

# 地上重力波検出器 の将来計画

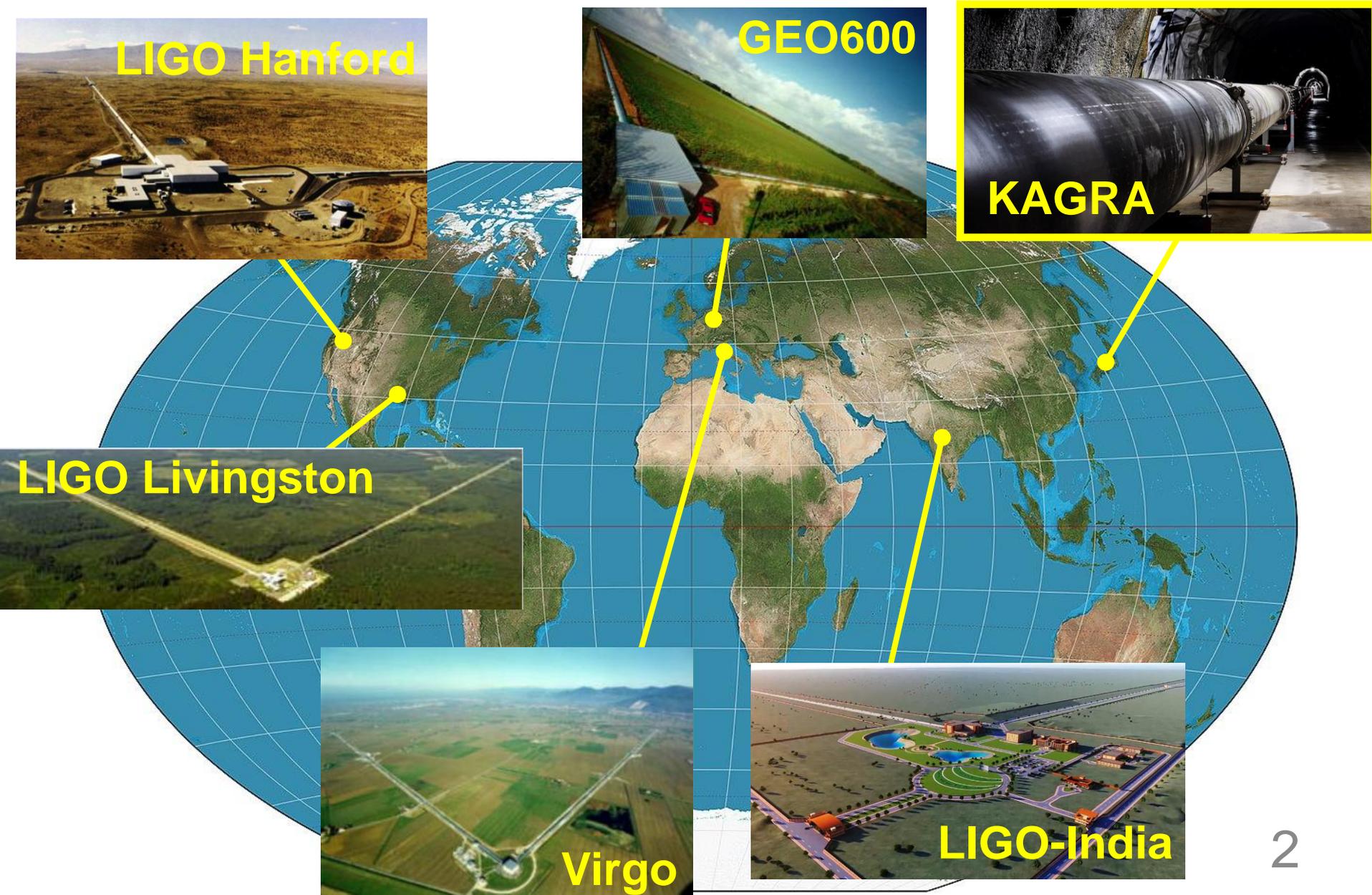
道村唯太

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](mailto:michimura@resceu.s.u-tokyo.ac.jp)

KAGRA

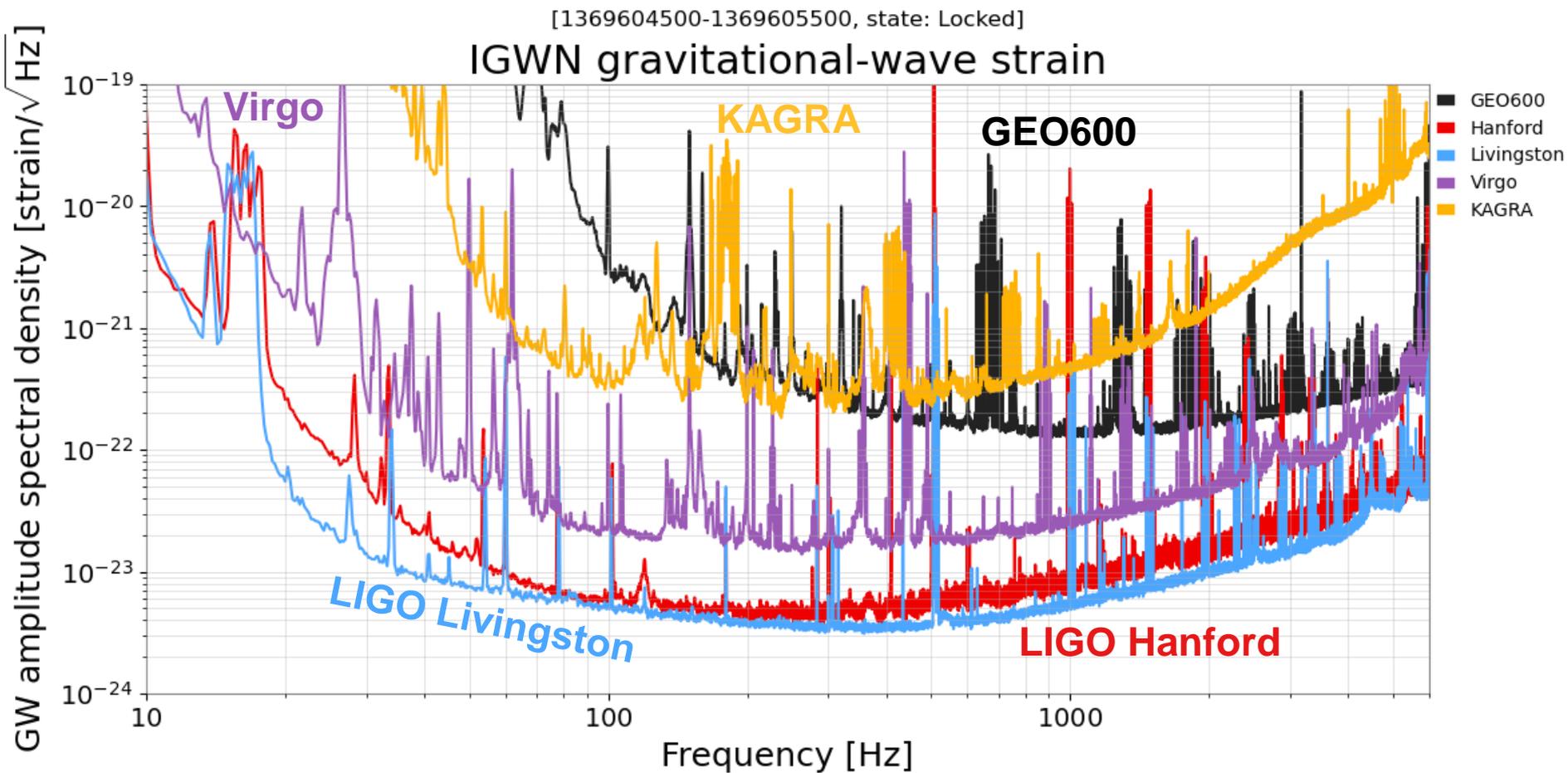


# 地上重力波検出器のネットワーク



# 現状(2年前;04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)

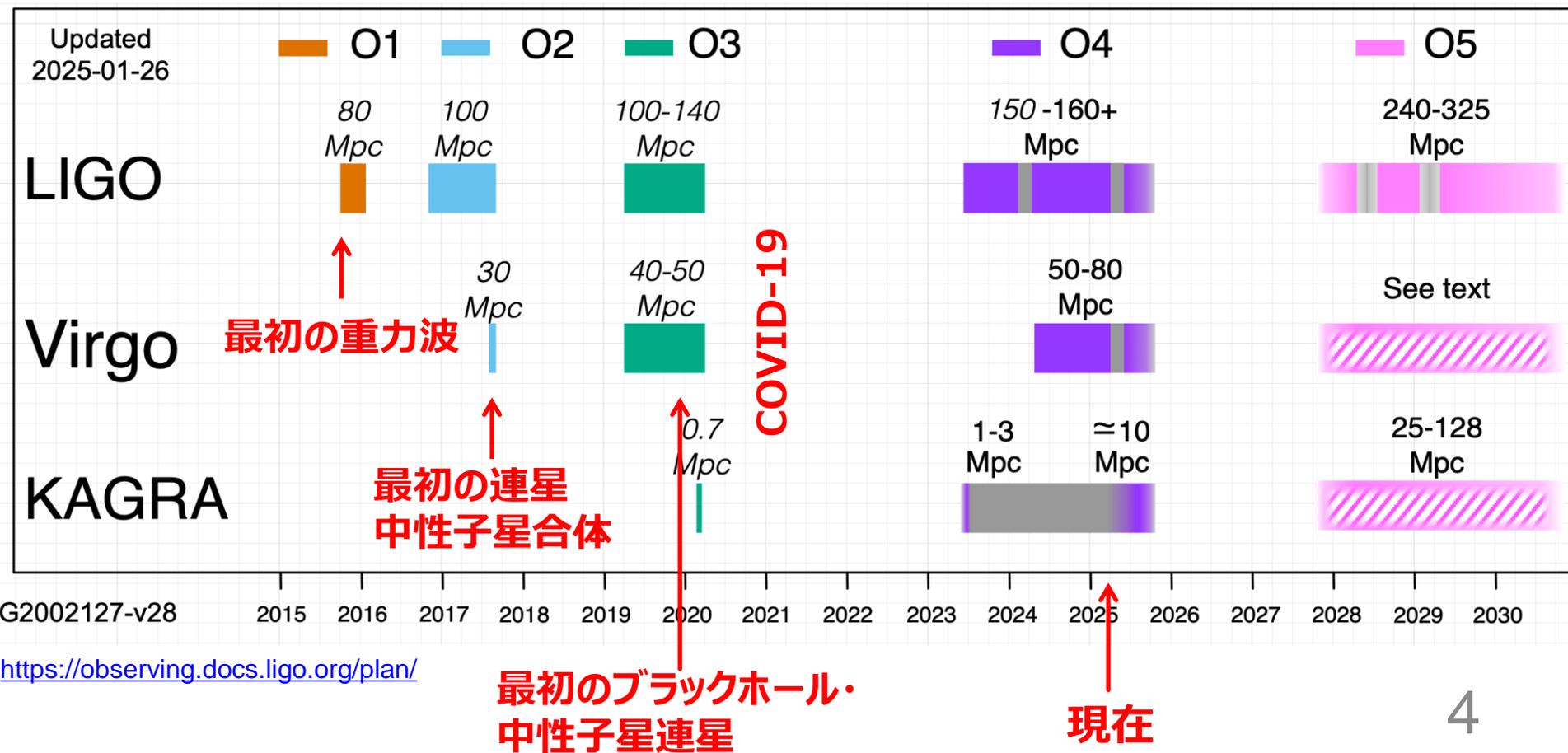


NOTE: Not the latest. Taken when 5 detectors are locked simultaneously on June 1, 2023

# LIGO-Virgo-KAGRAの共同観測計画

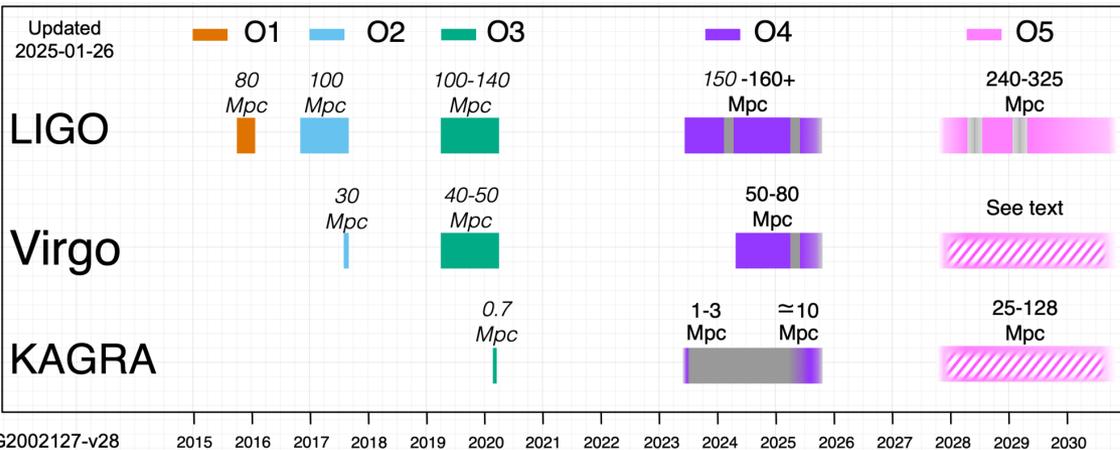


- 複数台による観測が重要
- より連携を強化したInternational Gravitational Wave Observatory Network (IGWN)構想も



# 各国の将来計画

- LIGO/VirgoはO5、O6以降に向けアップグレード
- 10-40 km級の次世代計画も進行中



**A# (and/or LIGO Voyager)**

500-700 Mpc

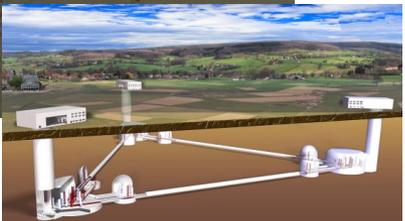
**Virgo\_nEXT**

2030s

2040s

建設予算\$320M確保済み

**LIGO India (4 km計画)**



**Cosmic Explorer (米国、20-40 km計画)**

z~7 for BNS  
z>10 for BBH

**Einstein Telescope (欧州、10-15 km計画)**

※2030年代にはLISA、DECIGOも 5

# 感度進展の歴史

## 第2世代

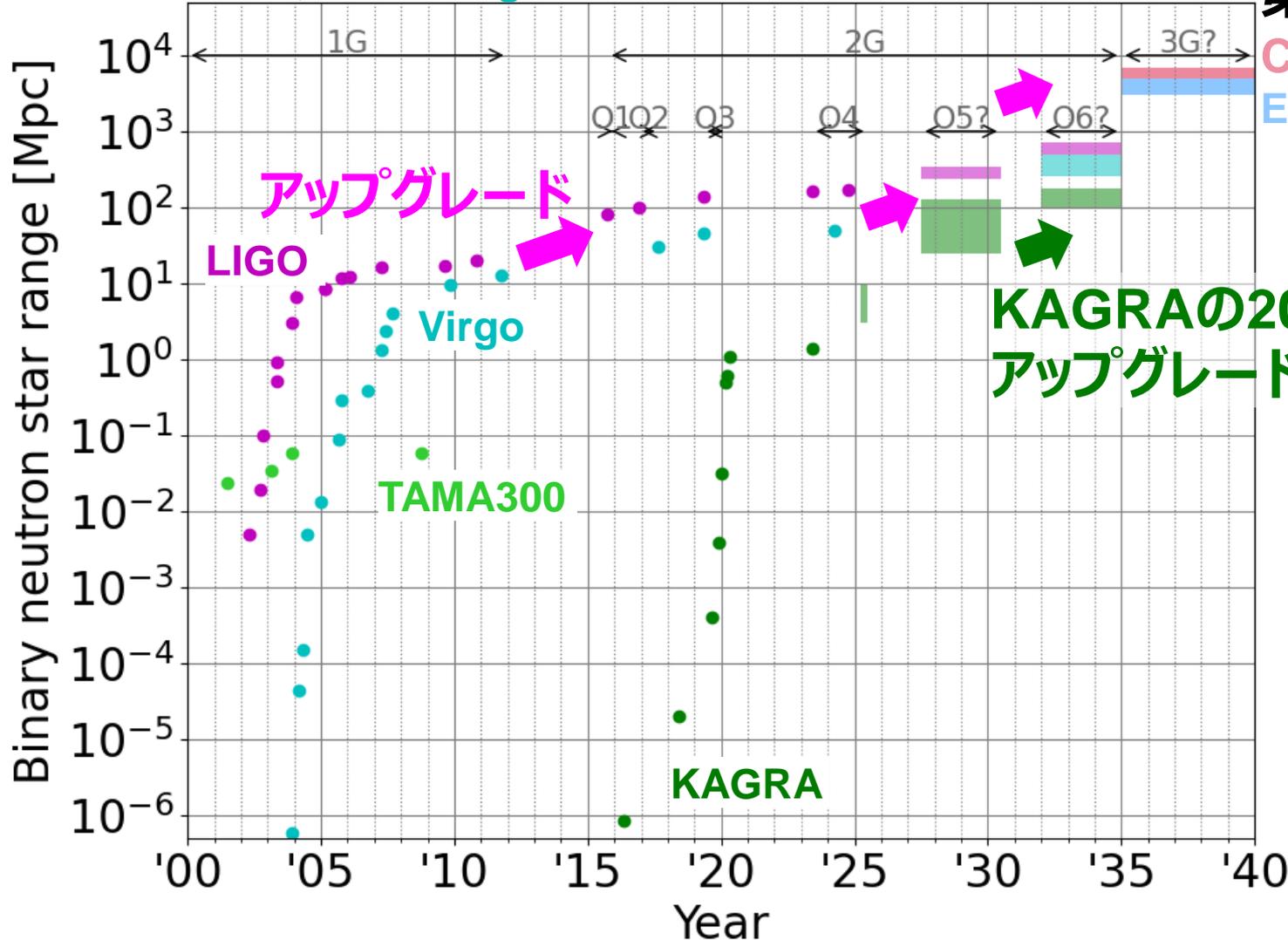
Advanced LIGO  
Advanced Virgo  
KAGRA

## 第1世代

TAMA300  
Initial LIGO, Initial Virgo

## 第3世代

Cosmic Explorer  
Einstein Telescope



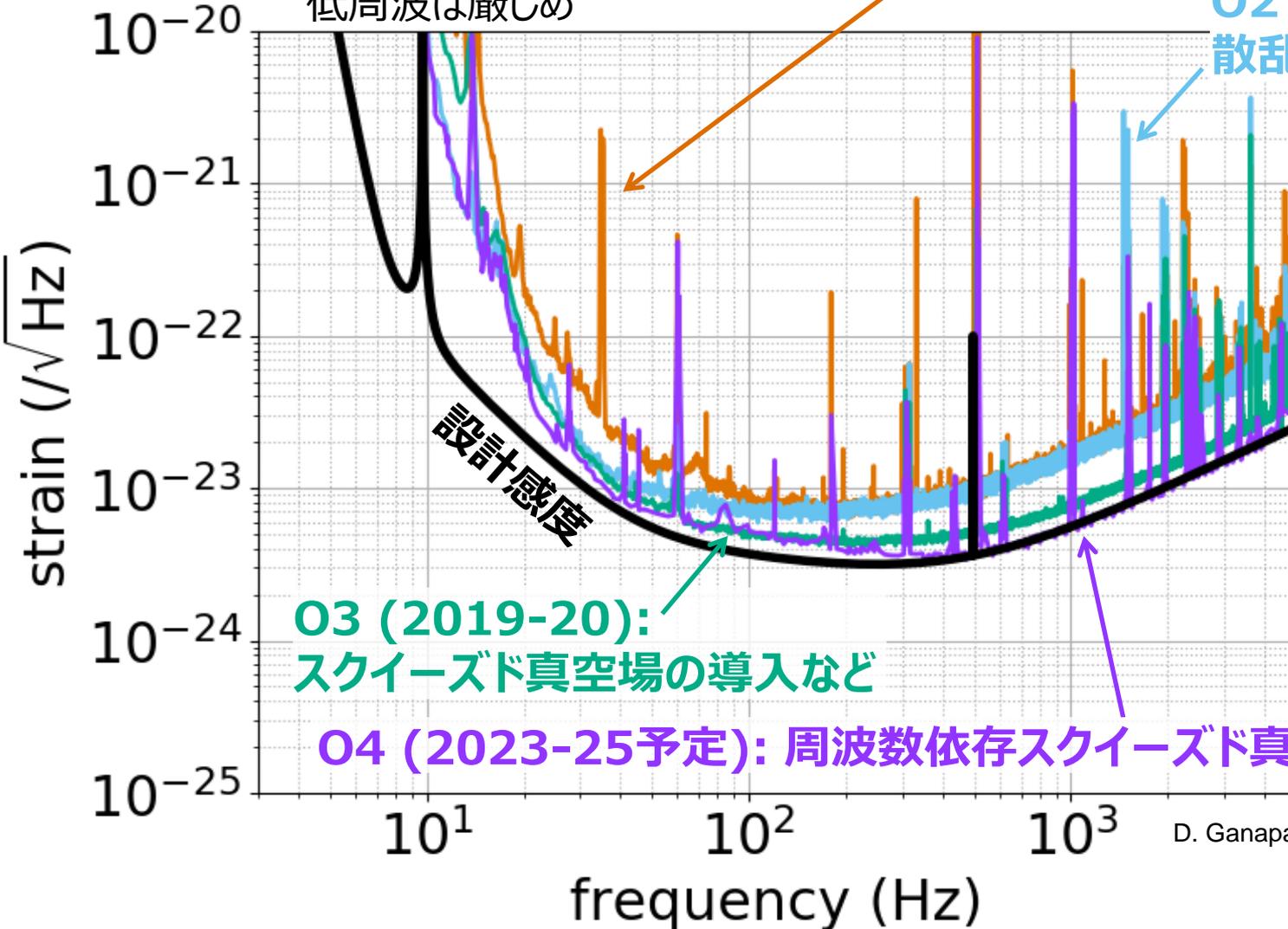
# LIGO(米国, 4 km)の状況

- 感度を順調に上げている

O1 (2015-16): 重力波の初検出

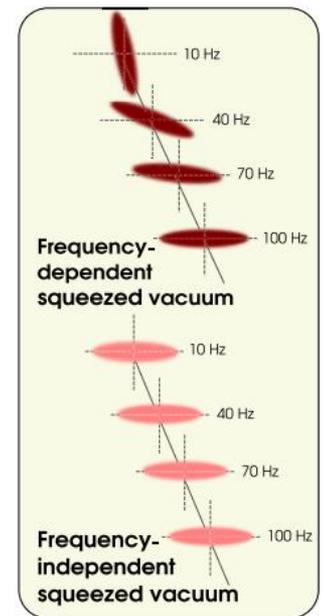
O2 (2016-17): 散乱光雑音の低減など

低周波は厳しめ



O3 (2019-20): スクイズド真空場の導入など

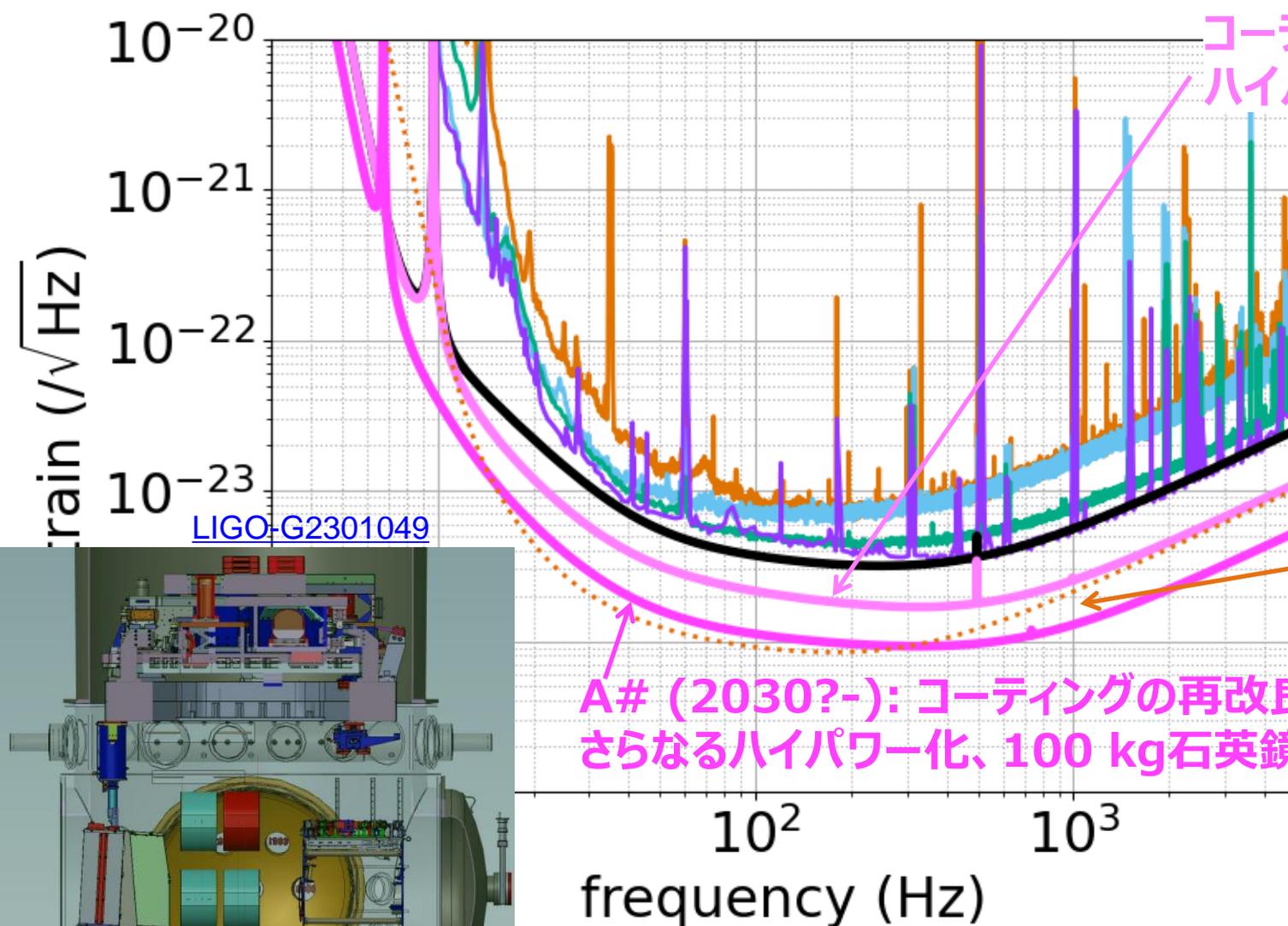
O4 (2023-25予定): 周波数依存スクイズド真空場の導入など



D. Ganapathy+, [PRX 13, 041021 \(2023\)](#)

# LIGO(米国, 4 km)の状況

- アップグレード計画に向けてR&D中



A+ (2028-):  
コーティングの改良、  
ハイパワー化など  
\$34M程度予算化  
(米・英・豪)

Voyager:  
200 kgシリコン鏡  
@120 Kを用いる案

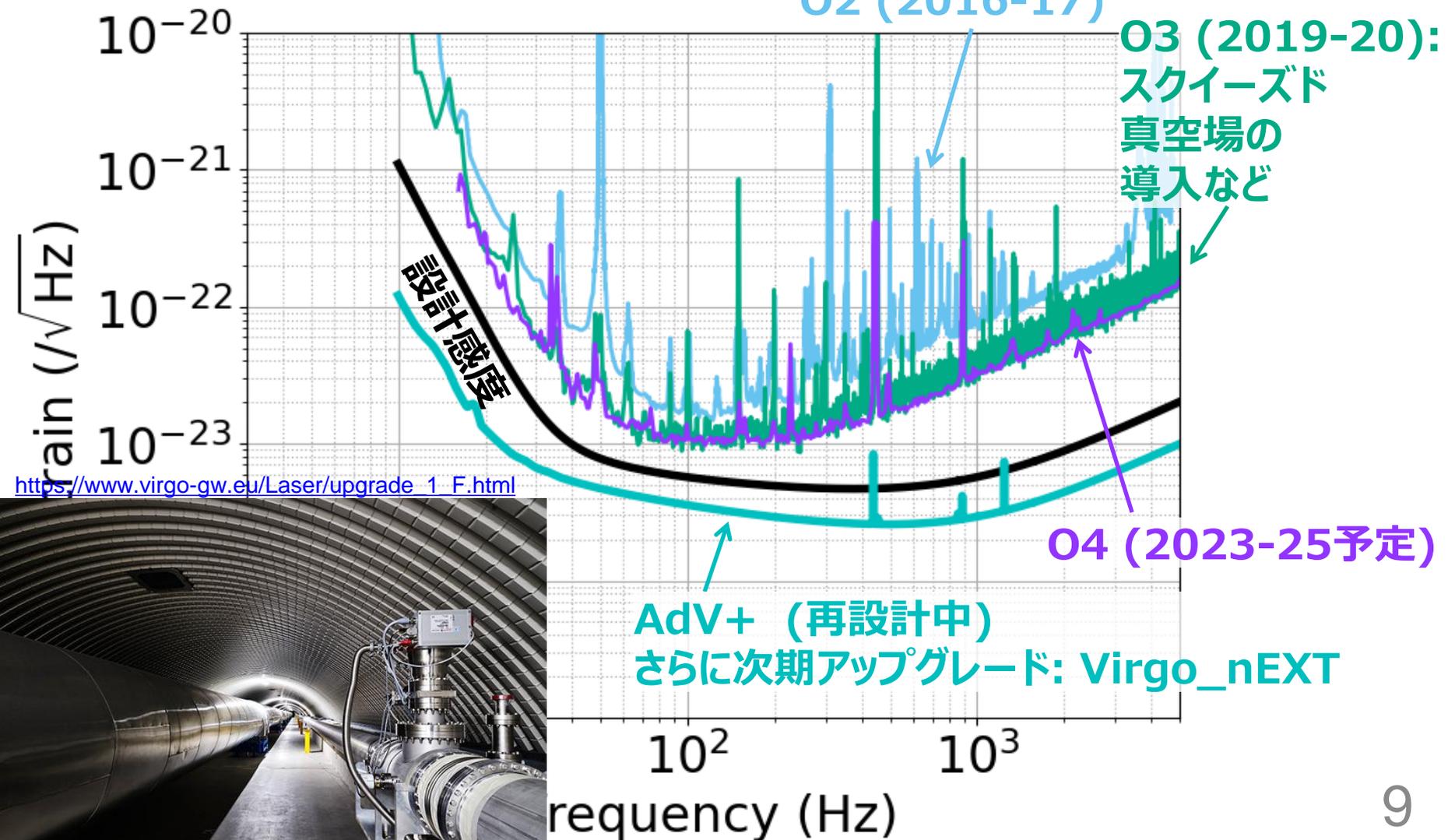
A# (2030?-): コーティングの再改良、  
さらなるハイパワー化、100 kg石英鏡など

# 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

O2 (2016-17)

O3 (2019-20):  
スクイズド  
真空場の  
導入など

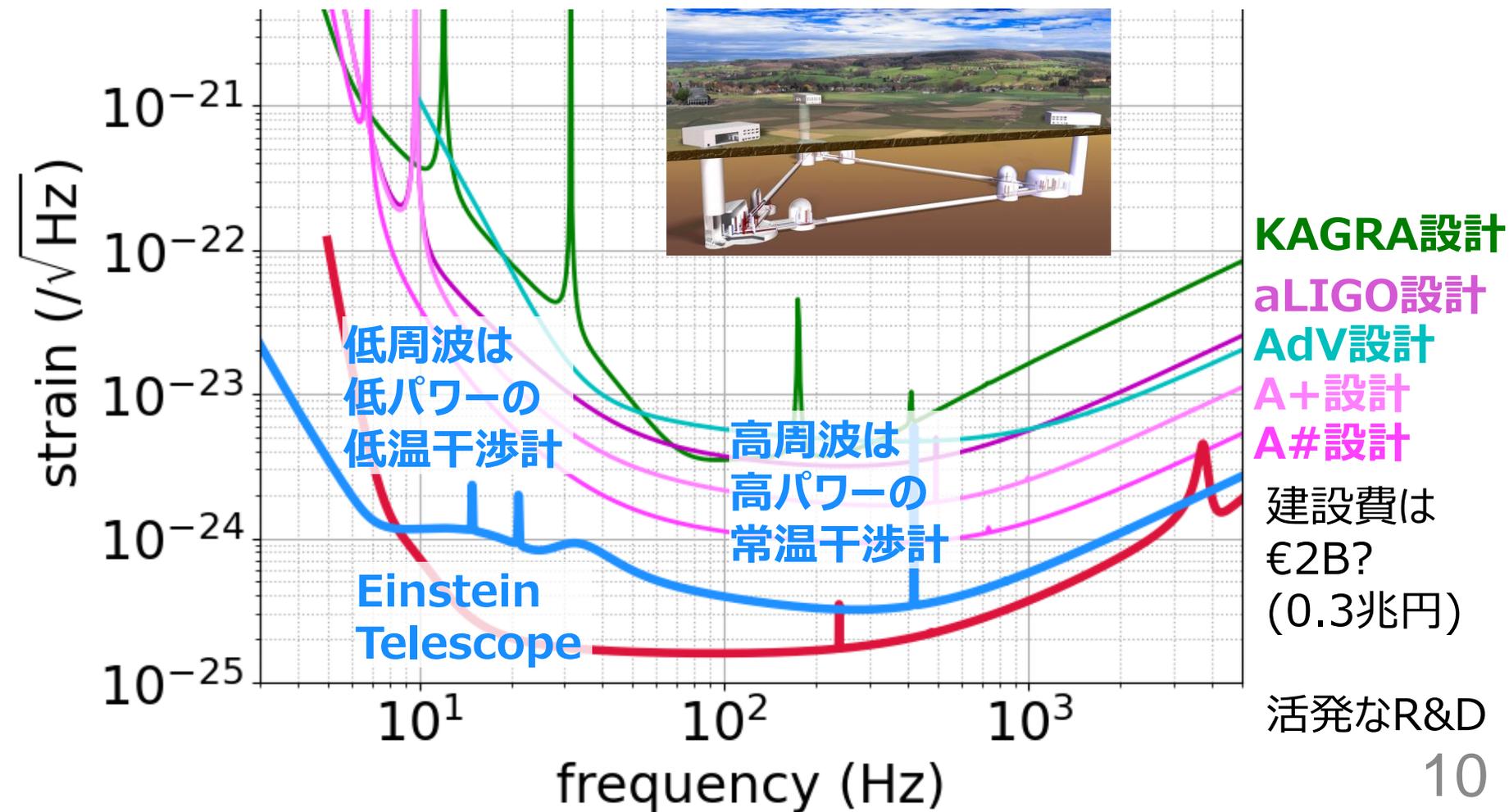


# Einstein Telescope(欧州, 10-15 km)

- 地下建設 (サルデーニャ島 or 白独蘭の国境)

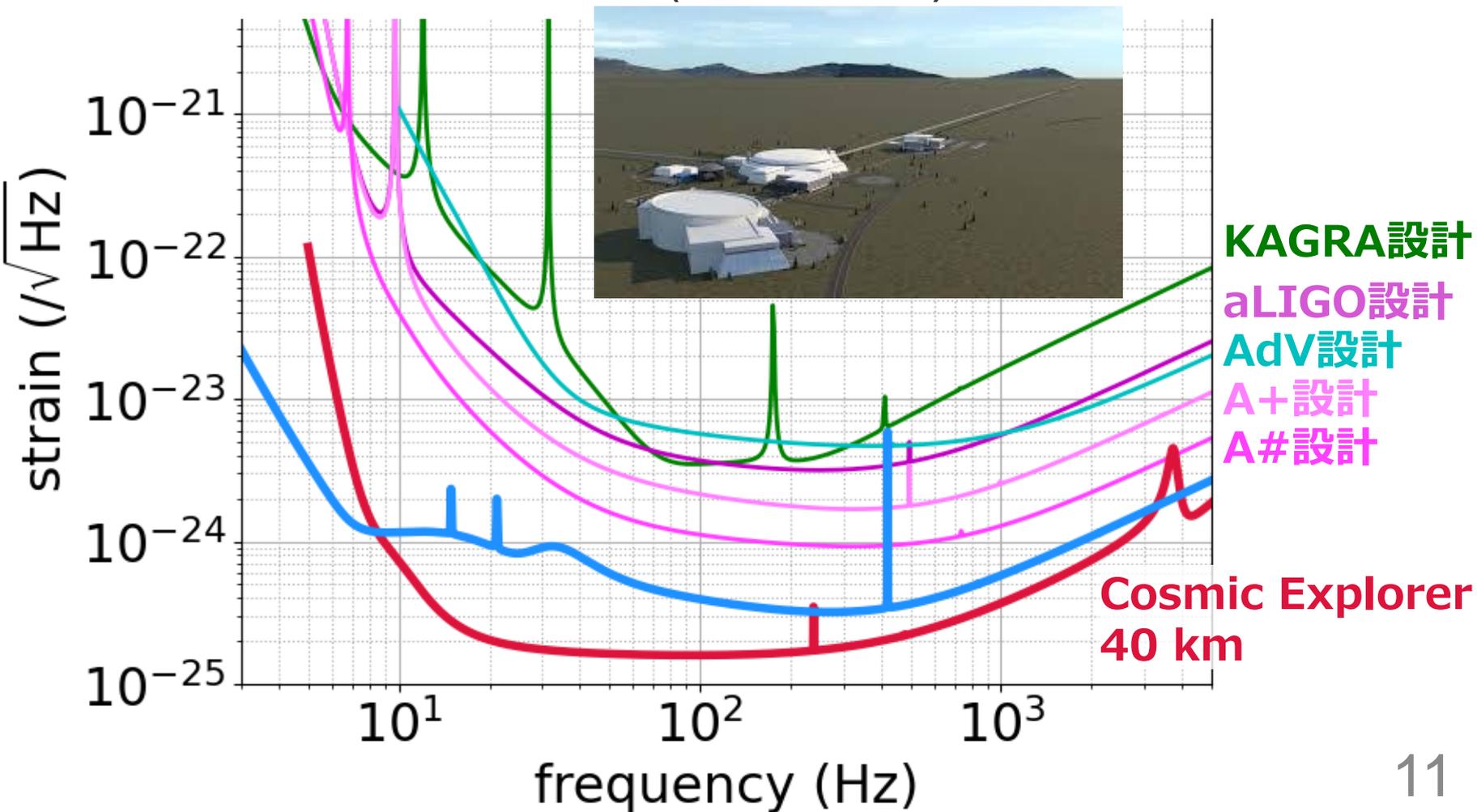
10 kmの△か  
15 kmの2L

- 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



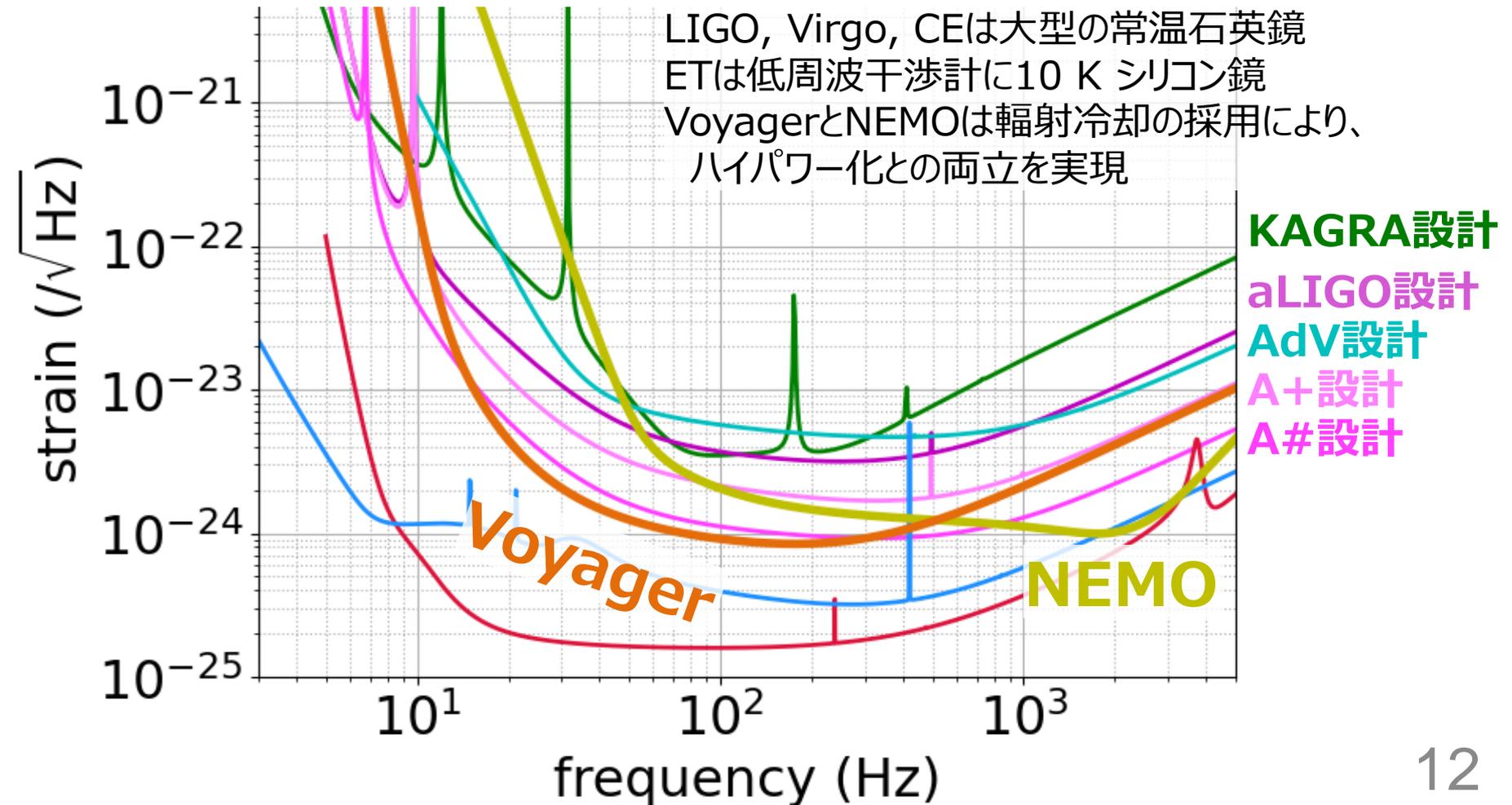
# Cosmic Explorer(米国, 20-40 km)

- 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



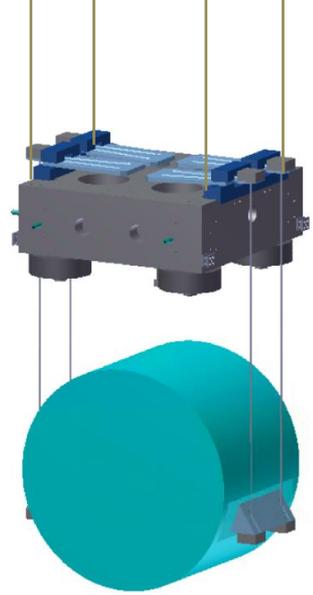
# その他の動き

- 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

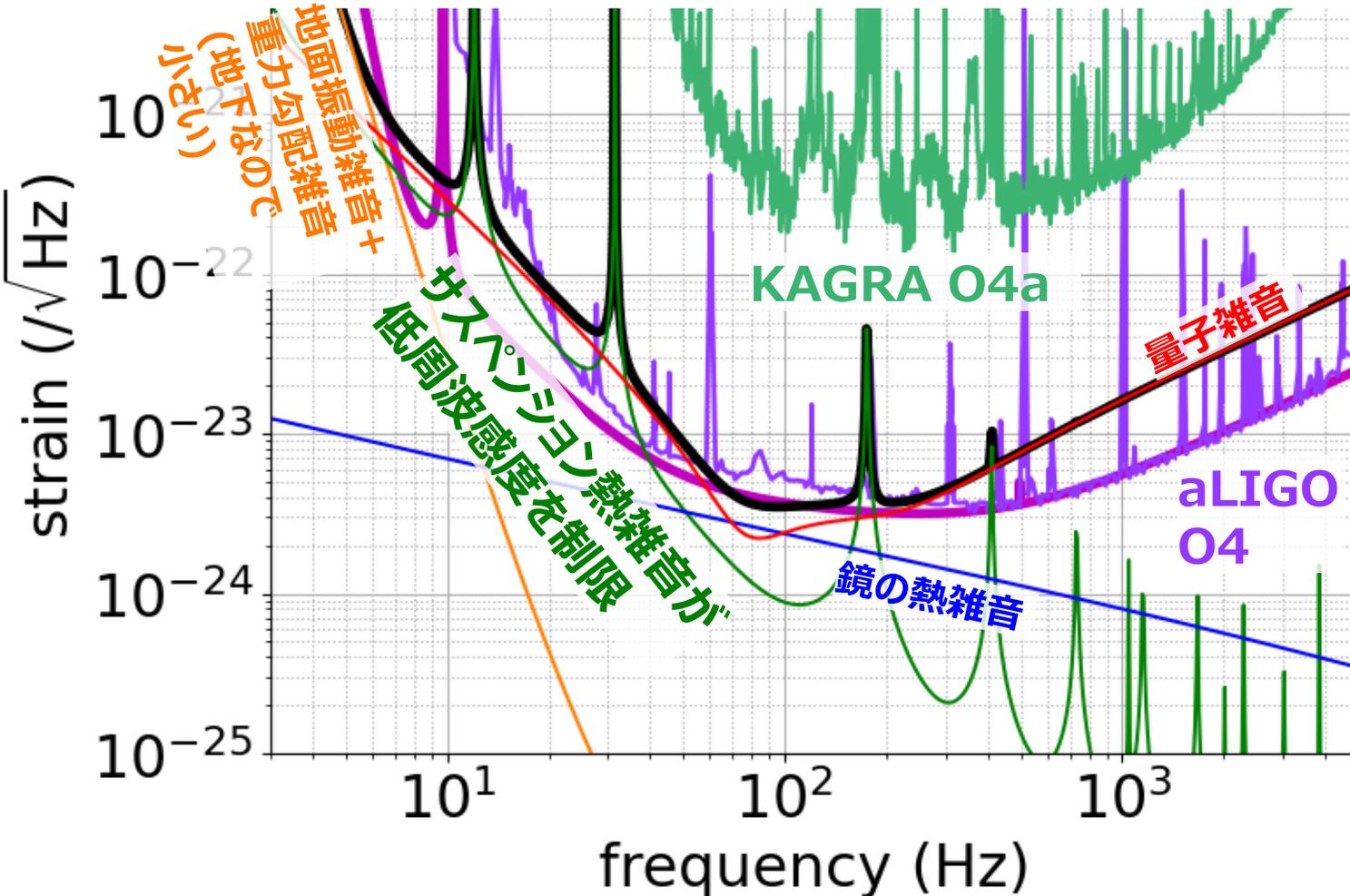


LIGO, Virgo, CEは大型の常温石英鏡

ETは低周波干渉計に10 K シリコン鏡

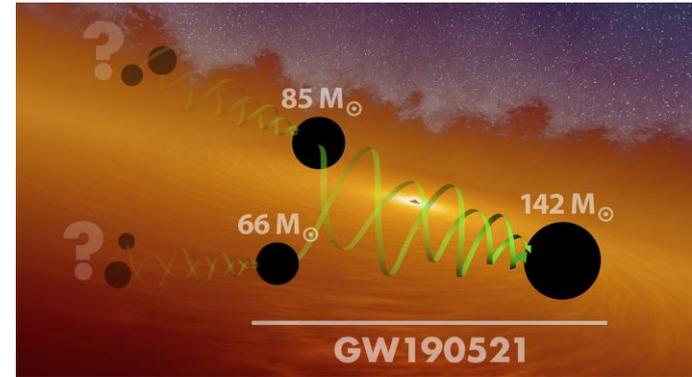
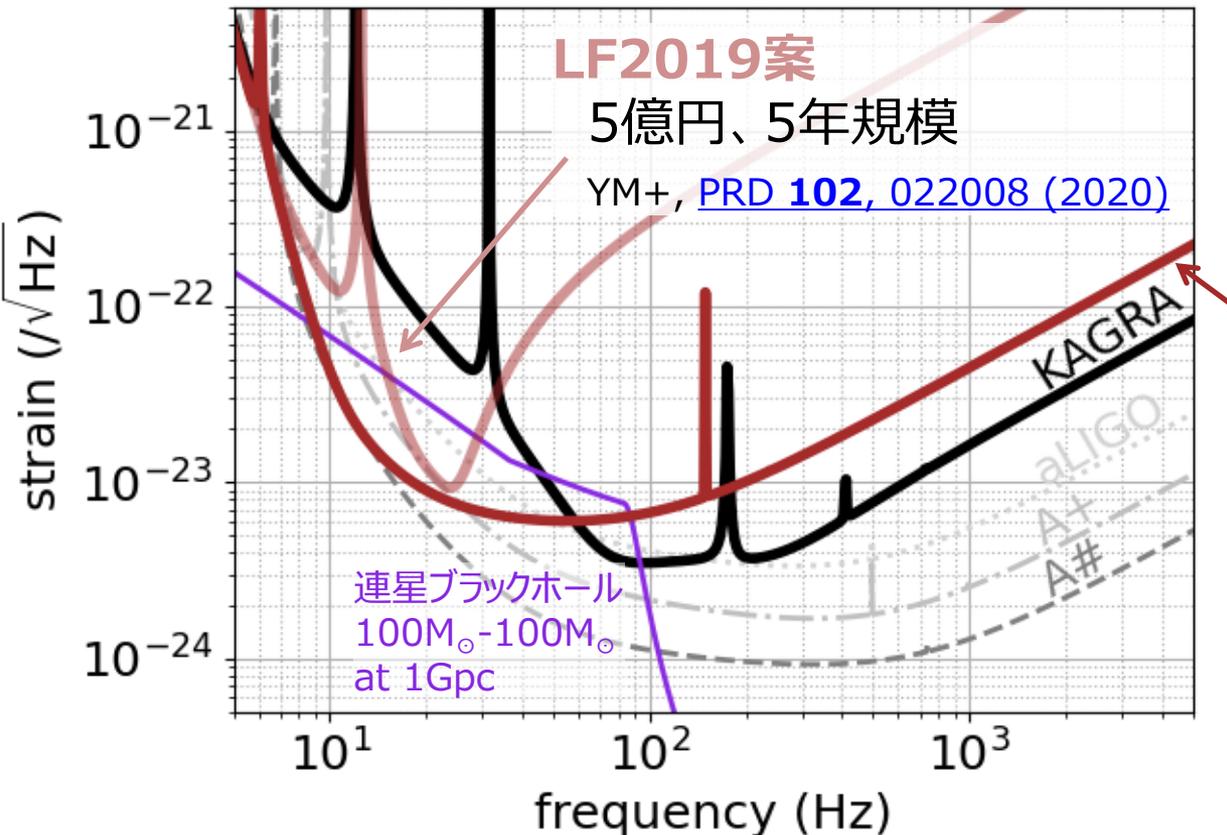
NEMO, Voyagerは熱伝導での冷却で120 K シリコン鏡

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

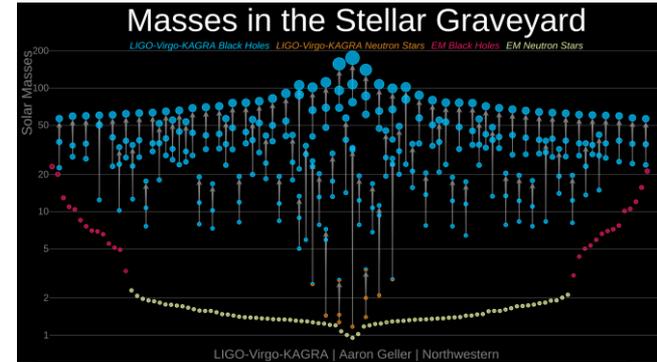
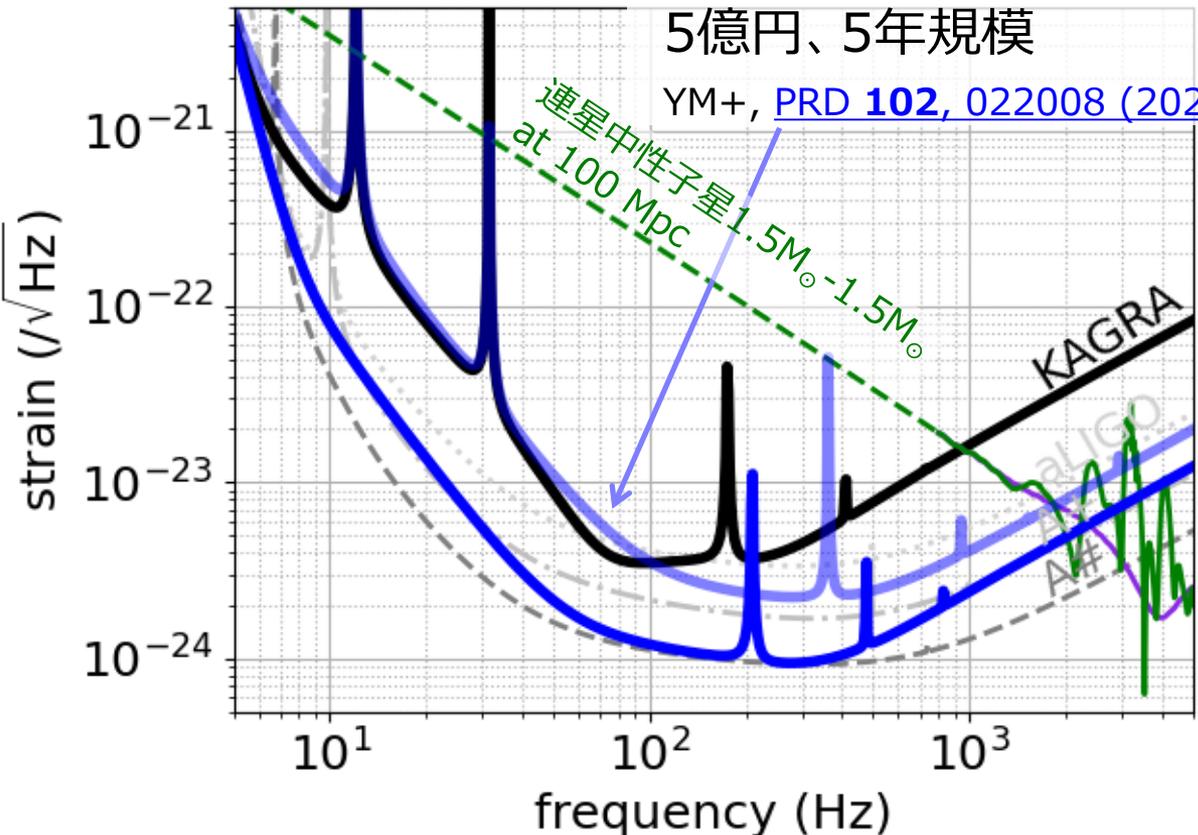
- LF: 懸架線細く、低パワー化して低周波特化
- **BB**: 鏡の改良、周波数依存スクリーニングで広帯域
- HF: 高パワー化して高周波特化

## 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)

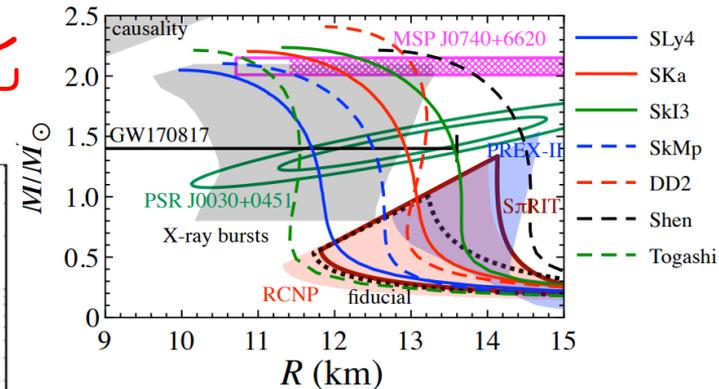
[JGW-T2416182](#)

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ジングで広帯域
- **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 \(2024\)](#)

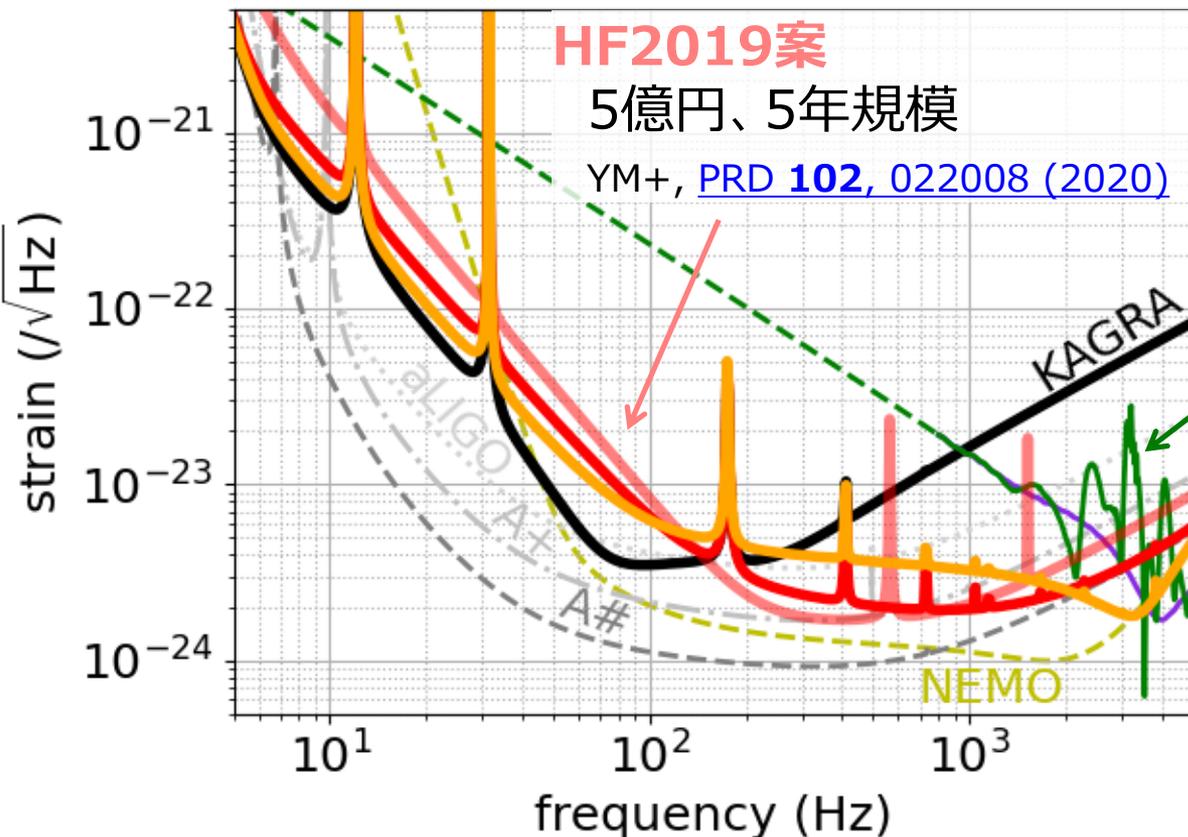
**HF2025案**

**HF3k案**

5億円、5年規模？

[JGW-T2416182](#)

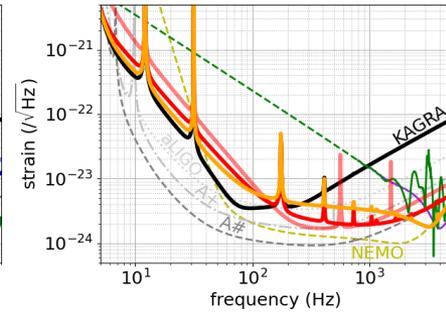
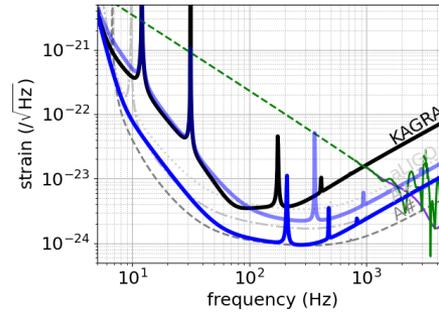
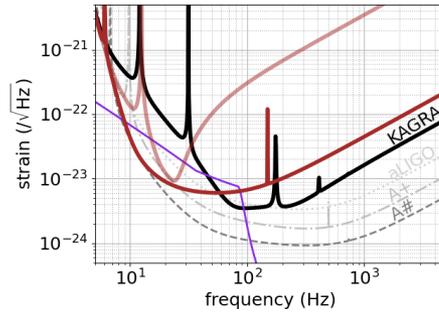
NEMO(豪州)と親和性が高い



# 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

LIGOのO6(2030?~)案  
KAGRAの設計感度の場合



	KAGRA	LIGO A#	LF2019	LF2024	BB2019	BB2024	HF2019	HF2024	HF3k
<b>Ranges (SNR&gt;8)</b>									
100 - 100M <sub>☉</sub>	353 Mpc	4927 Mpc	2019 Mpc	3787 Mpc	306 Mpc	2154 Mpc	112 Mpc	200 Mpc	277 Mpc
30 - 30M <sub>☉</sub>	1095 Mpc	6144 Mpc	1088 Mpc	2382 Mpc	842 Mpc	4229 Mpc	270 Mpc	407 Mpc	552 Mpc
1.4 - 1.4M <sub>☉</sub>	153 Mpc	670 Mpc	85 Mpc	196 Mpc	178 Mpc	537 Mpc	155 Mpc	133 Mpc	104 Mpc
<b>BNS sky localization</b> ※	10.64 deg <sup>2</sup> (HL-only) → 1.40 deg <sup>2</sup> (with K)		10.28 deg <sup>2</sup>	2.65 deg <sup>2</sup>	0.77 deg <sup>2</sup>	0.42 deg <sup>2</sup>	0.57 deg <sup>2</sup>	0.61 deg <sup>2</sup>	0.93 deg <sup>2</sup>
<b>BNS post-merger signal detection rate</b> (LF & BB plans are less than 10 <sup>-3</sup> events/year) Based on merger rate estimate from O3; SNR>5. [H. Tagoshi & S. Morisaki, JGW-P2416311]							10 <sup>-5</sup> -10 <sup>-3</sup> /year	10 <sup>-3</sup> -0.06 /year	10 <sup>-3</sup> -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 \(2020\)](#)

- サファイア鏡の複屈折の対策

K. Somiya, E. Hirose, YM, [PRD 100, 082005 \(2019\)](#)

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+, [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

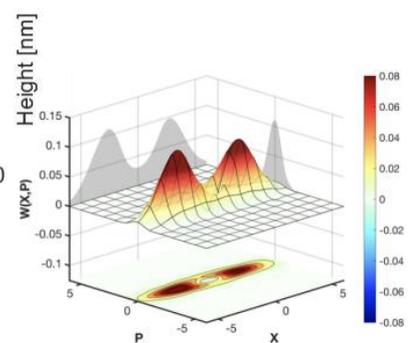
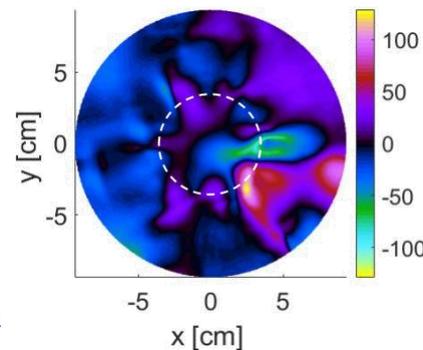
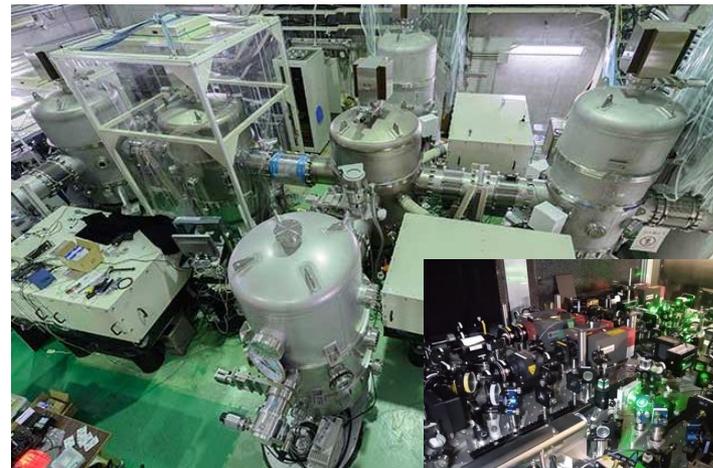
例1: “Long SRC”効果の確認実験@宇宙研

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も絵空事を言っているわけではない
- 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

From Quarks to Neutron Stars:

Insights from kHz gravitational waves

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

