

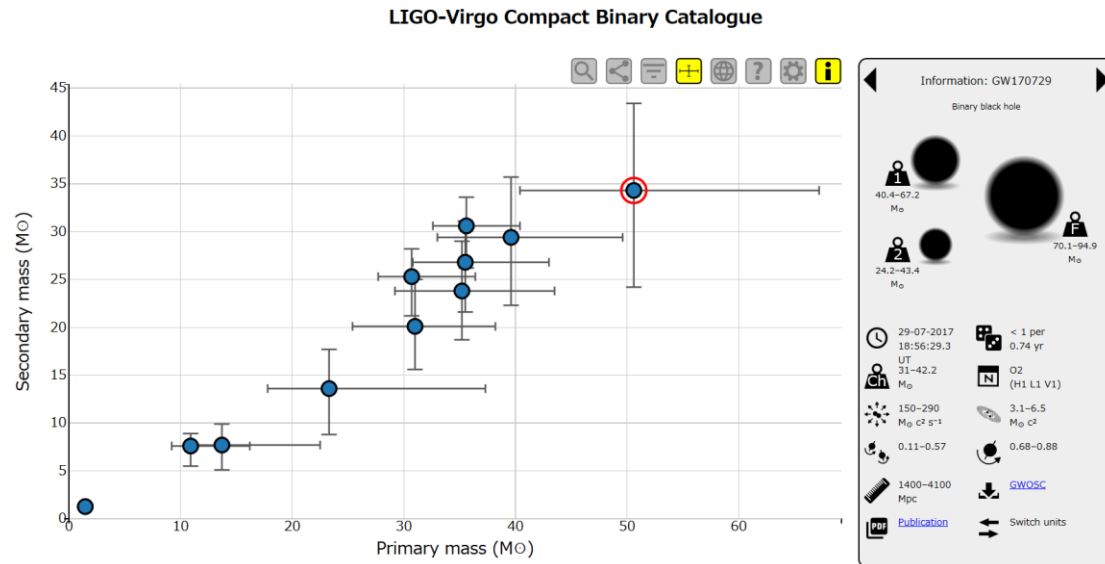
重力波観測の現状と 今後の展望

道村唯太

東京大学 大学院理学系研究科 物理学専攻

重力波物理学・天文学の幕開け

- これまでに連星ブラックホール10例、連星中性子星1例(ガンマ線バーストも)
- 合計質量20-80Msun程度の**重たい**恒星質量BH
- 一般相対性理論の**検証**
- 重力波の**伝播速度**
- **ハッブル定数**測定
- **キロノヴァ**の観測
- 連星中性子星の**状態方程式**に制限



今後も豊富なサイエンス

- 重たい恒星質量ブラックホールの起源
 - 中間質量ブラックホールの存在
 - 連星中性子星、中性子星ブラックホール連星
状態方程式、ガンマ線バースト、重元素合成
 - 超新星爆発、パルサー、中間質量比連星(IMRI)
 - ハッブル定数の精密測定
 - 初期宇宙からの背景重力波
 - 一般相対性理論の検証
ブラックホールの準固有振動、メモリー効果、
重力波の偏極モード などなど.....
- 複数台での高角度分解能で高精度な観測や
多波長観測が重要

重力波観測のこれから

- 今ある地上重力波望遠鏡の高感度化(~2024年)
Advanced LIGO, Advanced Virgo, KAGRA
LVは2019年4月1日に観測再開、約1年(O3)
KAGRAも2019年末にはO3に参加予定
それぞれにアップグレード計画
連星中性子星の観測可能距離で~300 Mpc
- 10 km級の地上重力波望遠鏡 (~2035年?)
Einstein Telescope, Cosmic Explorer
観測可能距離 $z=10$ に到達し、ほぼ全宇宙の
コンパクト連星合体が見えるように
- 宇宙重力波望遠鏡
LISAは2034年打ち上げ予定
DECIGO, Taiji / TianQinも計画進行中

地上重力波観測ネットワーク

- 3-4 kmのレーザー干渉計型重力波望遠鏡

GEO-HF



Advanced LIGO



Advanced LIGO



Advanced Virgo



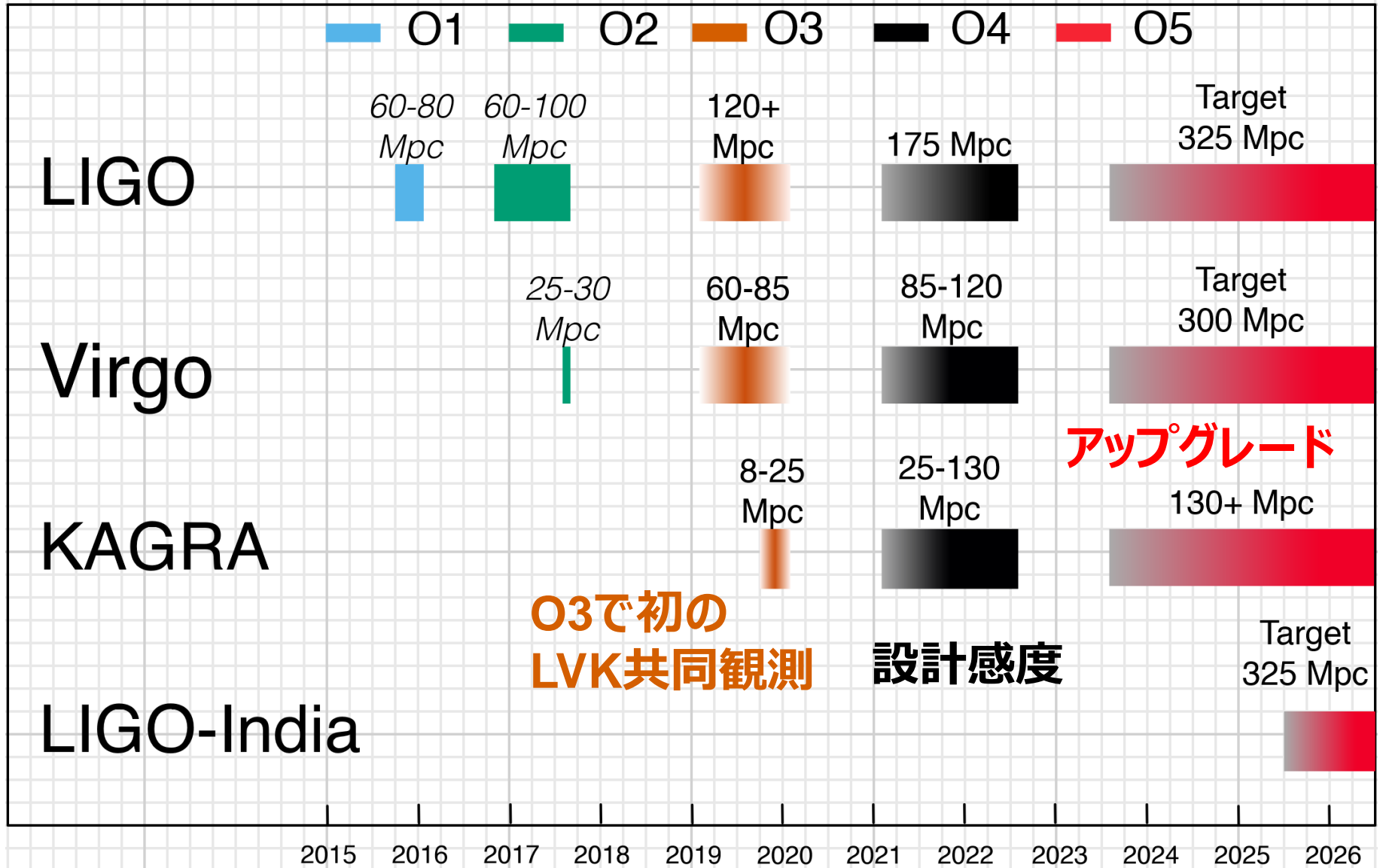
KAGRA



LIGO-India



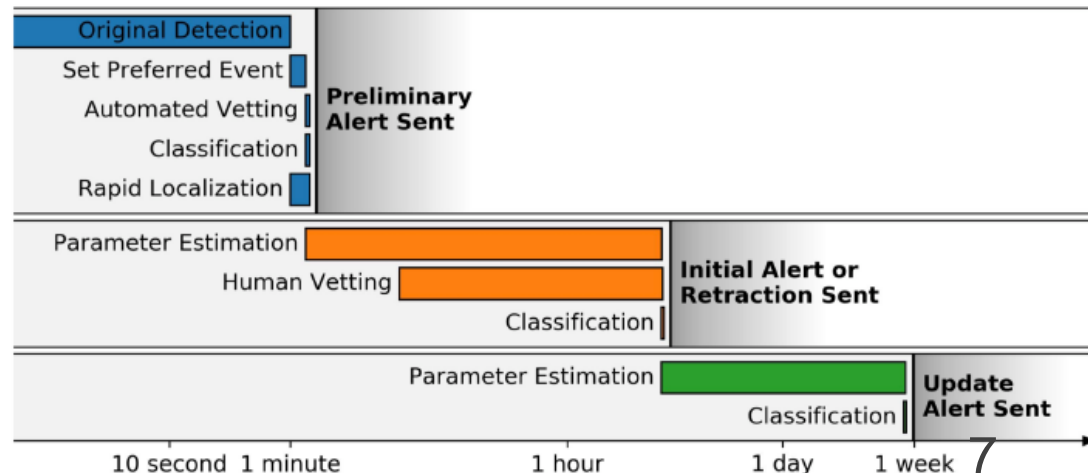
共同観測計画



Advanced LIGO

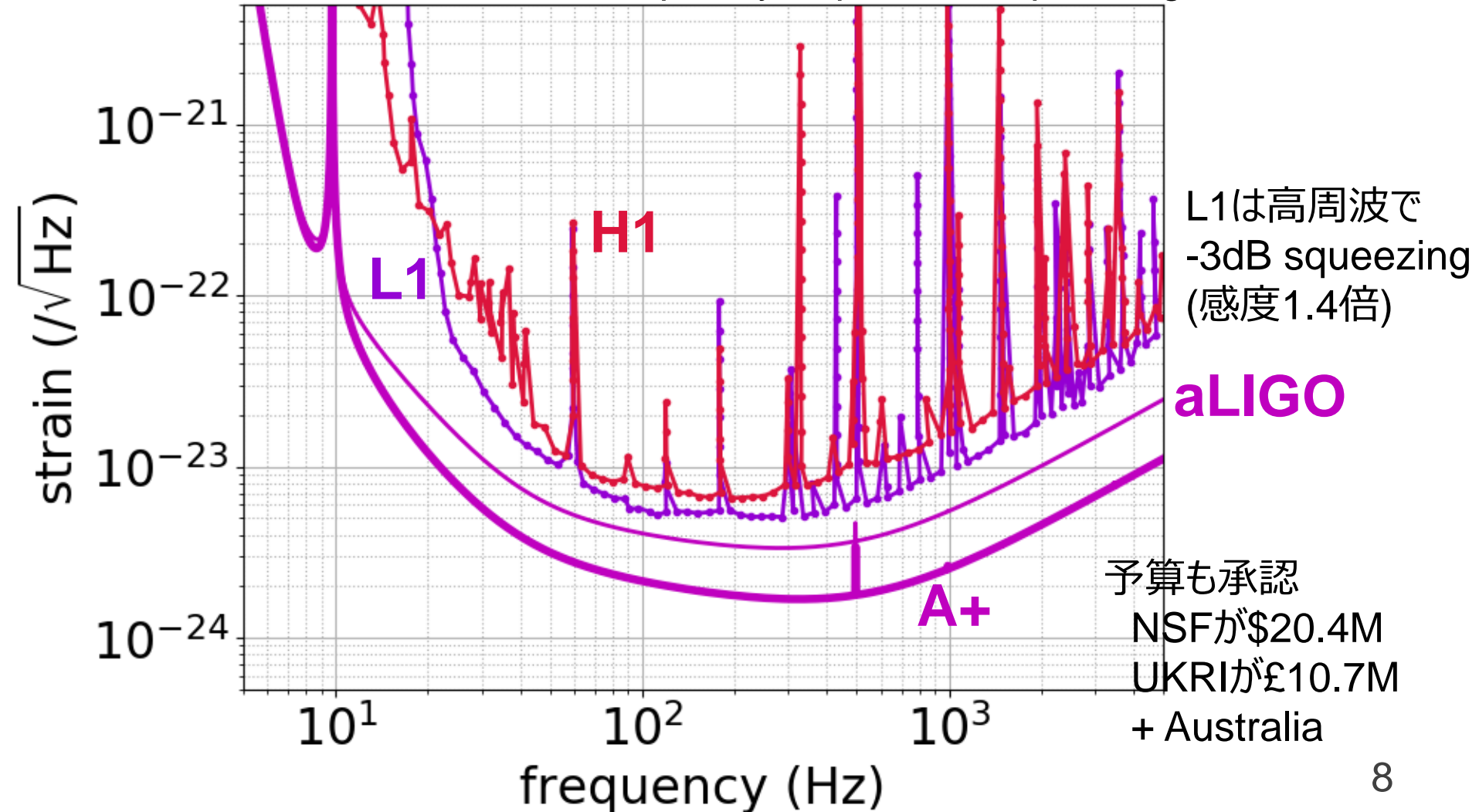
- 基線長4 km、40 kg石英鏡
- 現在はLivingstonが**135 Mpc**、Hanfordが**90 Mpc**
- 3月4日からHLVで試験運転(ER14)開始予定
- 4月1日からHLVで約1年のO3開始予定
- Open Public Alerts
 - **BNSは 2/year, upto 1/month**, 12-21%が $<20\text{deg}^2$ 以下
 - **BBHが 1/month – 1/week**

Preliminary alert
は審査なし
10%くらいが
コンタミ



Advanced LIGO

- アップグレード計画A+で**325 Mpc**
コーティングの改良、frequency dependent squeezingで感度約2倍



Advanced Virgo

- 基線長3 km、42 kg石英鏡
- 現在は**54 Mpc** (O3では60 Mpcを目指す)
- 最近squeezingが導入され、高周波で感度向上
- aLIGOと同期してER14、O3開始予定
- O3後の2020年からアップグレード予定

Phase-1: upto 160 Mpc

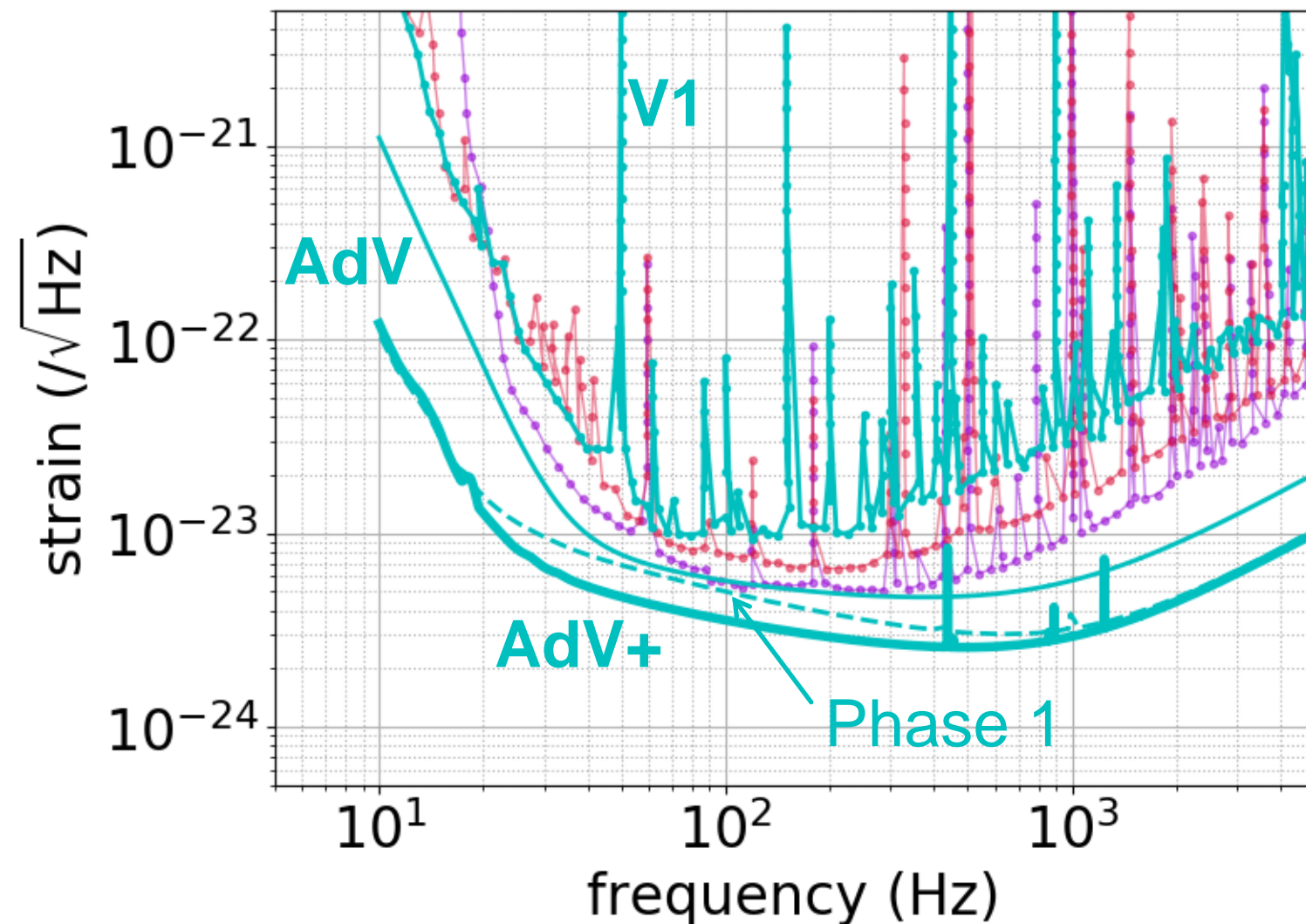
power increase, signal recycling,
frequency dependent squeezing,
Newtonian noise cancellation

Phase-2: upto 300 Mpc

Larger mirror, better coating

Advanced Virgo

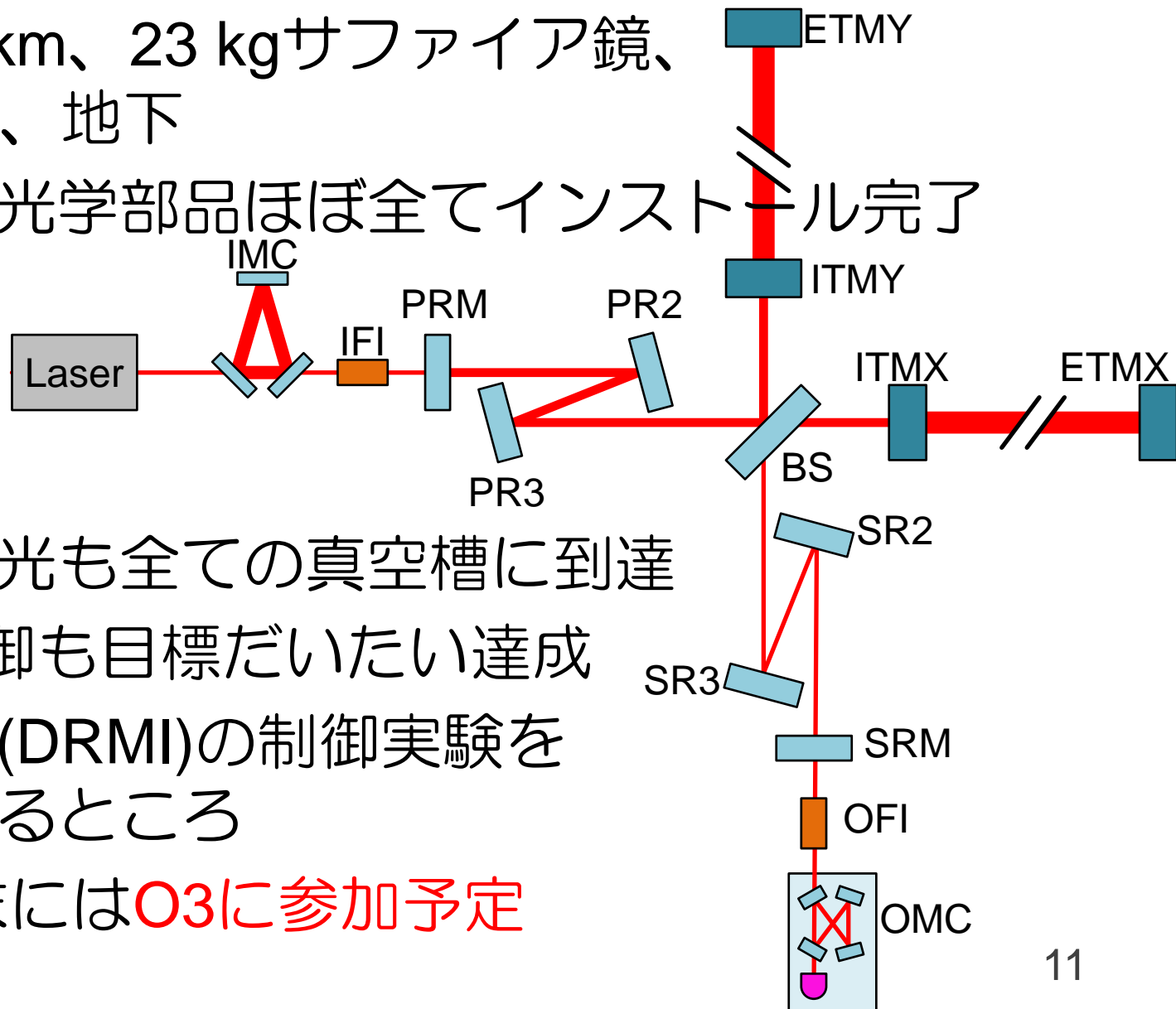
- アップグレード計画AdV+で**300 Mpc**



高周波でV1の感度が悪いのは signal recyclingが入っていないため

KAGRA

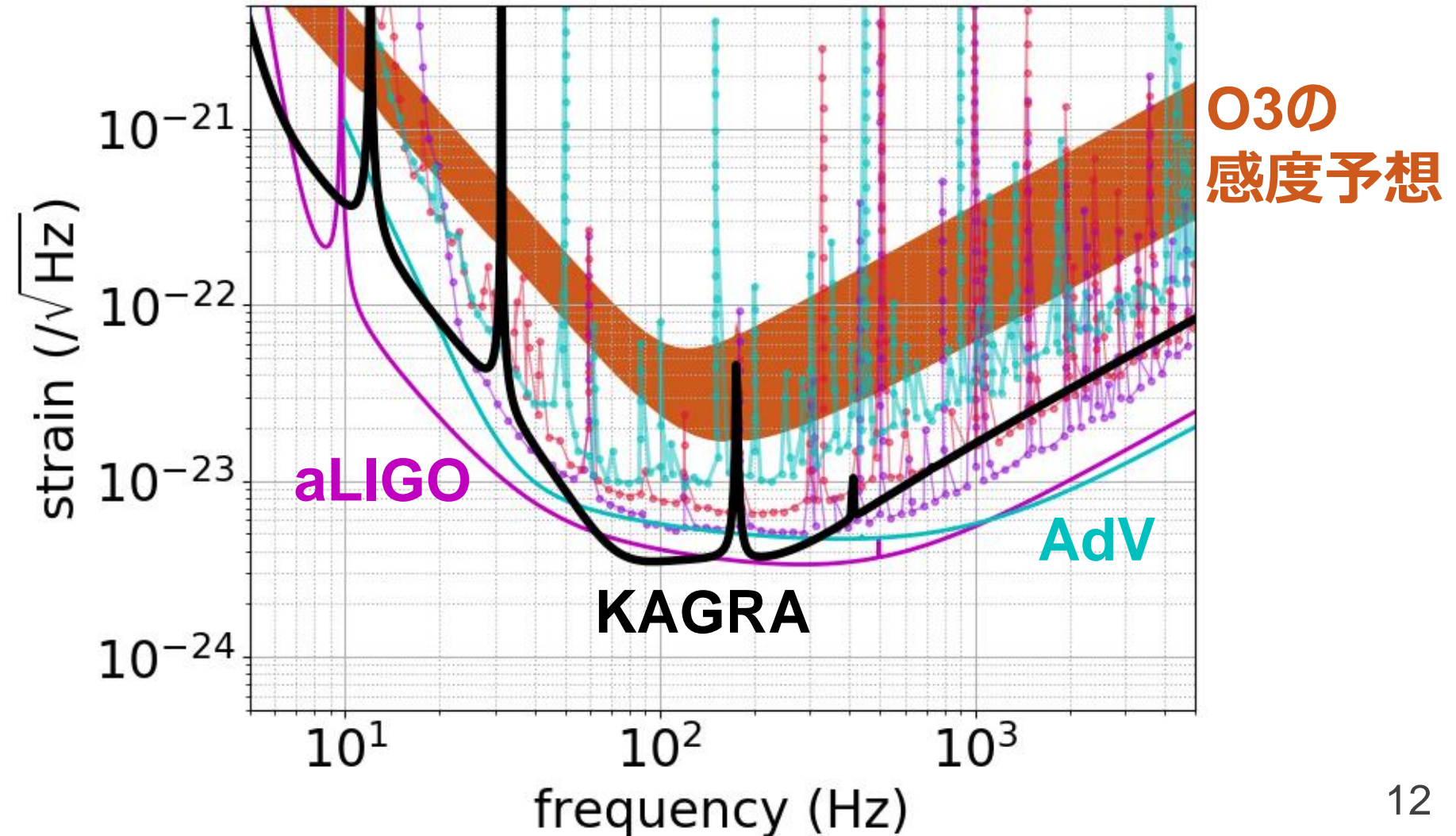
- 基線長3 km、23 kgサファイア鏡、低温20 K、地下
- メインの光学部品ほぼ全てインストール完了



- レーザー光も全ての真空槽に到達
- X腕の制御も目標だいたい達成
- 中心部分(DRMI)の制御実験を行っているところ
- 2019年末にはO3に参加予定

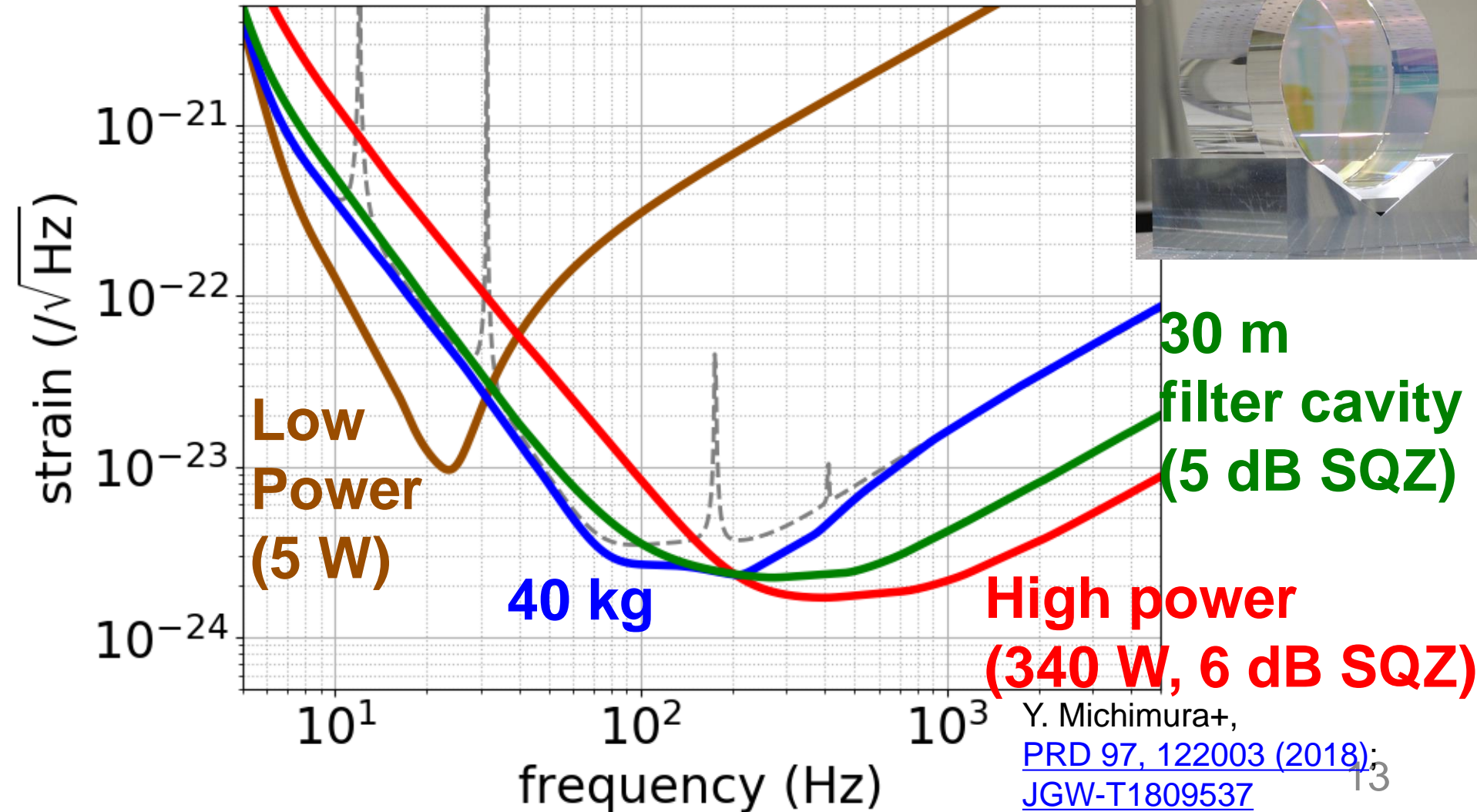
KAGRA

- O3へは8-25 Mpc程度で参加見込み



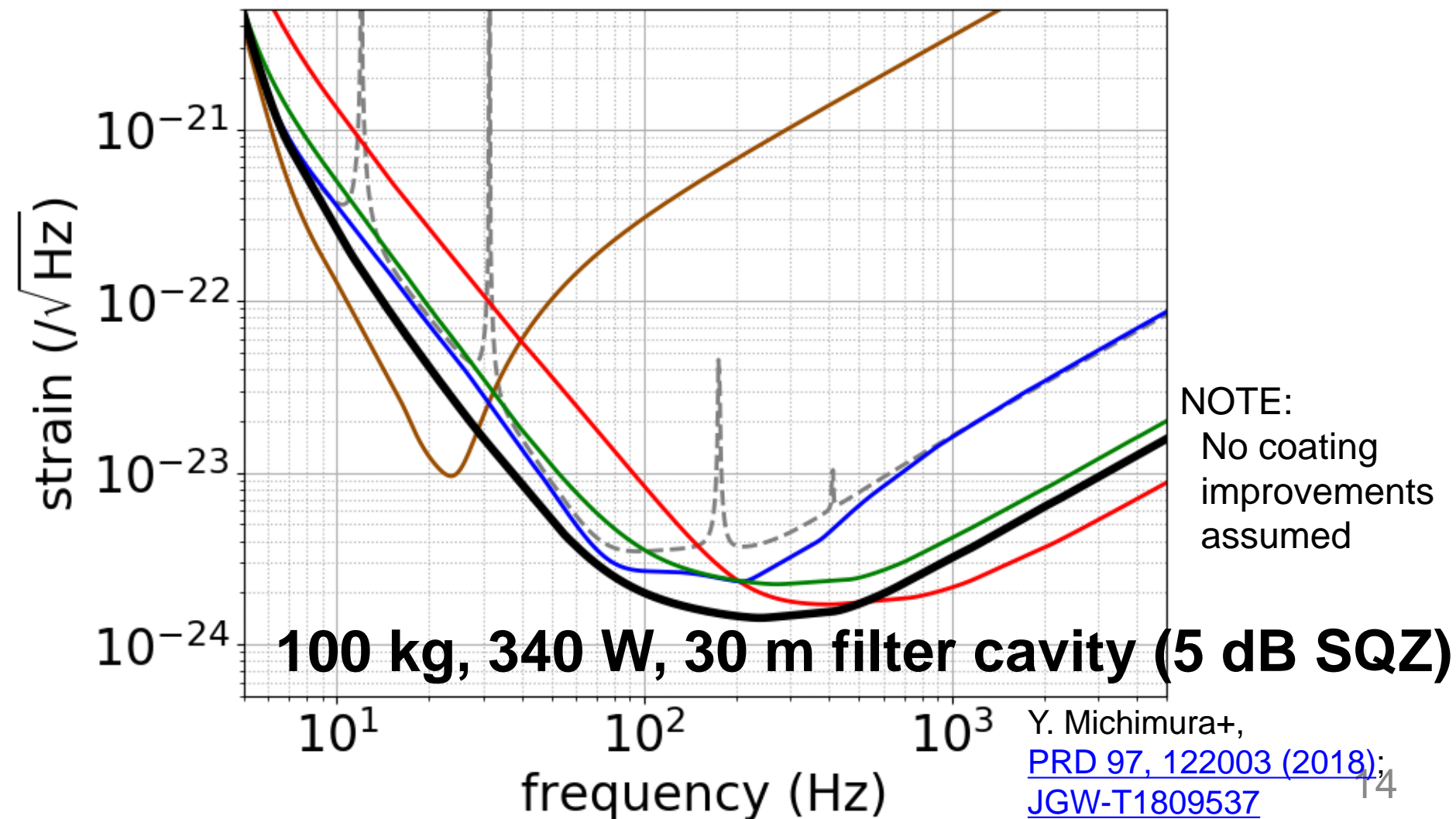
KAGRAのアップグレード計画？

- 限られた予算とスケジュール、4台目の検出器としての動作を考慮に入れながら議論中



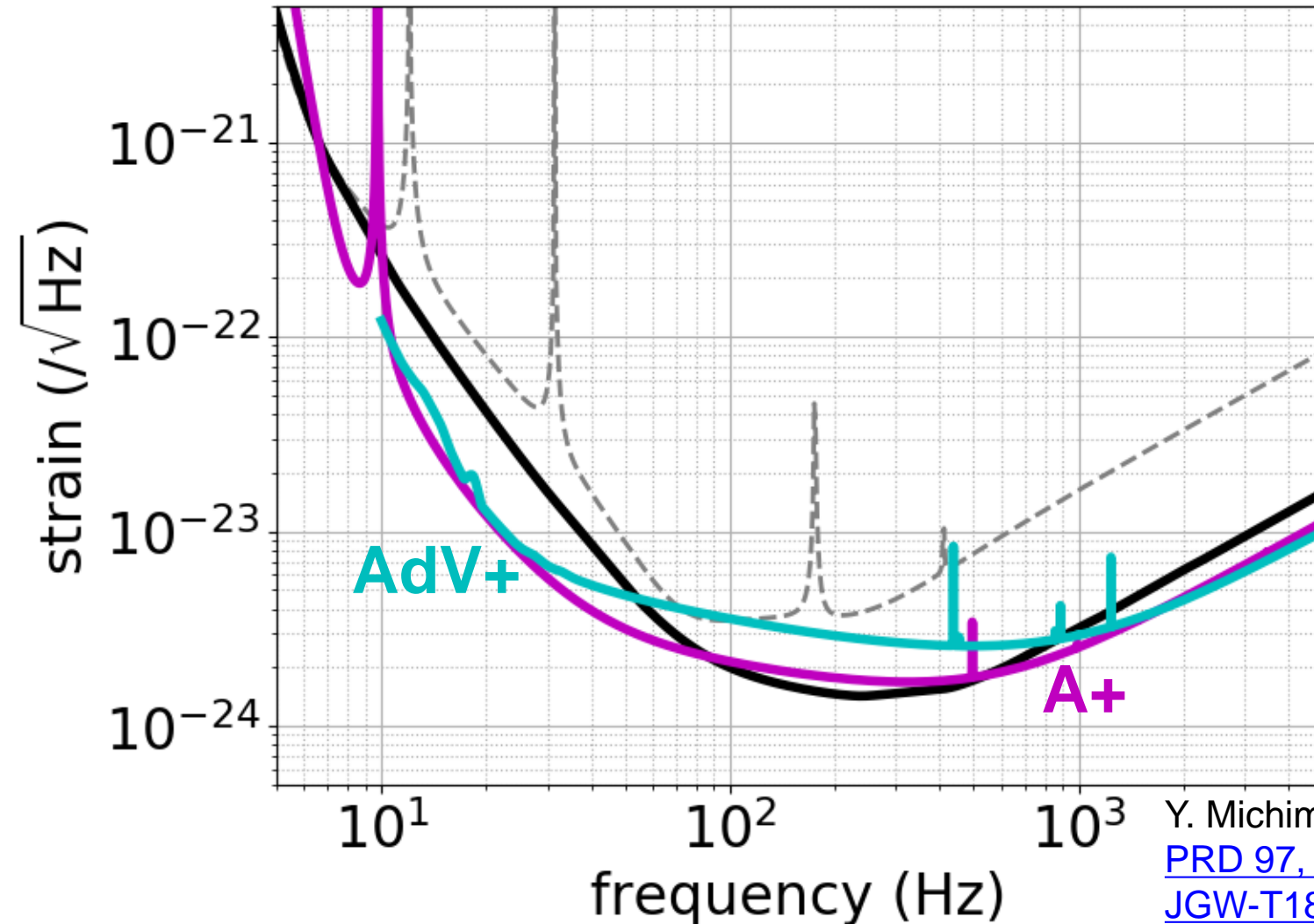
より長期的なアップグレード計画

- 可能な技術を合わせれば**300 Mpc**に到達



より長期的なアップグレード計画

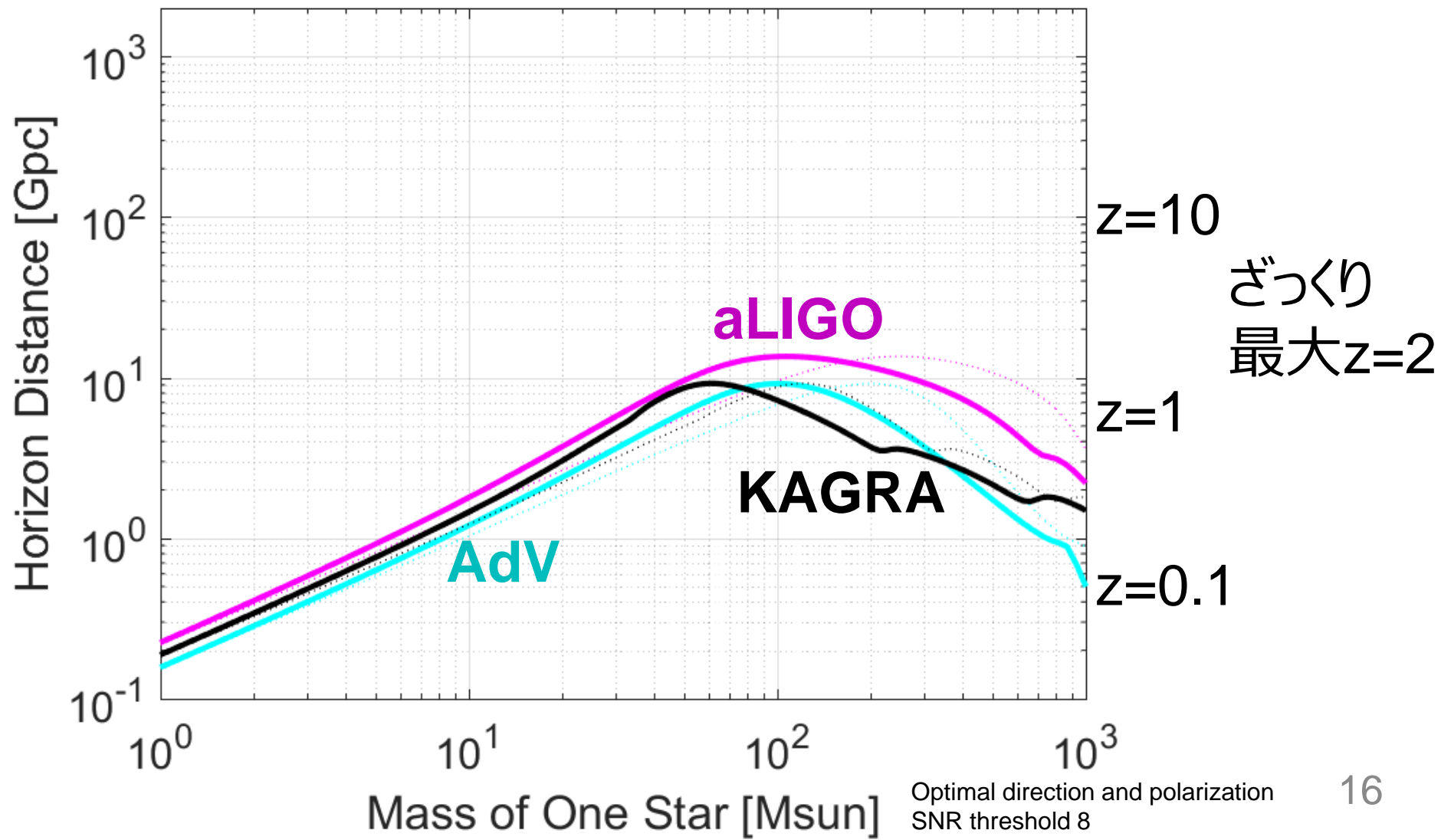
- A+やAdV+と同等の感度



Y. Michimura+,
[PRD 97, 122003 \(2018\)](#);
[JGW-T1809537](#)

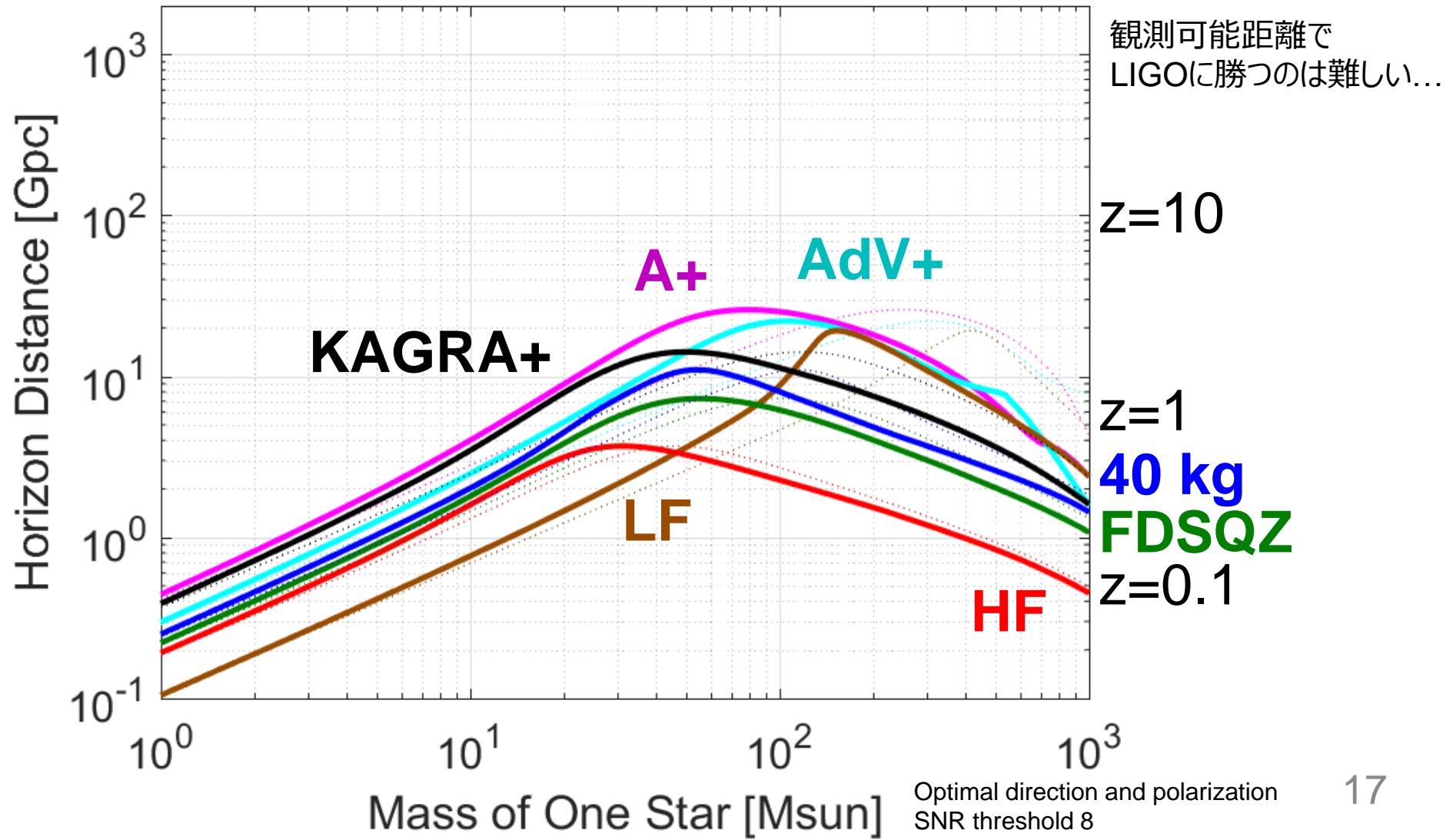
観測可能距離

- 設計感度実現(~2021)で $O(10^2)$ イベント/年



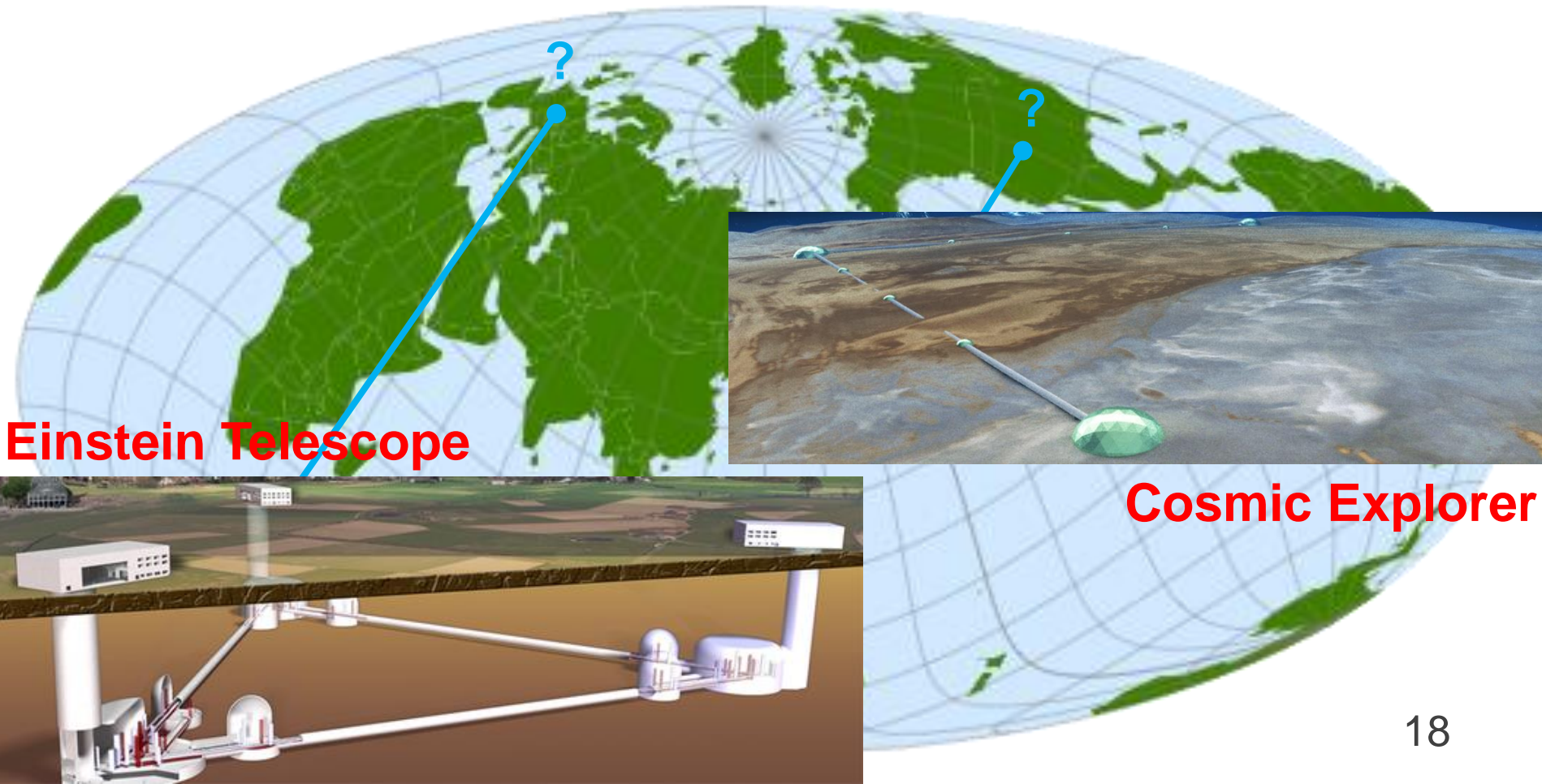
観測可能距離

- アップグレード(~2024)で $O(10^3)$ イベント/年



次世代重力波望遠鏡計画

- 10-40 kmのレーザー干渉計型重力波望遠鏡
- 場所と台数は未定



次世代重力波望遠鏡計画

- Einstein Telescope

10 km、200 kgシリコン鏡、地下

低温10 K低周波干渉計と常温高周波干渉計
2箇所に候補が絞られた(2022年に決定予定)

イタリアSardinia島

ベルギー-ドイツ-オランダの国境

2023年に最終デザイン決定

2032年からインストール予定

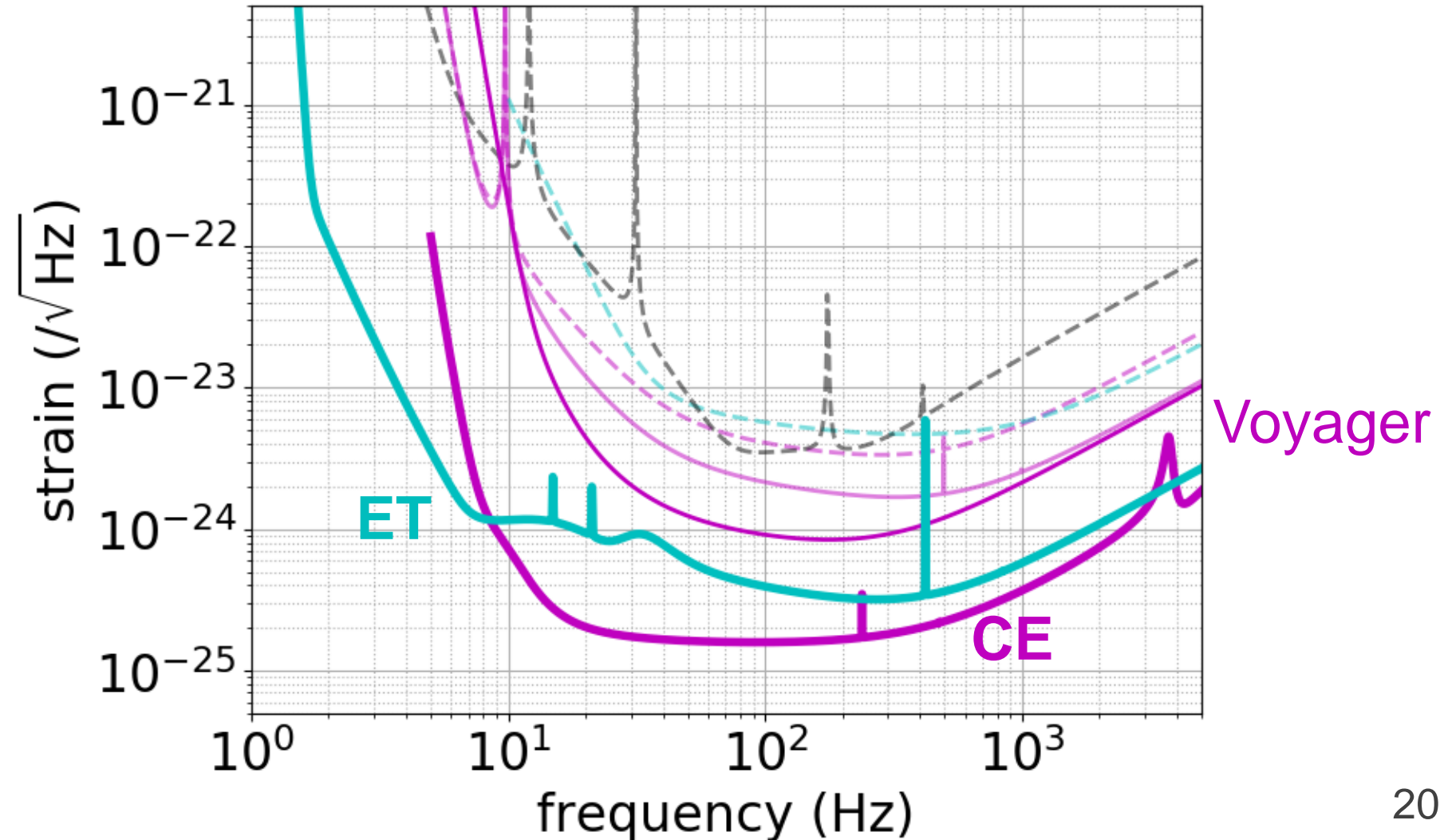
- Cosmic Explorer

40 km、320 kgシリコン鏡、120 K

4 km LIGO Voyagerを経る

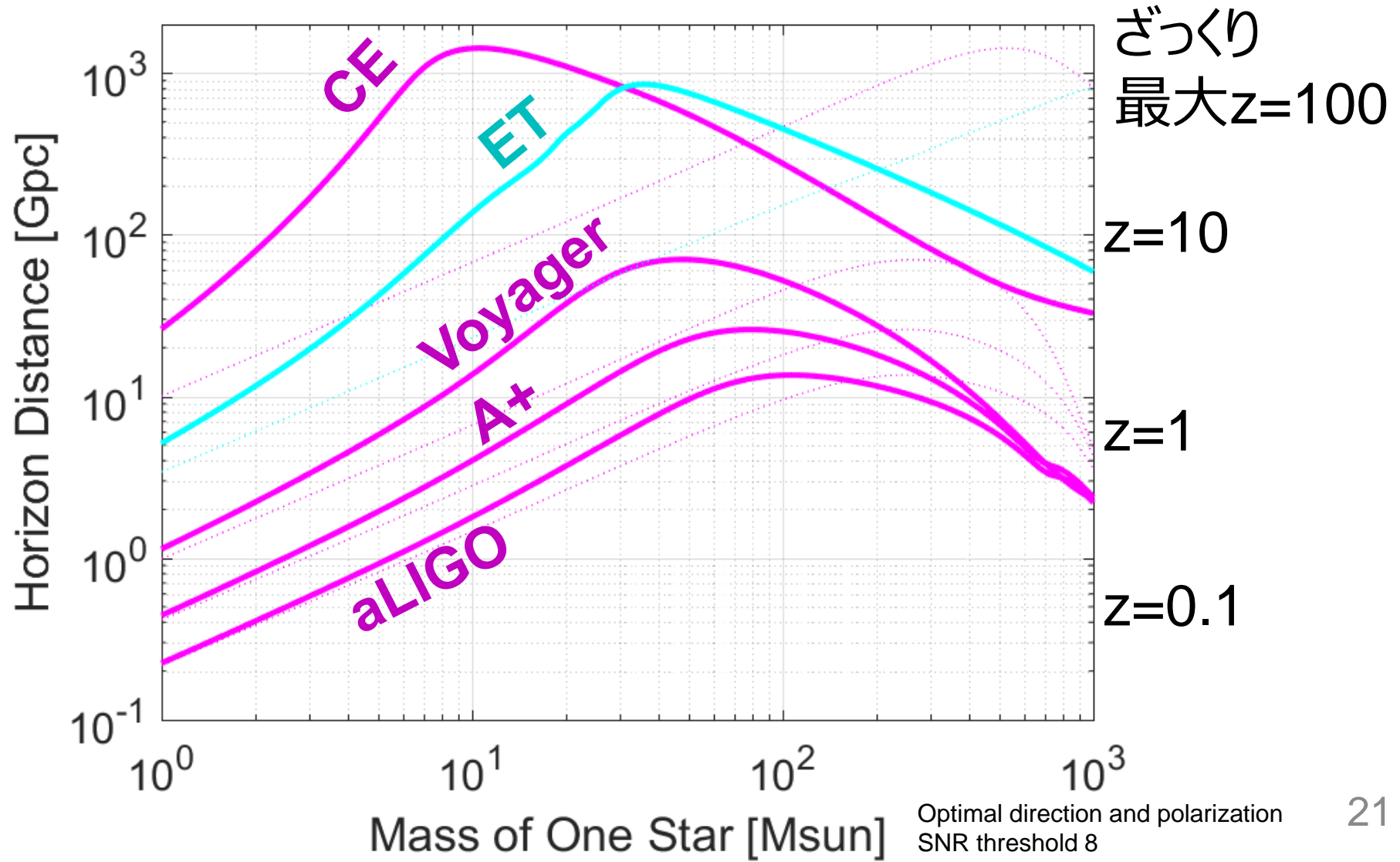
次世代重力波望遠鏡計画

- 感度が1桁向上



観測可能距離

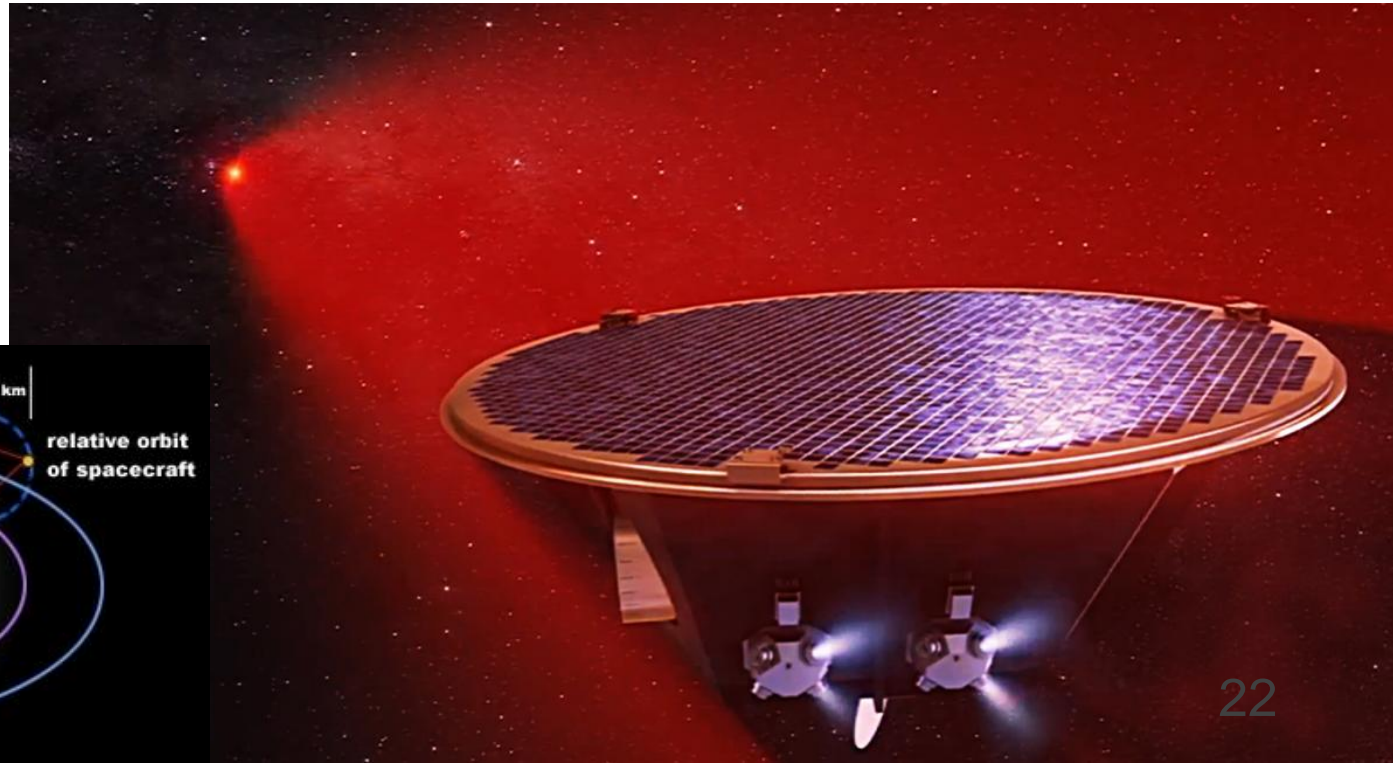
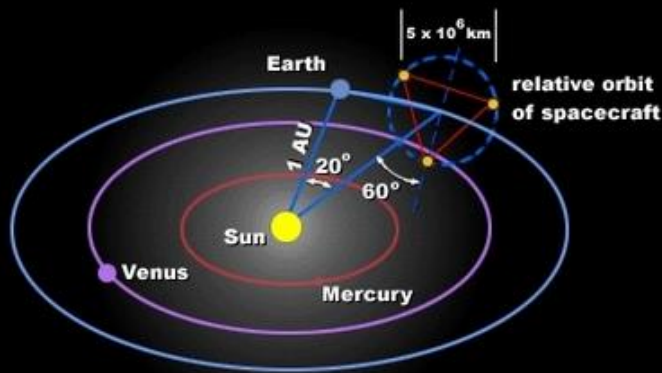
- 次世代重力波望遠鏡(~2035)で $O(10^5)$ イベント/年



宇宙重力波望遠鏡計画

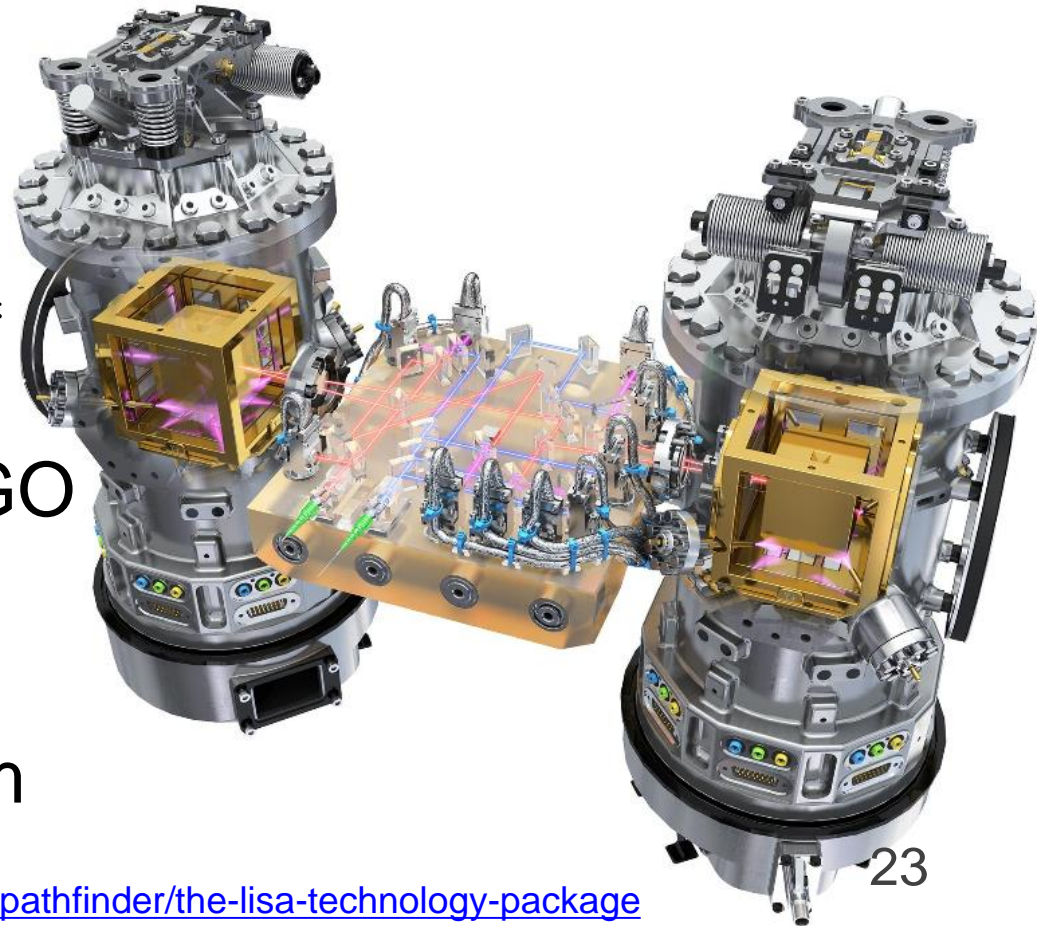
- 地上では地面振動のため数Hz以下に感度をもたせるのは困難
→ 宇宙で**低周波**
- 宇宙では基線長も**長く**できる
標準量子限界はLで決まる

$$h_{\text{SQL}} = \sqrt{\frac{8\hbar}{m\omega^2 L^2}}$$



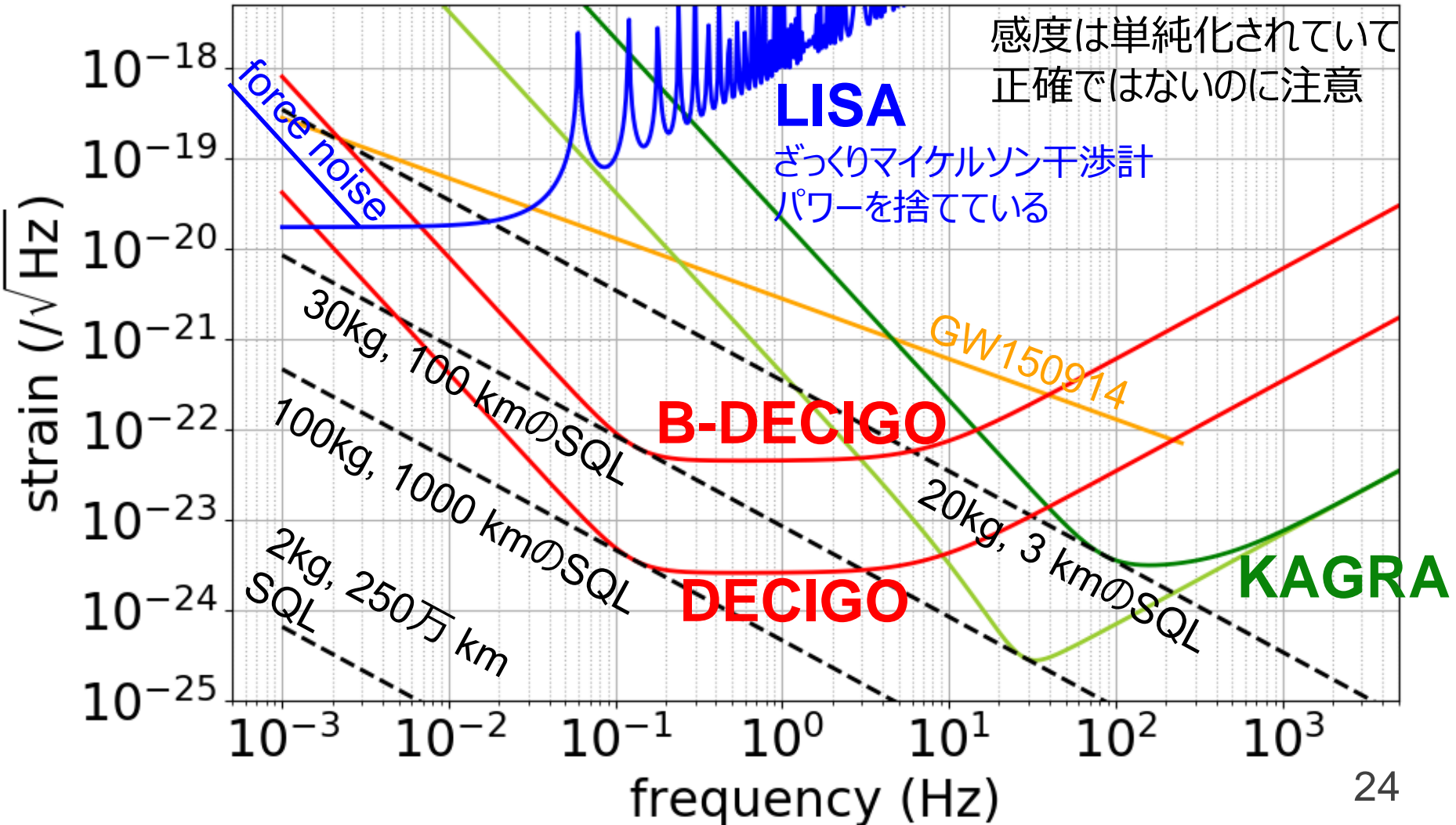
宇宙計画の現状

- LISA (ESA主導、NASAも、€1200M)
2016年LISA Pathfinderでセンサーの実証完了
2034年打ち上げ予定 (1980年代から計画されていた...)
250万 km
- DECIGO (日本)
Fabry-Perot共振器
1000 km
100 kmのB-DECIGO
- Taiji / TianQin (中国)
LISAと同様の方式
300万km / 15万 km



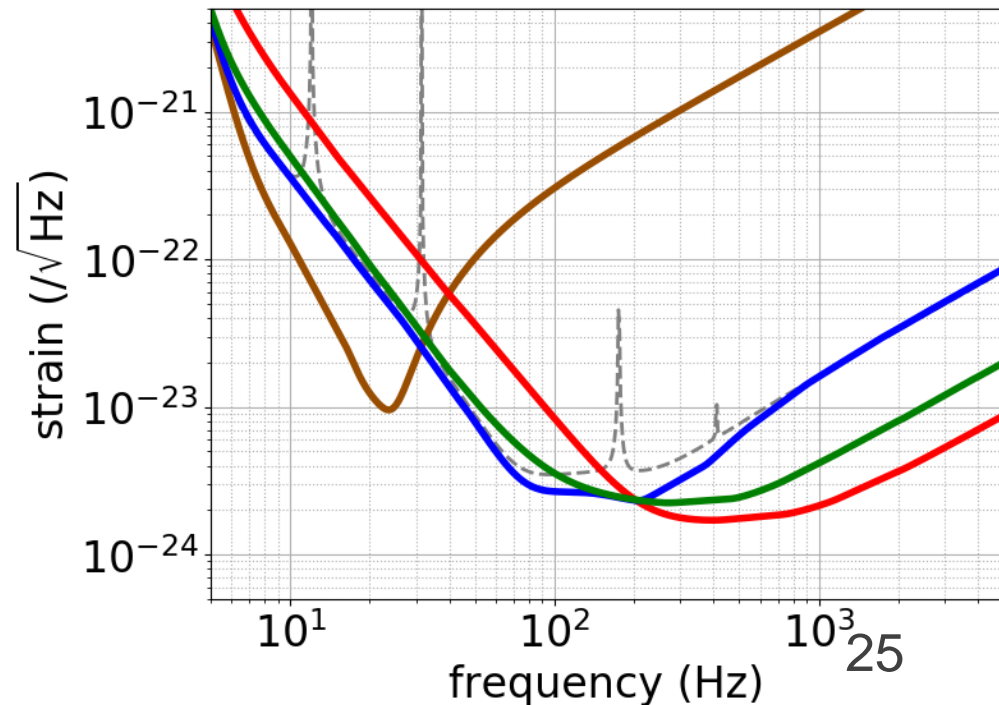
宇宙望遠鏡の感度設計

- KAGRAを長くして、宇宙に持っていくとDECIGO (長くしないとSQLの壁、長くしただけだと高周波改善せず)



まとめ

- 重力波観測はまだまだこれから
- 高感度化にはお金と時間がかかる
- 多イベント時代、複数台時代にはターゲットを絞った観測もあり？ 狭帯域化？
- どの周波数帯でどのくらいの感度が必要か、がわかるとよい
- KAGRAのアップグレード計画に対する意見募集中
- 必要最低限な宇宙計画を募集中



宣伝

- レーザー干渉計による精密計測を利用すると
いろいろな基礎物理実験ができる

$$\frac{\delta L}{L} = \frac{\delta c}{c} = \frac{\delta \nu}{\nu}$$

- Lorentz不変性の検証
光速の等方性の検証

Y. Michimura+, [PRL 110, 200401 \(2013\)](#)

Y. Michimura+, [PRD 88, 111101\(R\) \(2013\)](#)

- アクシオンの探査

I. Obata+, [PRL 121, 161301 \(2018\)](#)

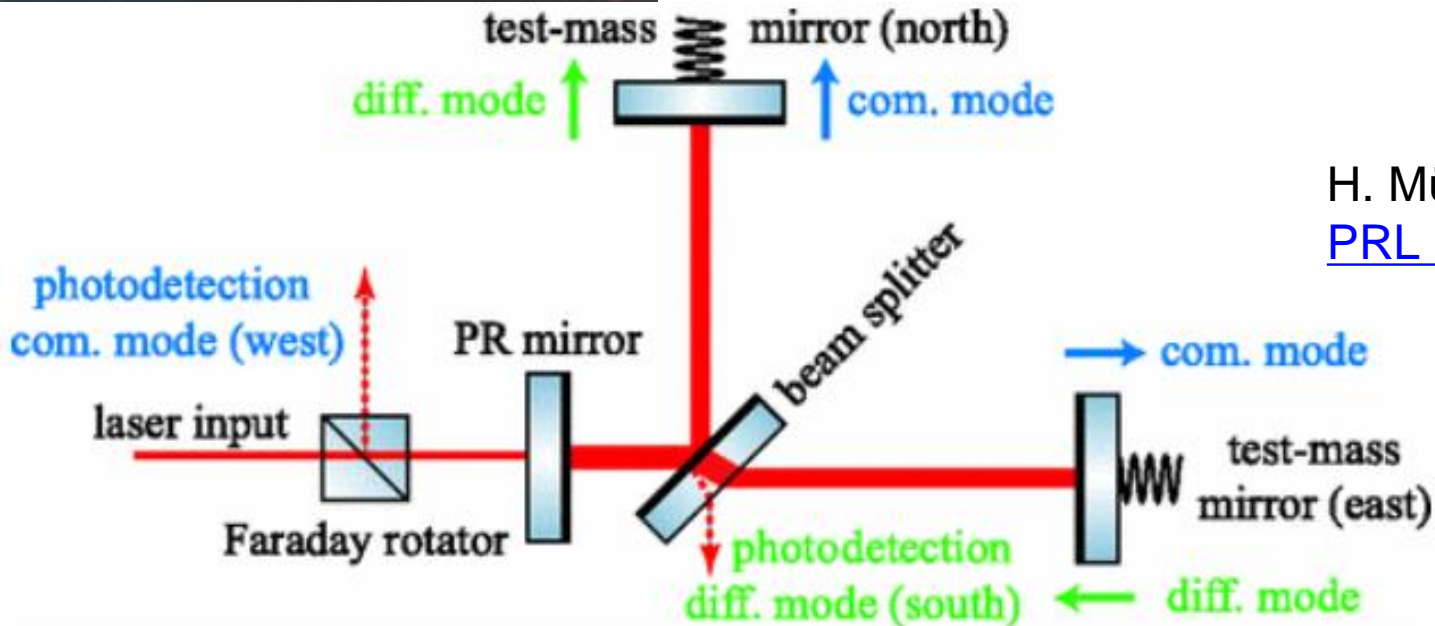
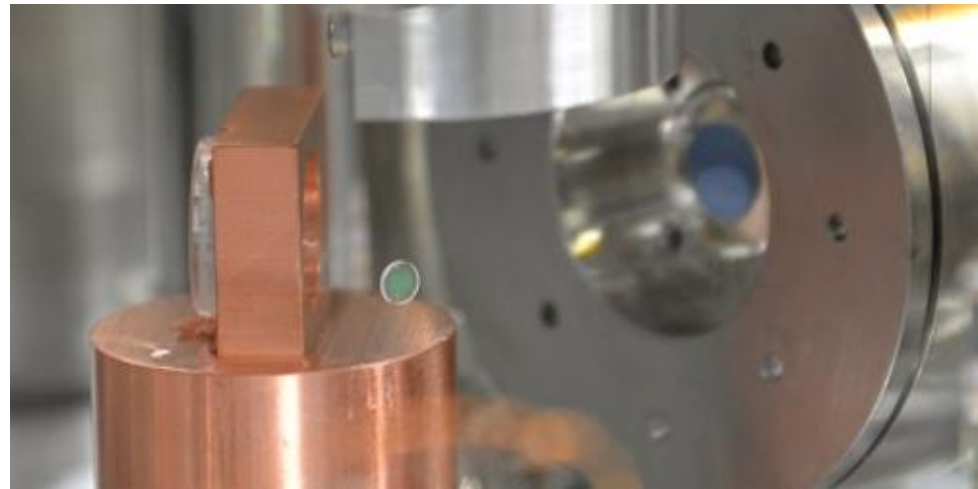
- 巨視的量子力学の検証

巨視的な鏡の位置の重ね合わせ

N. Matsumoto+, [PRL 122, 071101 \(2019\)](#)

巨視的量子力学の検証

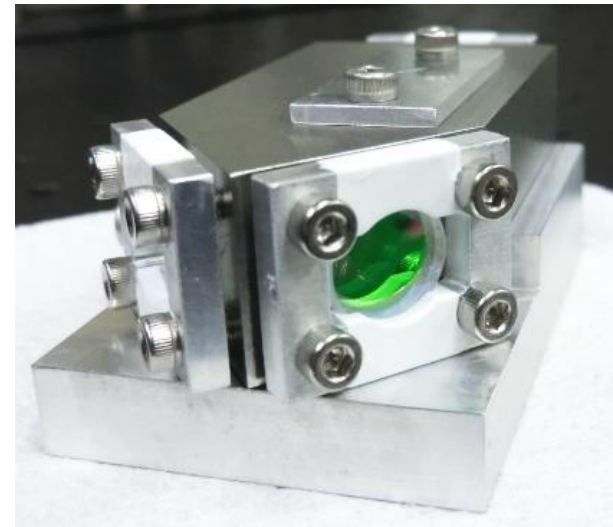
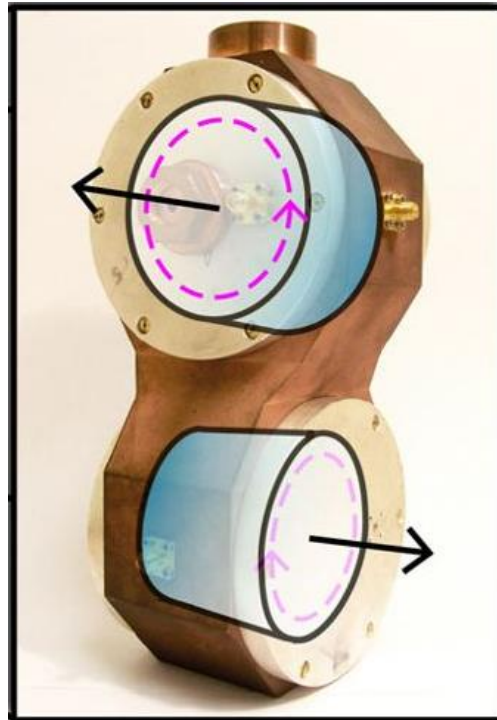
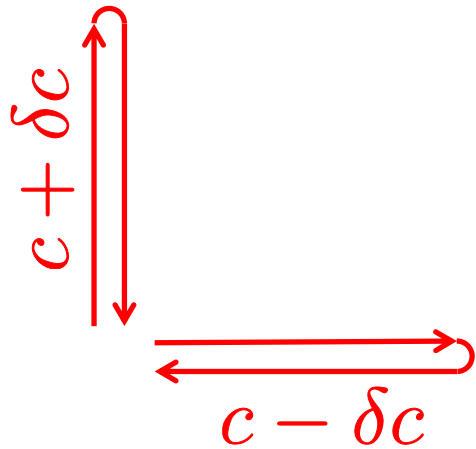
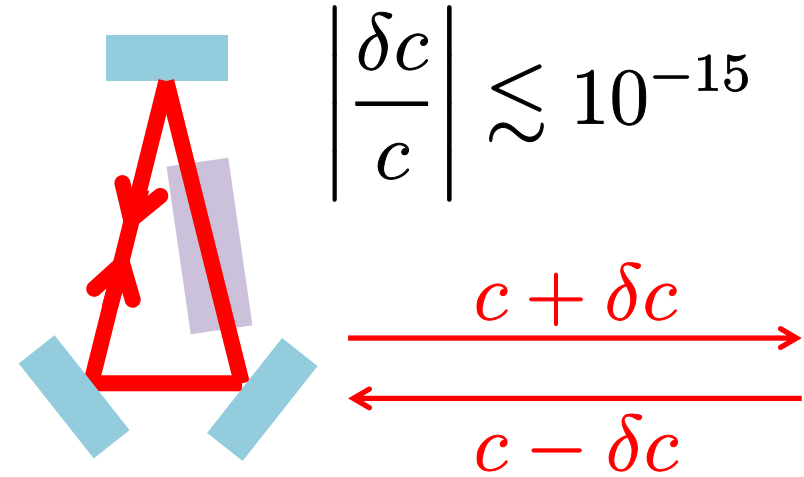
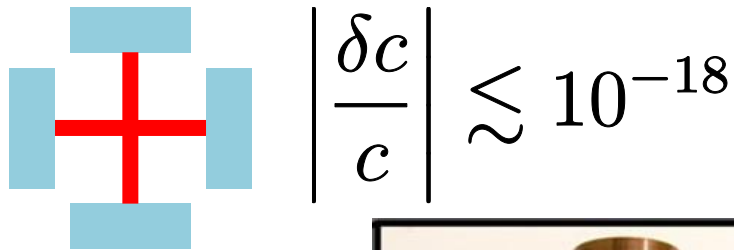
- 巨視的な鏡でも位置の重ね合わせが観測できるか



H. Müller-Ebhardt+,
[PRL 100, 013601 \(2008\)](#)

Lorentz不変性の検証

- 光速の等方性を検証することで光子のLorentz不変性を検証



アクシオンの探査

- アクシオンとの相互作用により、2つの円偏光の光速に差が生じる

$$c_{\pm} = \sqrt{1 \pm \frac{g_{a\gamma} a_0 m_a}{k} \sin(m_a t + \delta_{\tau})}$$

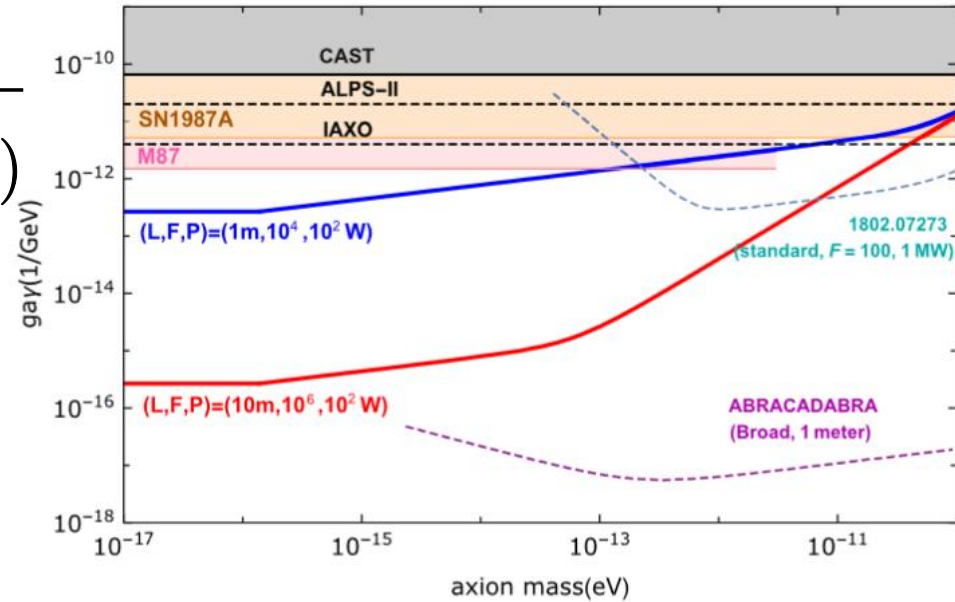
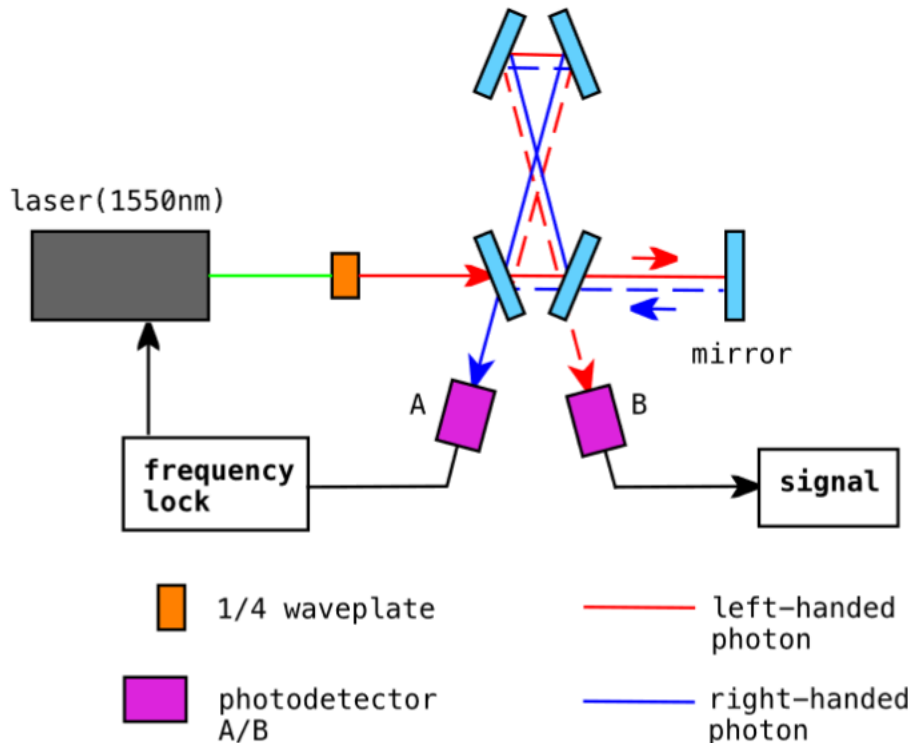


FIG. 2. The sensitivity curves for the axion-photon coupling constant $g_{a\gamma}$ with respect to the axion mass m . The solid blue (red) line shows the sensitivity of our experiment $(L, F, P) = (1(10) \text{ m}, 10^4(10^6), 10^2(10^2) \text{ W})$. The gray band represents the current limit from CAST [5]. The dashed black lines are the prospected limits of IAXO [6] and ALPS-II [7] missions. The dashed turquoise blue and purple lines show the proposed reaches of axion optical interferometer suggested in [10] and ABACADABRA magnetometer [12]. The orange and pink bands denote the astrophysical constraints from the cosmic observations of SN1987A [15] and radio galaxy M87 [17].

おしまい

2G/2G+ Parameter Comparison

	KAGRA	AdVirgo	aLIGO	A+	Voyager
Arm length [km]	3	3	4	4	4
Mirror mass [kg]	23	42	40	80	200
Mirror material	Sapphire	Silica	Silica	Silica	Silicon
Mirror temp [K]	22	295	295	295	123
Sus fiber	35cm Sap.	70cm SiO ₂	60cm SiO ₂	60cm SiO ₂	60cm Si
Fiber type	Fiber	Fiber	Fiber	Fiber	Ribbon
Input power [W]	67	125	125	125	140
Arm power [kW]	340	700	710	1150	3000
Wavelength [nm]	1064	1064	1064	1064	2000
Beam size [cm]	3.5 / 3.5	4.9 / 5.8	5.5 / 6.2	5.5 / 6.2	5.8 / 6.2
SQZ factor	0	0	0	6	8
F. C. length [m]	none	none	none	16	300

KAGRA Detailed Parameters

K. Komori *et al.*, [JGW-T1707038](#)

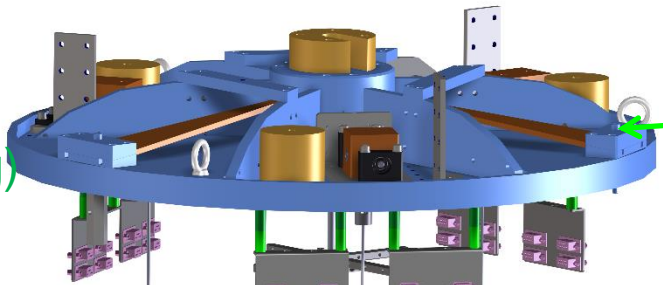
- **Optical parameters**
 - Mirror transmission: 0.4 % for ITM, 10 % for PRM, 15.36 % for SRM
 - Power at BS: 674 W
 - Detune phase: 3.5 deg (DRSE case)
 - Homodyne phase: 135.1 deg (DRSE case)
- **Sapphire mirror parameters**
 - TM size: 220 mm dia., 150 mm thick
 - TM mass: 22.8 kg
 - TM temperature: 22 K
 - Beam radius at ITM: 3.5 cm
 - Beam radius at ETM: 3.5 cm
 - Q of mirror substrate: $1e8$
 - Coating: tantala/silica
 - Coating loss angle: $3e-4$ for silica, $5e-4$ for tantala
 - Number of layers: 22 for ITM, 40 for ETM
 - Coating absorption: 0.5 ppm
 - Substrate absorption: 50 ppm/cm
- **Suspension parameters**
 - TM-IM fiber: 35 cm long, 1.6 mm dia.
 - IM temperature: 16 K
 - Heat extraction: 5800 W/m/K at 20 K
 - Loss angle: $5e-6/2e-7/7e-7$ for CuBe fiber/sapphire fiber/sapphire blade
- **Inspirial range calculation**
 - SNR=8, $f_{min}=10$ Hz, sky average constant 0.442478
- Seismic noise curve includes vertical coupling, vibration from heatlinks and Newtonian noise from surface and bulk

KAGRA Cryopayload

Figure by T. Ushiba and A. Hagiwara

Platform
(SUS, 65 kg)

3 CuBe blade springs



Marionette
(SUS, 22.5 kg)

MN suspended by 1 Maraging steel fiber
(35 cm long, 2-7mm dia.)

MRM suspended by 3 CuBe fibers

Intermediate Mass
(SUS, 20.1 kg,
16 K)

Heat link attached to MN

IM suspended by 4 CuBe fibers
(24 cm long, 0.6 mm dia)

IRM suspended by 4 CuBe fibers

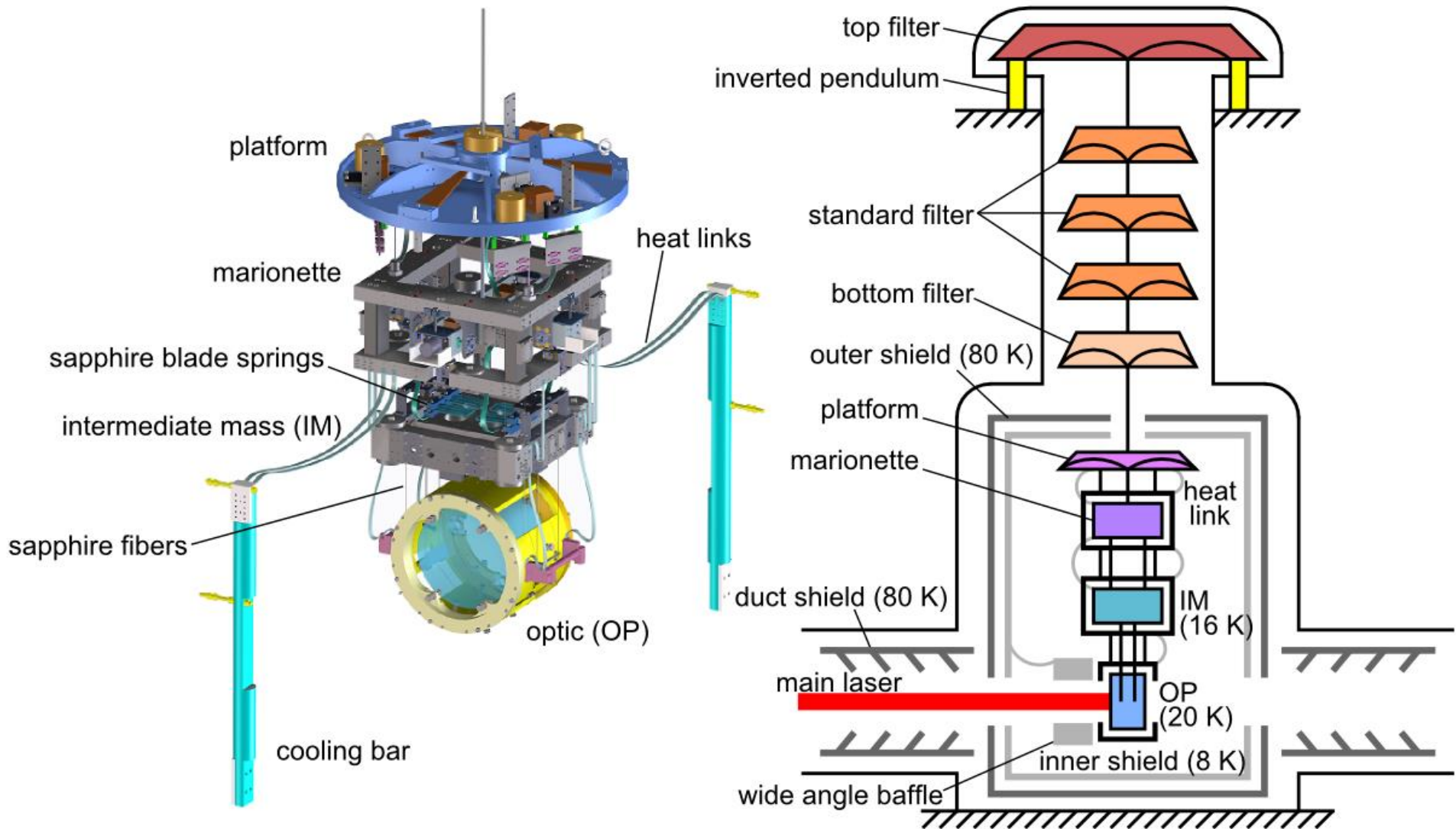
4 sapphire blades

Test Mass
(Sapphire, 23 kg,
22 K)

TM suspended by 4 sapphire fibers
(35 cm long, 1.6 mm dia.)

RM suspended by 4 CuBe fibers

KAGRA Cryostat Schematic



KAGRA Suspensions

Type-A

13.5 m



cryogenic payload

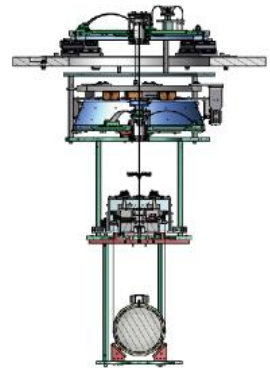
Type-B

3.1 m



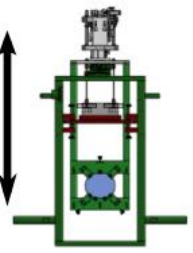
Type-Bp

1.7 m

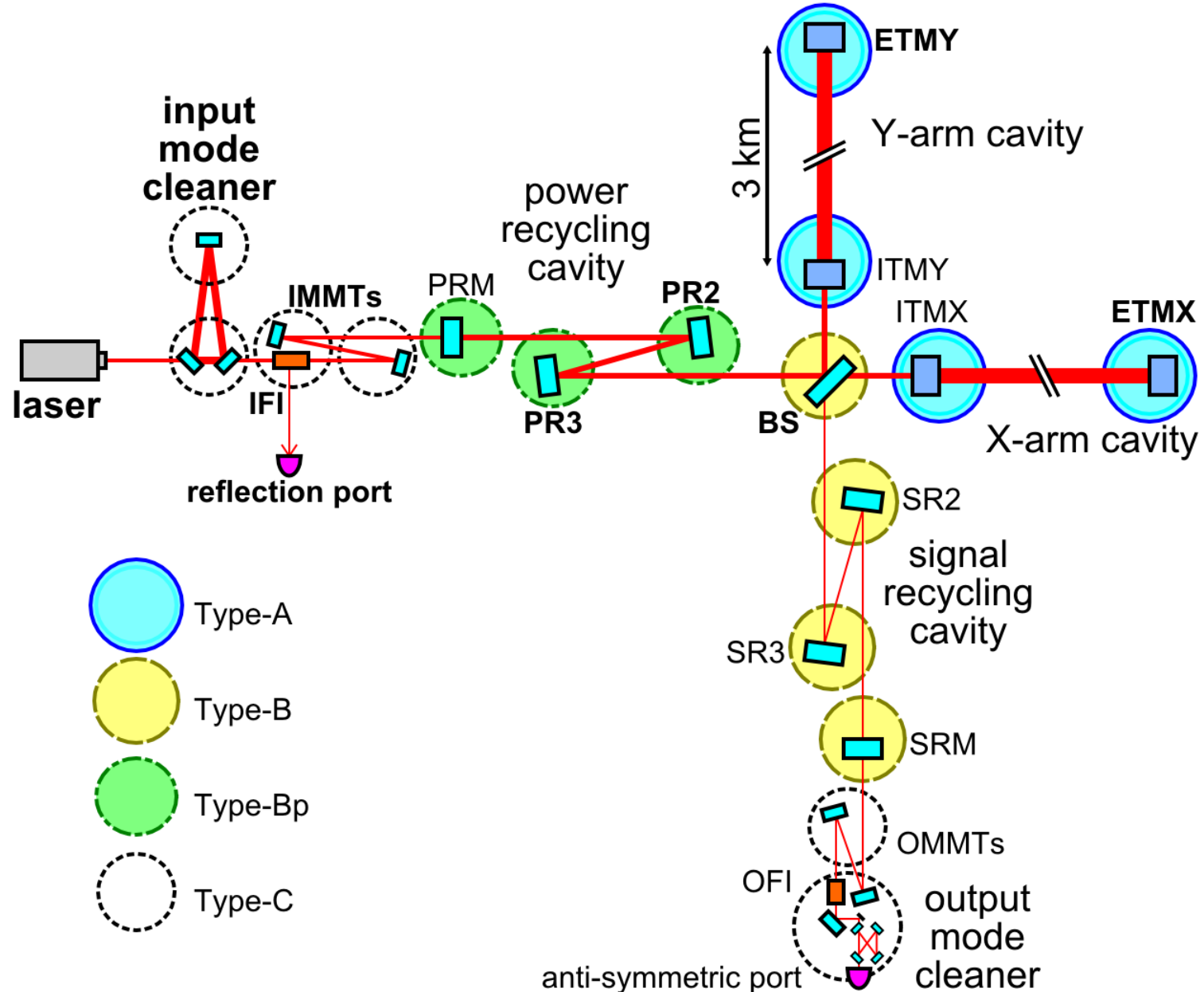


Type-C

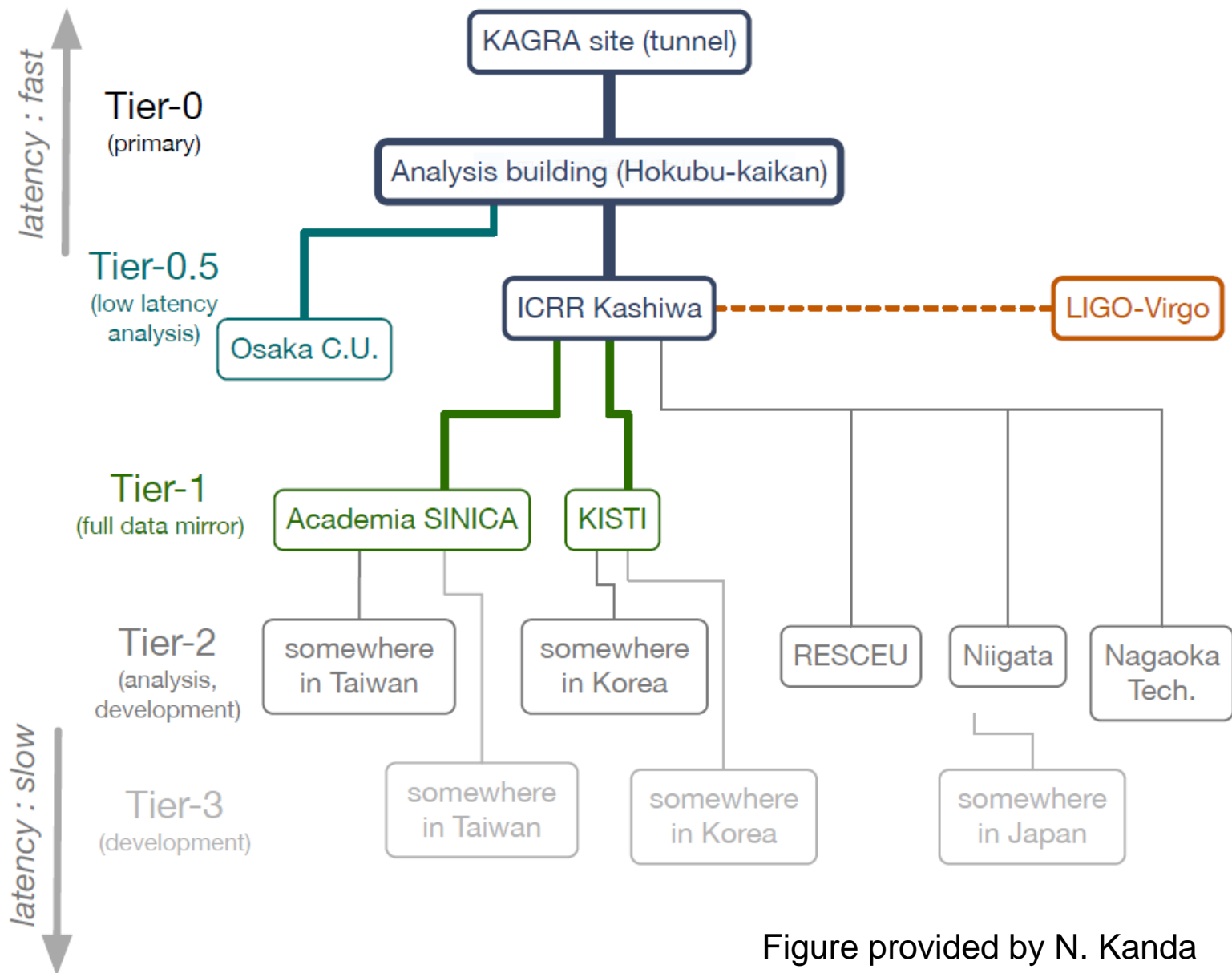
0.4 m



KAGRA Interferometer



KAGRA Data Tree



KAGRA Scientific Congress

KAGRA Scientific Congress (KSC)
organization chart 2019/Jan 15

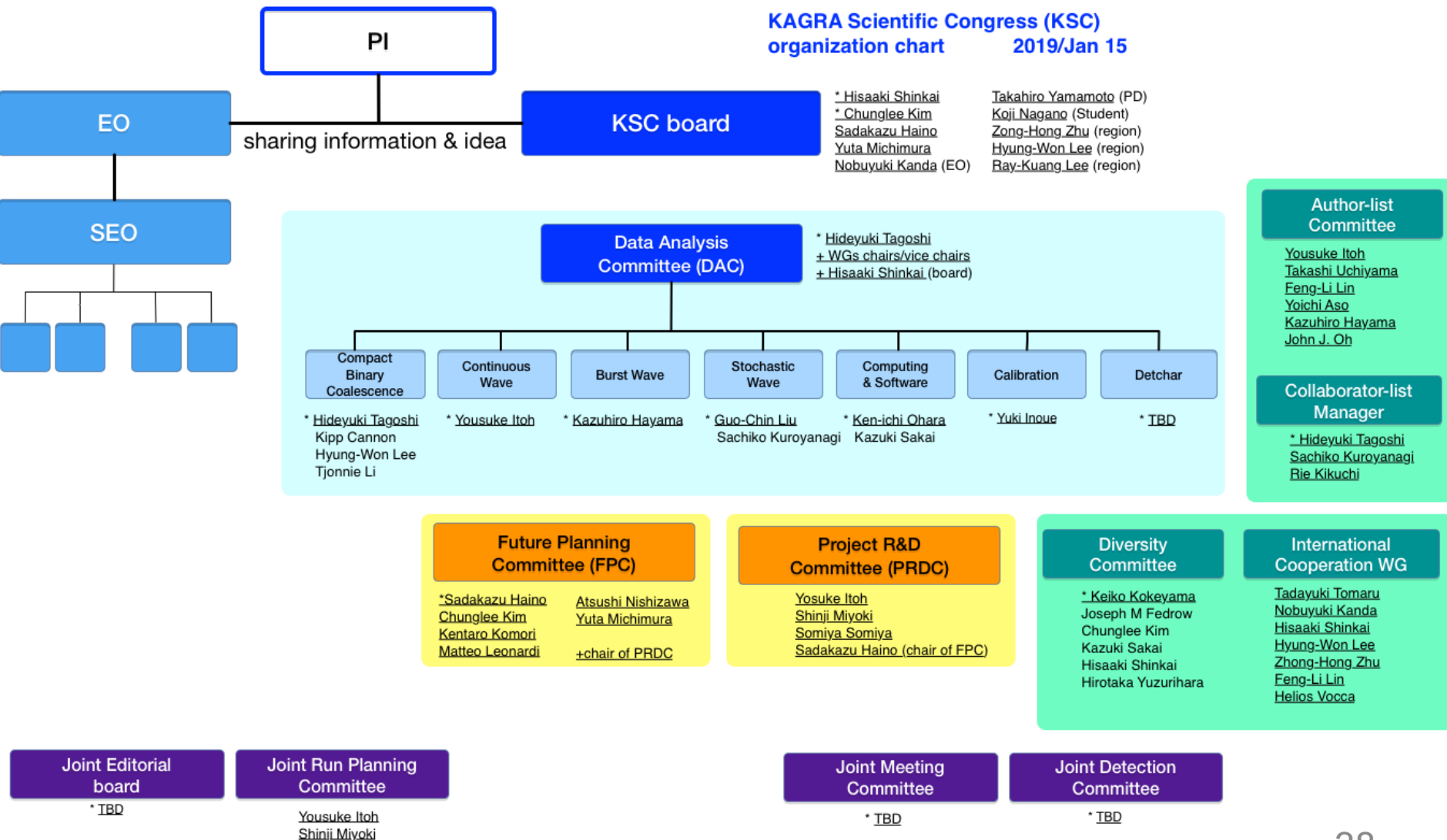
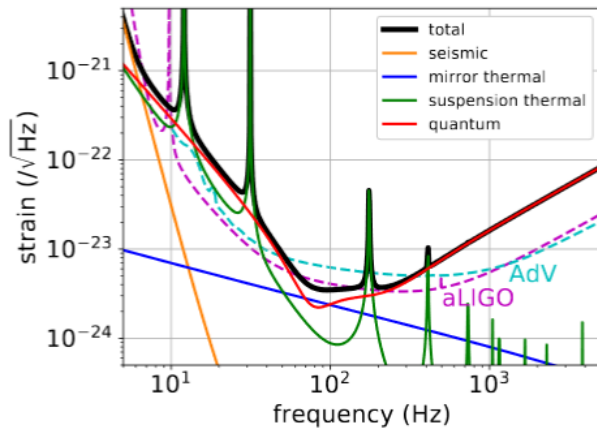
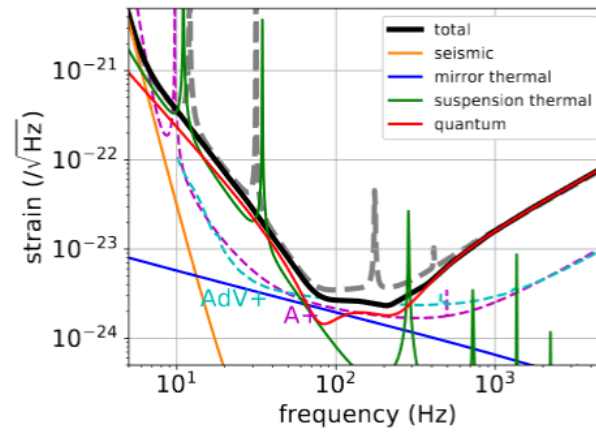


Figure by H. Shinkai

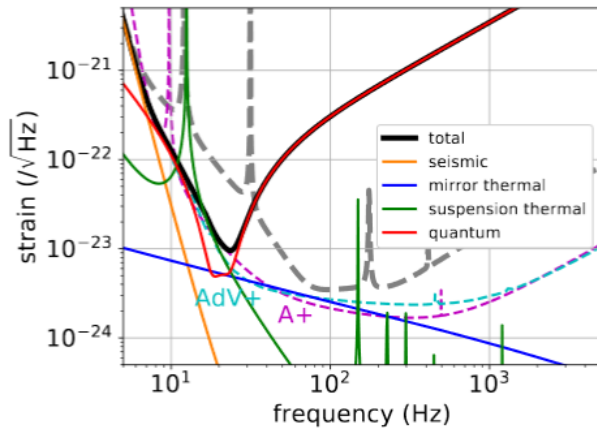
Possible KAGRA Upgrade Plans



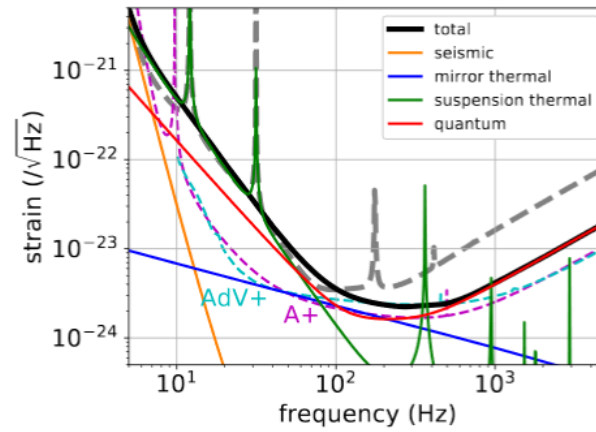
(a) bKAGRA



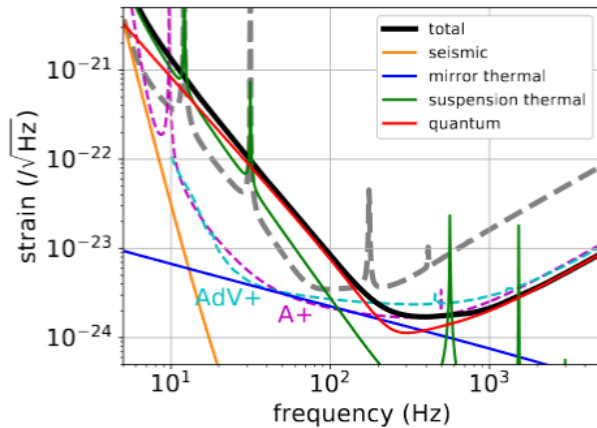
(d) 40kg



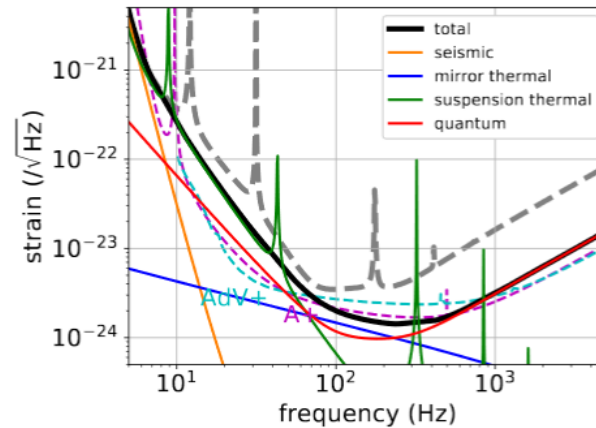
(b) LF



(e) FDSQZ



(c) HF



(f) Combined

Y. Michimura+,
[PRD 97, 122003 \(2018\);](#)
[JGW-T1809537](#)

Possible KAGRA Upgrade Plans

Y. Michimura+,
[PRD 97, 122003 \(2018\)](#);
[JGW-T1809537](#)

		bKAGRA	LF	HF	40kg	FDSQZ	Combined
detuning angle (deg)	ϕ_{det}	3.5	28.5	0.1	3.5	0.2	0.3
homodyne angle (deg)	ζ	135.1	133.6	97.1	123.2	93.1	93.0
mirror temperature (K)	T_m	22	23.6	20.8	21.0	21.3	20.0
SRM reflectivity (%)	R_{SRM}	84.6	95.5	90.7	92.2	83.2	80.9
fiber length (cm)	l_f	35.0	99.8	20.1	28.6	23.0	33.1
fiber diameter (mm)	d_f	1.6	0.45	2.5	2.2	1.9	3.6
mirror mass (kg)	m	22.8	22.8	22.8	40	22.8	100
input power at BS (W)	I_0	673	4.5	3440	1500	1500	3470
maximum detected squeezing (dB)		0	0	6.1	0	5.2 (FC)	5.1 (FC)
$100M_{\odot}$ - $100M_{\odot}$ inspiral range (Mpc)		353	2099	114	412	318	702
$30M_{\odot}$ - $30M_{\odot}$ inspiral range (Mpc)		1095	1094	271	1269	855	1762
$1.4M_{\odot}$ - $1.4M_{\odot}$ inspiral range (Mpc)		153	85	156	202	179	307
median sky localization error (deg ²)		0.183	0.507	0.105	0.156	0.119	0.099