



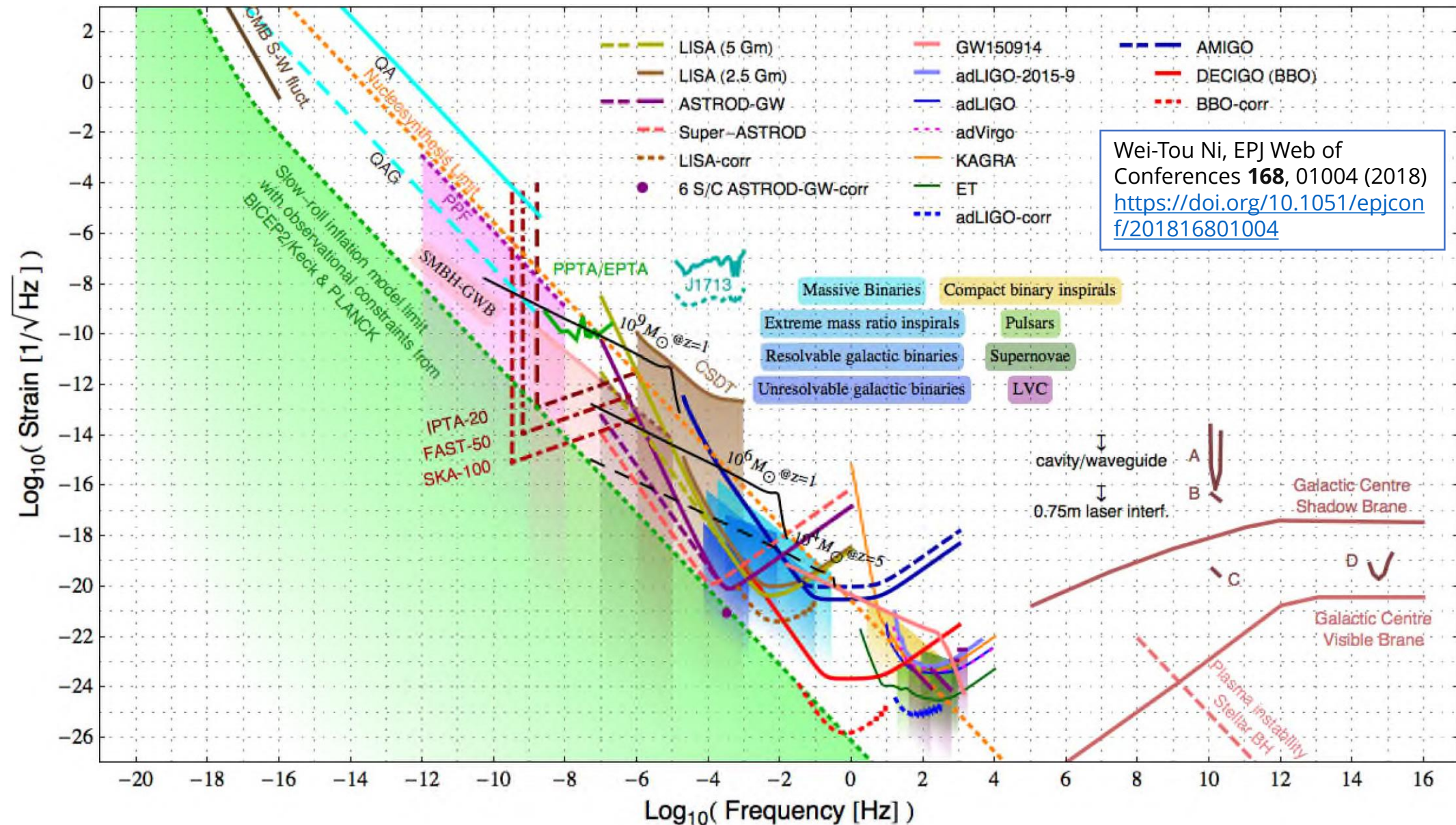
地上検出器(LIGO, Virgo, KAGRA) の現状紹介



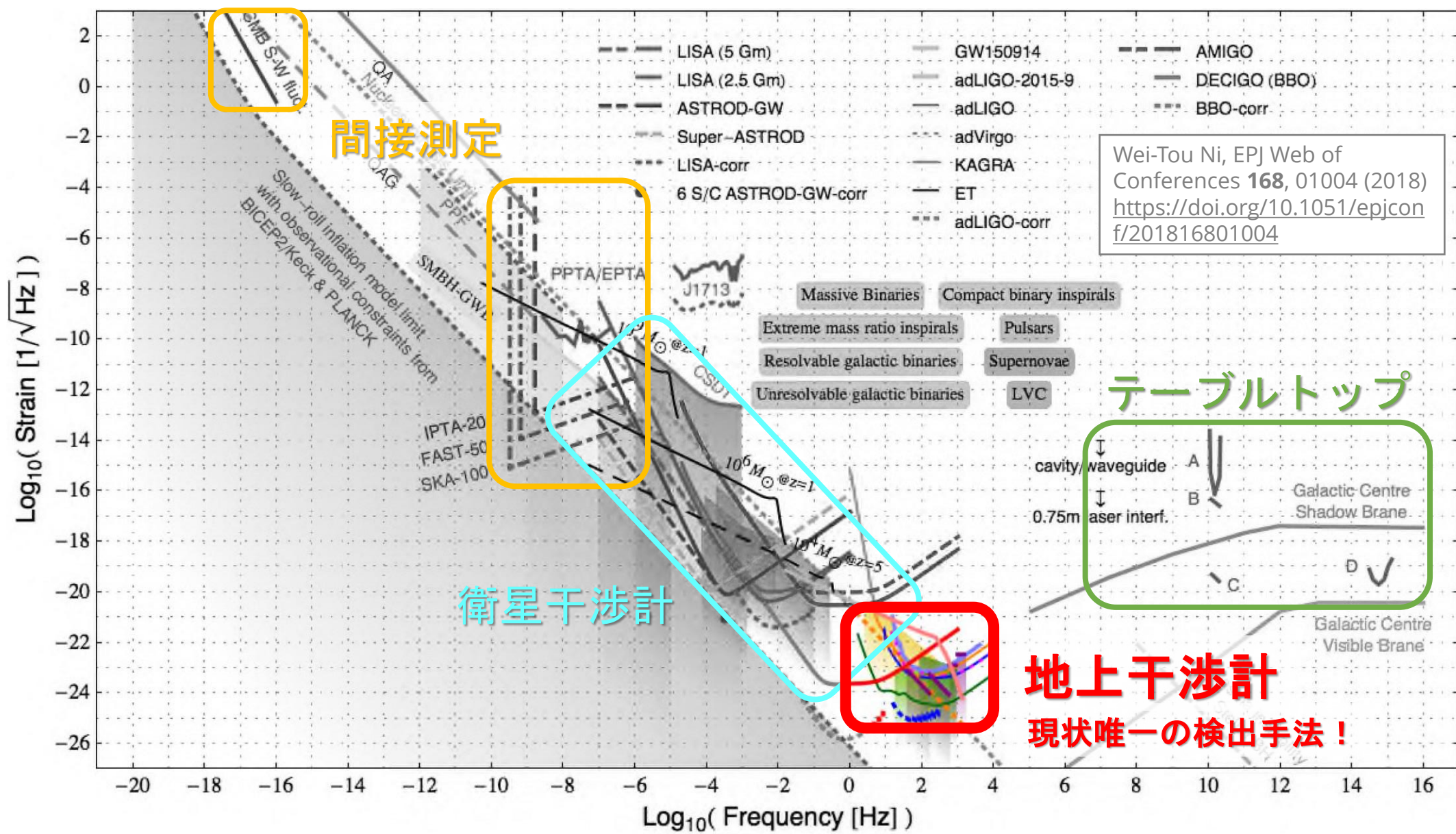
鷲見貴生 (国立天文台)

on behalf of the KAGRA Collaboration

重力波の周波数と地上干渉計の立ち位置



重力波の周波数と地上干渉計の立ち位置



間接測定

衛星干渉計

地上干渉計

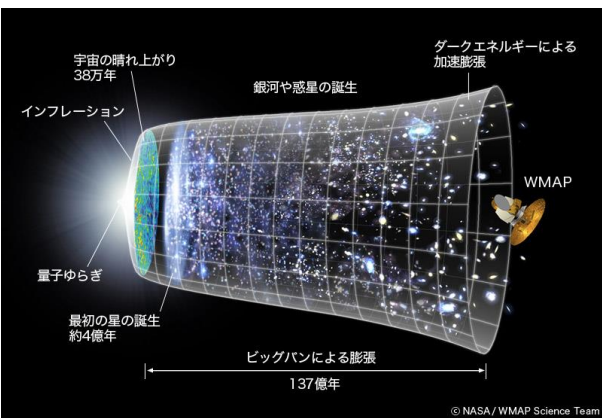
現状唯一の検出手法！

テーブルトップ

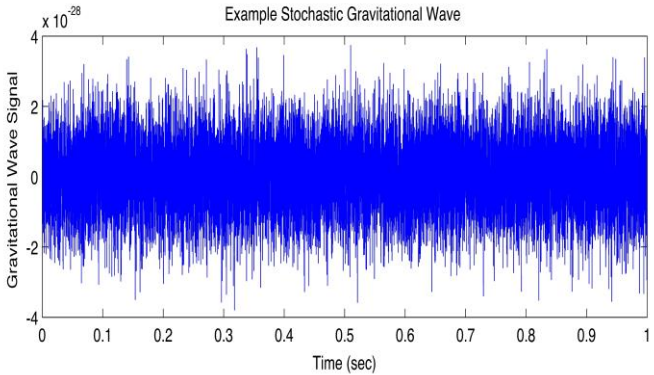
Wei-Tou Ni, EPJ Web of Conferences **168**, 01004 (2018)
<https://doi.org/10.1051/epjconf/201816801004>

地上干渉計のターゲットとなる重力波源

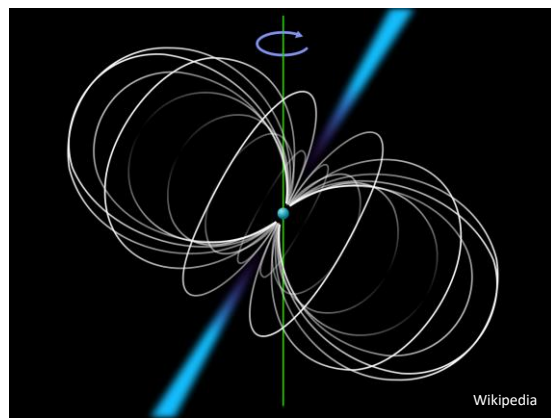
初期宇宙



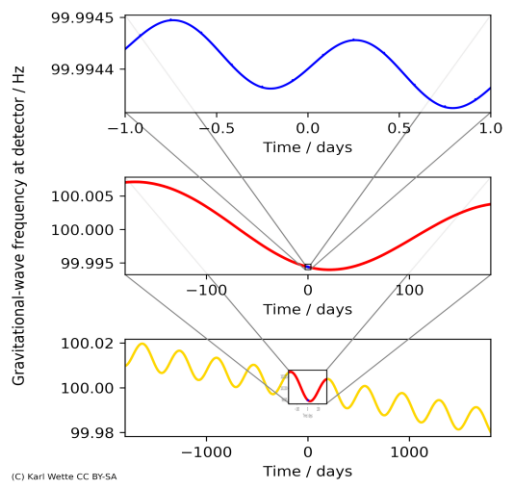
背景重力波 (< 10Hz)



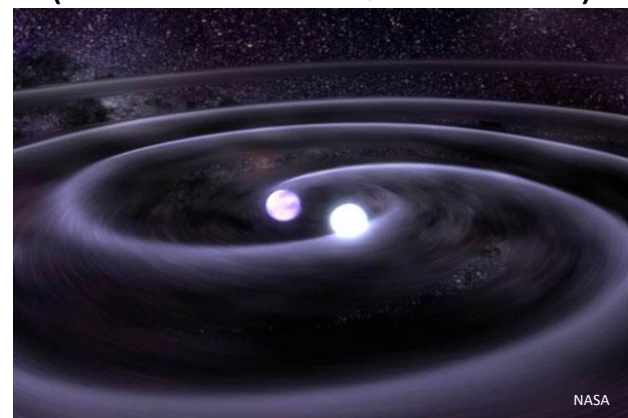
パルサー



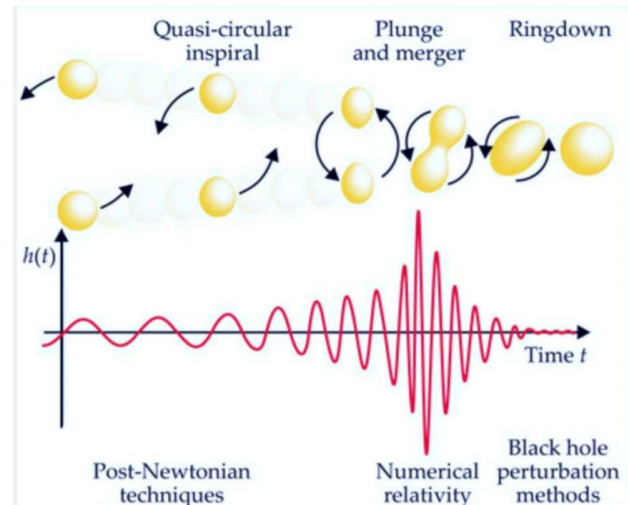
連続波 (~数十Hz)



コンパクト連星合体 (ブラックホール、中性子星)



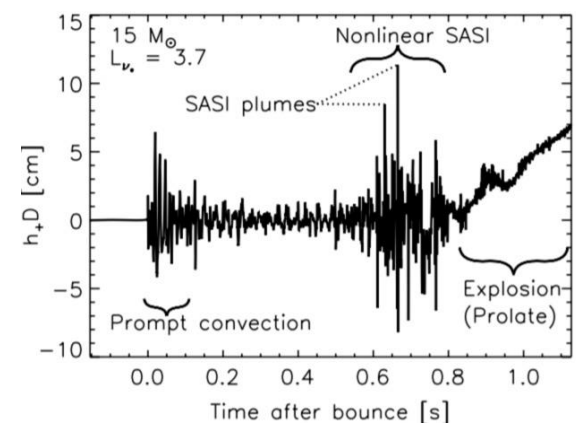
チャープ波 (~100Hz)



超新星爆発



バースト波 (~kHz)



修正重力理論の候補と検証

(注) 実験屋の私が独断と偏見でまとめた表です。間違い・補足など、ご指摘お願いします。

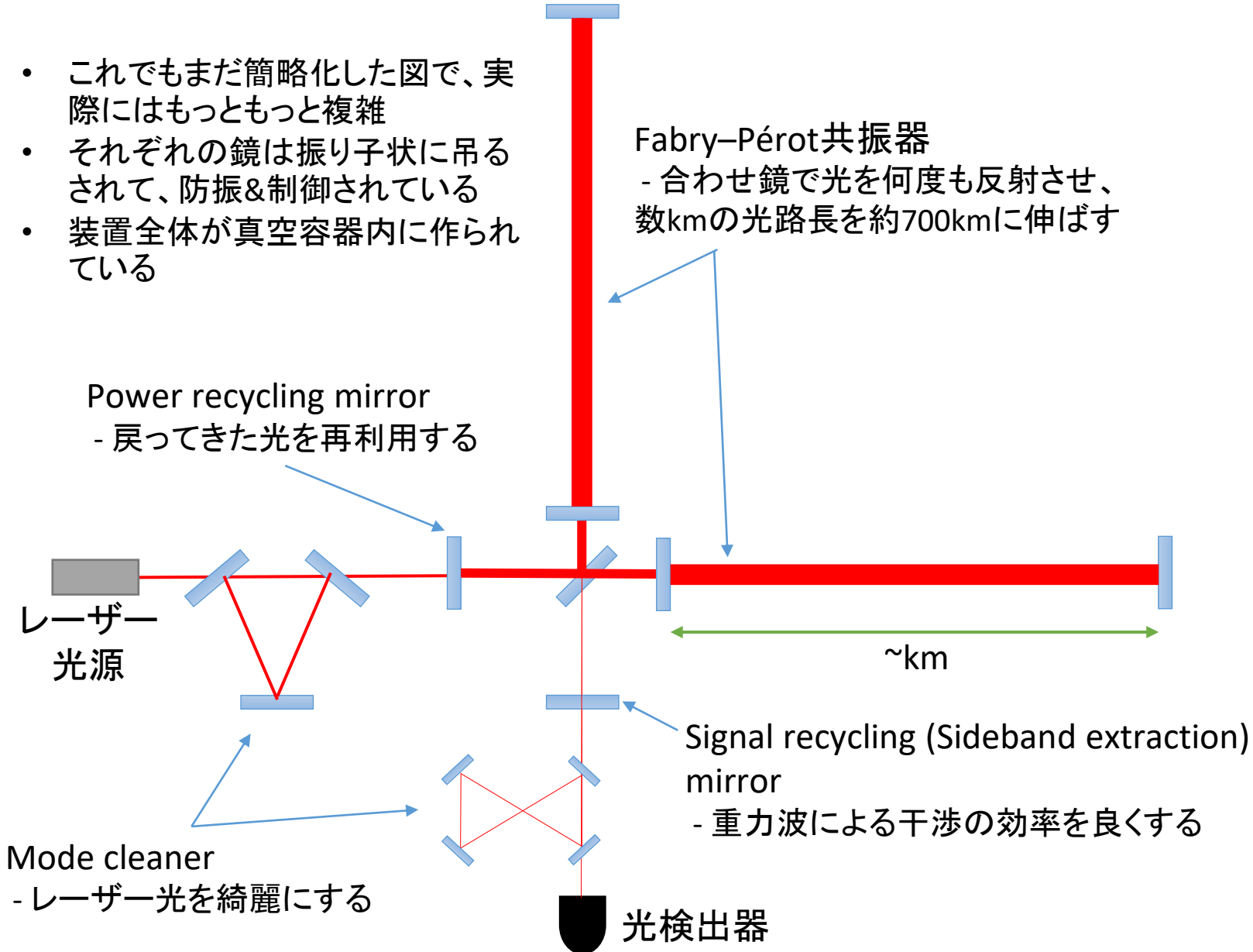
修正重力理論のタイプ	モデルの具体例	検証に適した現象	検証に適した観測
スカラー・テンソル型	Brans-Dicke, Horndeski	<ul style="list-style-type: none"> GRからのズレの長期観測 GWのスカラーモード 	<ul style="list-style-type: none"> 連星パルサー、太陽系実験 CBC GW (複数台同時観測)
f(R) gravity型	Gauss-Bonnet, Chern-Simons	<ul style="list-style-type: none"> 非常に強い重力(曲率) 	<ul style="list-style-type: none"> BBH GW, BH合体の準固有振動
Lorentz violation型	Einstein-Æther, Khronometric	<ul style="list-style-type: none"> GWと光の速度差 GWのベクトルモード 	<ul style="list-style-type: none"> BNS GW + Multi messenger CBC GW (複数台同時観測)
Massive graviton型	Dvali-Gabadadze-Porrati, bigravity	<ul style="list-style-type: none"> GWと光の速度差 GWのスカラーモード 	<ul style="list-style-type: none"> BNS GW + Multi messenger CBC GW (複数台同時観測)
余剰次元型	Kaluza-Klein, Randall-Sundrum	<ul style="list-style-type: none"> GW振幅の減衰超過 銀河中心のブレーン Newtonの逆二乗則のズレ 	<ul style="list-style-type: none"> 非常に遠方のCBC GW 高周波(>GHz)のGW探索 Table top実験、加速器実験

地上干渉計の強み：複数検出器による偏光分離や、電磁波との同時観測ができる点

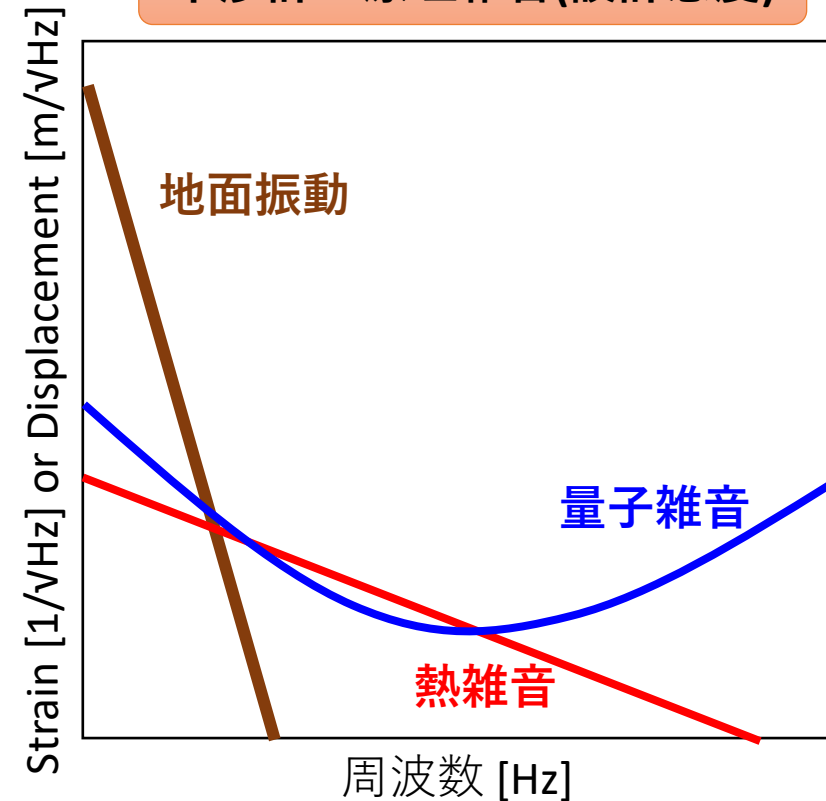
コンパクト連星合体の強み：強重力現象であることや、放出される重力波波形予測がしやすい点

レーザー干渉計型重力波検出器

- これでもまだ簡略化した図で、実際にはもっともっと複雑
- それぞれの鏡は振り子状に吊るされて、防振&制御されている
- 装置全体が真空容器内に作られている



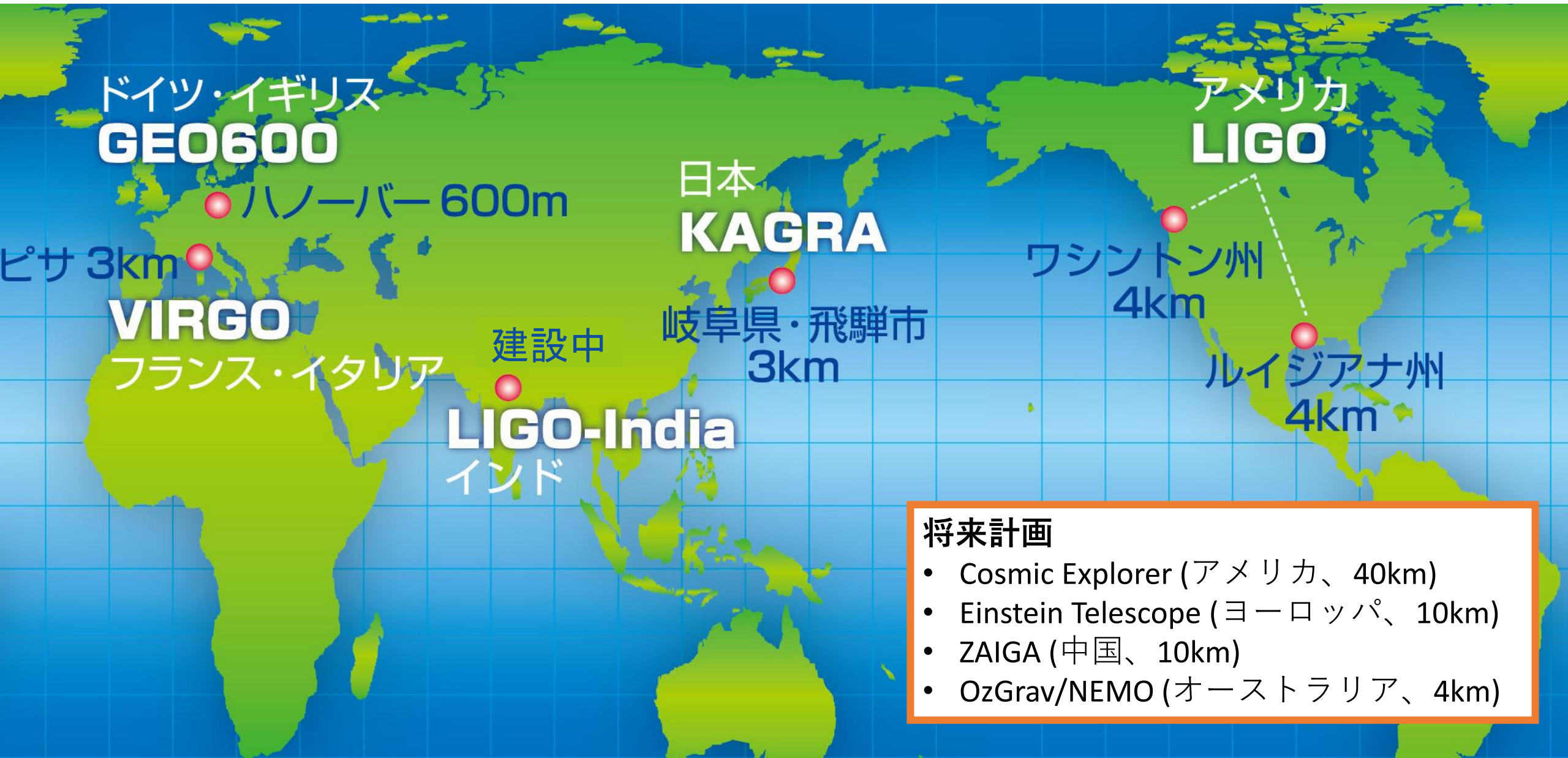
干渉計の原理雑音(設計感度)



これらは実験デザインによって決まるが、実際には他にも様々なテクニカルノイズが存在する。(それらを取り除くことを”Noise hunting”と呼んでいる)

世界の地上重力波検出器

<https://gwpo.nao.ac.jp/gallery/000028.html>

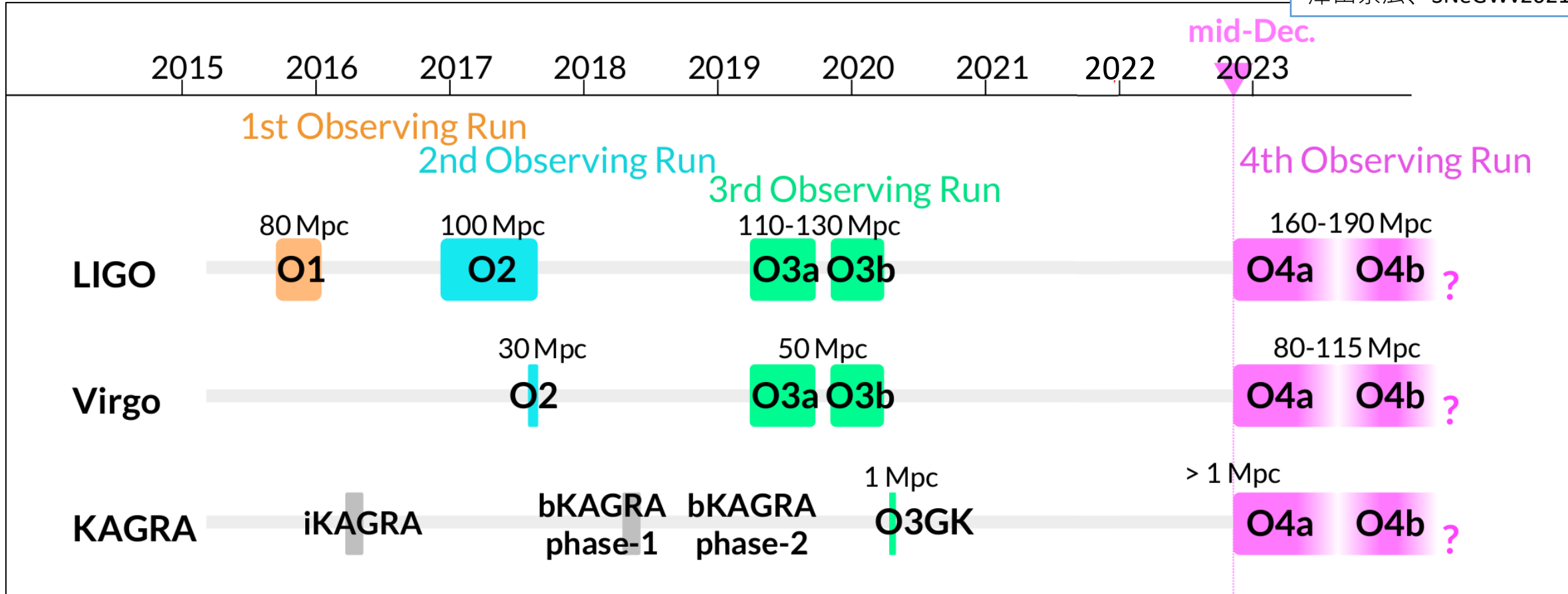


将来計画

- Cosmic Explorer (アメリカ、40km)
- Einstein Telescope (ヨーロッパ、10km)
- ZAIGA (中国、10km)
- OzGrav/NEMO (オーストラリア、4km)

観測期間 (past & plan)

澤田崇広、SNeGWv2021



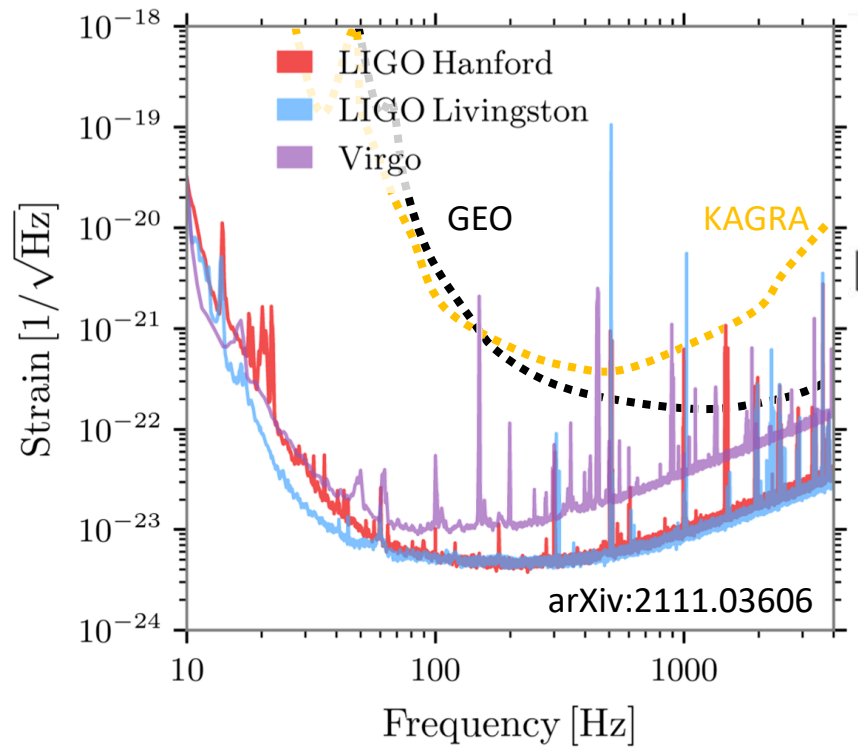
最新発表(2021年11月15日)では、O4開始予定は2022年12月中旬

- <https://www.ligo.caltech.edu/news/ligo20211115>
- <https://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/archives/4213>

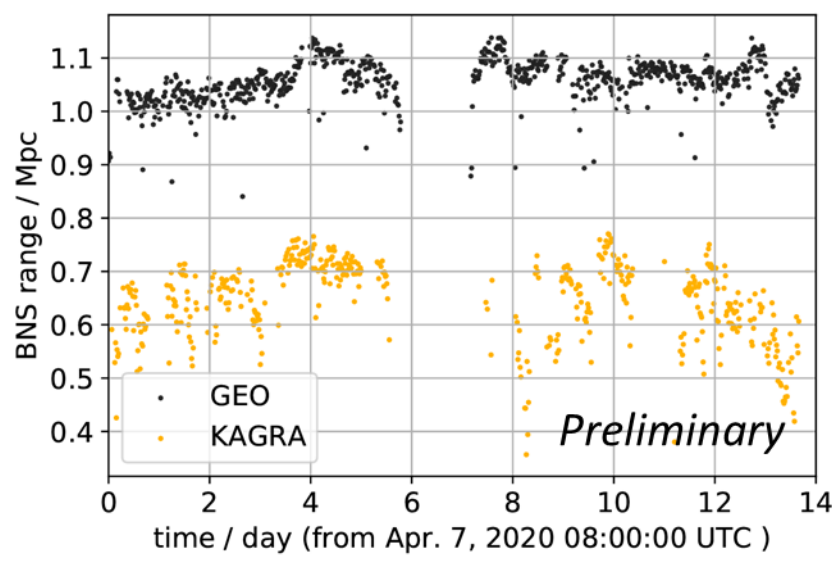
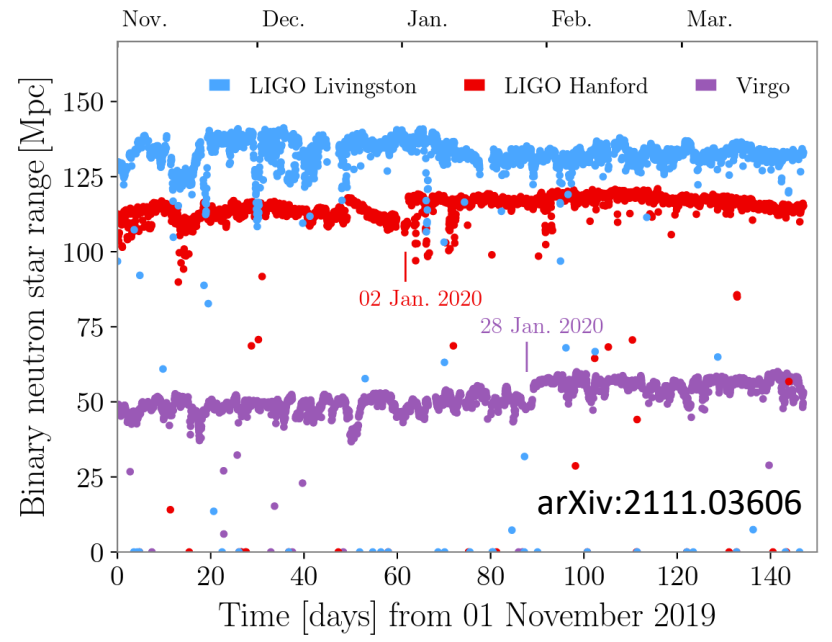
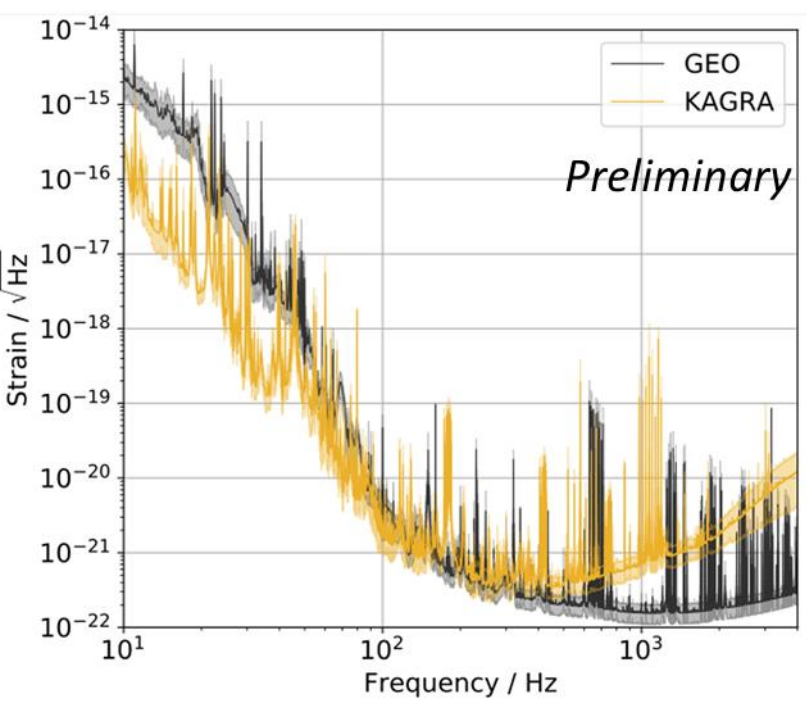
観測期間やbreak期間については議論中

O3b/O3GK感度

LIGO/Virgo O3b



GEO/KAGRA O3GK



BNS range : 連星中性子星合体が信号雑音比8で観測できる距離
(到来方向と偏光については平均を取っている)

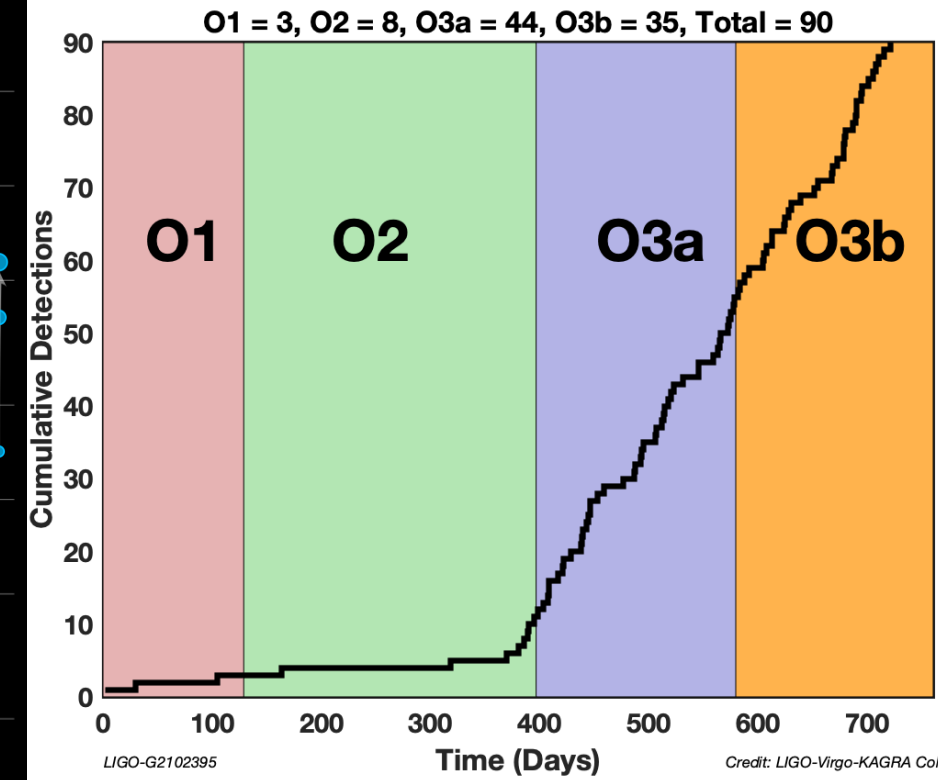
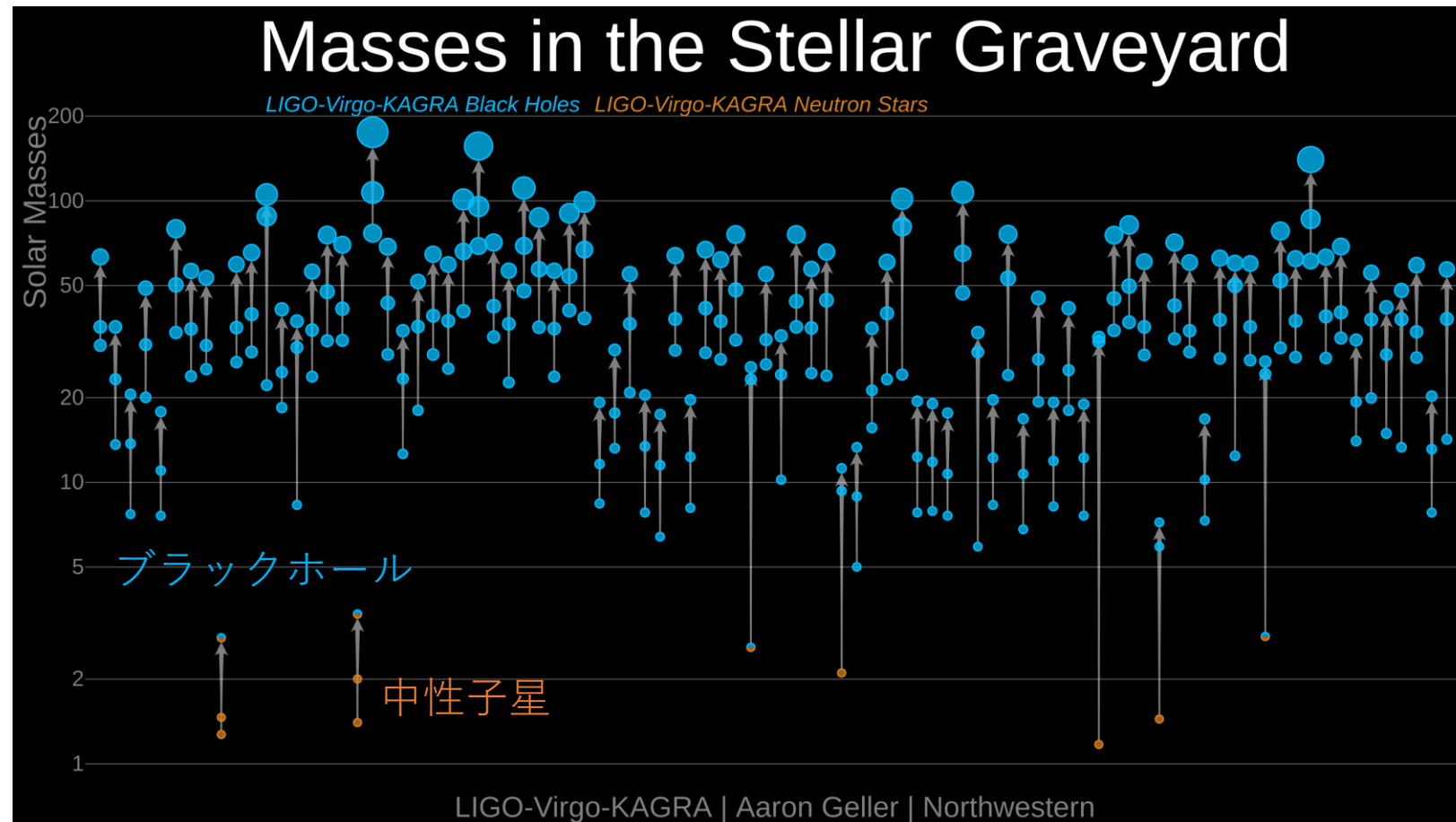
検出器の比較 (O3b/O3GK/O4 (不確定性大))

	LIGO Hanford	LIGO Livingston	Virgo	KAGRA	GEO 600
場所	米ワシントン州	米ルイジアナ州	イタリア ピサ	日本 神岡(地下)	独ハノーバー
基線長	4km	4km	3km	3km	0.6km
防振装置	能動防振、4m	能動防振、4m	受動防振、10m	受動防振、14m (細かい改善たくさん)	受動防振、1m
干渉計構成	DR FP MI	DR FP MI	PR FP MI -> DR FP MI	PR FP MI	DR DL MI
スキューミング	Freq. Indep. -> Freq. Dep.	Freq. Indep. -> Freq. Dep.	Freq. Indep. -> Freq. Dep.	なし	Freq. Indep.
鏡の質量	40kg	40kg	42kg	23kg	14kg
鏡の温度	常温	常温	常温	250K -> 20K?	常温
入射レーザー強度	34W -> 80W?	38W -> 80W?	26W -> 40W?	5W -> 5~30W?	30W
Power-recycling Gain	44	47	39	11	100
BNS range	115Mpc -> 180Mpc?	133Mpc -> 180Mpc?	51Mpc -> 100Mpc?	0.7Mpc -> 1~10Mpc?	1Mpc

これまでに観測された重力波イベント (計90)

gravitational wave transient catalog (GWTC)にまとめられている

- GWTC-1 (O1, O2) : [Phys. Rev. X **9**, 031040 \(2019\)](#)
- GWTC-2 (O3a) : [Phys. Rev. X **11**, 021053 \(2021\)](#)
- GWTC-3 (O3b) : [arXiv:2111.03606](#)

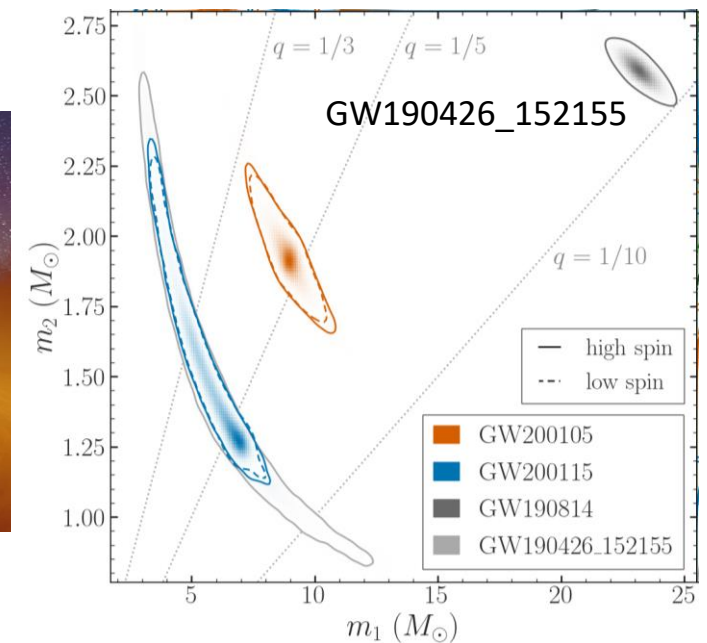
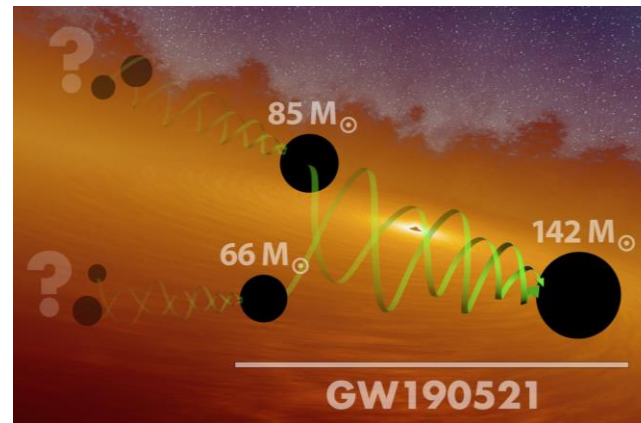
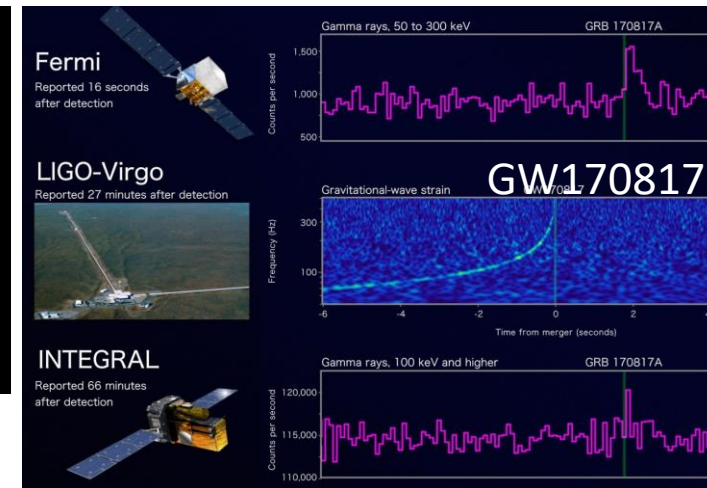
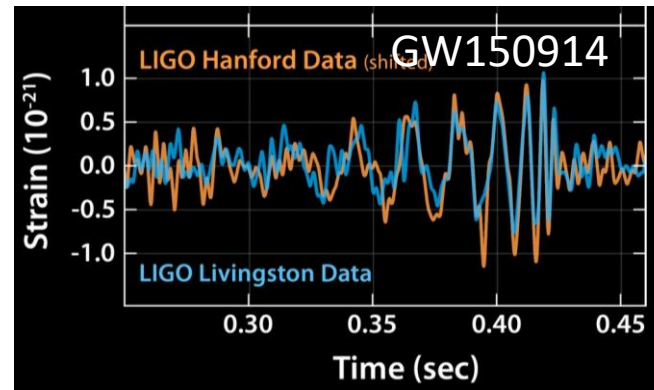


<https://www.ligo.org/science/Publication-O3bCatalog/>

<https://www.ligo.org/science/Publication-O3bTGR/>

代表的な重力波イベント

- GW150914
 - 人類初の重力波直接検出
 - 人類初のブラックホール直接検出
 - 人類初のブラックホール連星合体検出 ($36M_{\odot} + 29M_{\odot} \rightarrow 62M_{\odot}$)
- GW170817
 - 初のBNSイベント
 - EM観測によるフォローアップ (GRB 170817A)
 - graviton velocityに強い制限 ($(c-v)/c < 7 \times 10^{-16}$)
- GW190426_152155
 - 初の明確なNSBHイベント
- GW190521g
 - 最も重いBBH ($85M_{\odot} + 66M_{\odot} \rightarrow 142M_{\odot}$)
- GW191109_010717
 - 実効インスピラルスピンの負



<https://www.ligo.org/science/Publication-O2Catalog/index.php>

<https://www.ligo.org/science/Publication-O3aCatalog/translations/science-summary-japanese.pdf>

<https://www.ligo.org/science/Publication-O3aFinalCatalog/translations/science-summary-japanese.pdf>

<https://www.ligo.org/science/Publication-O3bCatalog/translations/science-summary-japanese.pdf>

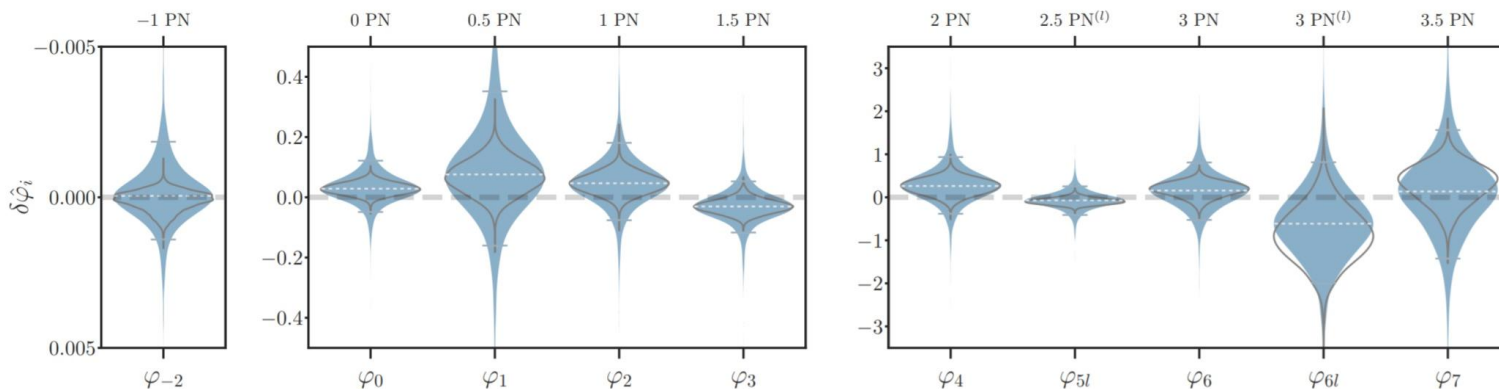
O3bイベントによる一般相対論の検証

<https://www.ligo.org/science/Publication-O3bTGR/>, <https://arxiv.org/abs/2112.06861>

Inspiral test

$$\varphi_{\text{PN}}(f) = 2\pi f t_c - \varphi_c - \frac{\pi}{4} + \frac{3}{128\eta} (\pi\tilde{f})^{-5/3} \sum_{i=0}^7 [\varphi_i + \varphi_{il} \log(\pi\tilde{f})] (\pi\tilde{f})^{i/3}$$

Post Newtonian展開で一般相対論からのズレを評価



Polarization test

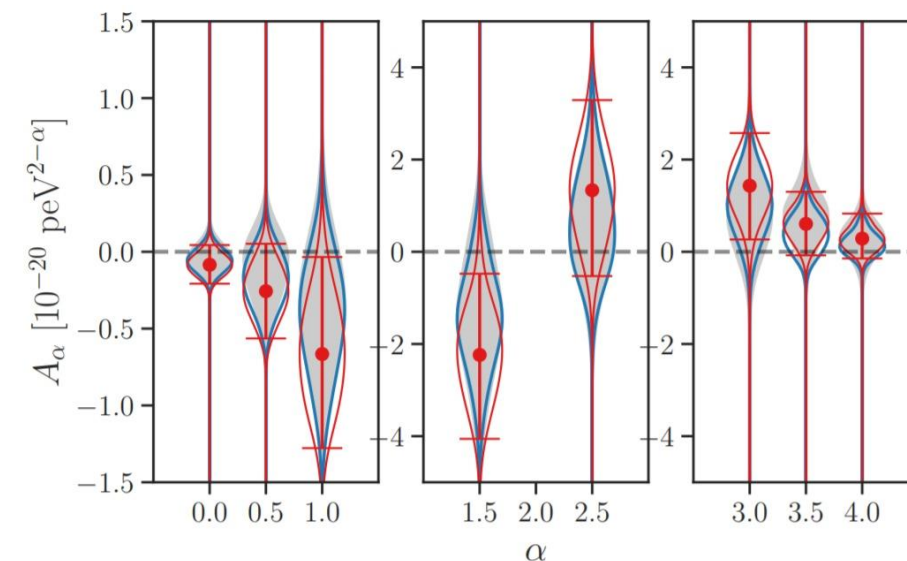
Scalar, Vector, Tensor各モードのBayes factorを評価

Events	$\log_{10} \mathcal{B}_T^S$	$\log_{10} \mathcal{B}_T^V$	$\log_{10} \mathcal{B}_T^{TS}$	$\log_{10} \mathcal{B}_T^{TV}$	$\log_{10} \mathcal{B}_T^{VS}$	$\log_{10} \mathcal{B}_T^{TVS}$
O1	-0.04 ± 0.07	0.09 ± 0.07	0.04 ± 0.07	0.09 ± 0.07	0.09 ± 0.07	0.07 ± 0.07
O2	-0.42 ± 0.12	0.04 ± 0.12	0.08 ± 0.12	0.22 ± 0.12	0.09 ± 0.12	0.35 ± 0.12
O3a	-1.85 ± 0.21	-1.04 ± 0.20	0.25 ± 0.20	0.07 ± 0.20	-1.05 ± 0.20	-0.18 ± 0.20
O3b	-1.93 ± 0.17	-0.79 ± 0.17	-0.17 ± 0.17	-0.07 ± 0.17	-0.86 ± 0.17	-0.32 ± 0.17
Combined	-4.24 ± 0.30	-1.70 ± 0.30	0.20 ± 0.30	0.31 ± 0.30	-1.73 ± 0.30	-0.08 ± 0.30

Propagation test

伝搬速度の分散関係を評価

$$E^2 = p^2 c^2 + A_\alpha p^\alpha c^\alpha, \quad m_g c^2 = \sqrt{A_0}$$



何れも一般相対論とconsistent

KAGRAについて

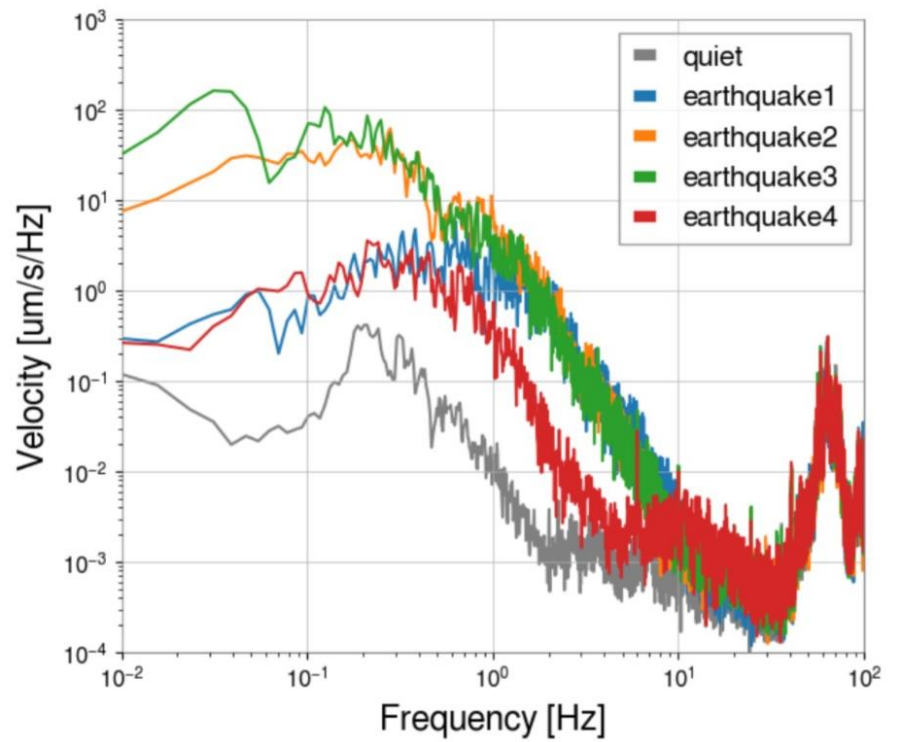


- 飛騨市神岡町池ノ山 地下200~450m
 - 世界で唯一、地下施設・低温鏡の重力波検出器
- 2020年4月に2週間、GEO600との共同観測を行った
- 現在は2022年6月以降開始予定のLIGO-Virgo-KAGRA共同観測(O4)に向け、諸々の改修工事が進行中



神岡の地震事情

- 地震の周波数(< 5Hz)は重力波観測帯域よりも低いため、偽イベントになることはない



- 干渉計の”ロックロス”を引き起こし、観測が一時中断してしまう
- 神岡では東側で起きた地震の影響が小さい⇒

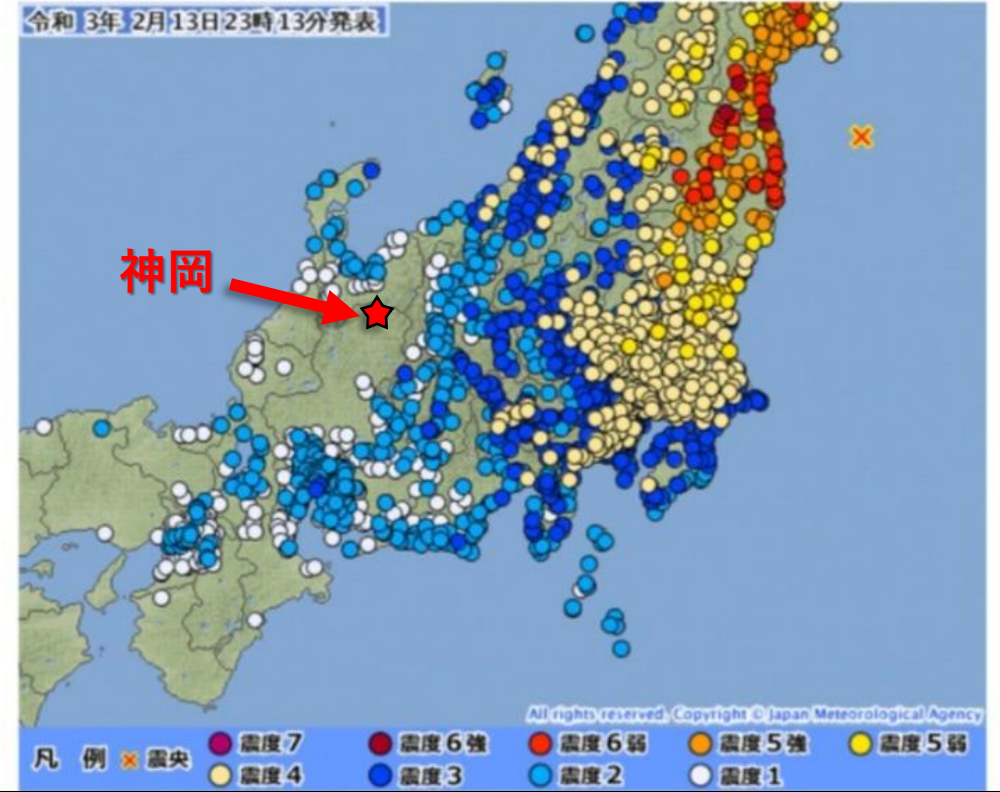
先日の大地震でも飛騨地方は震度ゼロ…まるで「山神」がいるみたい！？ 飛騨山脈の地震減衰効果に注目集まる

<https://maidonanews.jp/article/14204489?p=25461832>

中将 タカノリ 2021.02.23(Tue)

【各地の震度に関する情報】震度1以上を観測した地点と地震の発生場所（震源）やその規模（マグニチュード）の情報

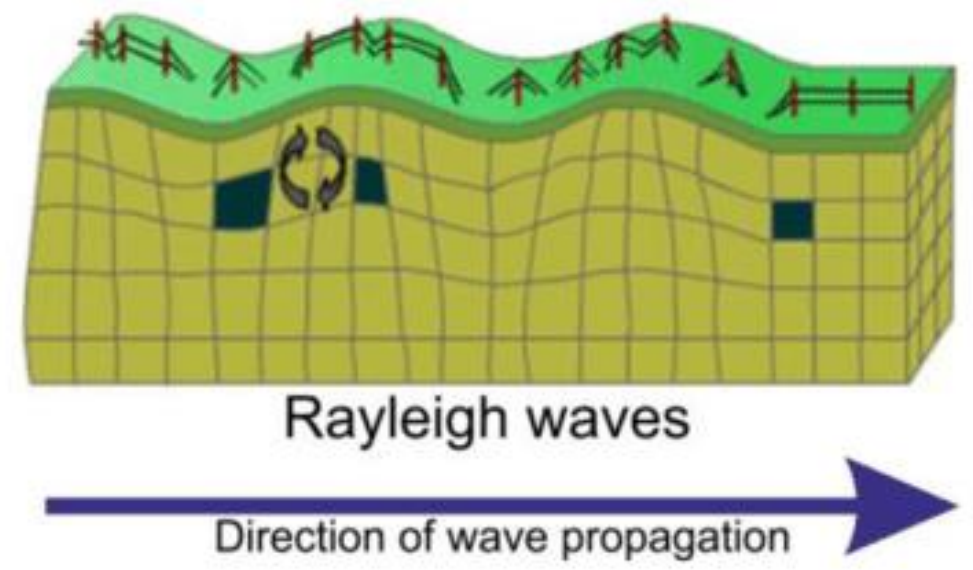
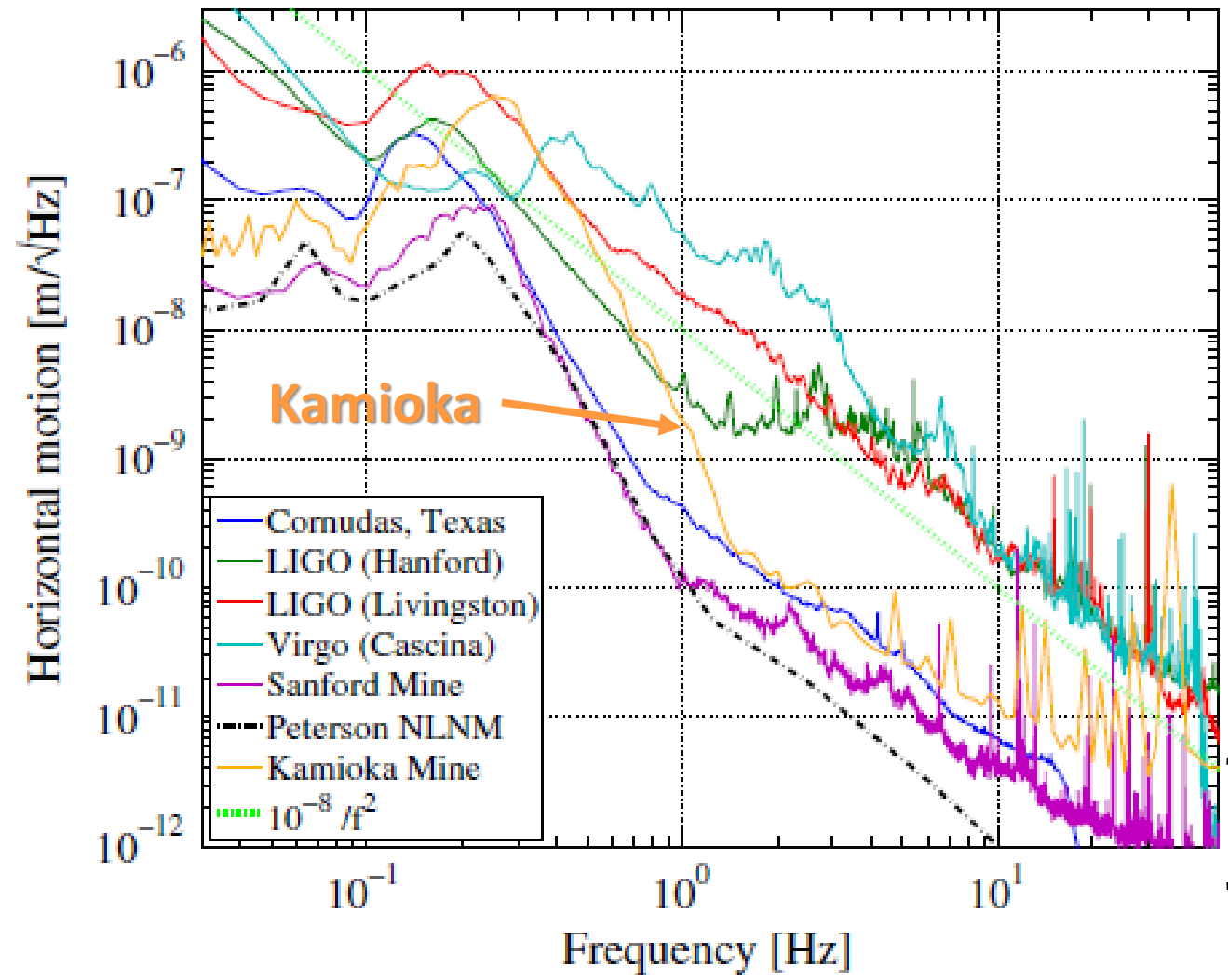
全国表示
地図をクリックすると拡大できます。 説明へ



地上と地下の地面振動

地面振動(レイリー波)は主に地表を伝搬する

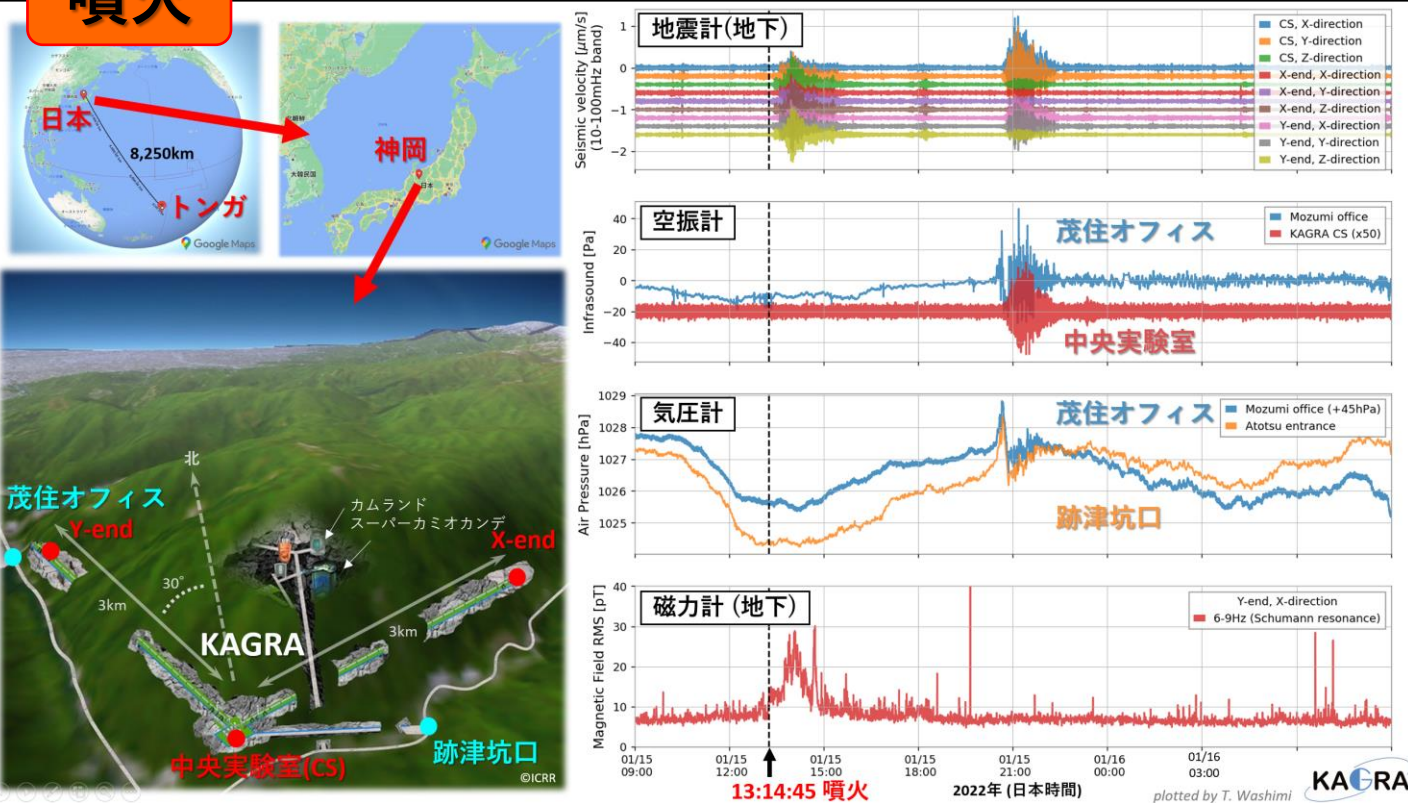
➤ 地下施設を用いることで1Hz以上の振動を2桁ほど低減



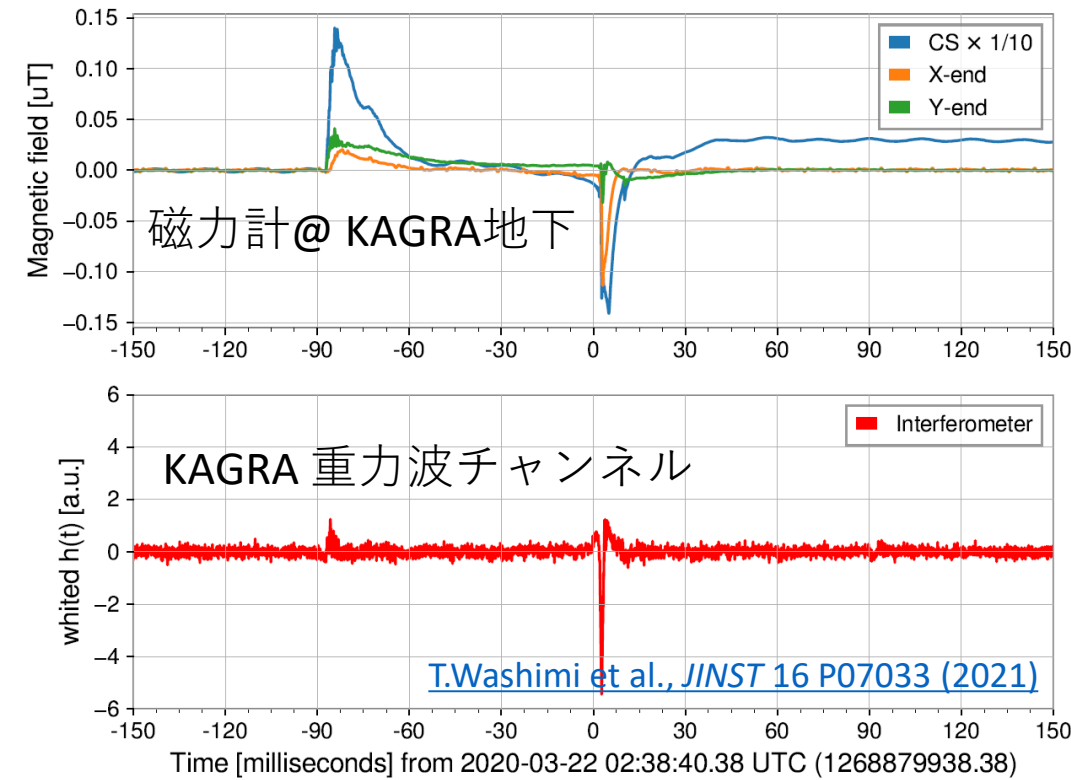
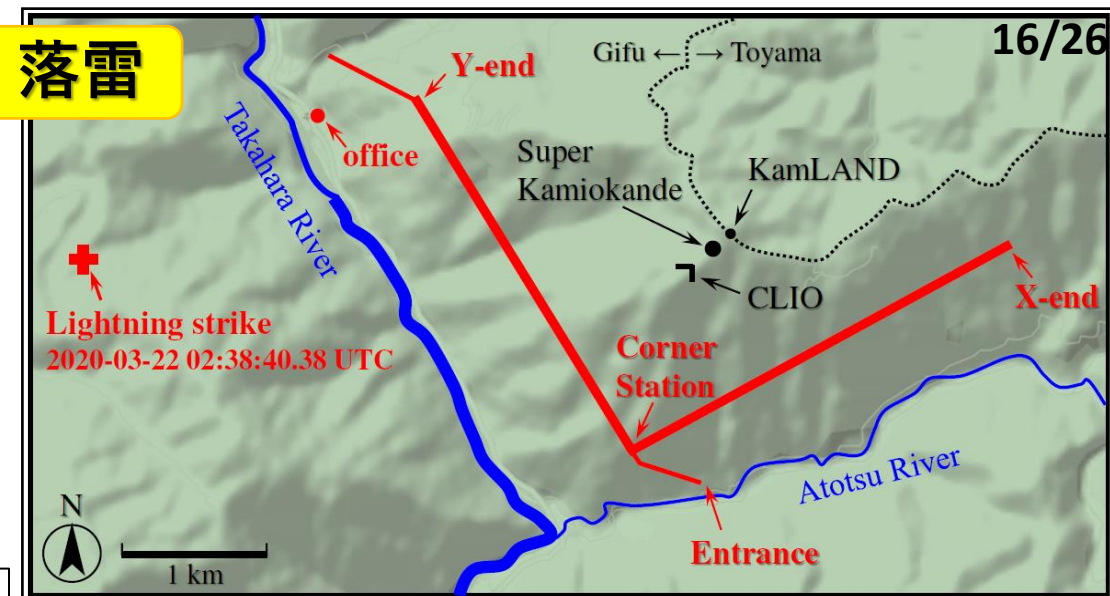
自然現象の影響の評価

- これまで地面振動以外の雑音に対する地下施設の遮蔽能力は調べられていなかった。
- 噴火による空振や落雷による磁場など、様々な自然現象の影響を近年積極的に評価している。

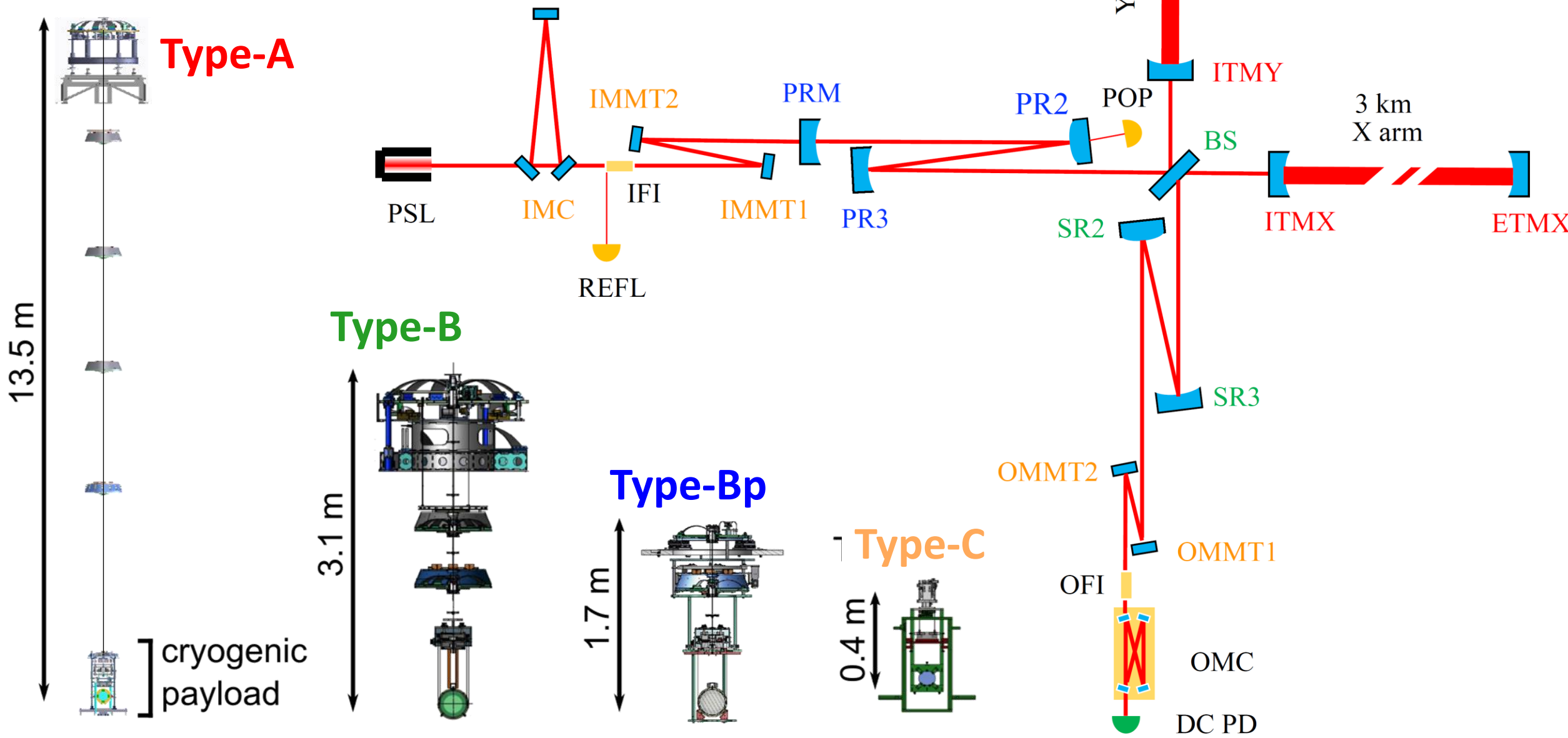
噴火



落雷

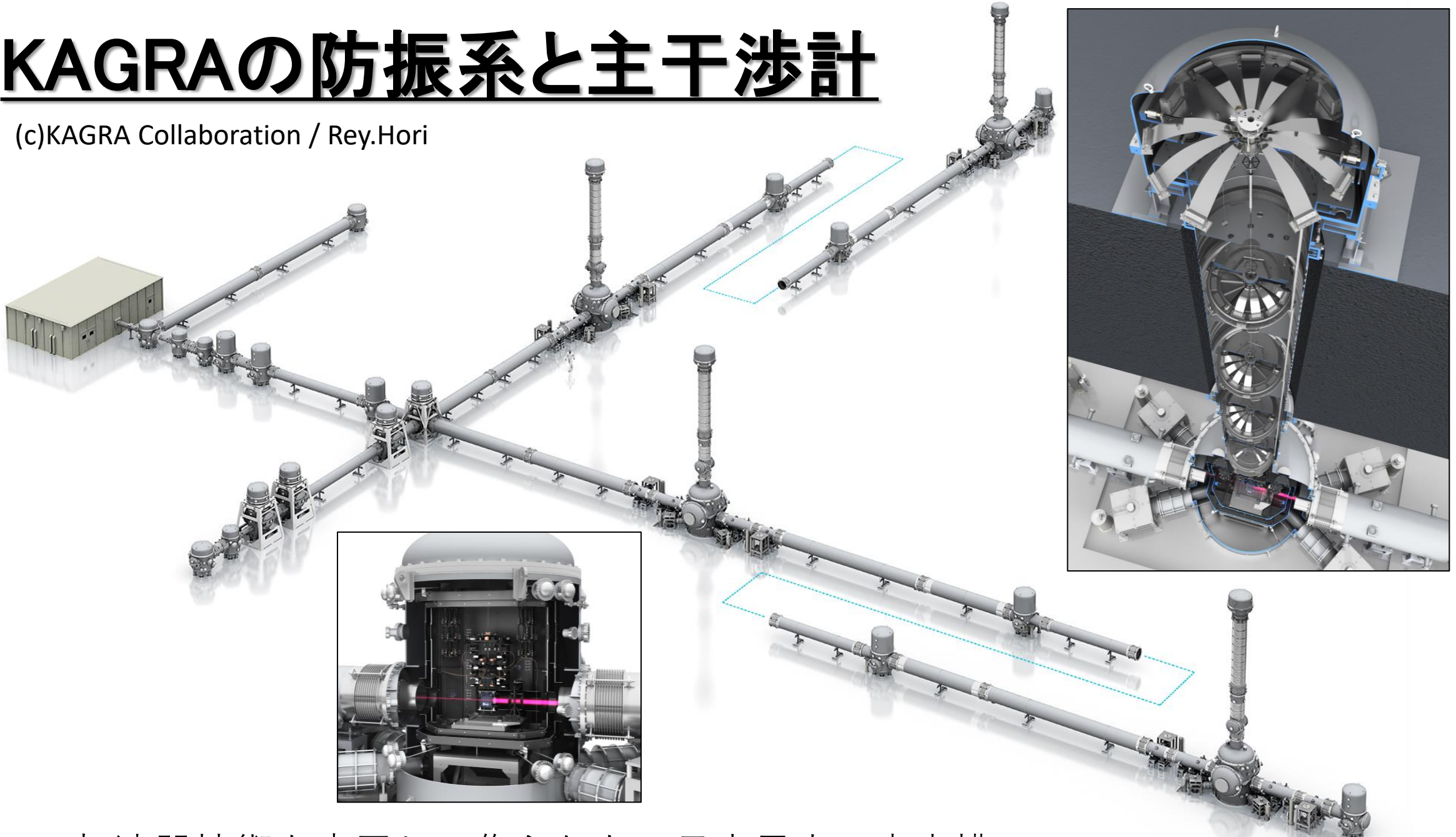


KAGRAの防振系と主干渉計



KAGRAの防振系と主干涉計

(c)KAGRA Collaboration / Rey.Hori



KEKの加速器技術を応用して作られた、日本最大の真空槽

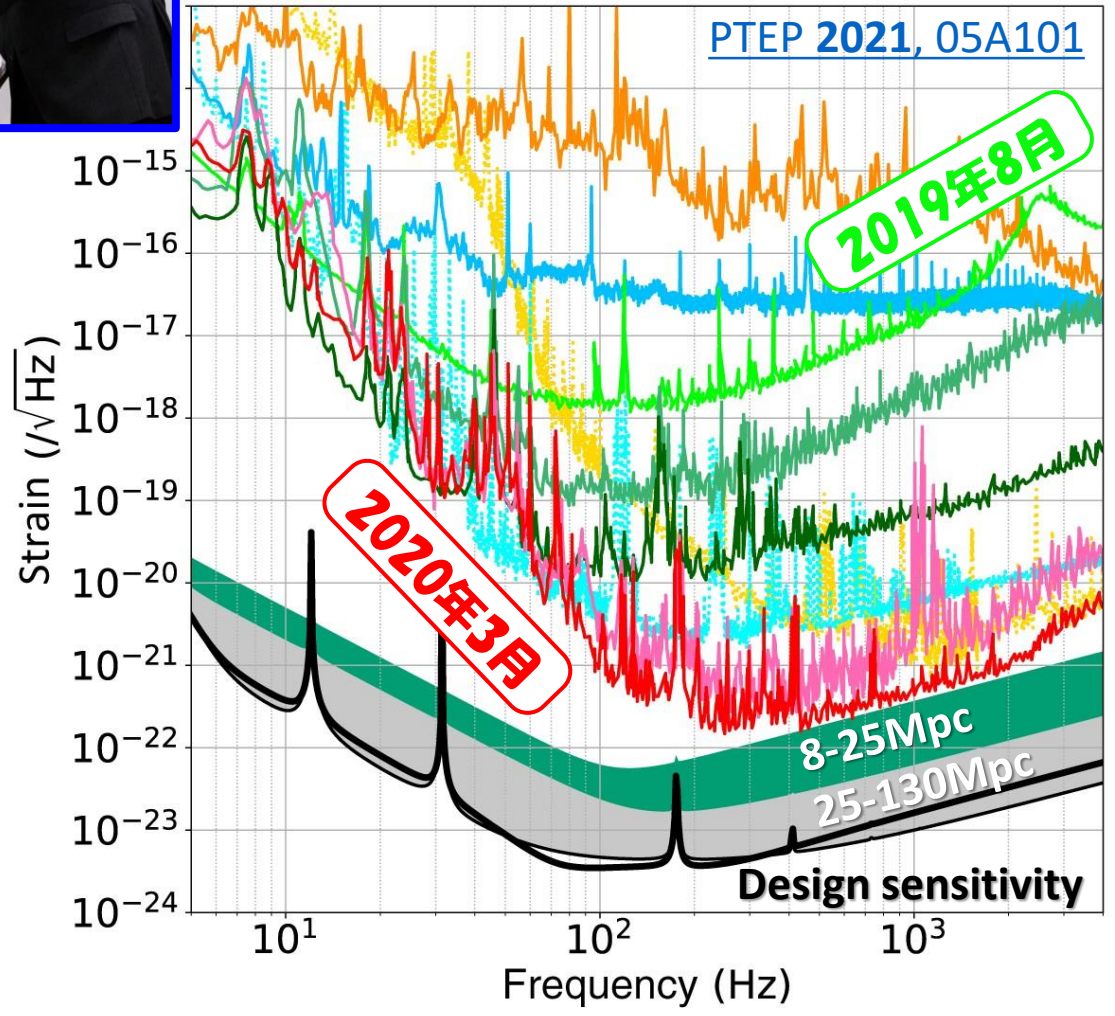
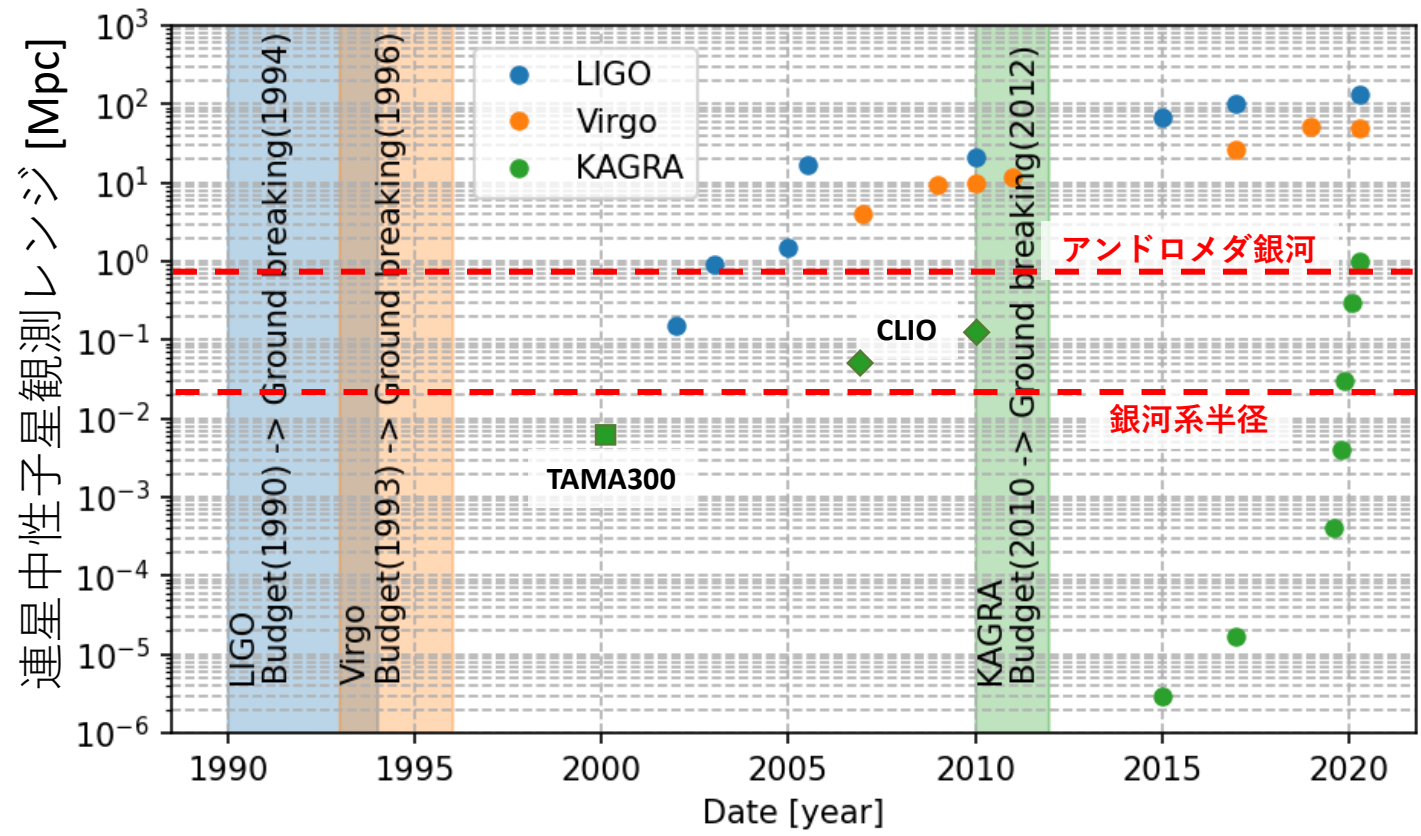
KAGRAの歴史

GW検出器は建設後の調整・雑音低減も重要

- トンネル掘削 2013年5月～2014年3月
- iKAGRA 2016年3月～4月
- bKAGRA phase-1 2018年4月28日～5月7日
- インストール完了 2019年10月 ←
- 単独観測 2020年2月25日～3月10日
- O3GK(次頁) 2020年4月7～21日



● TAMA (2008)	— FPMI (Aug 2019)
● CLIO (2010)	— FPMI (Nov 2019)
— iKAGRA (2016)	— FPMI (Dec 2019)
— bKAGRA Phase 1 (2018)	— PRFPMI (Feb 2020)
	— PRFPMI (Mar 2020)



国際共同重力波観測O3GK

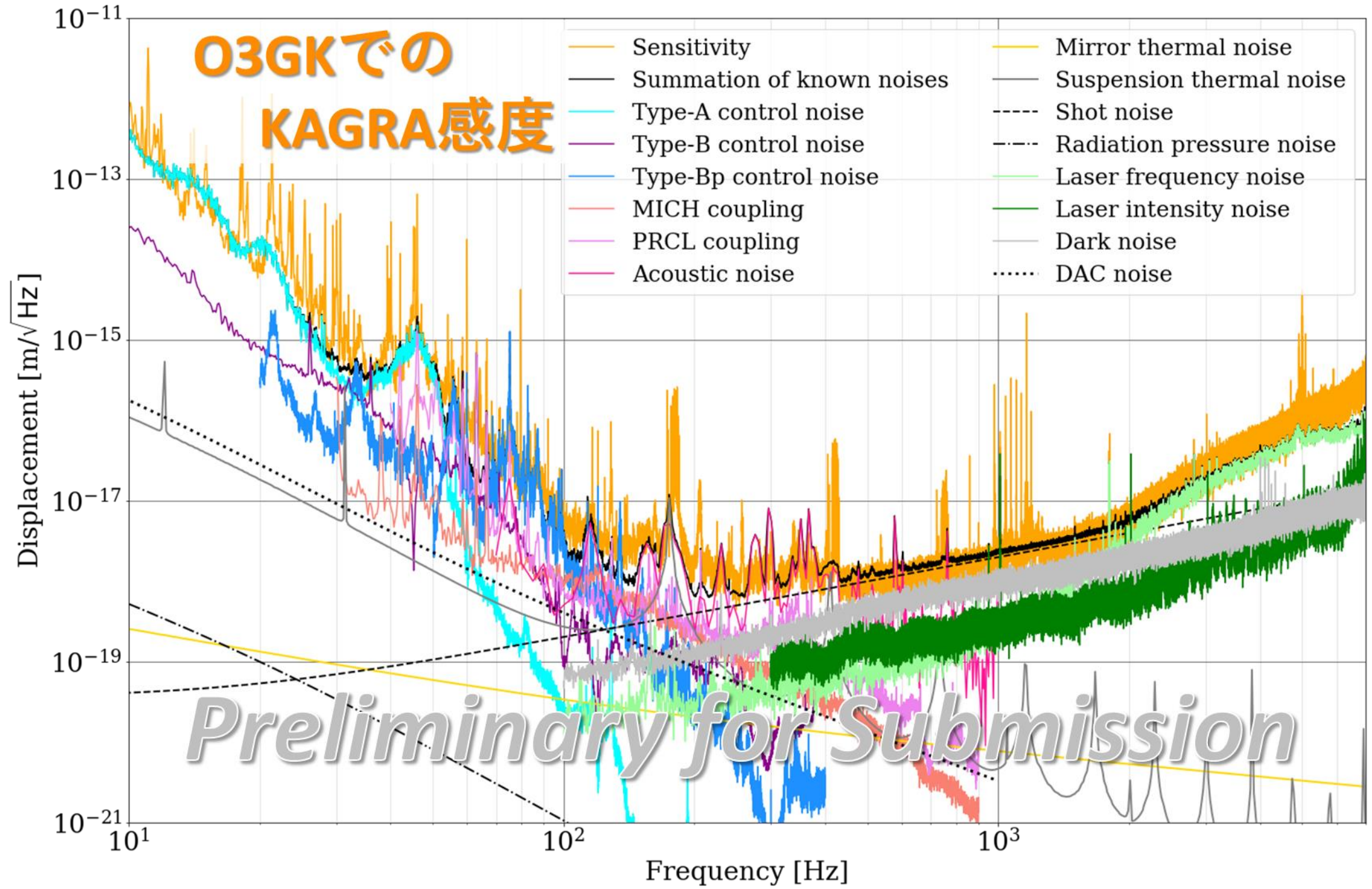
- KAGRAは2020年3月に、LIGO/Virgoとの共同観測要件の感度(連星中性子星観測レンジ 1Mpc)を達成した
- COVID-19パンデミックの影響により、LIGO/Virgoは2020年3月で観測(O3)を打ち切り
- 稼働を続けていたGEO600(ドイツ)との共同観測として2020年4月7日～21日の2週間おこなわれた

GEO600 (Hannover, Germany)



KAGRA (Kamioka, Japan)

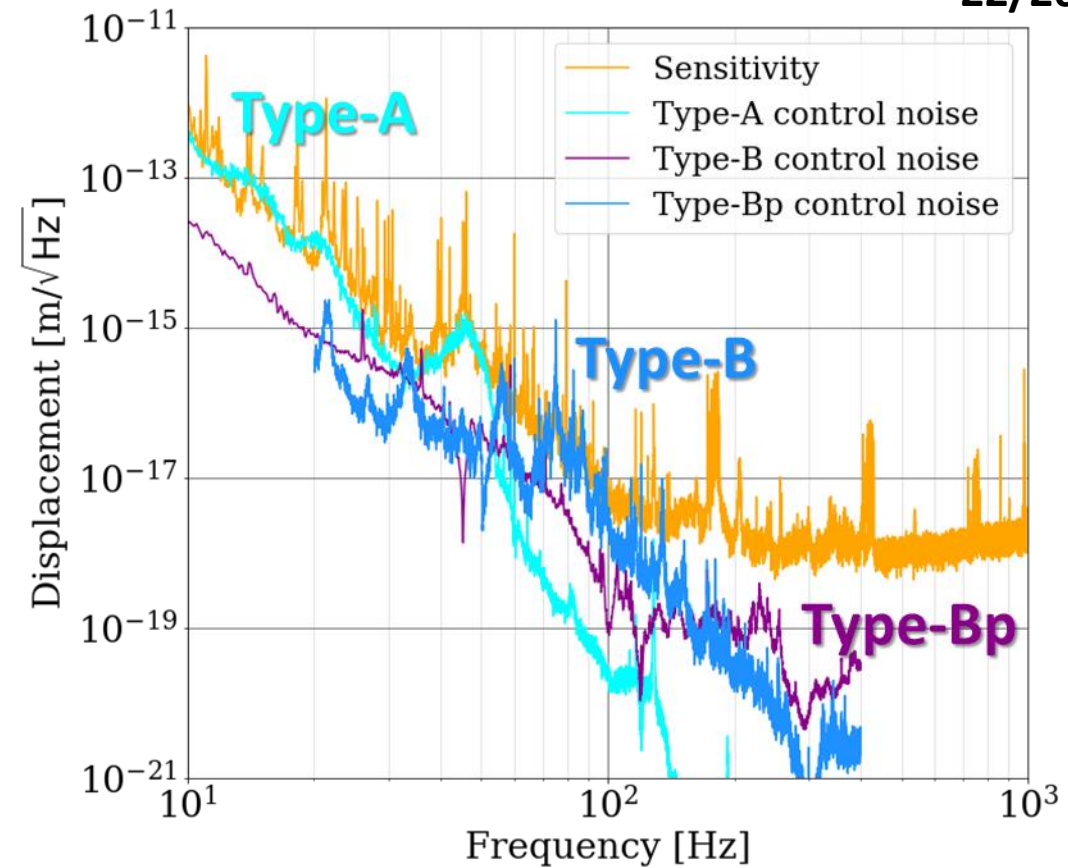
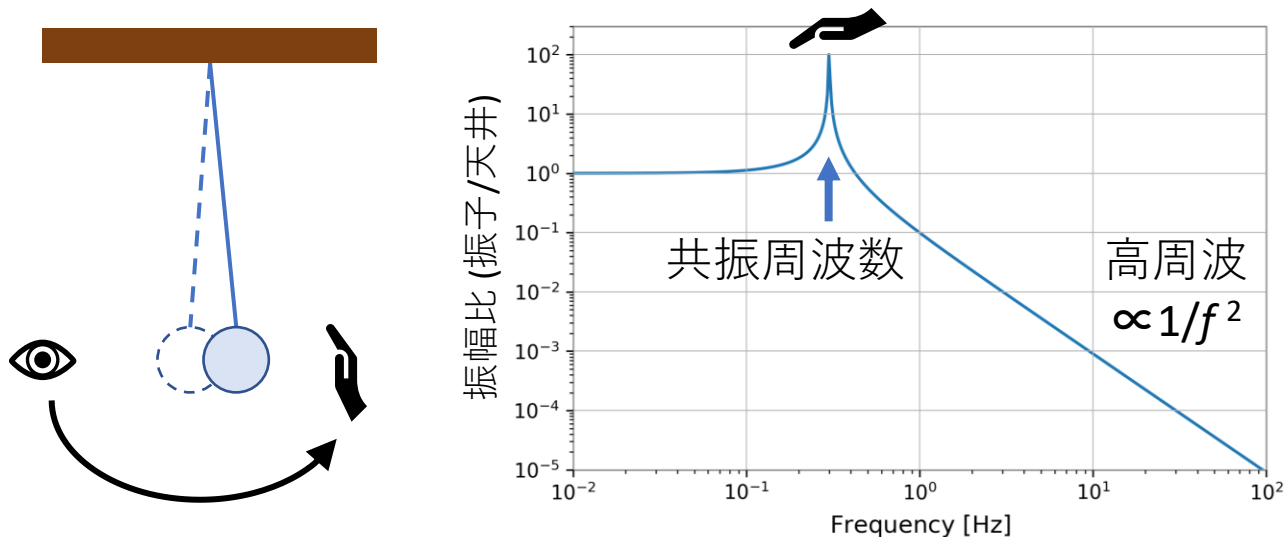




防振装置の制御雑音

- 鏡を振子にすることで、観測周波数帯における地面振動を削減している(受動防振)
- 共振周波数では逆に振動が大きくなってしまうため、これをローカルセンサーで測ってフィードバック制御によりダンプする
- ローカルセンサーのノイズが共振周波数以外の周波数帯を汚してしまっている

単純な1段振子の例



【O3GK後の対応策】

- 高さや加重バランスなどの調整により、防振装置の”振る舞い”が改善された
- ノイズの小さいローカルセンサーの導入 (on going、ほぼ完了)
- 制御フィルターを改善し、余分な周波数のノイズ混入を防ぐ

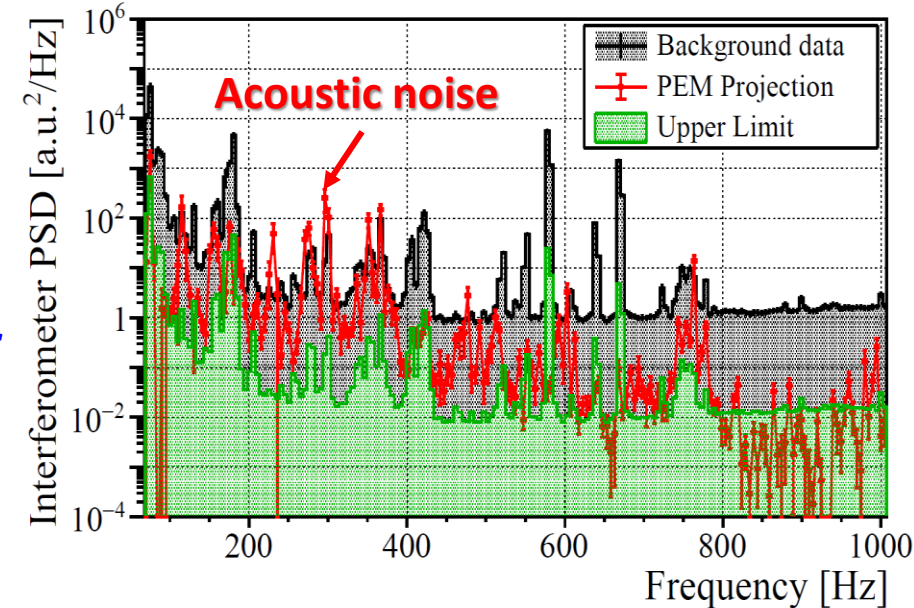
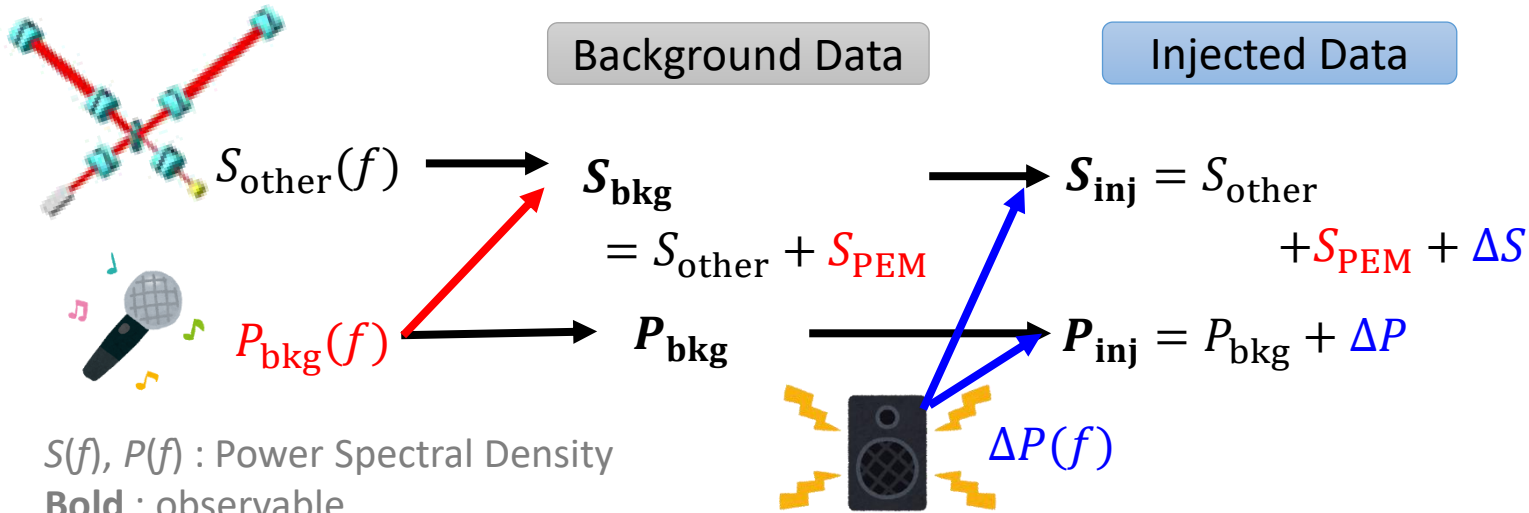
音響雑音

実験室内の音による影響を、雑音注入試験によって評価した

T Washimi et. al., CQG 38 125005 (2021)

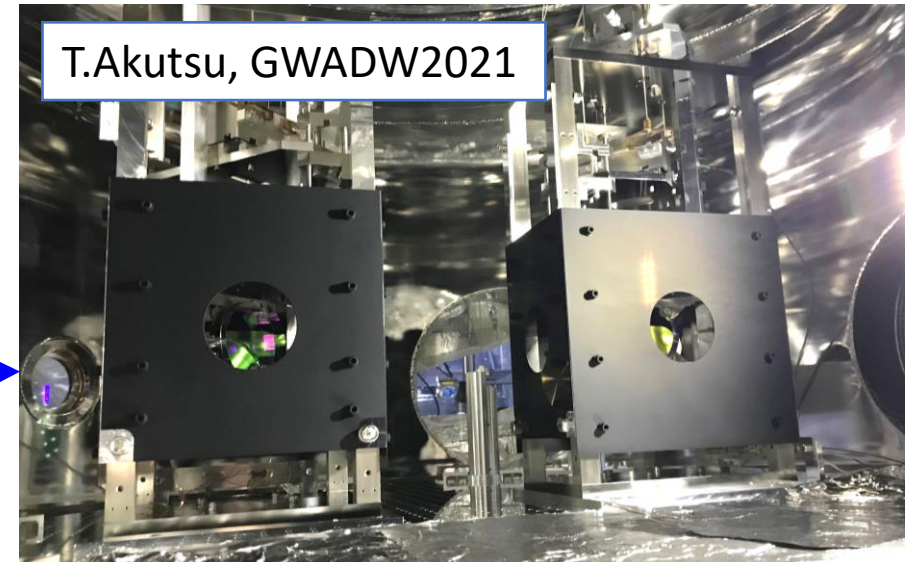
干渉計

音



- 200~400Hzにおいて、支配的な雑音となっていた
- 打撃試験により、入射光学系の真空ベローズにおける散乱光が主要な混入経路であると同定
- O3GK後の改修作業で散乱光対策のバッフルをインストールした
- マイク信号を用いたオフライン解析による雑音除去手法を開発中

T.Akutsu, GWADW2021

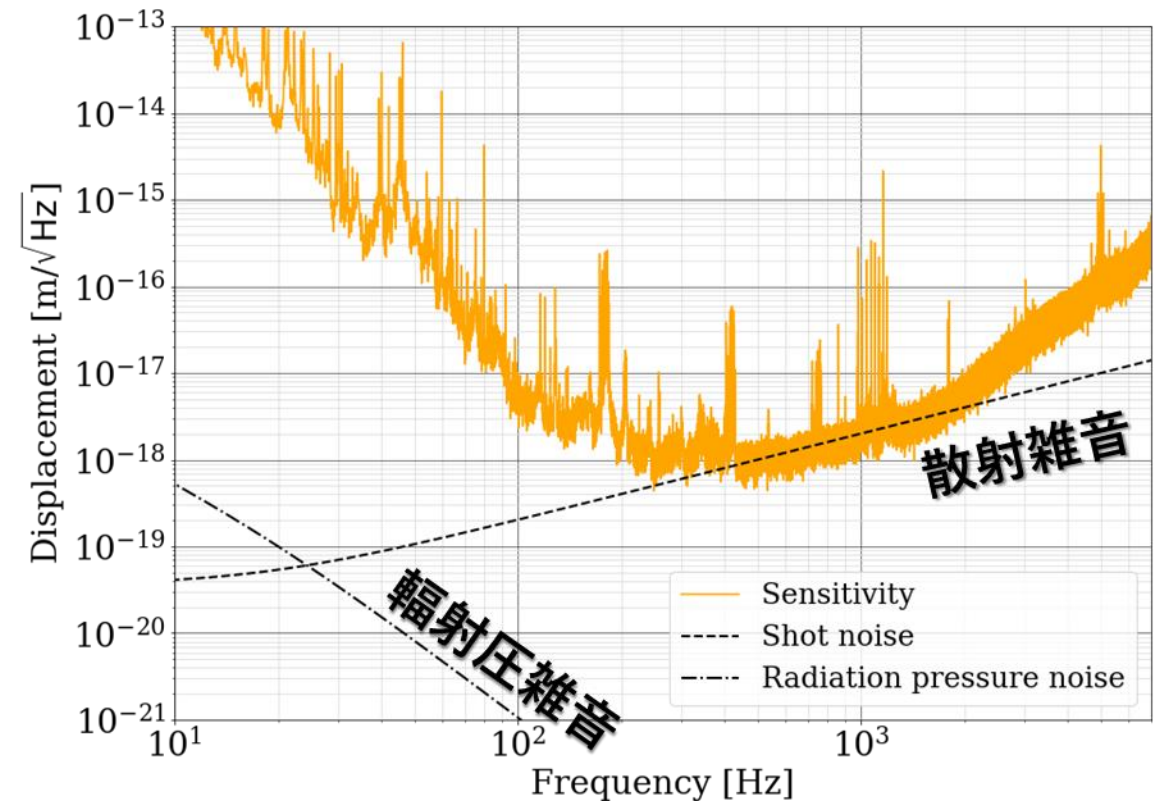


量子雑音

- 光の量子性に起因する雑音
 - 散射雑音 : 検出光子数のゆらぎ
 - 輻射圧雑音 : 鏡を押す光子数のゆらぎ
- O3GKにおける各種パラメタから計算されるショットノイズと400-2000Hzにおける感度がコンシステント
 - 実験デザインで決まる原理雑音で、ある意味「ノイズハンティングのゴール」

【今後(近くない将来含む)の改善策】

- レーザーパワーの増強
 - O3GK : 50W@BS \Rightarrow Design : 674W@BS
- RSE(resonant sideband extraction)干渉計として運用
- 鏡を重くする : 23kg \rightarrow 40kg ([PTEP 2021, 5, 05A103](#))
- 周波数依存スキューミング
 - 天文台三鷹キャンパスにて実証に成功 ([PRL 124, 171101 \(2020\)](#))



レーザー(強度, 周波数)と光検出器の雑音

■ レーザーの周波数雑音

- 2kHz以上で支配的となっている成分。
- シミュレーション見積もられるよりも大きなカップリングがあり、サファイア鏡の複屈折が原因ではないかと考えられている。

(PRD 100, 082005 (2019))

- 逆に言うと、複屈折の影響が感度全体を制限しているわけではない。

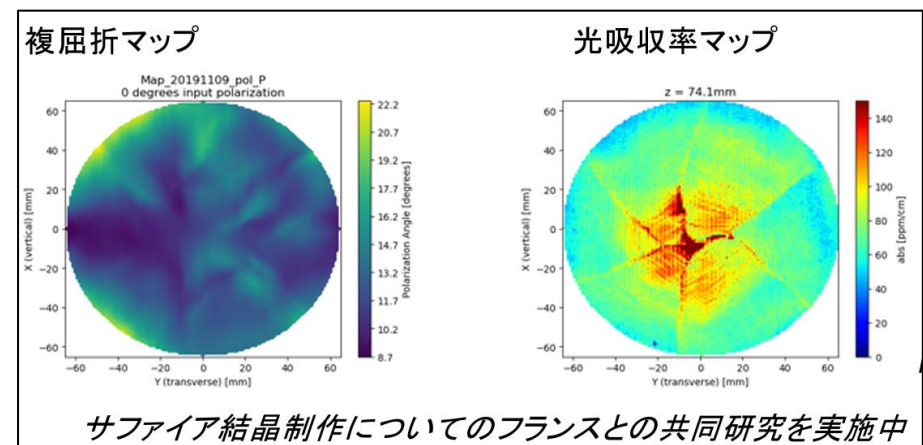
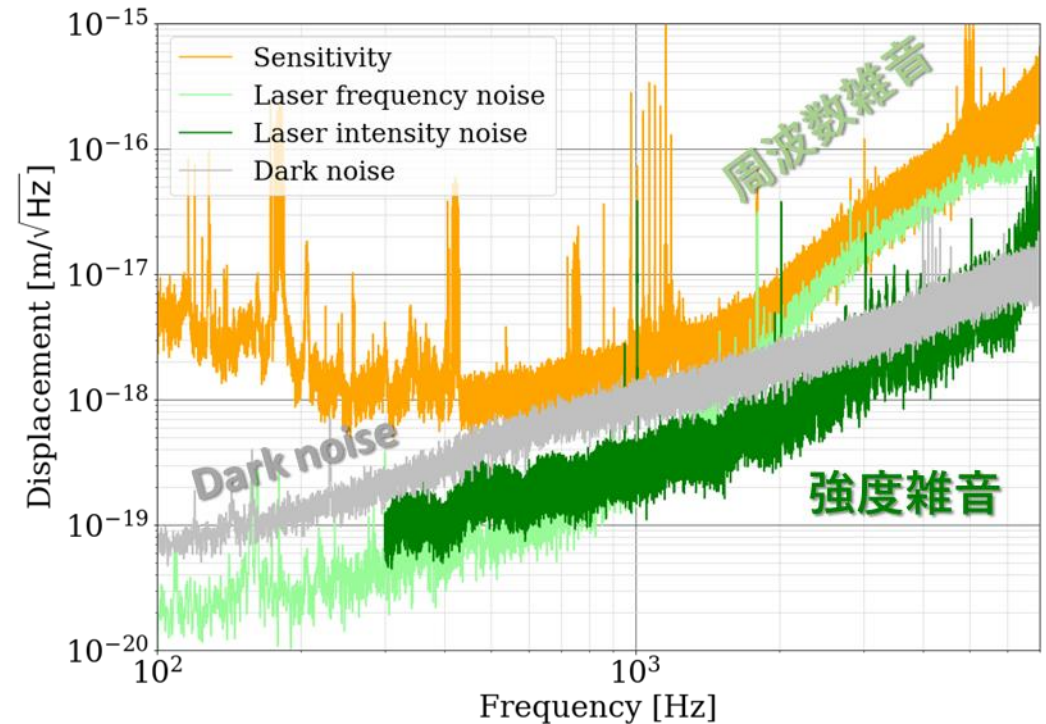
- O4では致命的ではないと見積もられている。
将来的にはITMを2枚再制作する予定

■ レーザーの強度雑音

- O3GK感度より十分小さい。
- 今後のハイパワー化に向けた強度安定化システムのアップグレードを富山大学で開発中。

■ Dark noise

- 重力波信号を含む光を受け取る光検出器(PD)の暗電流やADCノイズなど。
- レーザー光が入らない状態のスペクトルから評価。
- O3GKの段階で散射雑音より小さいので、今後問題にはならない。



<https://indico.icrr.u-tokyo.ac.jp/event/527/contributions/3040/>

まとめ

- ✓ 地上干渉計型重力波検出器は1Hz~10kHzの重力波を観測する
 - これまでにLIGO/Virgoで90イベントのCBC事象を観測
 - 一般相対論からの有意なズレは得られていない
- ✓ KAGRAは2020年4月にGEO600との国際共同観測O3GKを実施した
 - KAGRA検出器の雑音成分をほぼ全て説明することができた
 - 検出器論文と解析論文を投稿(準備)中
- ✓ LIGO/Virgo/KAGRAでは今後に向けたアップグレード作業が進行中
 - LIGO-Virgo-KAGRA共同観測(O4)：2022年12月開始予定
 - KAGRAのアップグレード詳細は3月のJPS等を参照
- ✓ KAGRAの現状をまとめた招待論文を投稿中
 - https://www.mdpi.com/journal/galaxies/special_issues/pfgwa