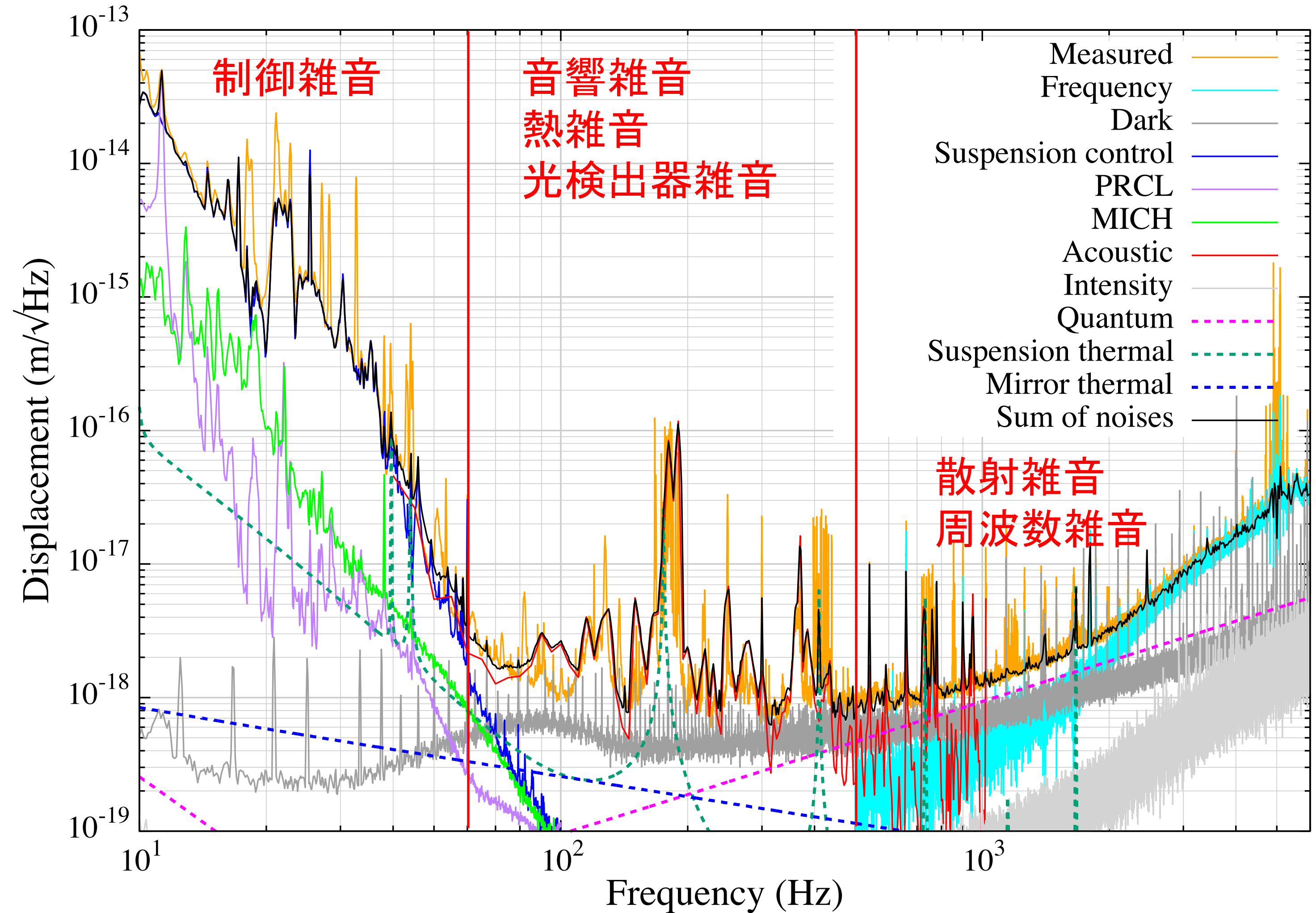
- 防振装置の制御雑音
- 他自由度の制御雑音

中間周波数：

- 熱雑音
- 音響雑音
- 光検出器雑音

高周波数：

- レーザー周波数雑音
- 光の散射雑音
- 光検出器雑音



雑音低減を達成して2024年3月から国際共同観測O4bに参加する予定だったが…

能登地震



KAGRAとデータ収集解析棟



データ収集解析棟



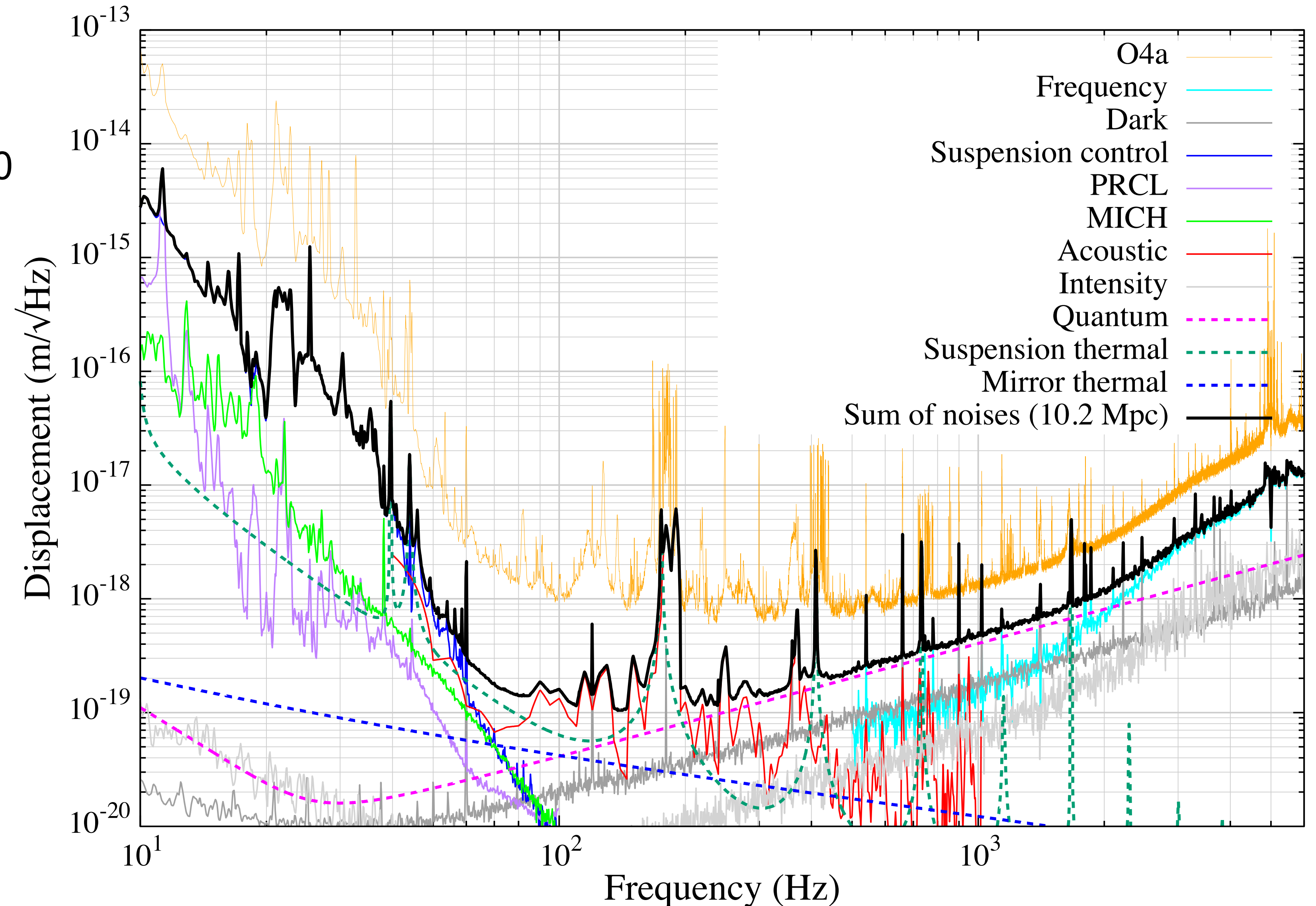
室内の様子

KAGRAサイト付近で震度5弱を観測：ここ100年で最大規模の地震

KAGRA近傍で数cm程度の地殻変動が観測された。

O3での感度とO4での目標感度(10Mpc)

- 低周波数帯感度の改善
 - 防振装置の制御雑音： $\sim 1/10$
 - 制御雑音低減： $\sim 1/10$
- 中間周波数帯感度の改善
 - 熱雑音低減： $\sim 1/5$
 - 音響雑音低減： $\sim 1/20$
 - 光検出器雑音： $\sim 1/30$
- 高周波数帯感度の改善
 - 散射雑音： $\sim 1/3$
 - 周波数雑音： $\sim 1/2$



10 Mpc程度の感度で観測再開を目指す

05に向けて

04に向けたコミッショニングで判明した問題点を解消するとともに、検出器側に鏡をさらに追加してシグナルリサイクリング干渉計を達成することで高感度化を目指す。

具体的なアップグレード内容は検討中で

- ITMの高性能化(低複屈折・反射率非対称性の低減)
- OMC防振台の製作・インストール(OMC防振の強化)
- 光検出器の真空化(散乱光低減・センシング雑音の低減)

などの検討が進められている。

まとめ

- 宇宙線研重力波グループではA5(田越)、A8(三代木、内山、宮川)が修士学生を受け入れます
- 岐阜県飛騨市神岡町にある大型低温重力波望遠鏡KAGRAを用いた研究を進めています
- A5(田越): 重力波データ解析・理論の研究に基づき、KAGRAによる重力波検出を目指しています。柏で研究します。
- A8(三代木、内山、宮川): KAGRAの感度向上や将来に向けた観測技術開発など幅広いテーマが対象。神岡で研究します。神岡での研究についてはオープンラボにて。
- KAGRAでは観測と感度向上を交互に行い、重力波天文学の発展に貢献していきます