

2030年代の 地上重力波検出器 とKAGRAの戦略

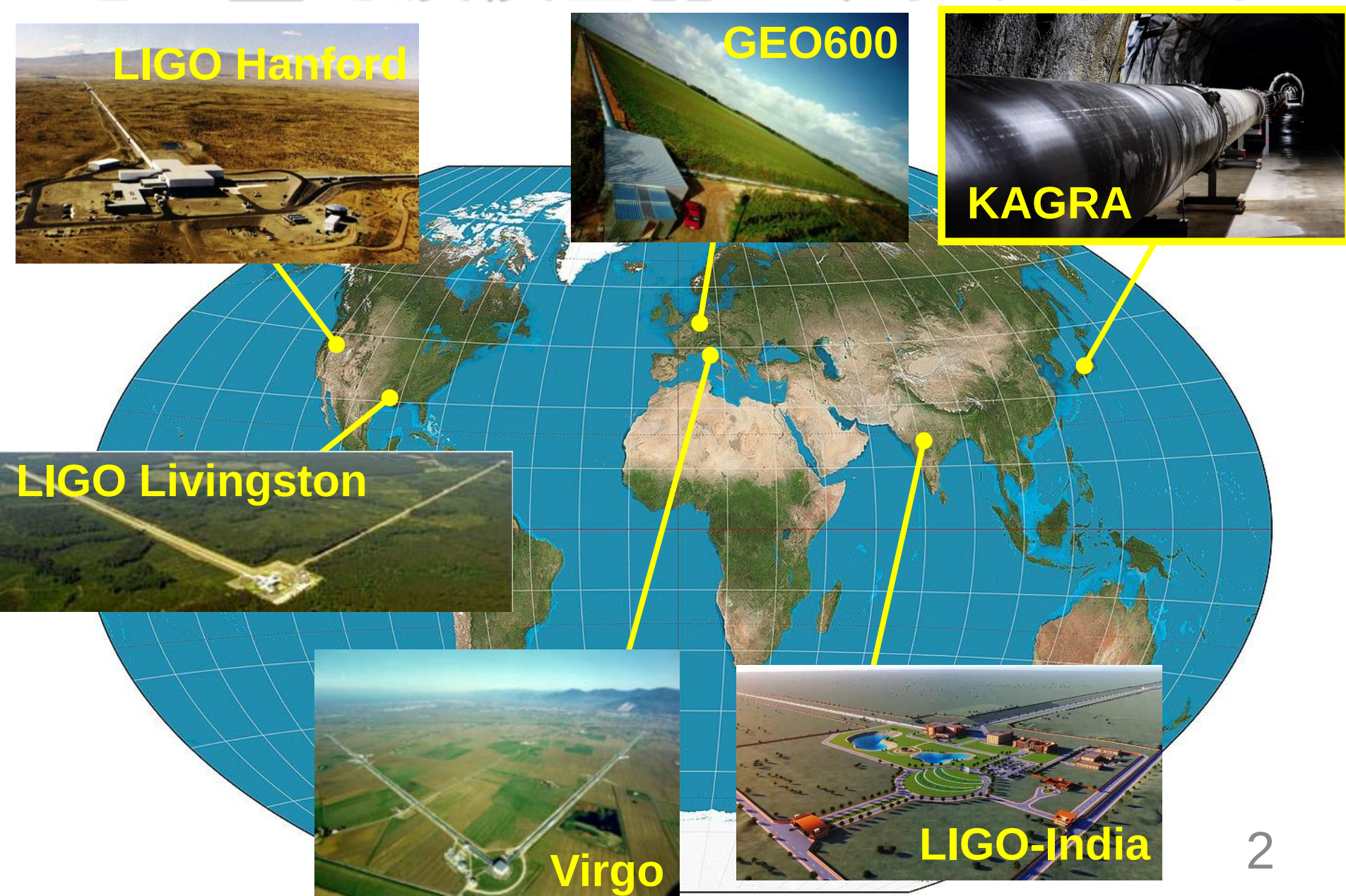
道村唯太

東京大学 大学院理学系研究科附属
ビッグバン宇宙国際研究センター
michimura@resceu.s.u-tokyo.ac.jp

KAGRA

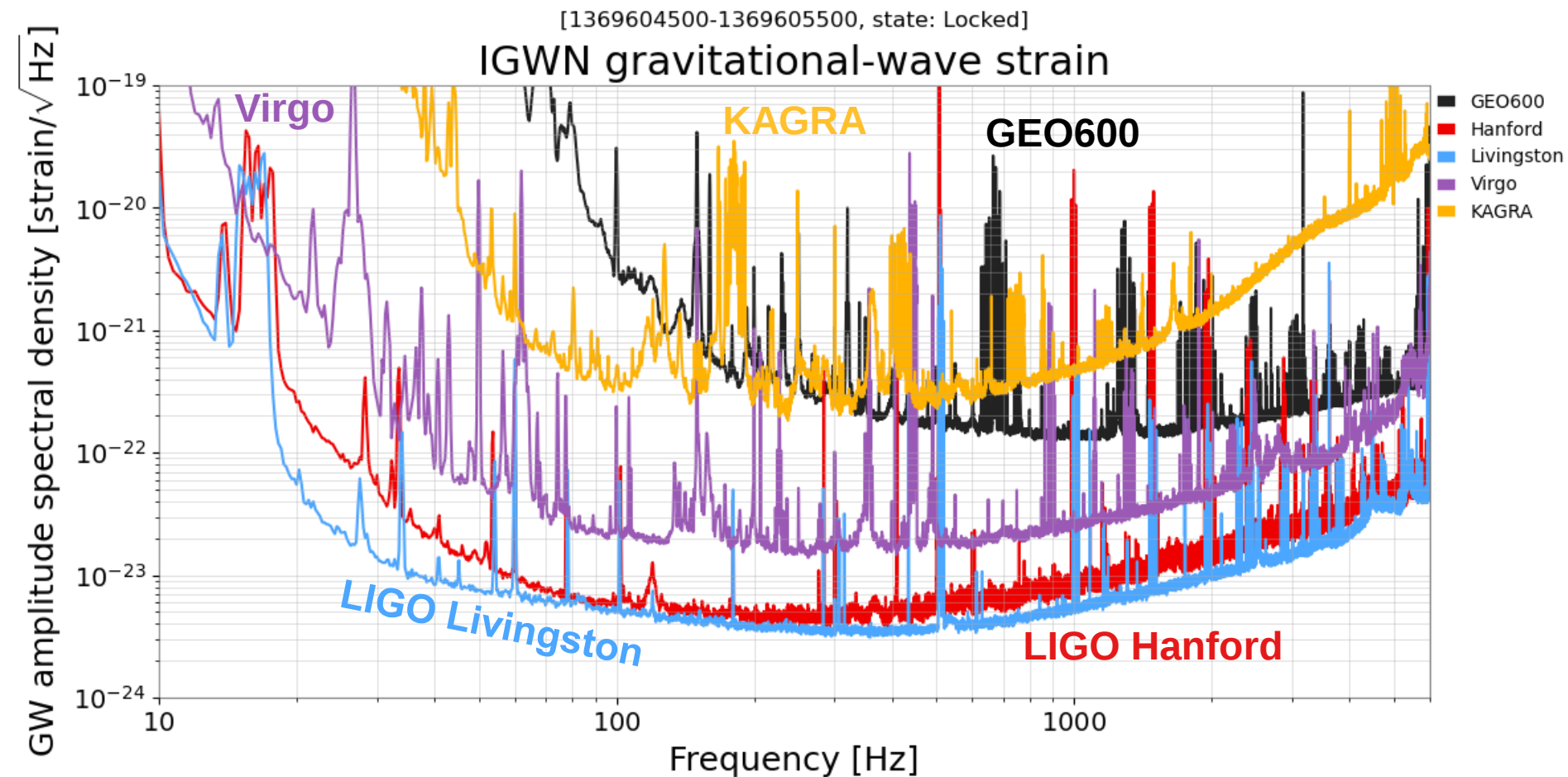


地上重力波検出器のネットワーク



現状(2年前;O4開始時)の感度の比較

- 下に行くほど感度が良い(2倍良いと、8倍の観測数)

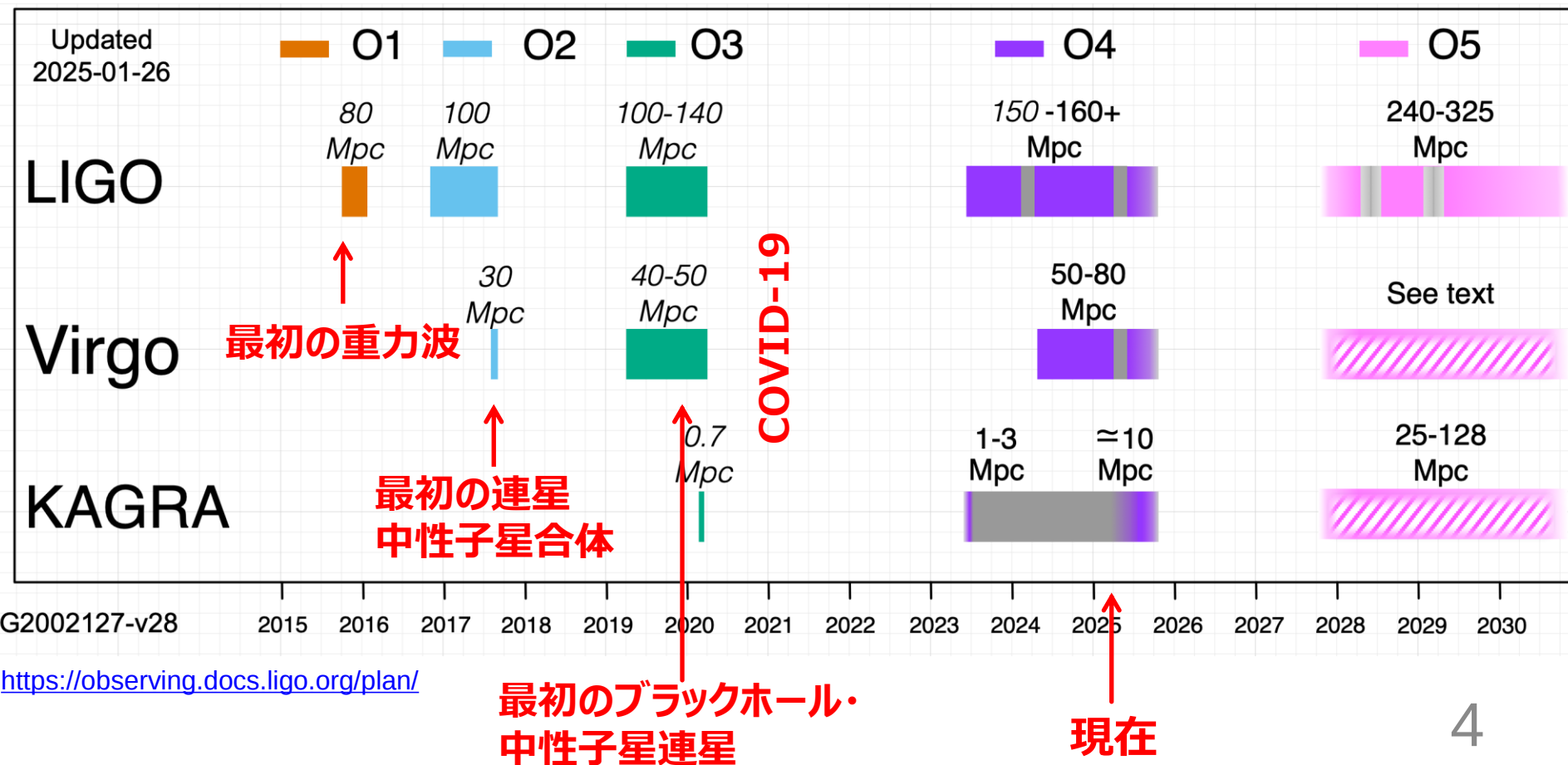


NOTE: Not the latest. Taken when 5 detectors are locked simultaneously on June 1, 2023

LIGO-Virgo-KAGRAの共同観測計画

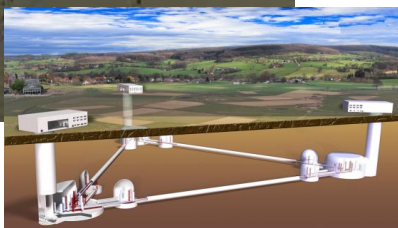
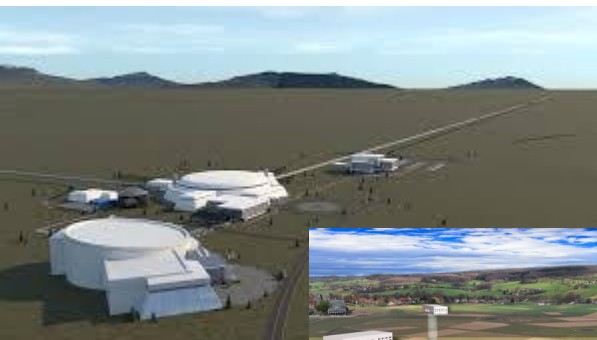
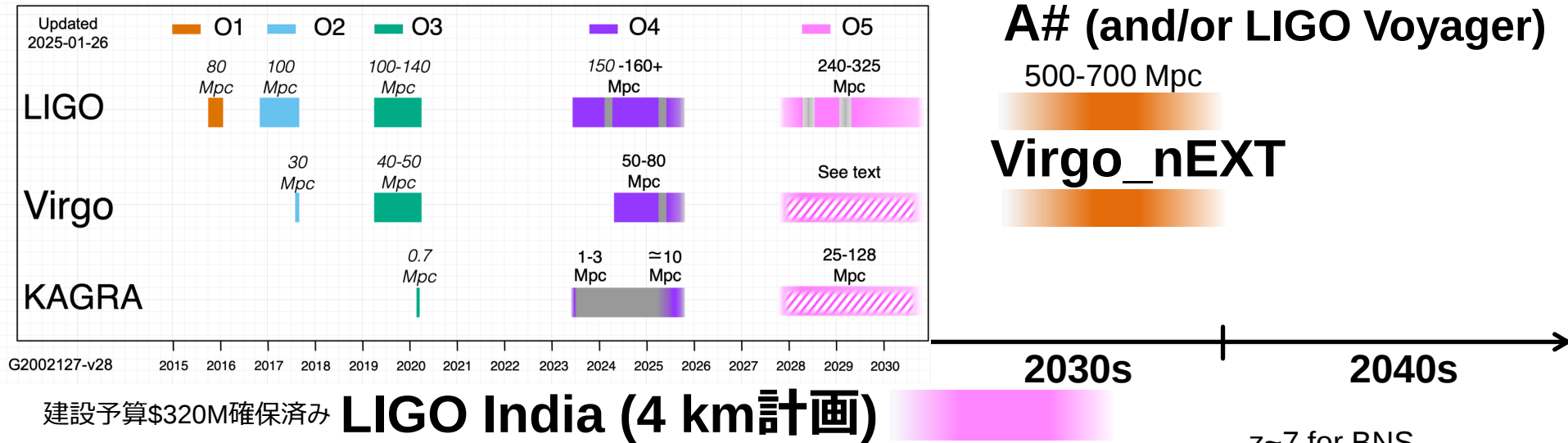


- 複数台による観測が重要
- より連携を強化したInternational Gravitational Wave Observatory Network (IGWN)構想も



各国の将来計画

- LIGO/VirgoはO5、O6以降に向けアップグレード
- 次世代計画も進行中、全宇宙の恒星質量連星観測



Cosmic Explorer
(米国、20-40 km計画)

Einstein Telescope
(欧州、10-15 km計画)

※2030年代にはLISA、
Taiji、TianQin、DECIGOも

感度進展の歴史

第1世代

TAMA300

Initial LIGO, Initial Virgo

第2世代

Advanced LIGO

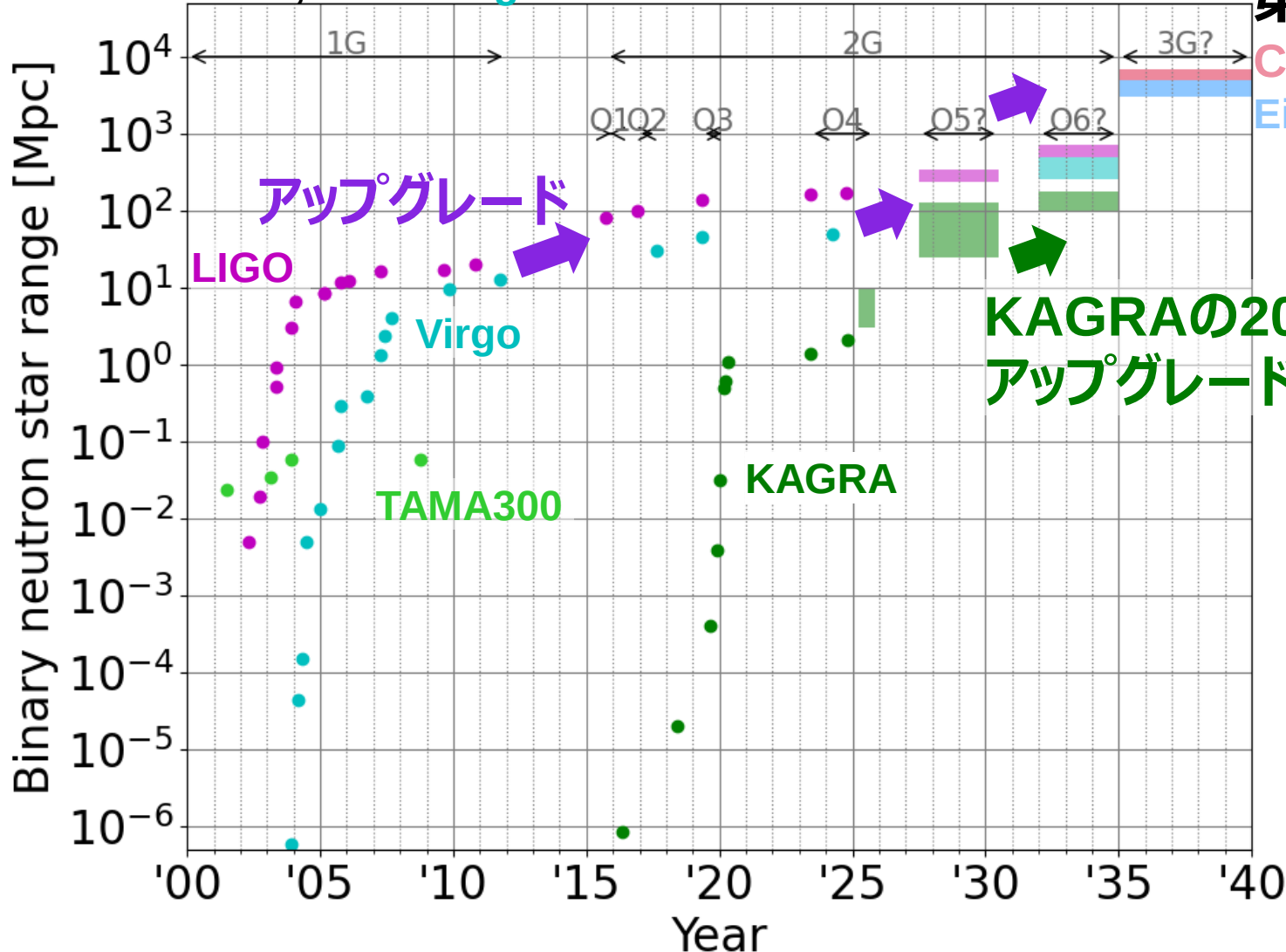
Advanced Virgo

KAGRA

第3世代

Cosmic Explorer

Einstein Telescope



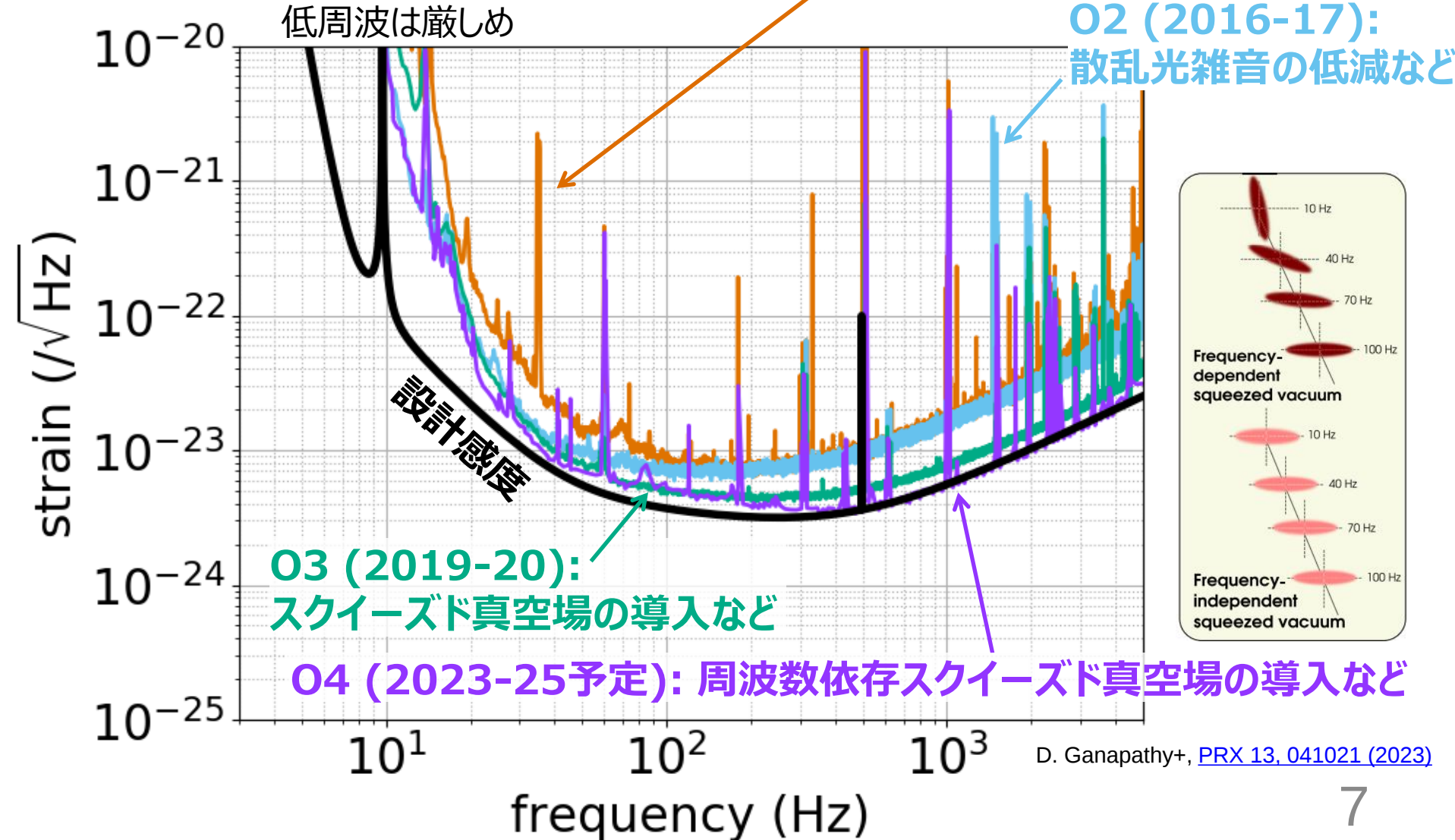
LIGO(米国, 4 km)の状況

- 感度を順調に上げている

O1 (2015-16): 重力波の初検出

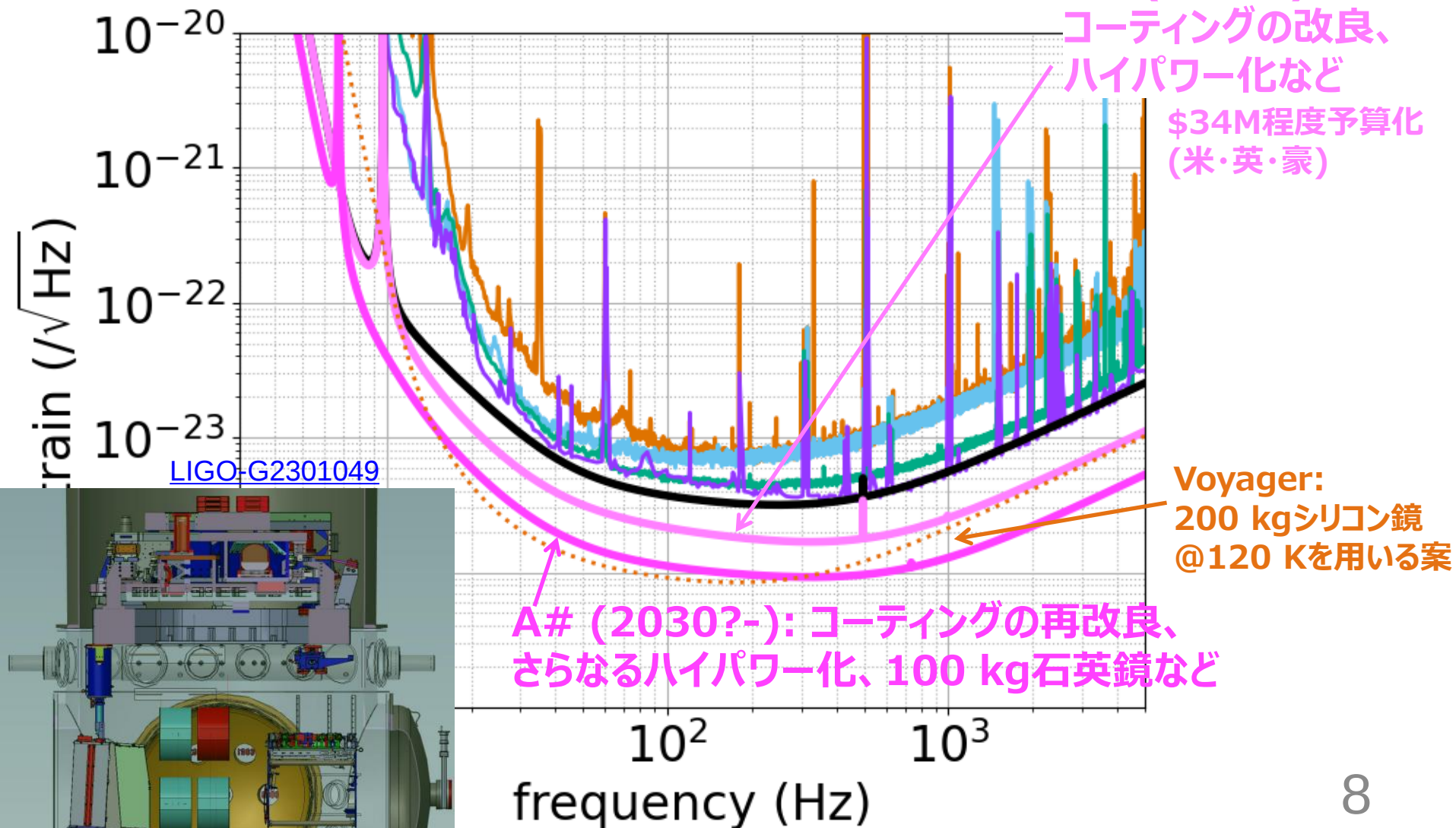
O2 (2016-17):
散乱光雑音の低減など

低周波は厳しめ



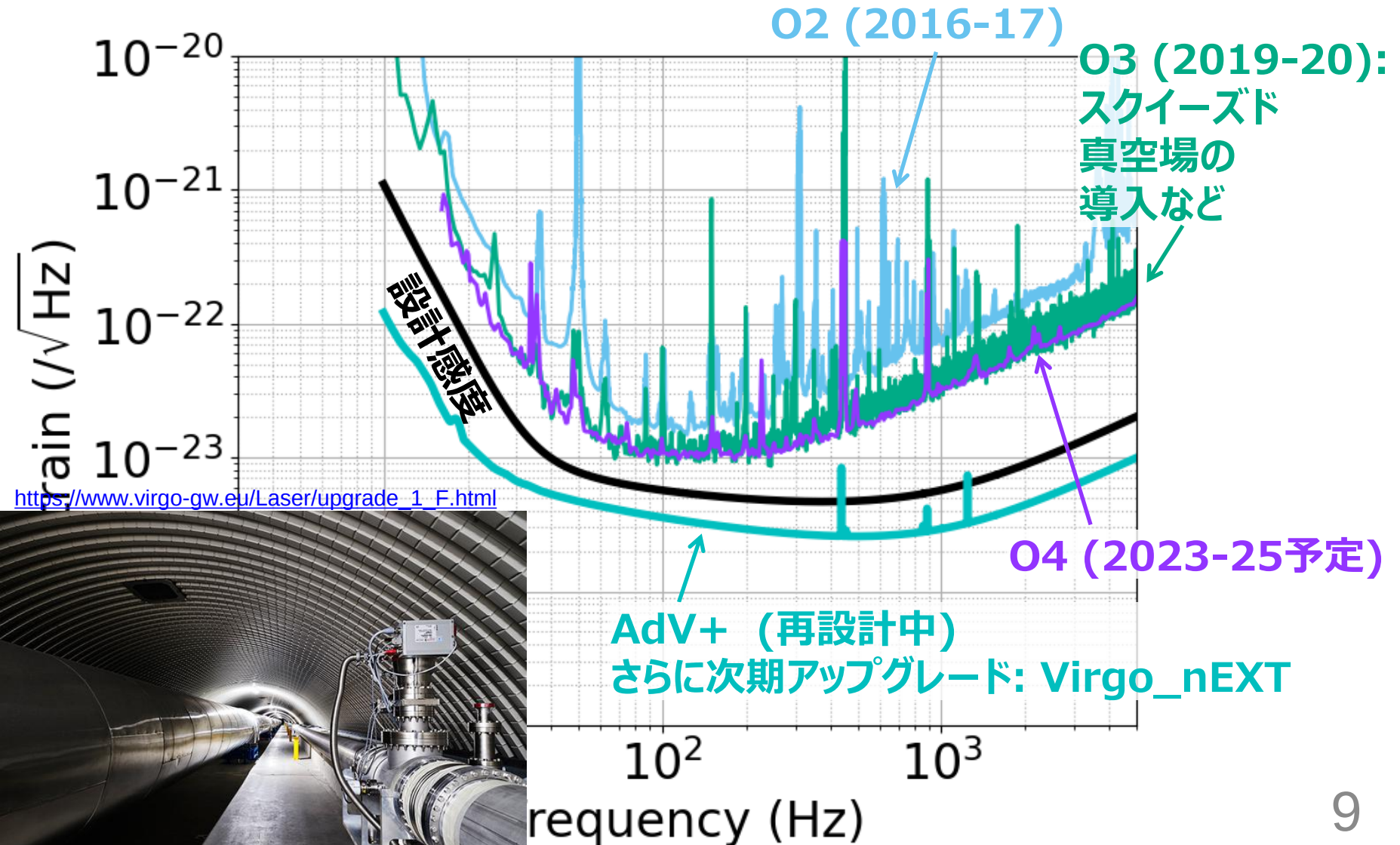
LIGO(米国, 4 km)の状況

- アップグレード計画に向けてR&D中



Virgo(欧州, 3 km)の状況

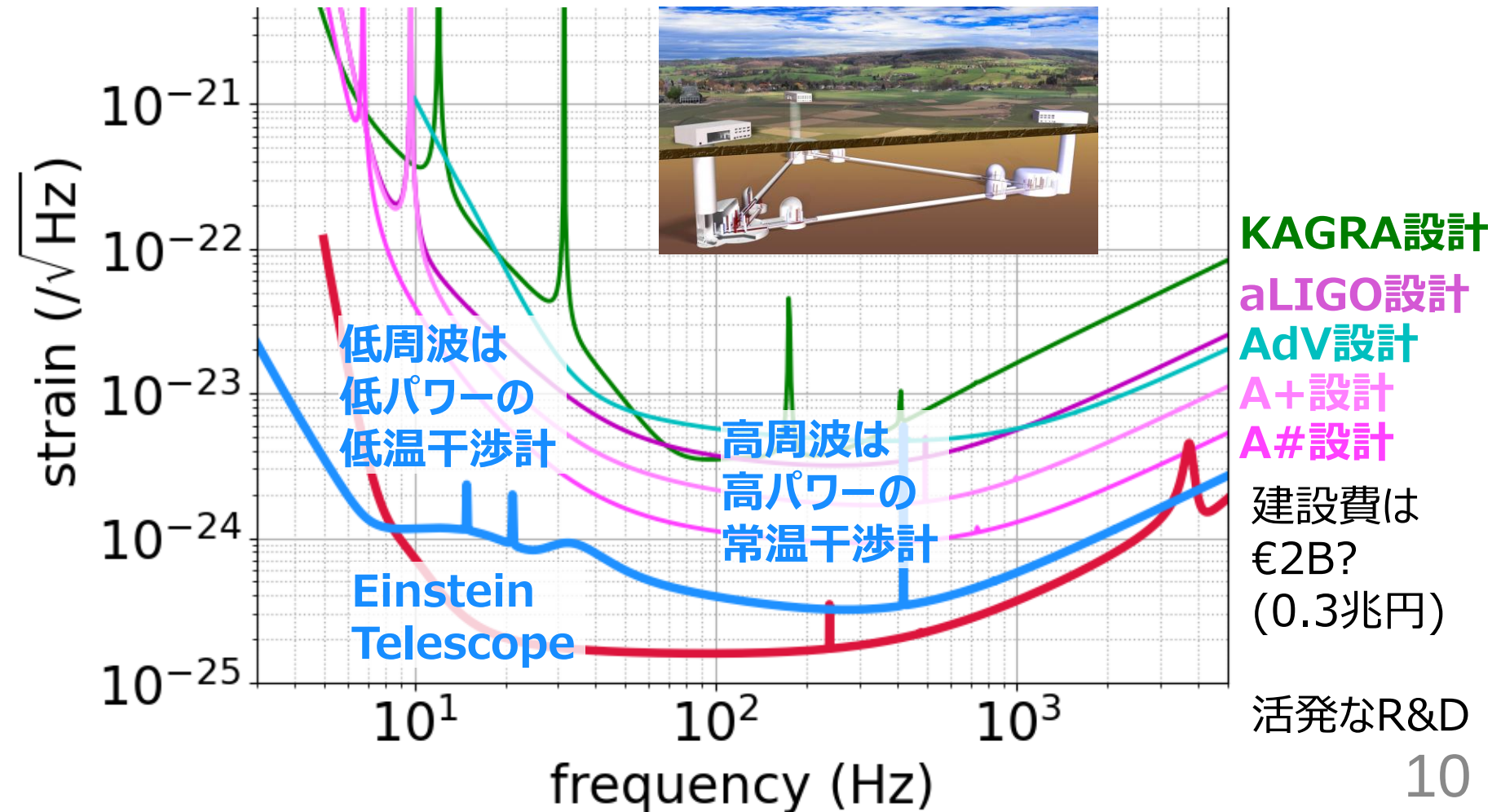
- 次期観測とそれ以降の計画は練り直し中



Einstein Telescope(欧州, 10-15 km)

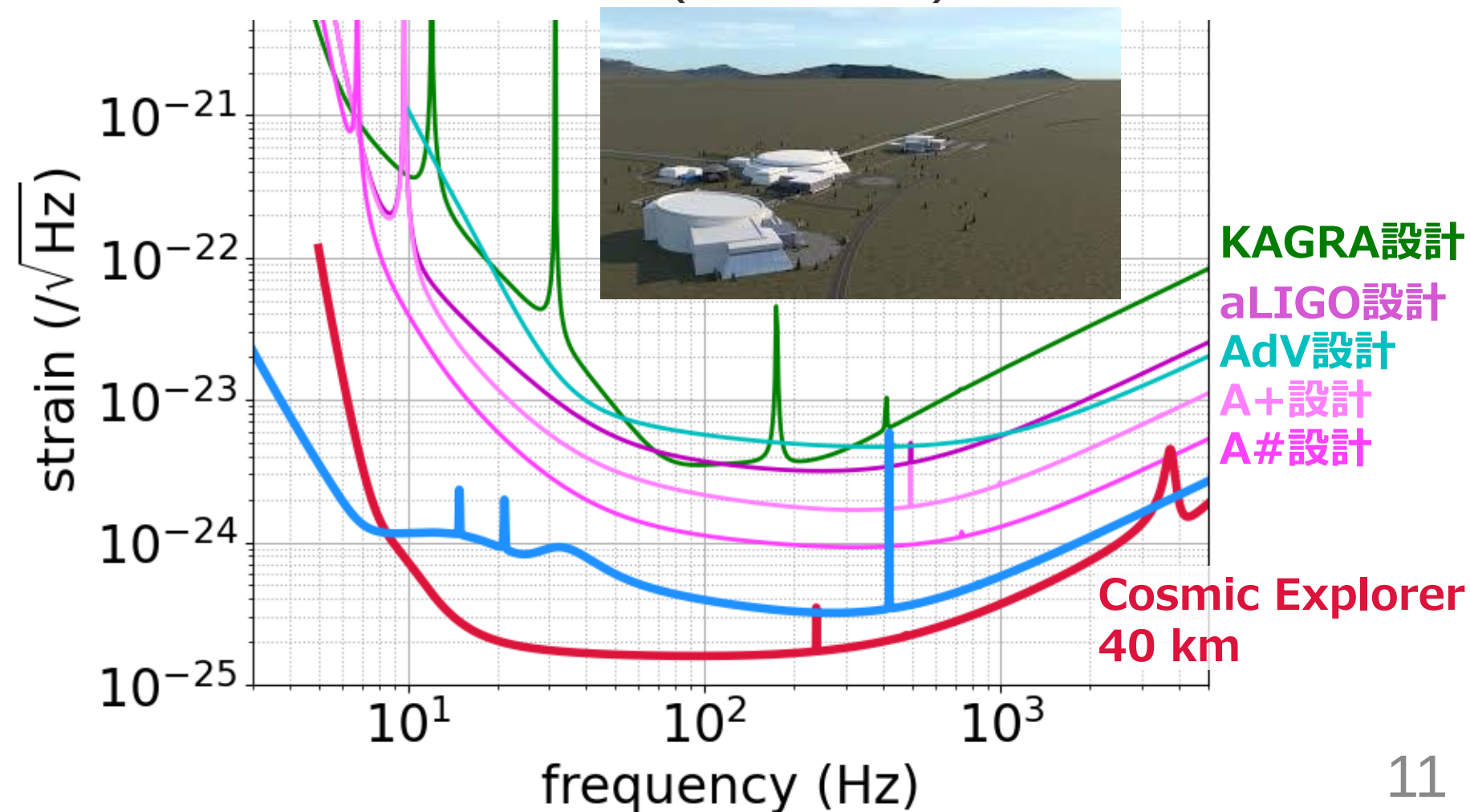
- 地下建設 (サルデーニャ島 or 白独蘭の国境)
- 10 Kシリコン鏡の干渉計と常温石英鏡の干渉計の2種類

10 kmの△か
15 kmの2L



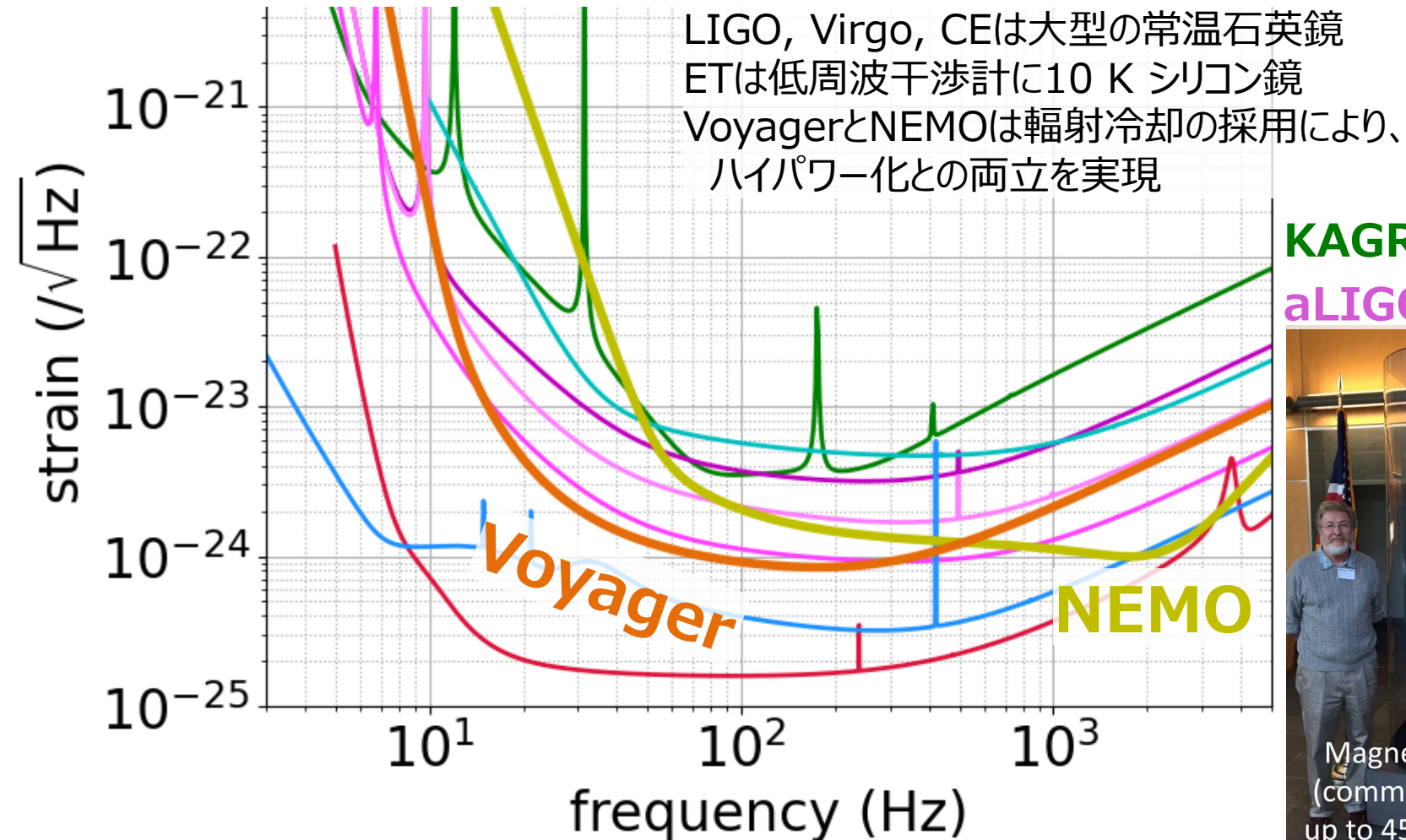
Cosmic Explorer(米国, 20-40 km)

- A#の技術に基づき、**10倍に大型化(常温)**
 - R&Dのための\$27M(約40億円)は予算化
- 20 kmと40kmの2台を想定



その他の動き

- LIGO Voyager: 120 K シリコン鏡(輻射冷却)
- NEMO: 豪州、4 km、120 K シリコン鏡



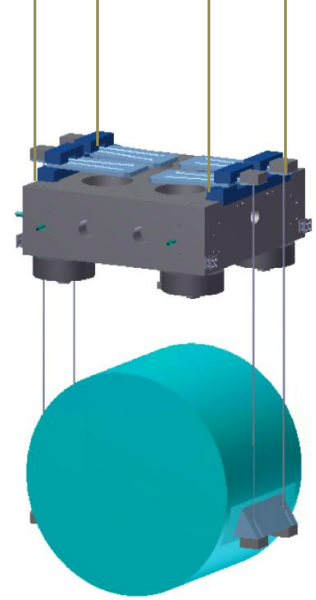
KAGRA設計
aLIGO設計



Magnetic CZ silicon
(commercially grown
up to 45 cm diameter)

KAGRAの2030年代は？

- 伝導冷却+ハイパワーの両立が困難
- 低周波の感度は一般に上げにくい

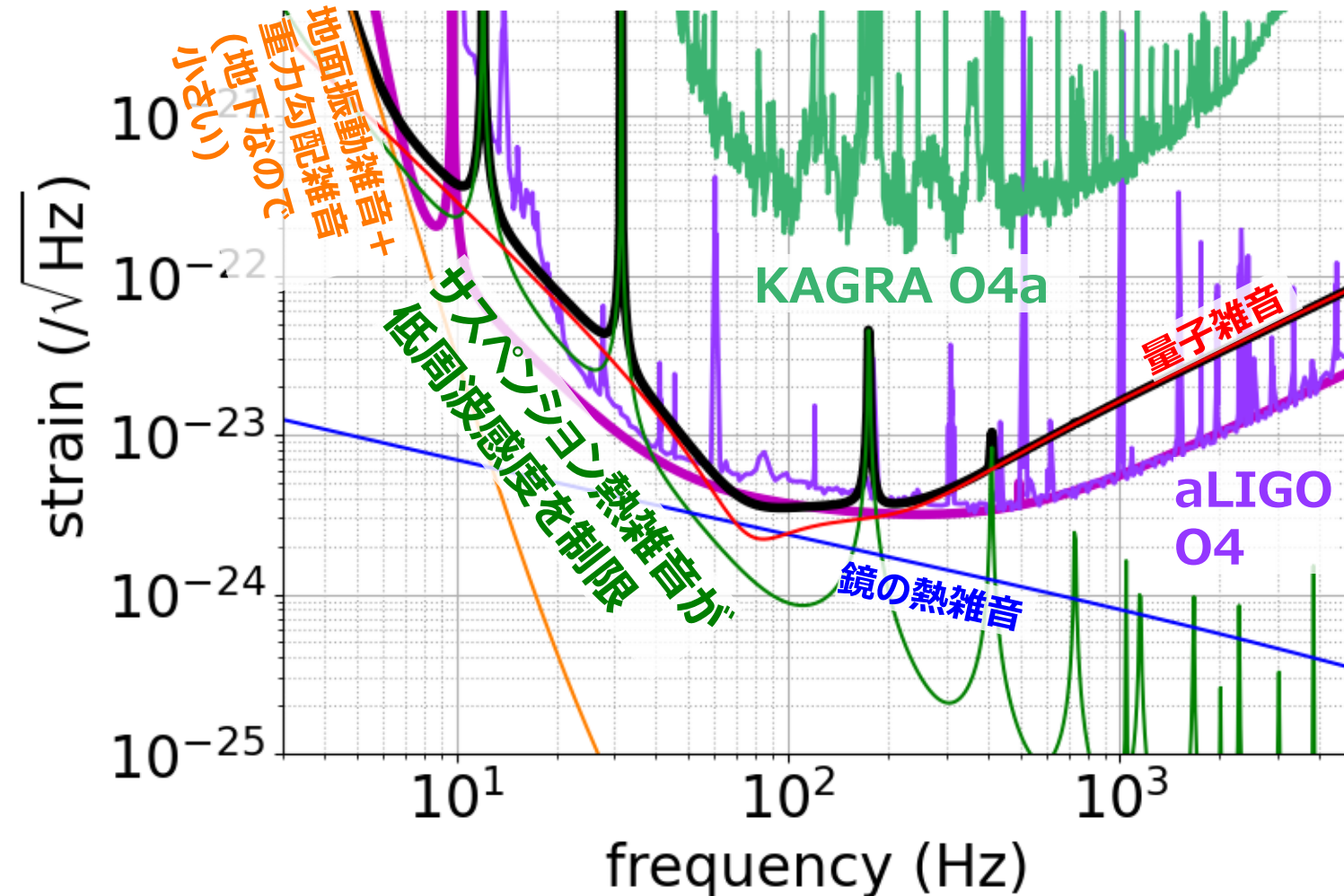


LIGO, Virgo, CEは
大型の常温石英鏡

ETは低周波干渉計に
10 K シリコン鏡

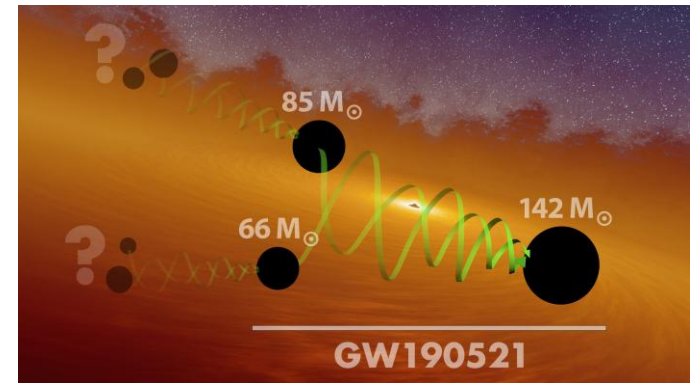
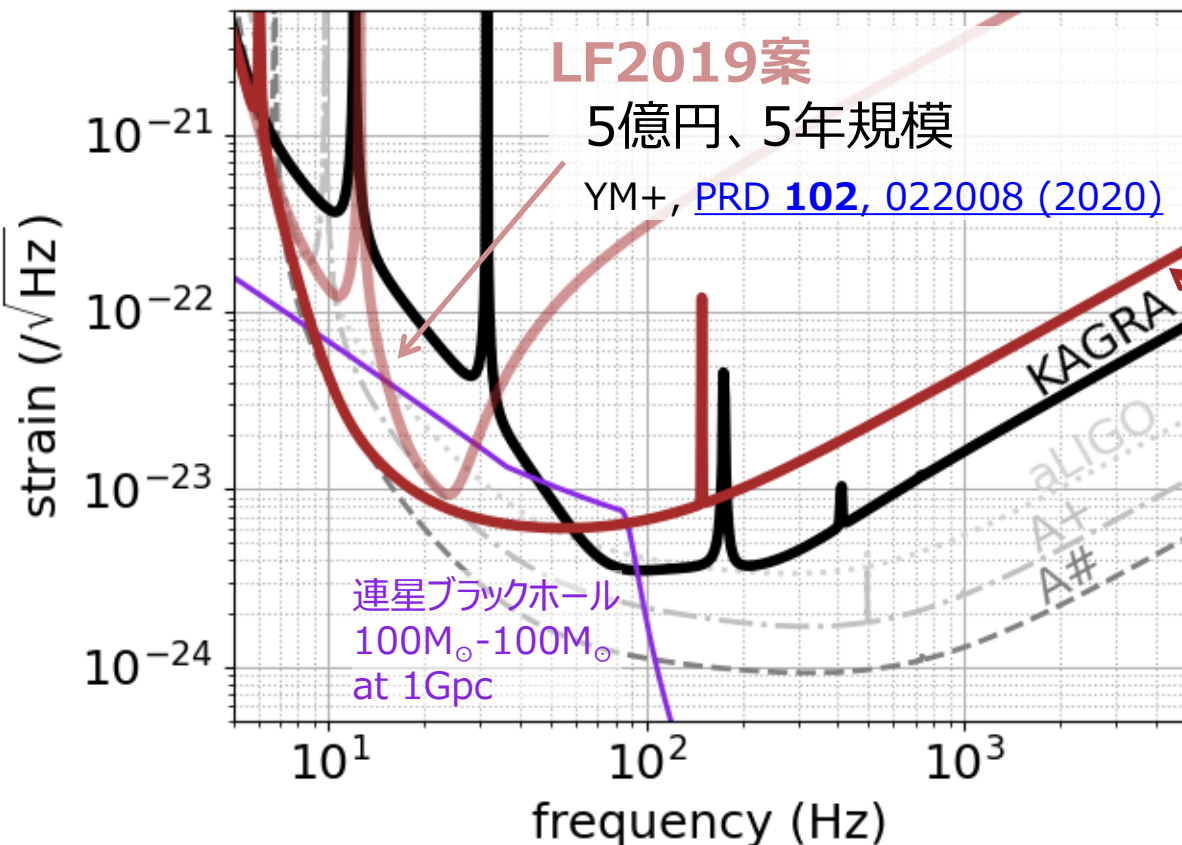
NEMO, Voyagerは
熱伝導での冷却で
120 K シリコン鏡

KAGRAは
熱伝導での冷却で
22 K サファイア鏡



3種類のアップグレード案

- LF: 懸架線細く、低パワー化して低周波特化
- BB: 鏡の改良、周波数依存スクィーミングで広帯域
- HF: 高パワー化して高周波特化



中間質量ブラックホールに迫る

LF2025案

さらにがんばる

(それでもLIGO A#には勝てない)

[JGW-T2416182](#)

Einstein Telescopeの
低周波干渉計と
技術的親和性が高い

3種類のアップグレード案

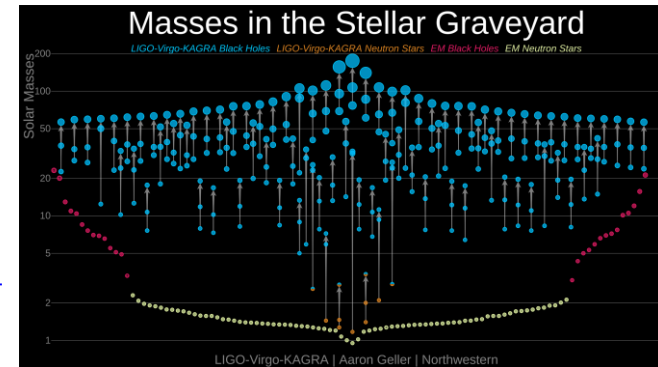
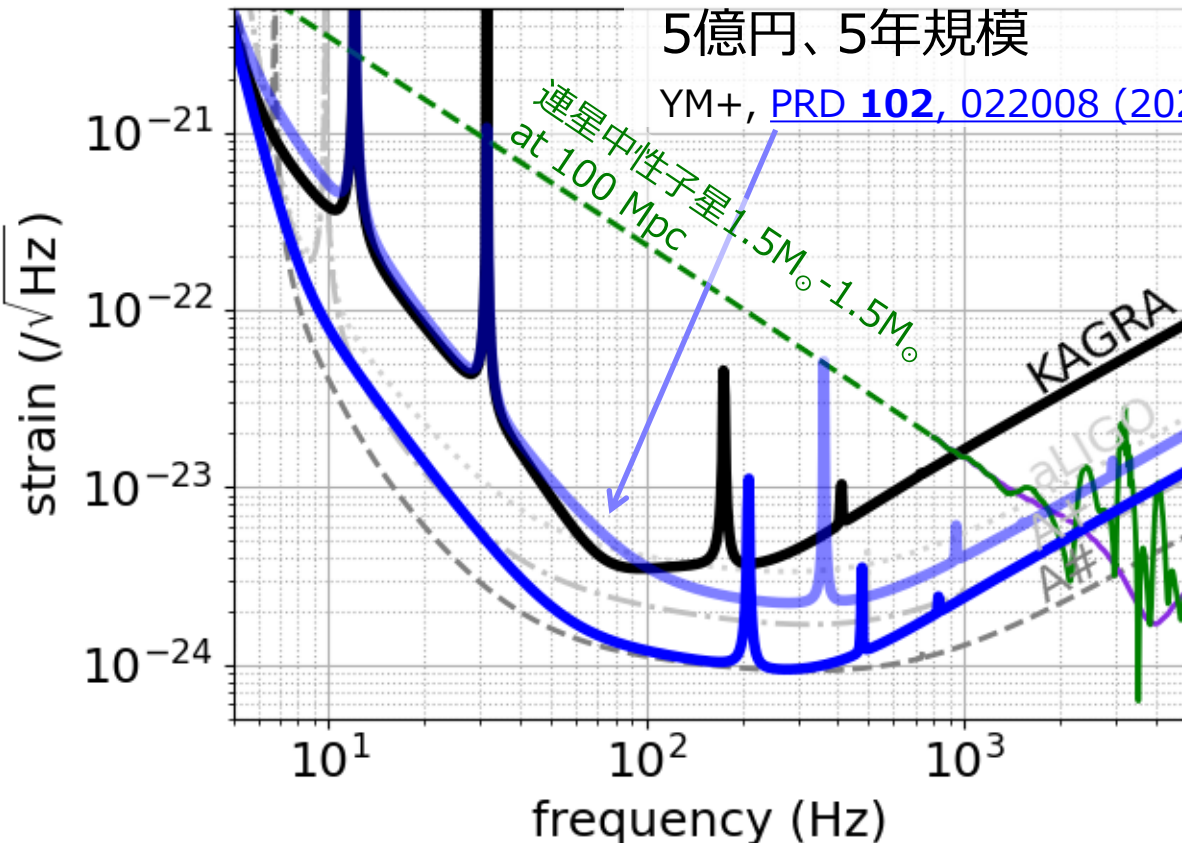
- LF: 懸架線細く、低パワー化して低周波特化
- **BB**: 鏡の改良、周波数依存スクィーミングで広帯域
- HF: 高パワー化して高周波特化

BB2019案

5億円、5年規模

YM+, [PRD 102, 022008 \(2020\)](#)

連星中性子星 $1.5M_{\odot} - 1.5M_{\odot}$
at 100 Mpc



観測数の最大化を目指す

BB2025案

さらにがんばる

(それでもLIGO A#には勝てない)

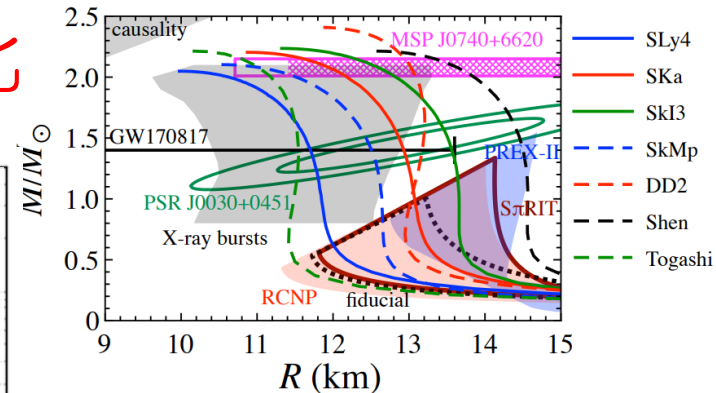
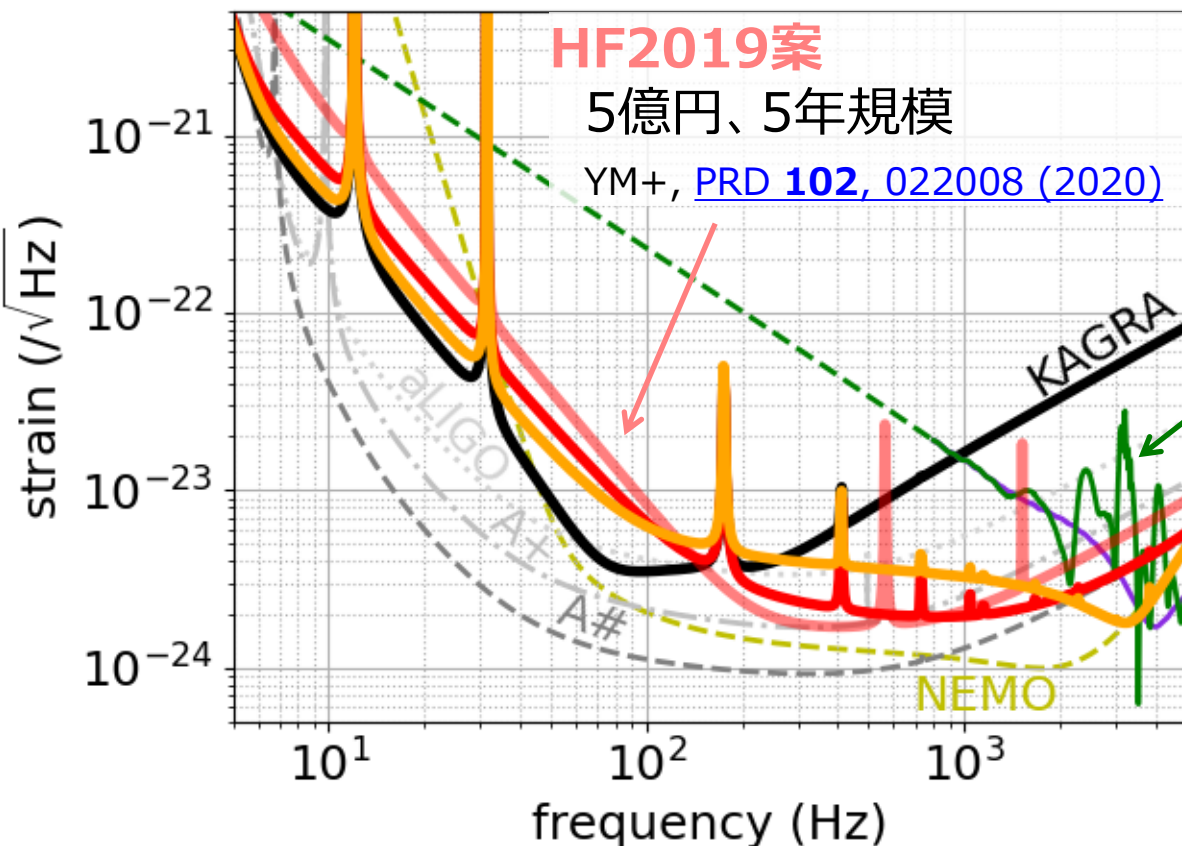
[JGW-T2416182](#)

A#などと同様のアップグレードを
すると、低周波はサスペンション
熱雑音が厳しい
4 kmと3 kmの違いも大きい

3種類のアップグレード案

- LF: 懸架線細く、低パワー化して低周波特化
- BB: 鏡の改良、周波数依存スクィーミングで広帯域
- **HF: 高パワー化して高周波特化**

中性子星の物理に迫る



H. Sotani+, [PTEP 2022, 041D01 \(2022\)](#)

Post-merger signal

例: R. Harada+, [PRD 110, 123005 \(2024\)](#)

HF2025案

HF3k案

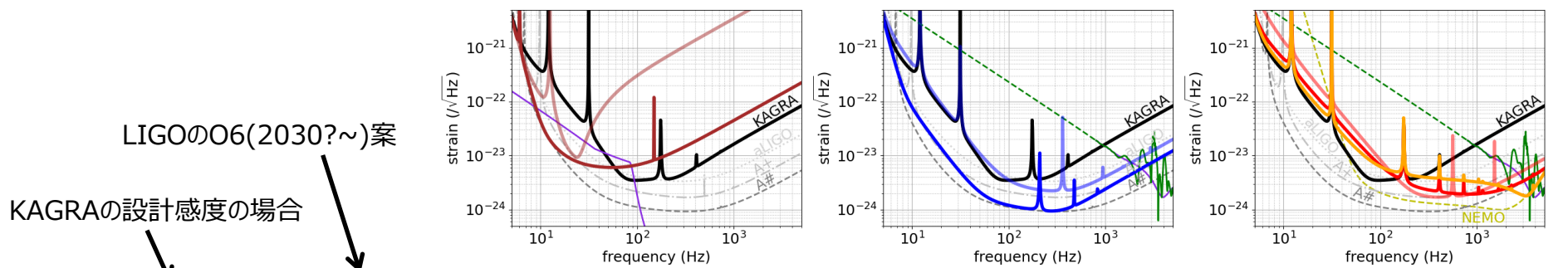
5億円、5年規模？

[JGW-T2416182](#)

NEMO(豪州)と親和性が高い

それぞれのサイエンス比較

- 高周波の方がユニークなサイエンスが狙えそう
中性子星の状態方程式、波源の方向決定精度



		KAGRA	LIGO A#	LF2019	LF2024	BB2019	BB2024	HF2019	HF2024	HF3k
Ranges (SNR>8)	100 - 100M _☉	353 Mpc	4927 Mpc	2019 Mpc	3787 Mpc	306 Mpc	2154 Mpc	112 Mpc	200 Mpc	277 Mpc
	30 - 30M _☉	1095 Mpc	6144 Mpc	1088 Mpc	2382 Mpc	842 Mpc	4229 Mpc	270 Mpc	407 Mpc	552 Mpc
	1.4 - 1.4M _☉	153 Mpc	670 Mpc	85 Mpc	196 Mpc	178 Mpc	537 Mpc	155 Mpc	133 Mpc	104 Mpc
BNS sky localization ※		10.64 deg ² (HL-only) → 1.40 deg ² (with K)		10.28 deg ²	2.65 deg ²	0.77 deg ²	0.42 deg ²	0.57 deg ²	0.61 deg ²	0.93 deg ²
BNS post-merger signal detection rate (LF & BB plans are less than 10 ⁻³ events/year) Based on merger rate estimate from O3; SNR>5. [H. Tagoshi & S. Morisaki, JGW-P2416311]								10 ⁻⁵ -10 ⁻³ /year	10 ⁻³ -0.06 /year	10 ⁻³ -0.2 /year

※ Fisher analysis using IMRPhenomD waveform for GW170817-like binary at z=0.03 (127 Mpc) with two A#s and KAGRA. Median of 108 uniformly distributed sets of the source location and the polarization angle is shown.

様々なKAGRA関連R&D (一部紹介)

- TAMA300施設を用いた**周波数依存スクリーニング**実証

Y. Zhao+, [PRL 124, 171101 \(2020\)](#)
N. Aritomi+, [PRD 106, 102003 \(2022\)](#)

- サファイア鏡の**複屈折**の対策

K. Somiya, E. Hirose, YM, [PRD 100, 082005 \(2019\)](#)
YM+, [PRD 109, 022009 \(2024\)](#)
H. Wang, ..., YM, [PRD 110, 082007 \(2024\)](#)
M. Eisenmann+, [Optics Letters 49, 3404 \(2024\)](#)

- 鏡の**コーティング熱雑音**

Y. Mori, Y. Nakayama+, [PRD 109, 102008 \(2024\)](#)

- **非ガウス型量子状態**の利用検討

@国立清華大学

Yi-Ru Chen+, [PRA 110, 023703 \(2024\)](#)

- **量子制御技術**の開発

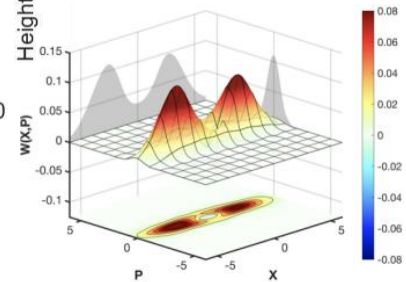
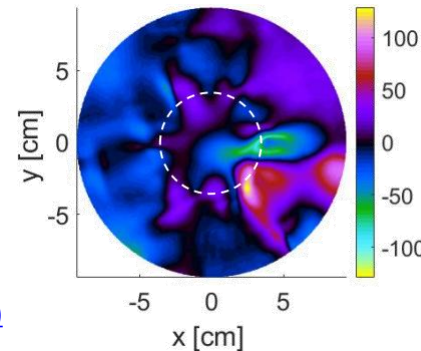
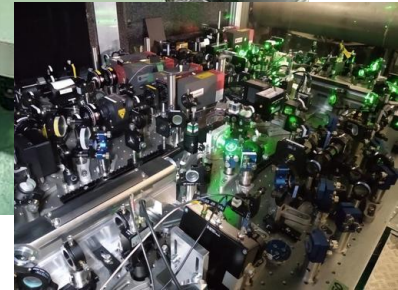
例1: “Long SRC”効果の確認実験@宇宙研

例2: カー効果を使った光ばねの増強

S. Otabe, ..., YM, K. Harada, K. Somiya, [PRL 132, 143602 \(2024\)](#)

2024年より、オーストラリアと交流事業ASPIREもスタート

<https://aspire-gw.com/>



ASPIRE

Adopting Sustainable Partnerships
for Innovative Research Ecosystem

まとめ

- LIGOとVirgoは確実に高感度化を進めている
- 次世代計画のEinstein TelescopeとCosmic Explorerも着実に設計と研究開発が進んでいる
- その中で、KAGRAや日本の役割とは？
- 中性子星物理(や超新星爆発)に特化し、**KAGRAの特性を活かした高周波アップグレード**を検討中

- 2025年4月23-24日に本郷で研究会をやります(3月21日締切)

From Quarks to Neutron Stars:
Insights from kHz gravitational waves

<https://indico2.riken.jp/event/5141/>

