

レーザー干渉計による 重力波観測の現状と将来展望

道村唯太

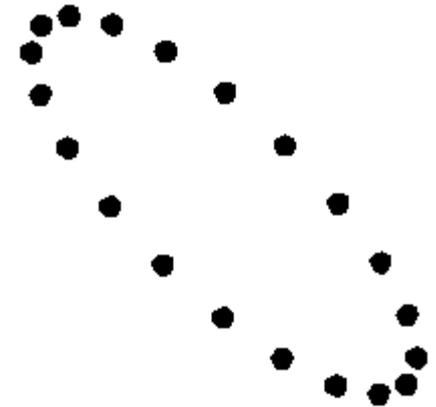
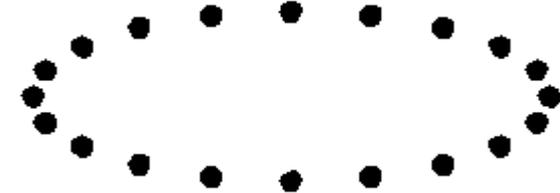
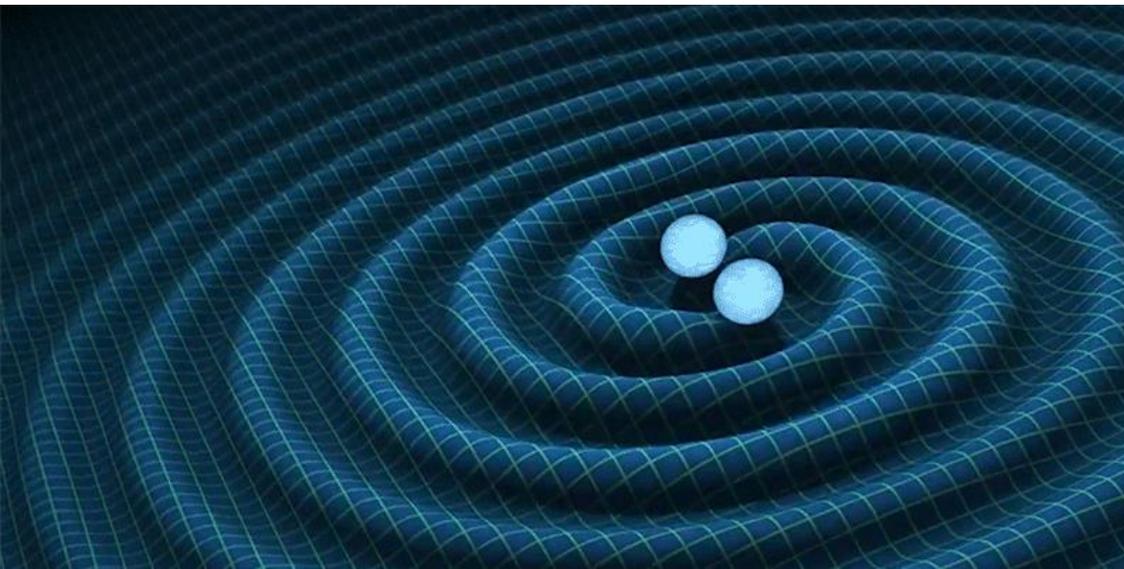
東京大学 大学院理学系研究科 物理学専攻

今回のお話

- レーザー干渉計型**重力波検出器の技術**
 - 重力波とその周波数
 - 国際重力波観測ネットワーク
 - マイケルソン干渉計の原理
 - 重力波検出器の感度と雑音源
 - インスパイラルレンジ
- **重力波観測**の現状と今後の展望
 - LIGO, Virgoの観測状況と今後の予定
 - KAGRAの開発状況と今後の予定
 - 重力波観測の今後の目標

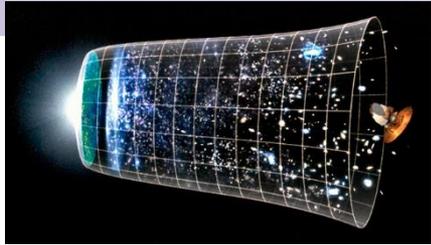
重力波とは？

- 光速で伝播する時空の歪み
- 質量を持つ物体の運動で生じる
- 四重極放射
- +モードとxモードの2つの偏極
- 電磁波観測とは異なる情報を得ることができる



様々な周波数にわたる重力波観測

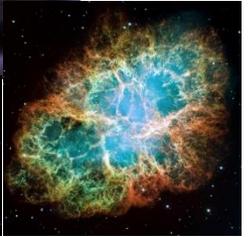
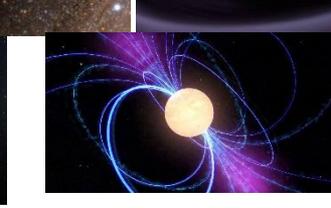
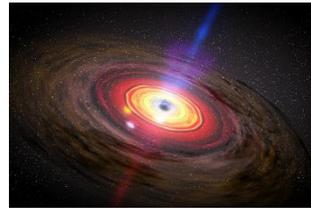
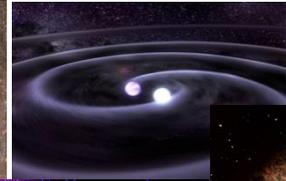
原始重力波



質量大



質量小



周期 宇宙年齢

年

時間

秒

ミリ秒

周波数
Hz

10^{-15}

10^{-12}

10^{-9}

10^{-6}

10^{-3}

1

地上干渉計 10^3

Pulsar timing



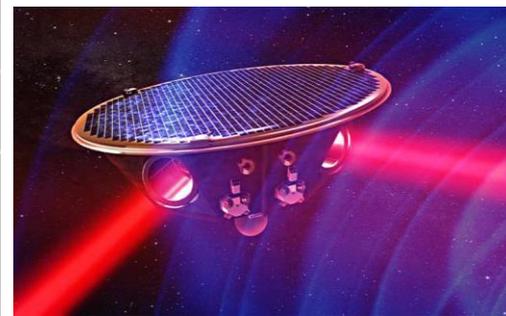
Doppler tracking

宇宙干渉計

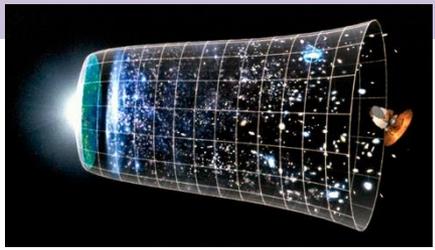


共振型

CMB B-mode



電磁波/PHzに例えると...

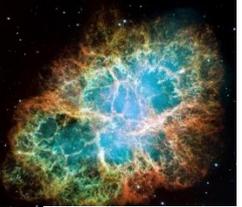
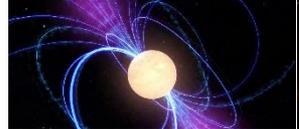


原始重力波

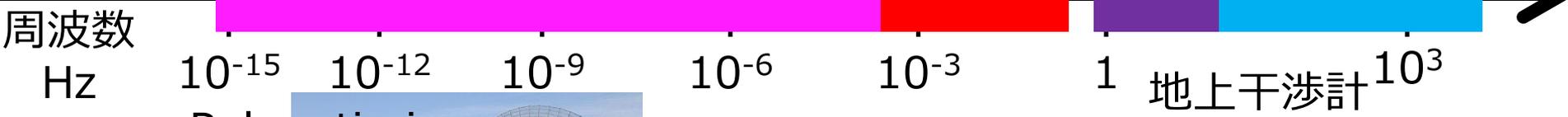
質量大



質量小



周期 宇宙年齢 **電波** 年 **赤外線** **紫外線** **X線**



周波数
Hz

10^{-15}

10^{-12}

10^{-9}

10^{-6}

10^{-3}

1

10^3

Pulsar timing



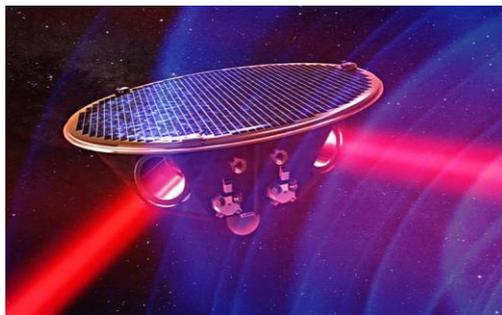
Doppler tracking

宇宙干渉計

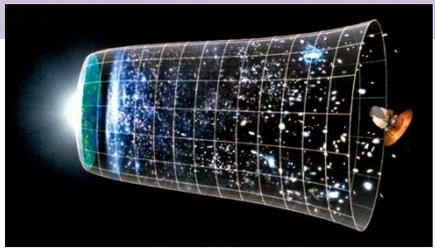


共振型

CMB B-mode



電磁波/PHzに例えると...

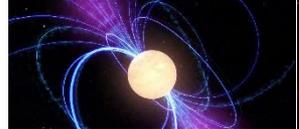
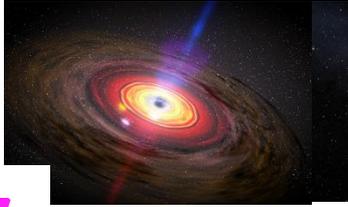


原始重力波

質量大



質量小



周期 宇宙年齢 電波 年 赤外線 紫外線 X線

周波数 Hz 10^{-15} 10^{-12} 10^{-9} 10^{-6} 10^{-3} 1 10^3

Pulsar timing



LISA

Doppler tracking

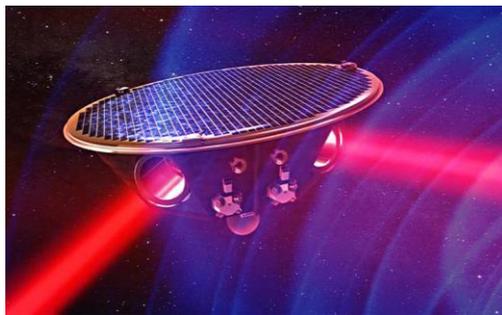
宇宙十沙計

DECIGO

地上干渉計

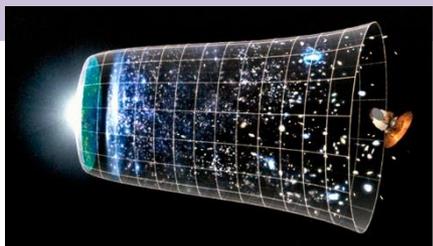
LIGO
Virgo
KAGRA

CMB B-mode



今回は10 Hz-1 kHz重力波のお話

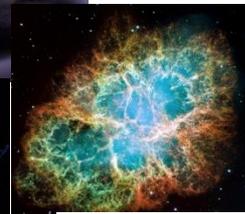
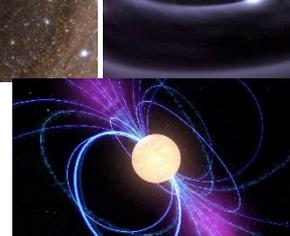
原始重力波



質量大



質量小



周期 宇宙年齢

年

時間

秒

X線

周波数

Hz

10^{-15}

10^{-12}

10^{-9}

10^{-6}

10^{-3}

1

地上干渉計

10^3

Pulsar timing



Doppler tracking

宇宙干渉計



LIGO
Virgo
KAGRA

CMB B-mode



重力波国際観測ネットワーク

- 重力波観測には複数台での観測が必須
- どれもレーザー干渉計型

GEO-HF



Advanced LIGO



Advanced LIGO



Advanced Virgo



KAGRA

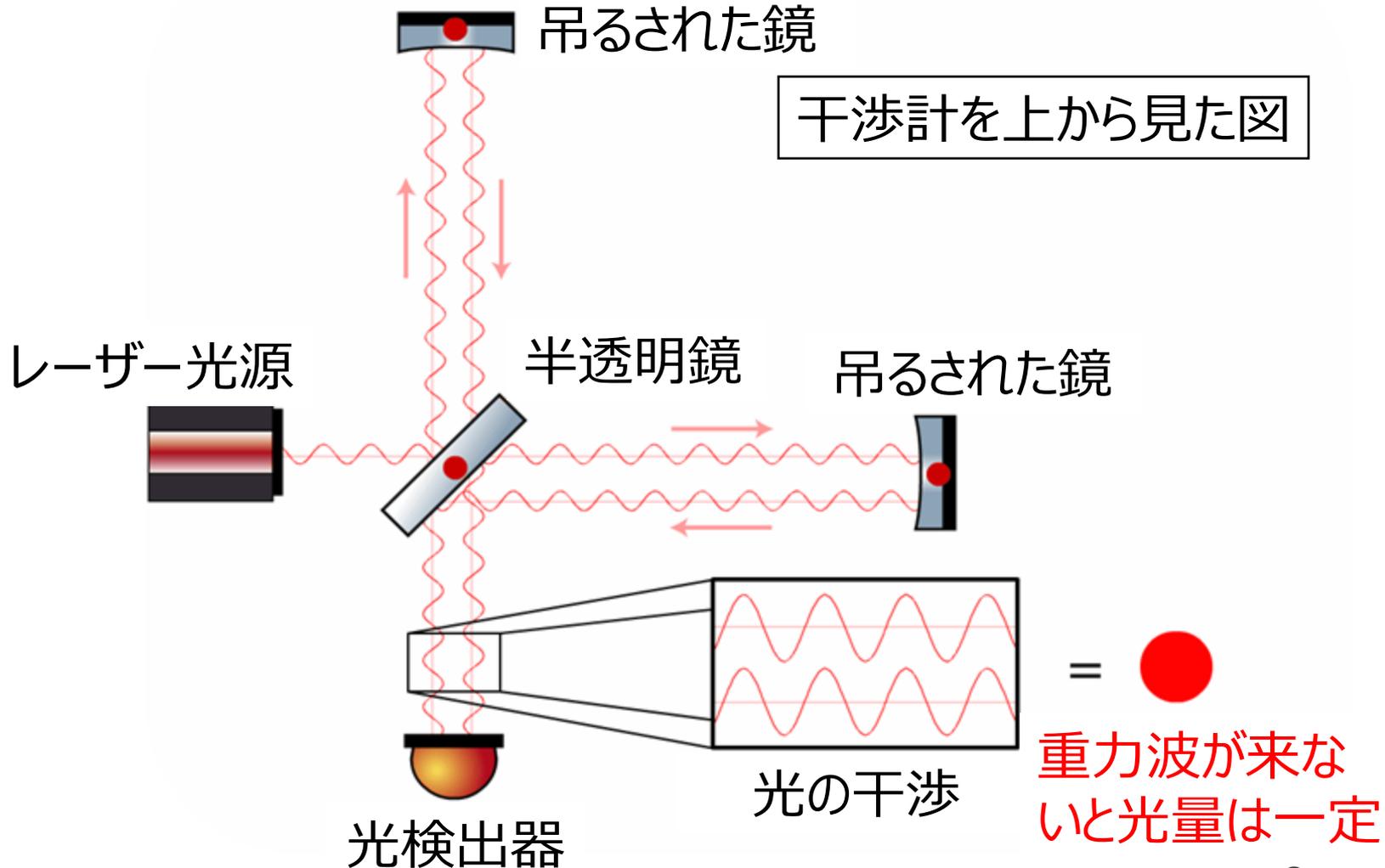


LIGO-India (approved)



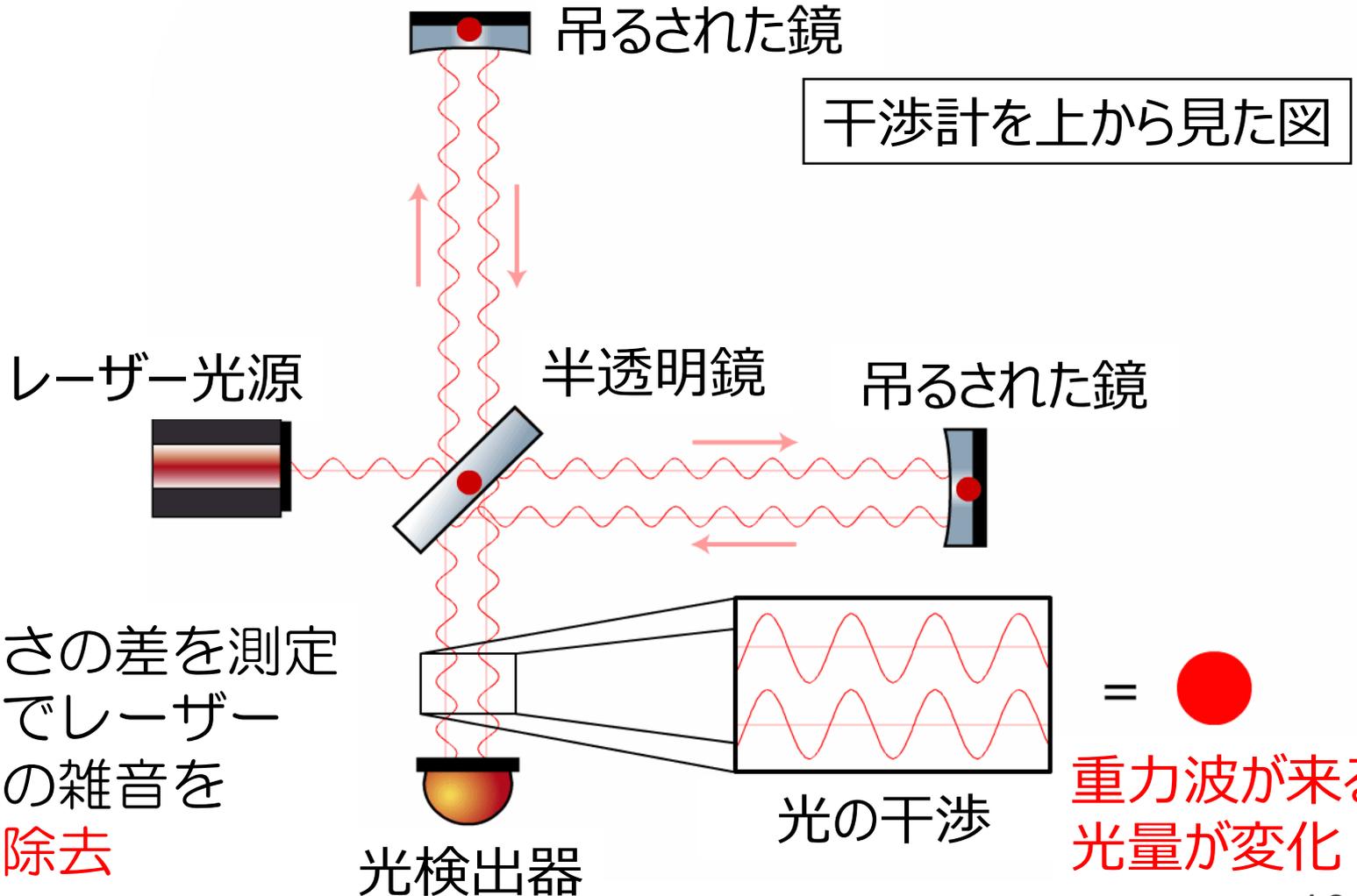
レーザー干渉計型重力波検出器

- 両腕の長さの差を干渉縞の変化として測定



レーザー干渉計型重力波検出器

- 両腕の長さの差を干渉縞の変化として測定



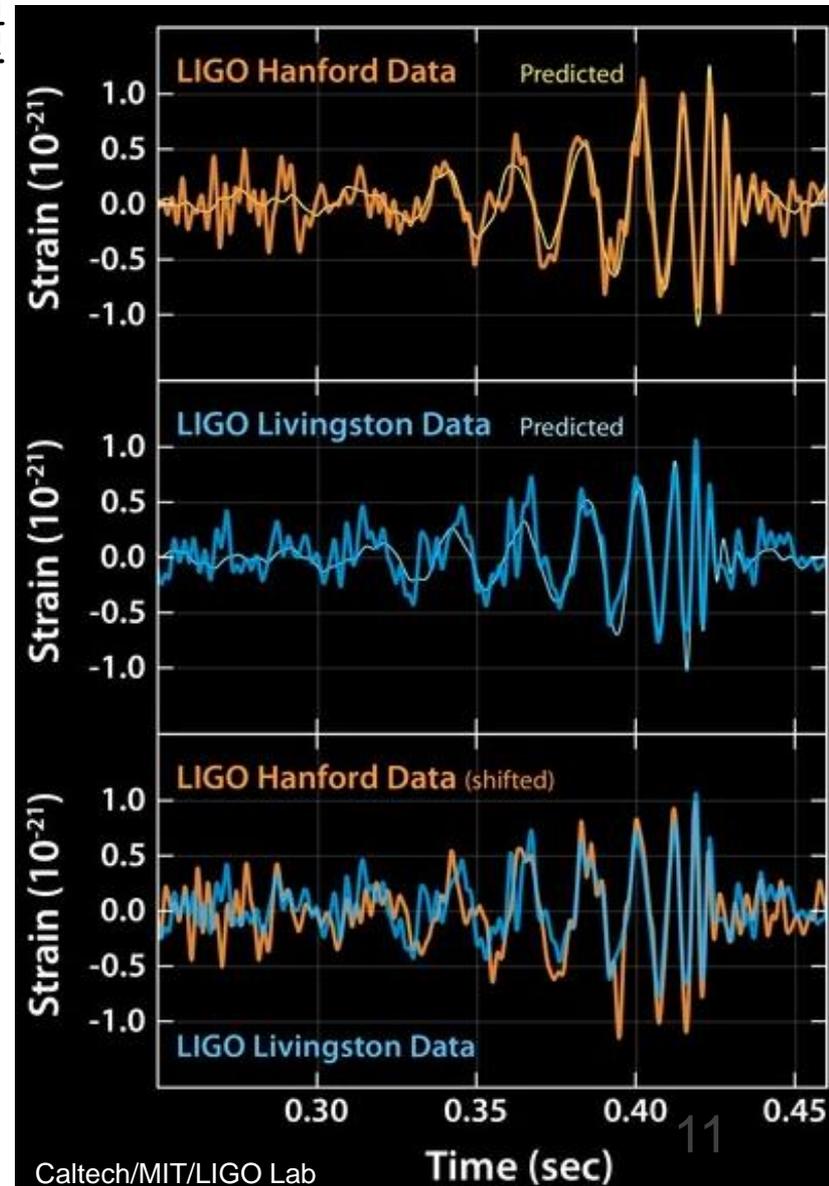
重力波による空間の歪み量

- GW150914の空間の歪み量
 $h \sim 10^{-21}$

- 距離の変化割合で表す

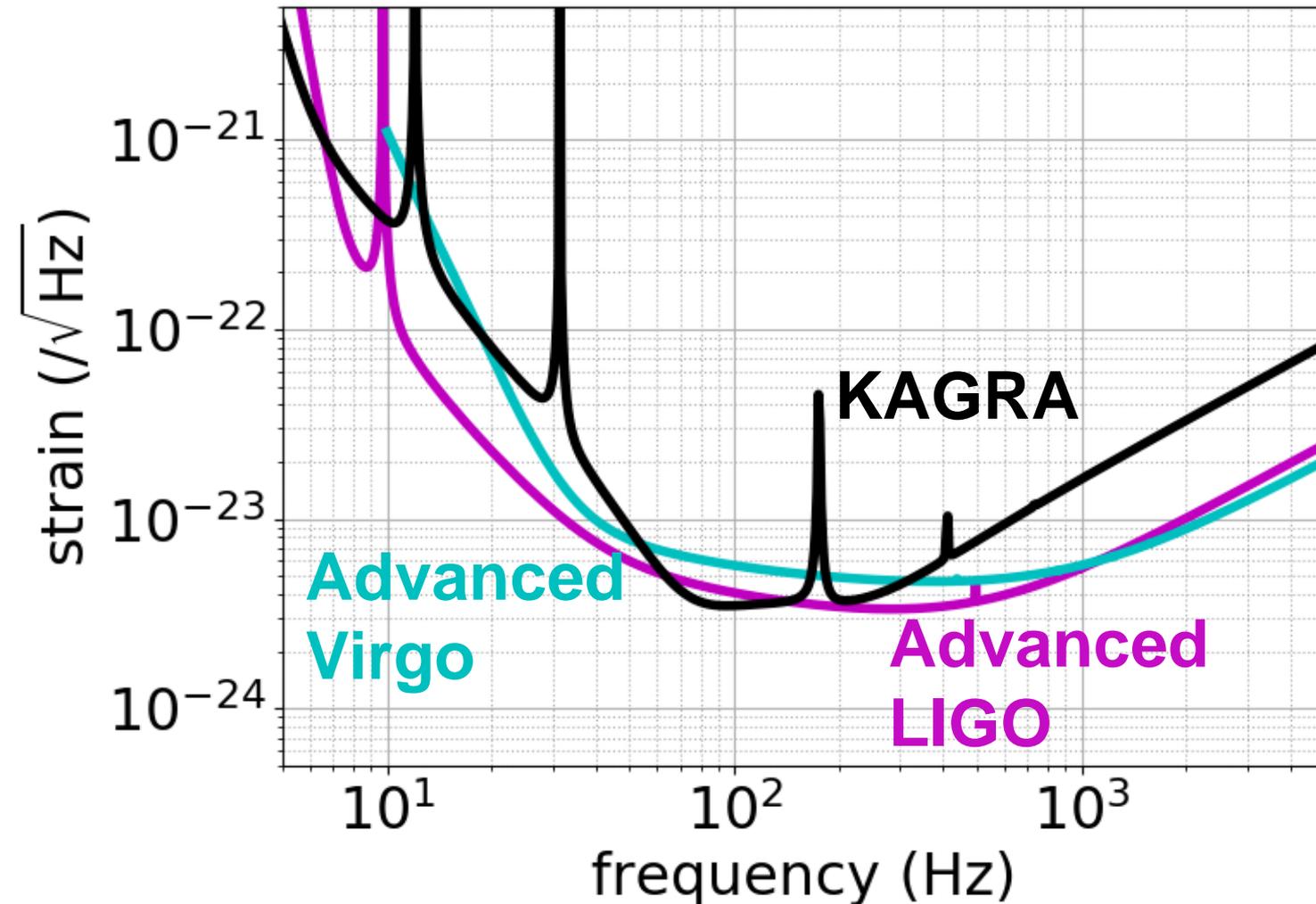
$$h = \frac{\delta L}{L}$$

- LIGOの場合 $L=4$ kmなので
 $\delta L = 4e-18$ m
陽子の大きさの1/1000
- どのくらい小さな h を
測定できるかで検出器
の性能が決まる



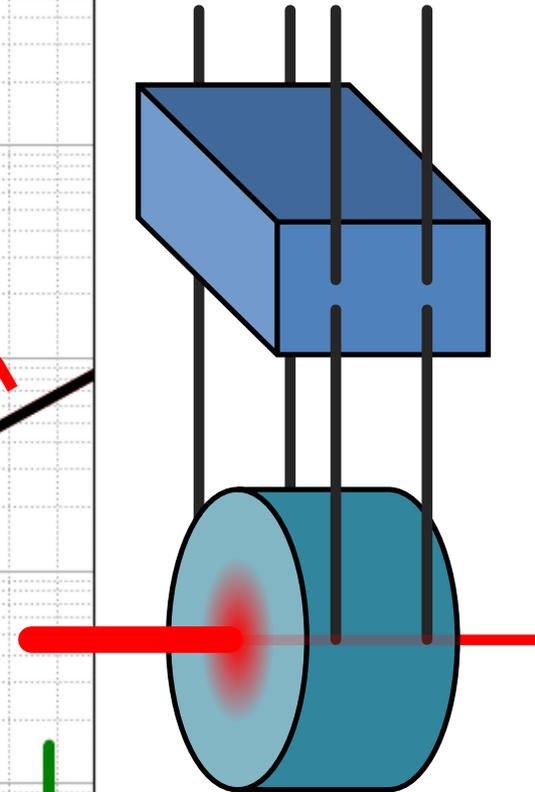
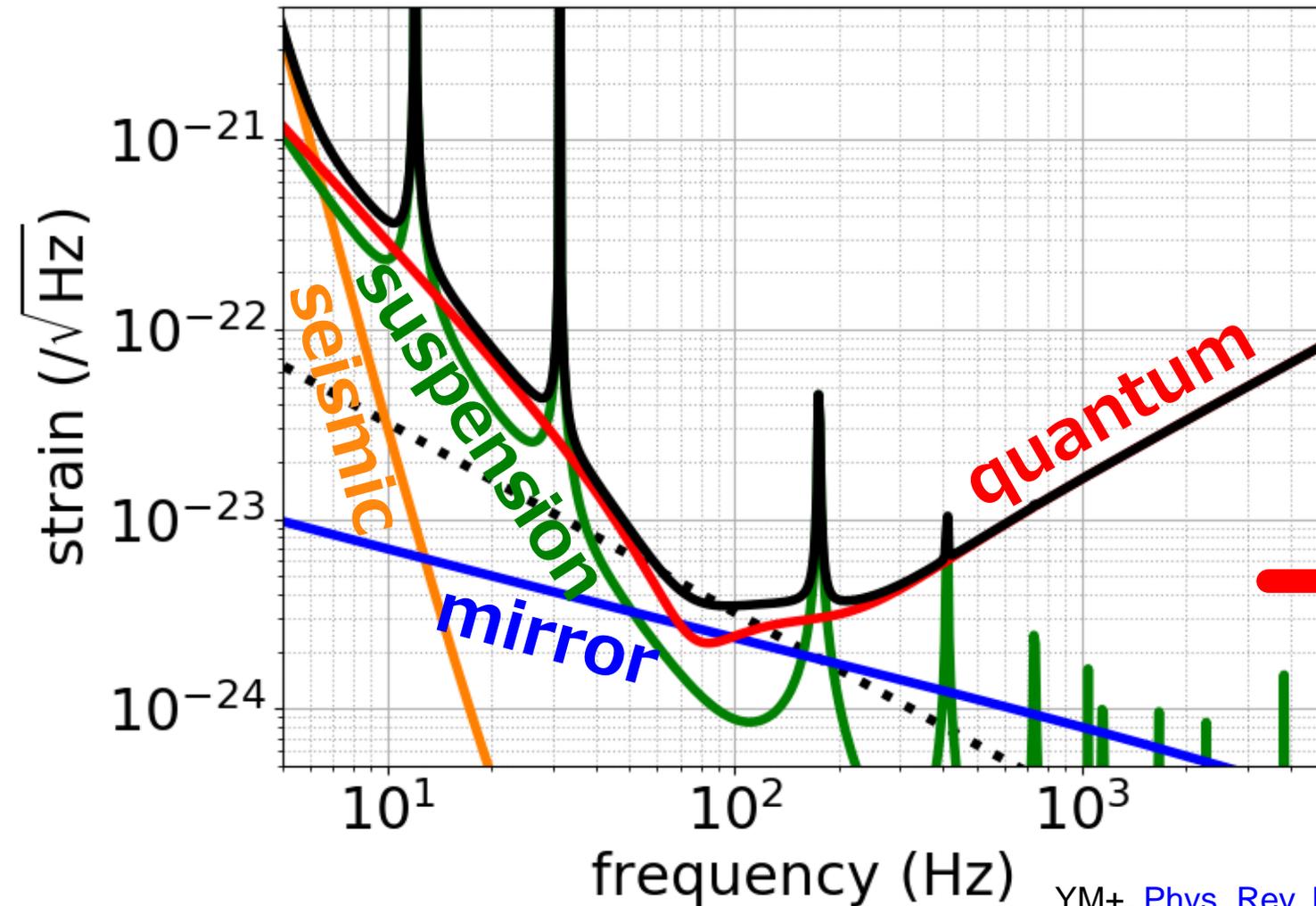
設計感度

- aLIGO、AdV、KAGRAはどれも同等の設計感度



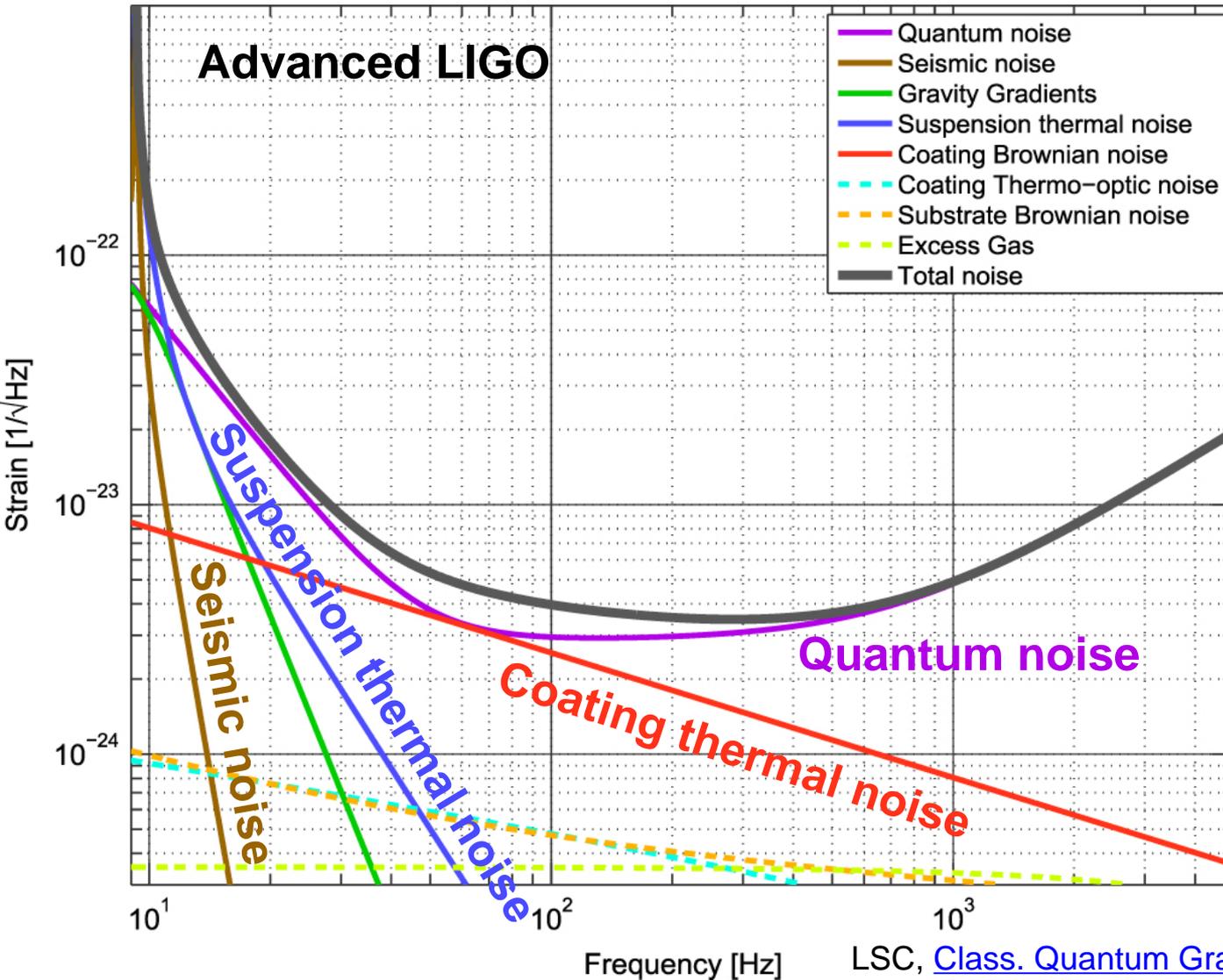
原理的な雑音源

- ほとんど量子雑音で、地面振動雑音、サスペンション熱雑音、鏡の熱雑音も重要



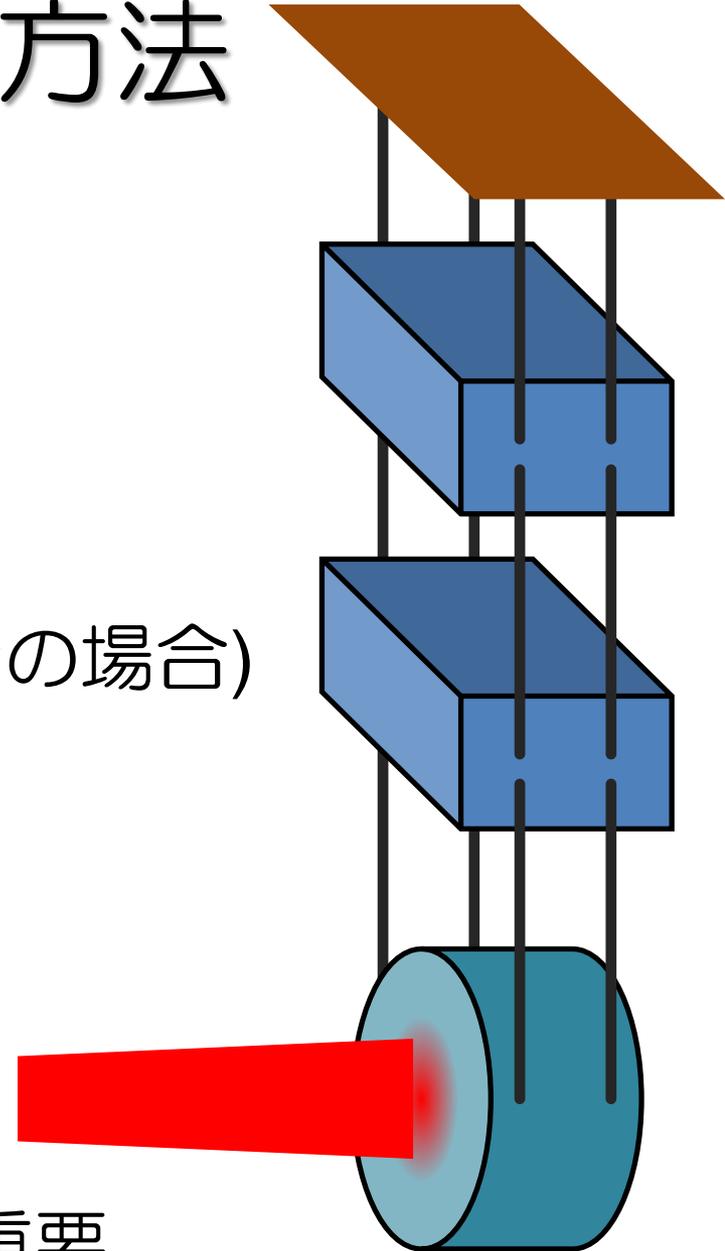
原理的な雑音源

- aLIGOも同様に、ほとんど量子雑音で決まる



雑音源と低減方法

- **地面振動雑音**
多段懸架で防振
- 鏡とサスペンションの**熱雑音**
機械的散逸の少ない材質
低温化
ビーム径の大型化 (鏡熱雑音の場合)
- **量子雑音**
レーザーパワーの最適化
干渉計構成の工夫
鏡の大質量化
- 長基線長化、鏡の大質量化が重要



干渉計構成の工夫

- Dual Recycled Fabry-Perot-Michelson Interferometer (DRFPMI)

Power recycling mirror

光源側に戻ってくる光を打ち返すことで実効的に入射パワーを増やす

Laser
~100 W

腕共振器

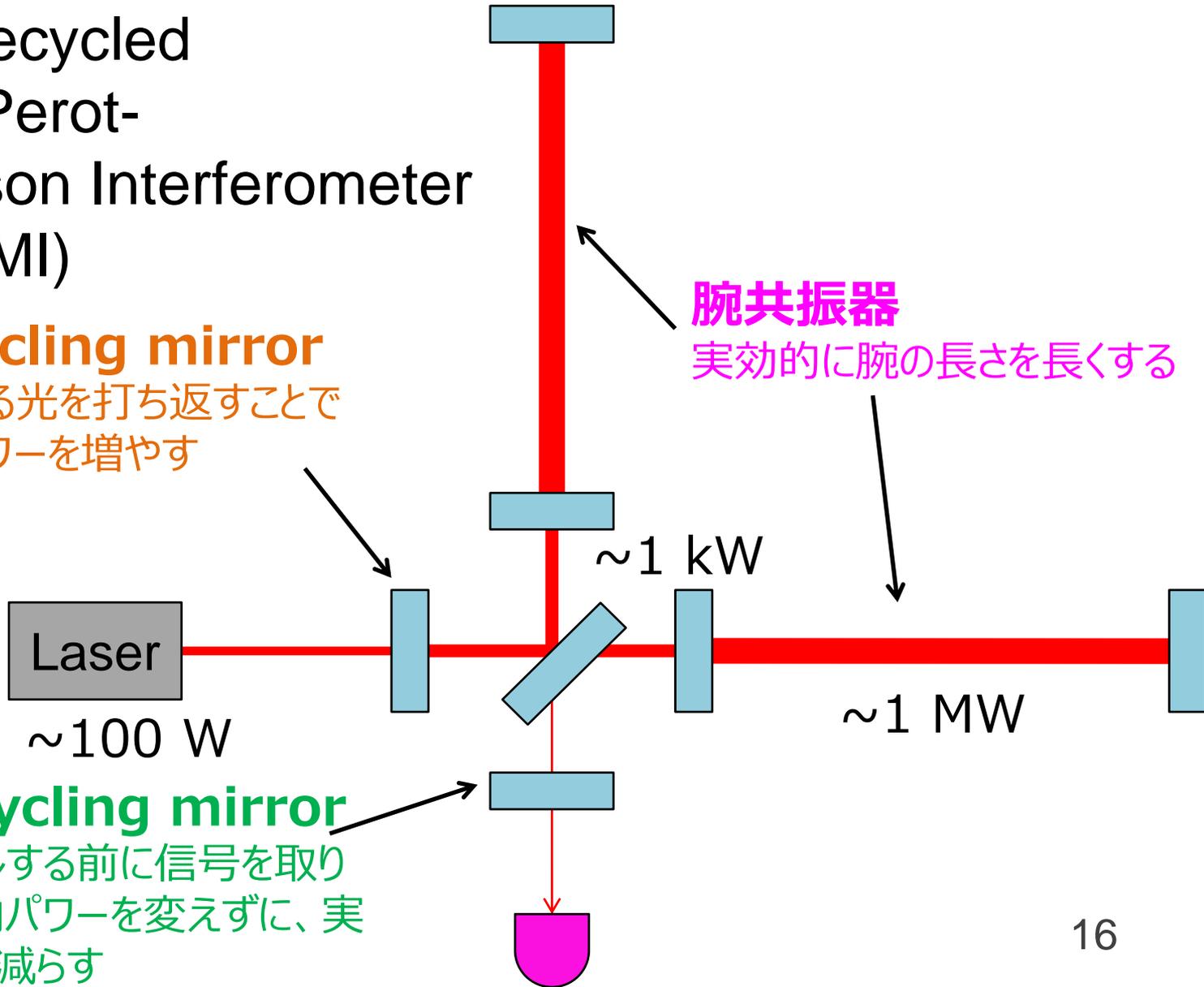
実効的に腕の長さを長くする

~1 kW

~1 MW

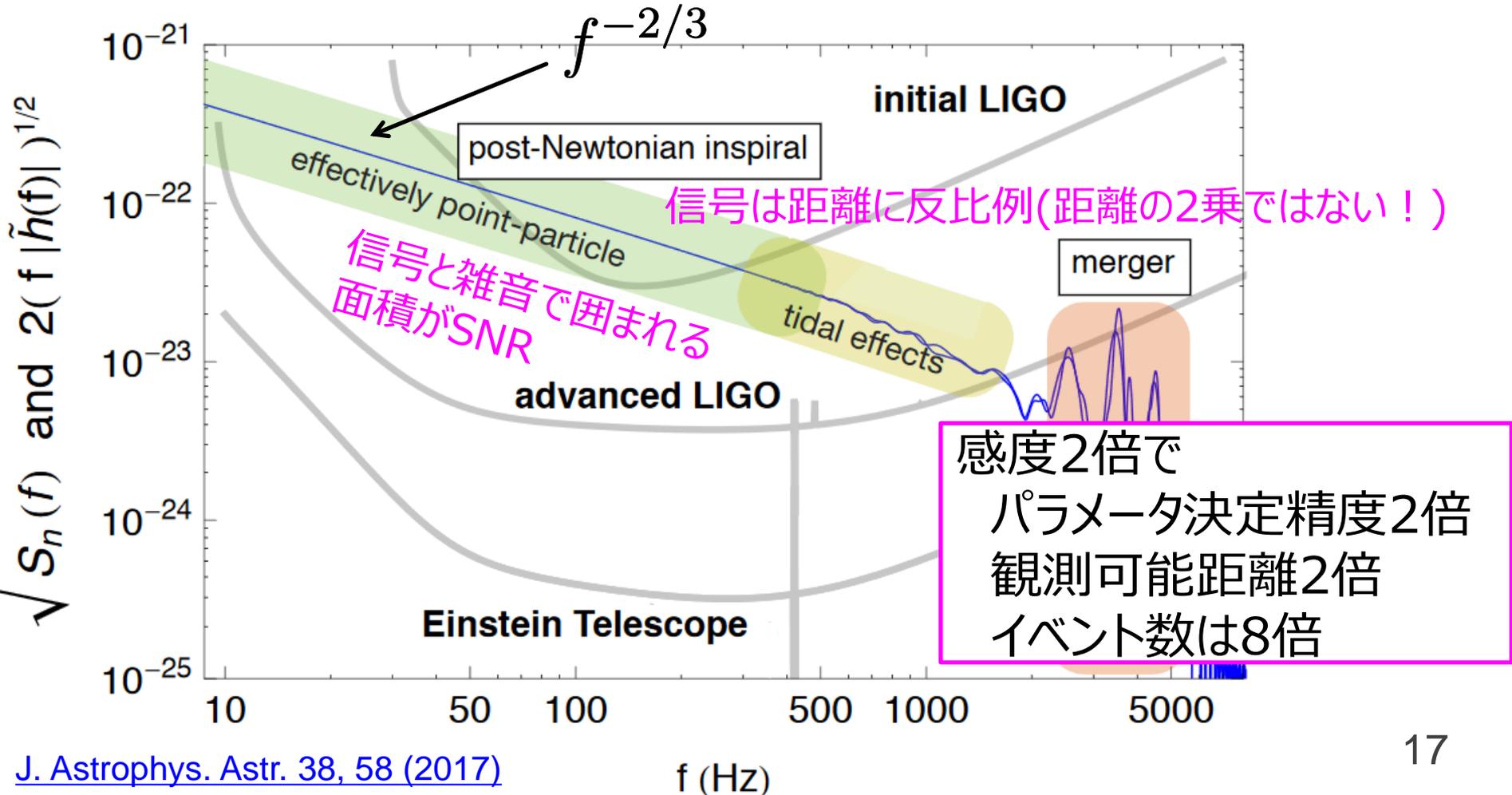
Signal recycling mirror

信号がキャンセルする前に信号を取り出すことで、腕内パワーを変えずに、実効的にフィネスを減らす

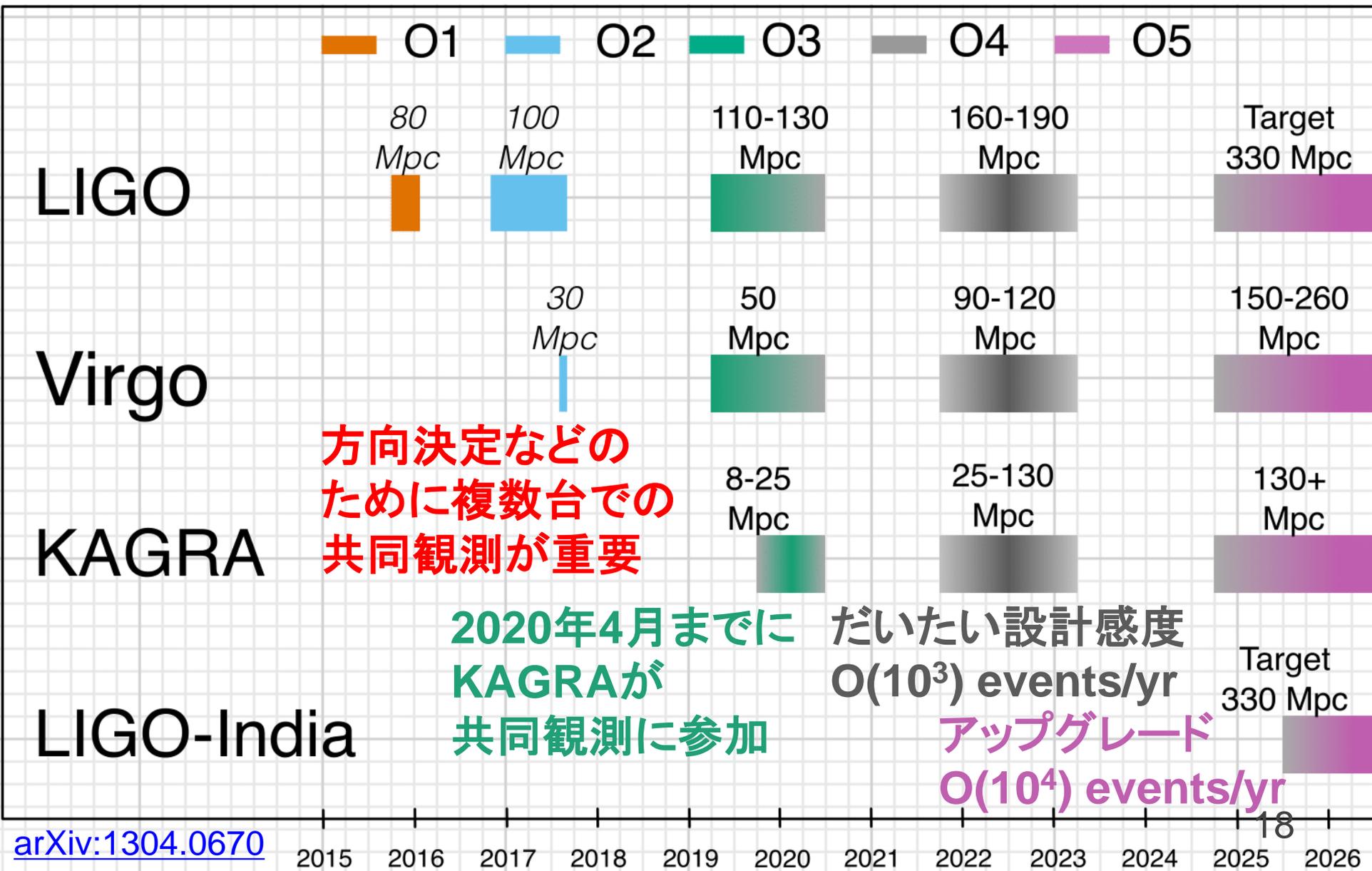


重力波検出器の性能指標

- 連星中性子星の観測可能距離で表すことが多い
- SNRが8以上になる距離、全天平均

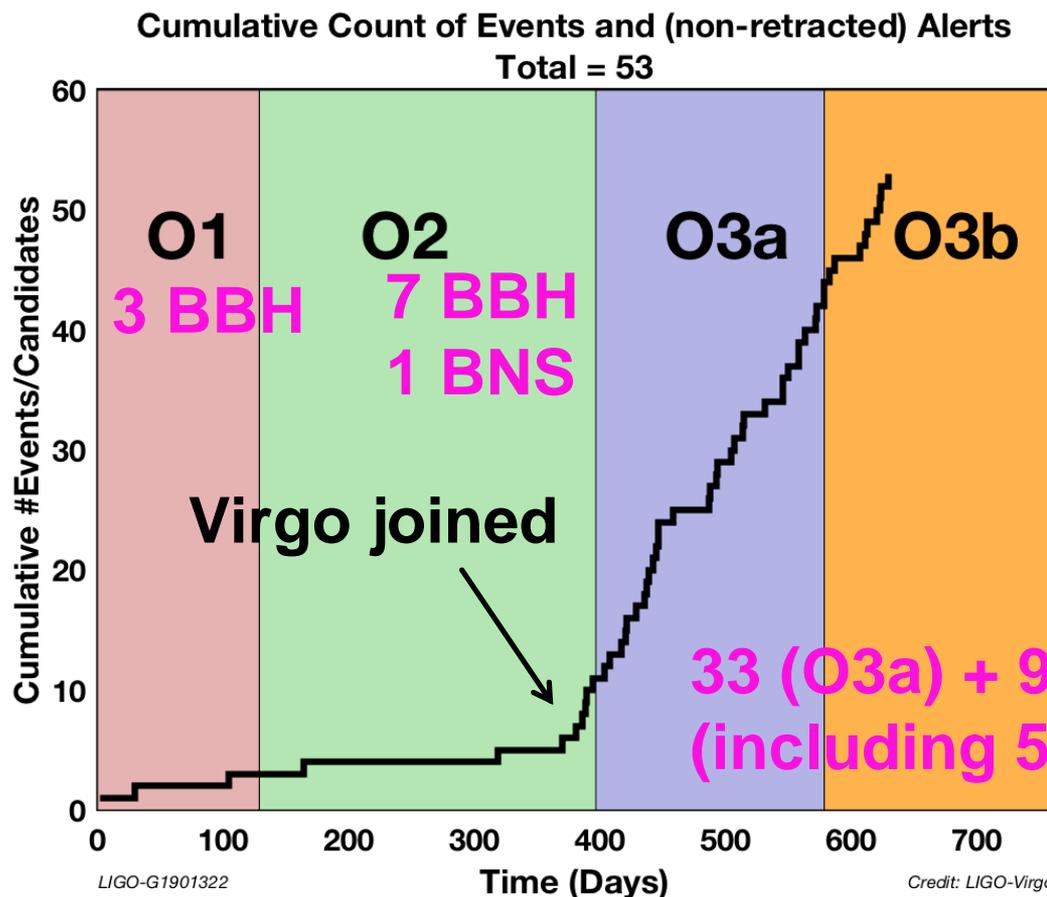


共同観測計画



LIGOとVirgoによる観測の現状

- O1で連星ブラックホール初観測
- O2で連星中性子星初観測、電磁波との共同観測
- O3 (2020年4月まで)では毎週のようにイベントが報告



O3から重力波候補は自動的に
Public Alertが出ている
(約1分以内)

<https://gracedb.ligo.org/superevents/public/O3/>

33 (O3a) + 9 (O3b) Candidates
(including 5 NSBH? 5 BNS?)

O3観測の状況

- 1台ごとの稼働率は70-75%程度
- 3台同時観測は45%程度
- 今観測中かは公開されている

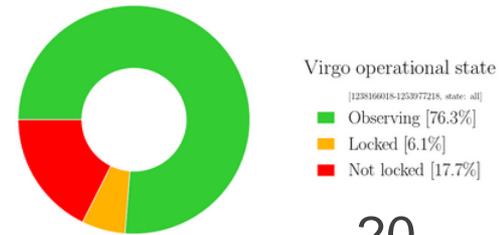
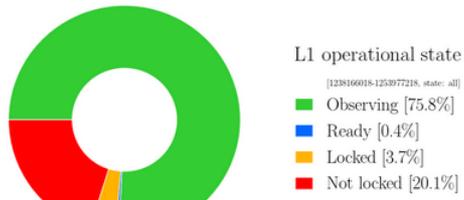
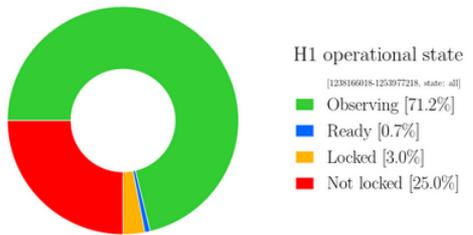
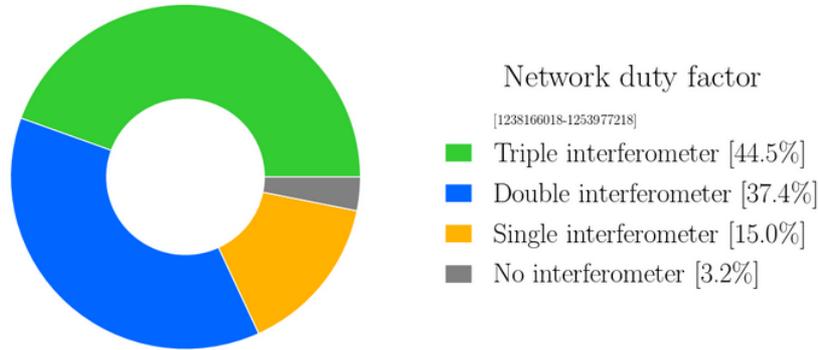
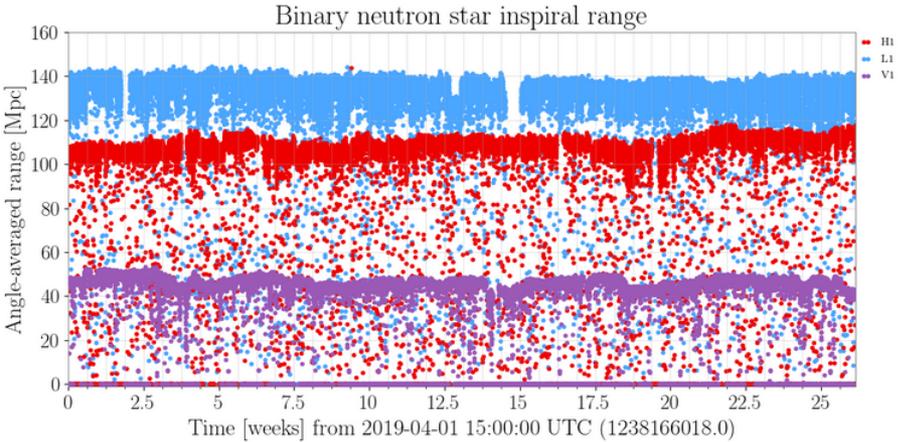
<https://ldas-jobs.ligo.caltech.edu/~gwistat/gwistat/gwistat.html>

Gravitational Wave Detector Network

Operational Snapshot as of Dec 16, 04:53 UTC

Detector	Status	Duration
<u>GEO 600</u>	Observing	4:46
<u>LIGO Hanford</u>	Observing	20:23
<u>LIGO Livingston</u>	Observing	18:57
<u>Virgo</u>	Science	20:25
<u>KAGRA</u>	Future addition	

[Detector status summary pages](#) [LVC links](#)

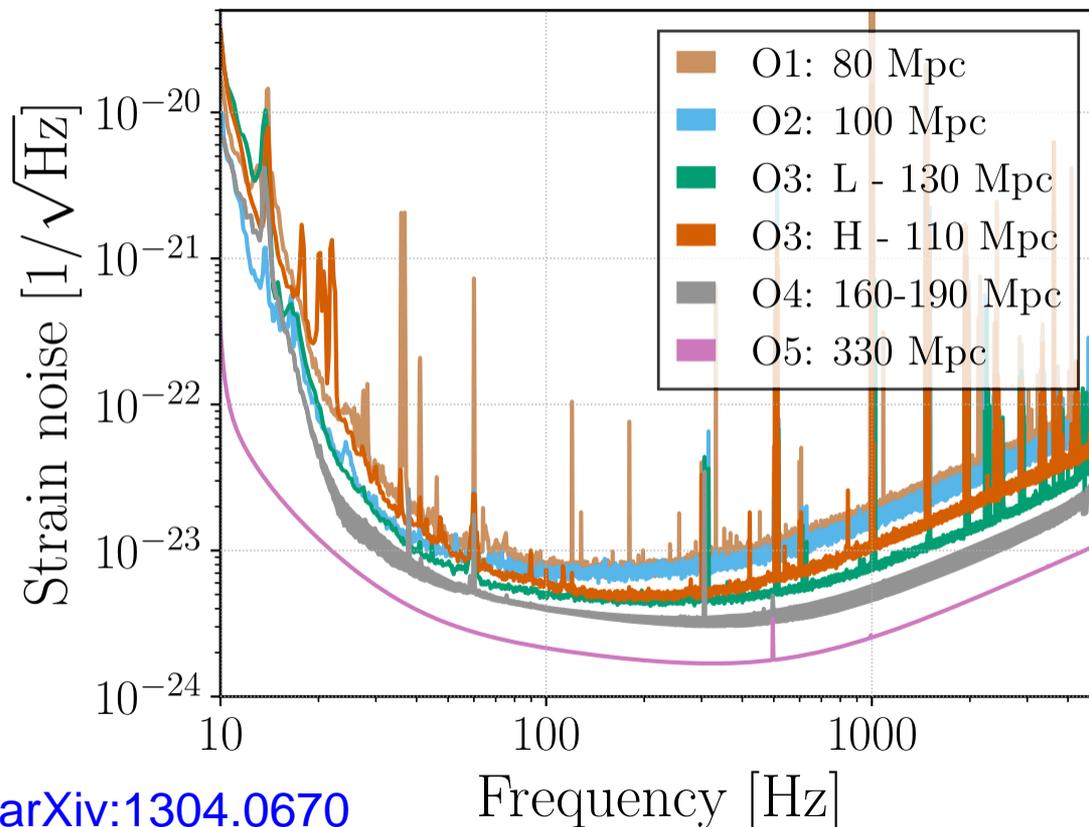


<https://summary.ligo.org/~detchar/summary/> (taken from O3a summary)

Advanced LIGOの状況

- 基線長4 km、40 kg石英鏡
- アップグレード計画(A+)で**330 Mpc**
コーティング改良、周波数依存スキューニング

LIGO

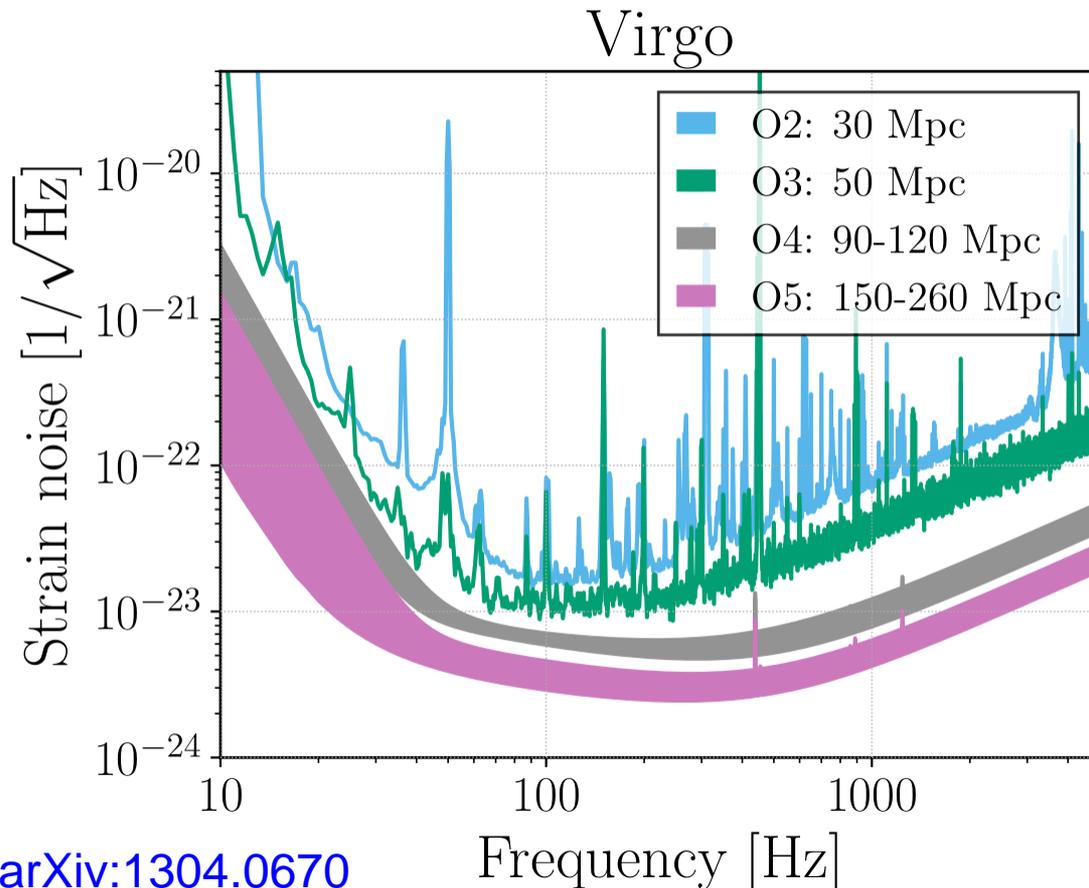


予算も承認

NSFが\$20.4M
UKRIが£10.7M
+ Australia

Advanced Virgoの状況

- 基線長3 km、42 kg石英鏡
- アップグレード計画(AdV+)で**260 Mpc**
周波数依存スキューニング、鏡の大型化など

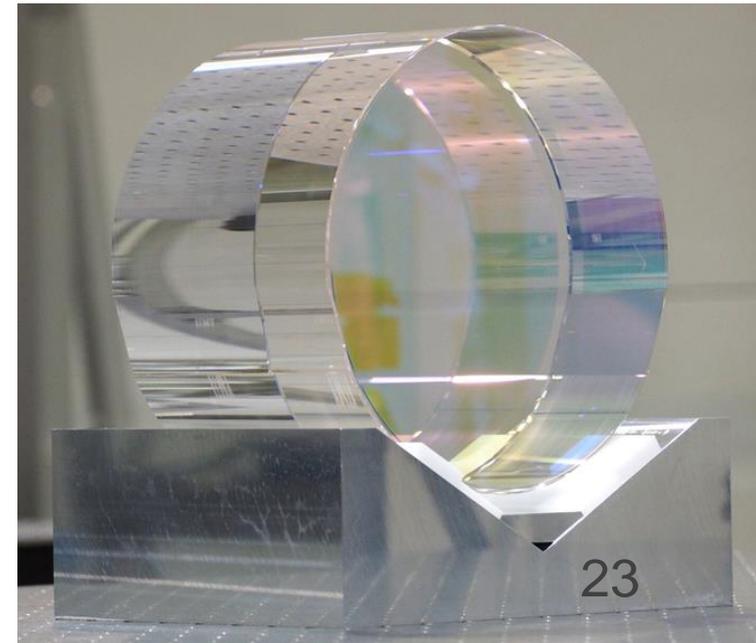
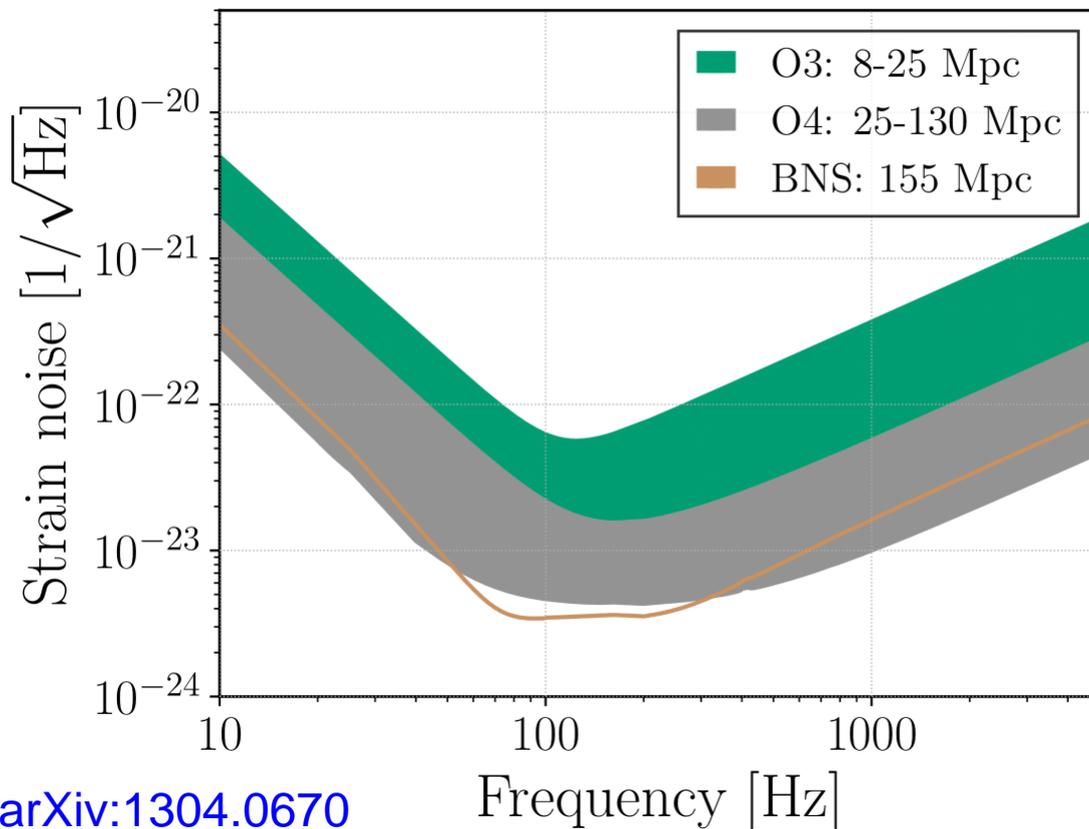


高周波でAdVの感度が設計より悪いのはsignal recycling mirrorがまだ入っていないため

KAGRAの状況

- 基線長3 km、23 kgサファイア鏡
- 設計感度**153 Mpc** (BNSに最適化した狭帯域運転の場合)
- LVより感度悪いが、2020年2月に**運転開始予定**

KAGRA

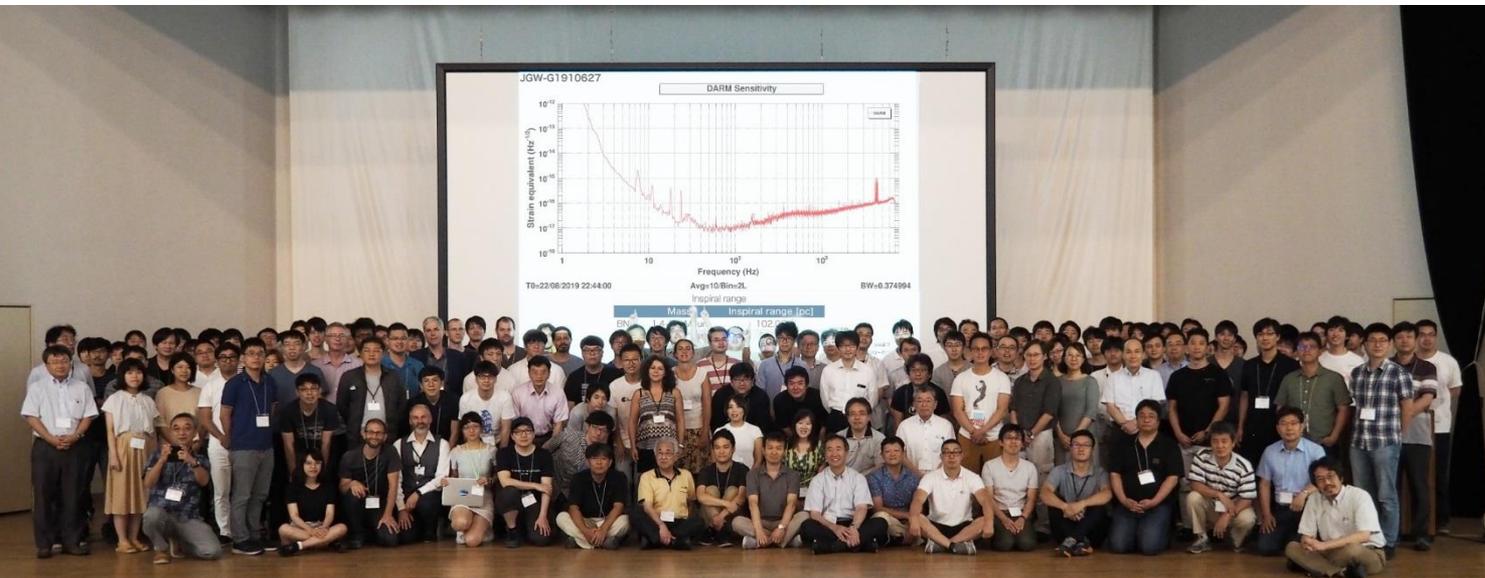
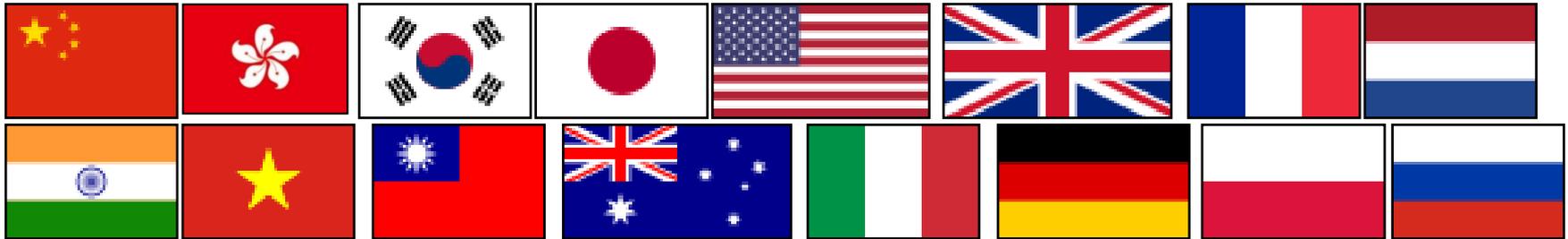


KAGRA計画



- 2010年に予算化
- 110 institutes, 360+ collaborators (200 authors)
- 低温と地下建設が特徴

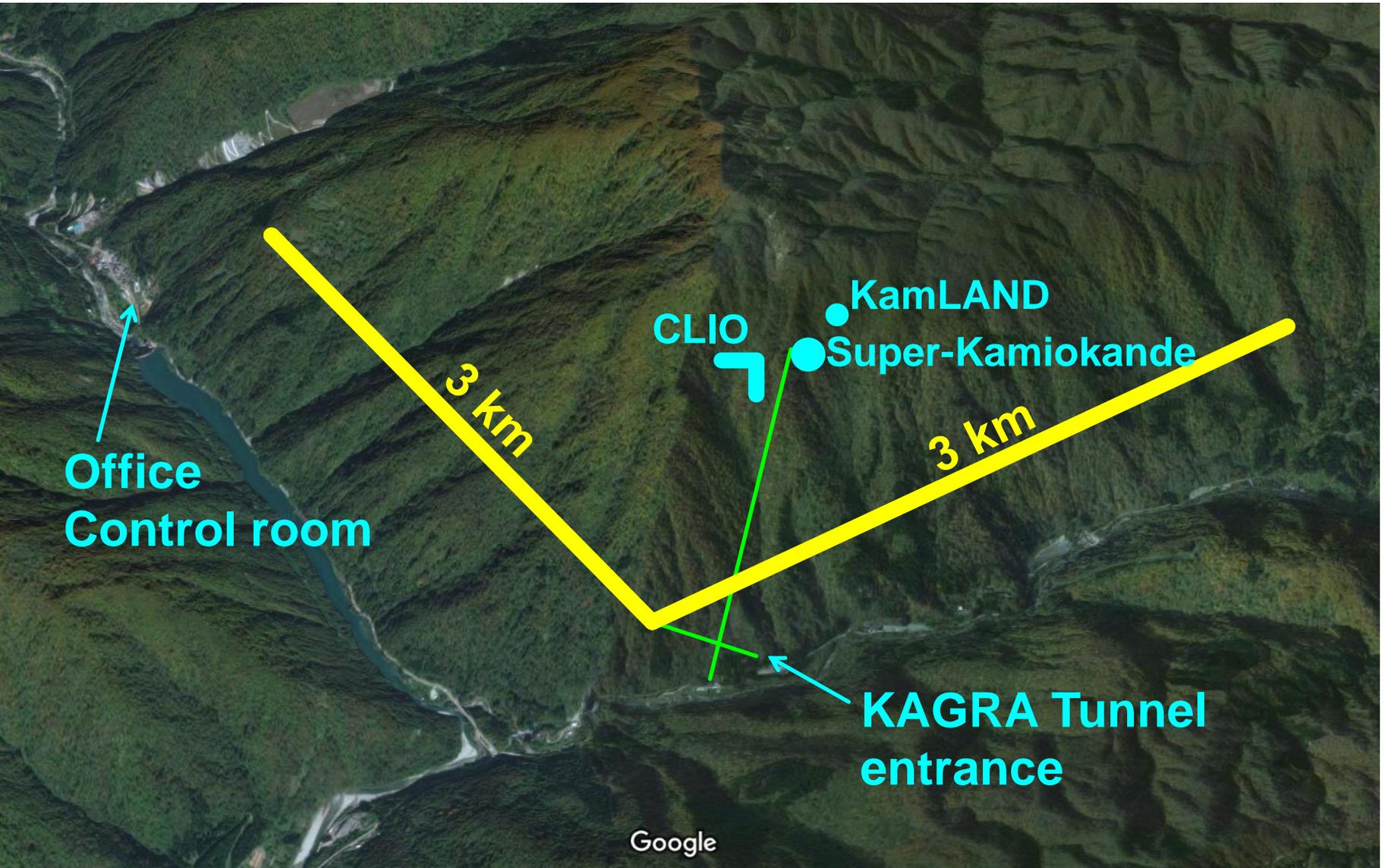
参加大歓迎！



Aug 2019
F2F meeting
@ Toyama

KAGRAの干渉計

- 岐阜県飛騨市 池ノ山の中にある



かぐらトンネル

- 2本の3km真空パイプの中をレーザー光が往復



Entrance
(2016.2.8)



10月4日にKAGRA完成記念式典

- ほぼ全装置のインストール完了
- LIGO, Virgoとの共同観測に関する協定を締結



共同観測の条件は
最低 1 Mpc

https://www.u-tokyo.ac.jp/focus/ja/articles/z0508_10010.html



KAGRAの観測参加の重要性

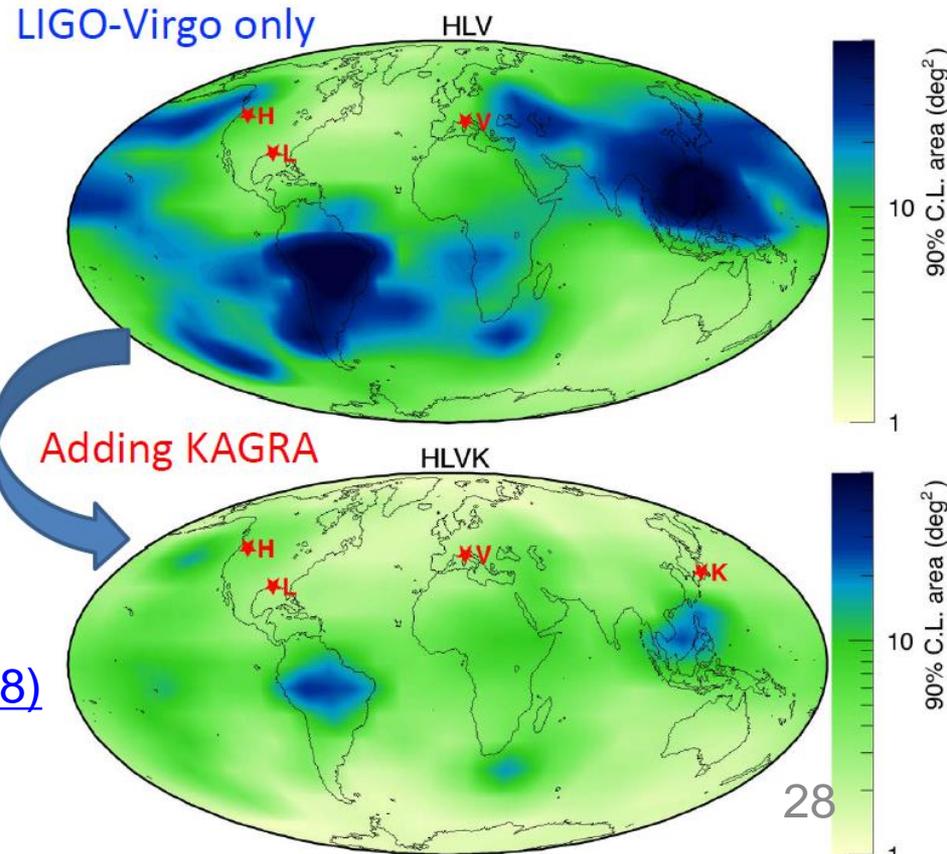
- 3台以上での同時稼働率が向上する
LHV 34 % → LHVK 65 %
(assuming 70 % duty factor for single detector)

S. Haino,
[JGW-G1808212](#)
(設計感度の場合)

- 波源方向決定精度が上がる
(ざっくり3倍)
 - 波源の起源
 - ハッブル定数測定
などなど

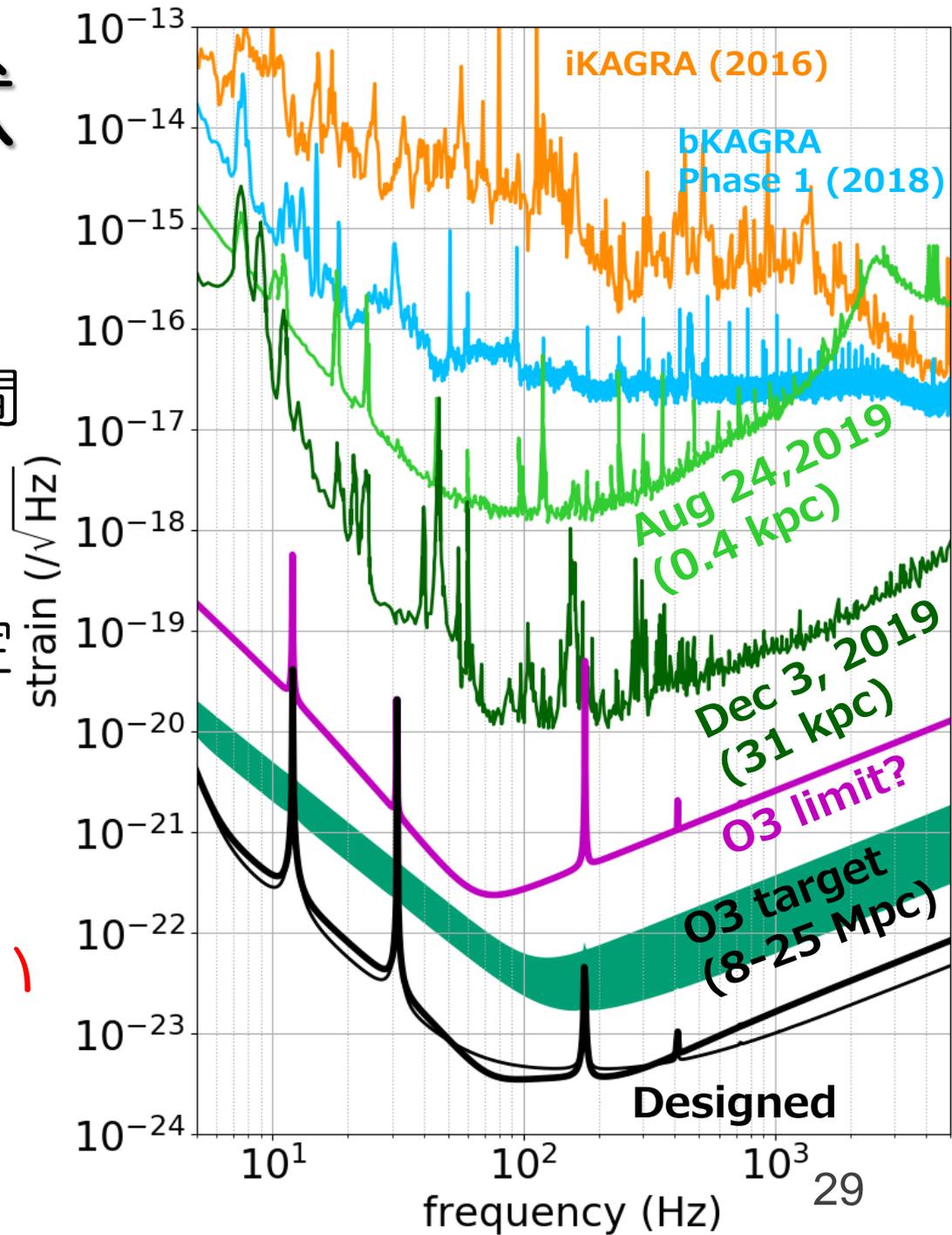
- 重力波の偏極測定
(一般相対論を超える
偏極モードの分離)

H. Takeda+, [PRD 98, 022008 \(2018\)](#)



KAGRAの現状

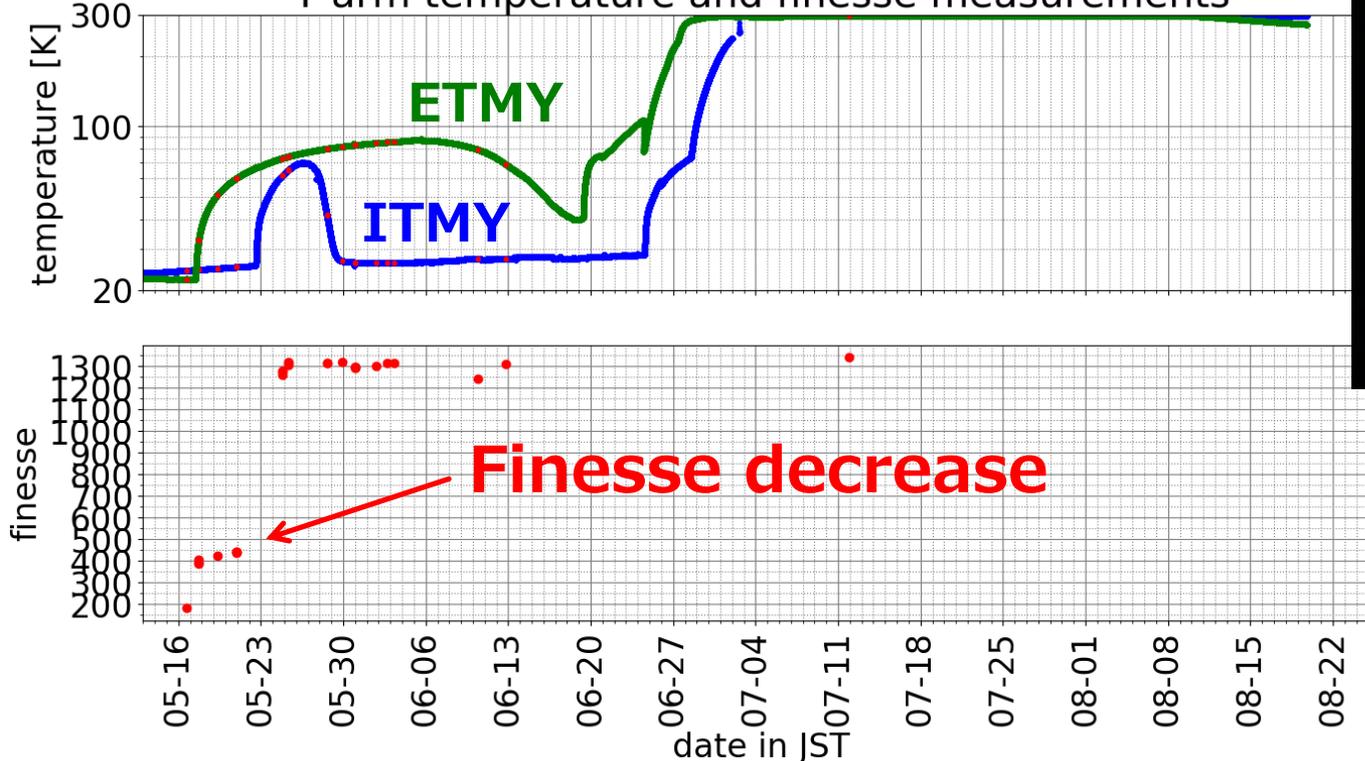
- 現在の感度は最大 30 kpc程度
- 12月17日から1週間の試験運転
- 2020年2月から(観測)運転開始予定
- 現在まで power recyclingと signal recyclingがうまく動いていない
 - 冷却による霜
 - 複屈折



冷却による霜の影響

- 腕共振器のフィネスが30 K程度以下で低くなる
- 残留ガスが鏡で氷結したため
- よりよい真空で冷やす必要がある
- O3では低温に冷やせない可能性がある

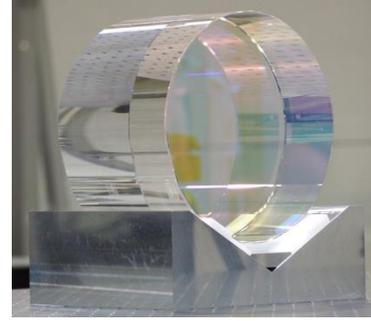
Y-arm temperature and finesse measurements



Frosted mirror
seen with
green laser

Y. Enomoto+, [klog #9861](#)

複屈折の影響

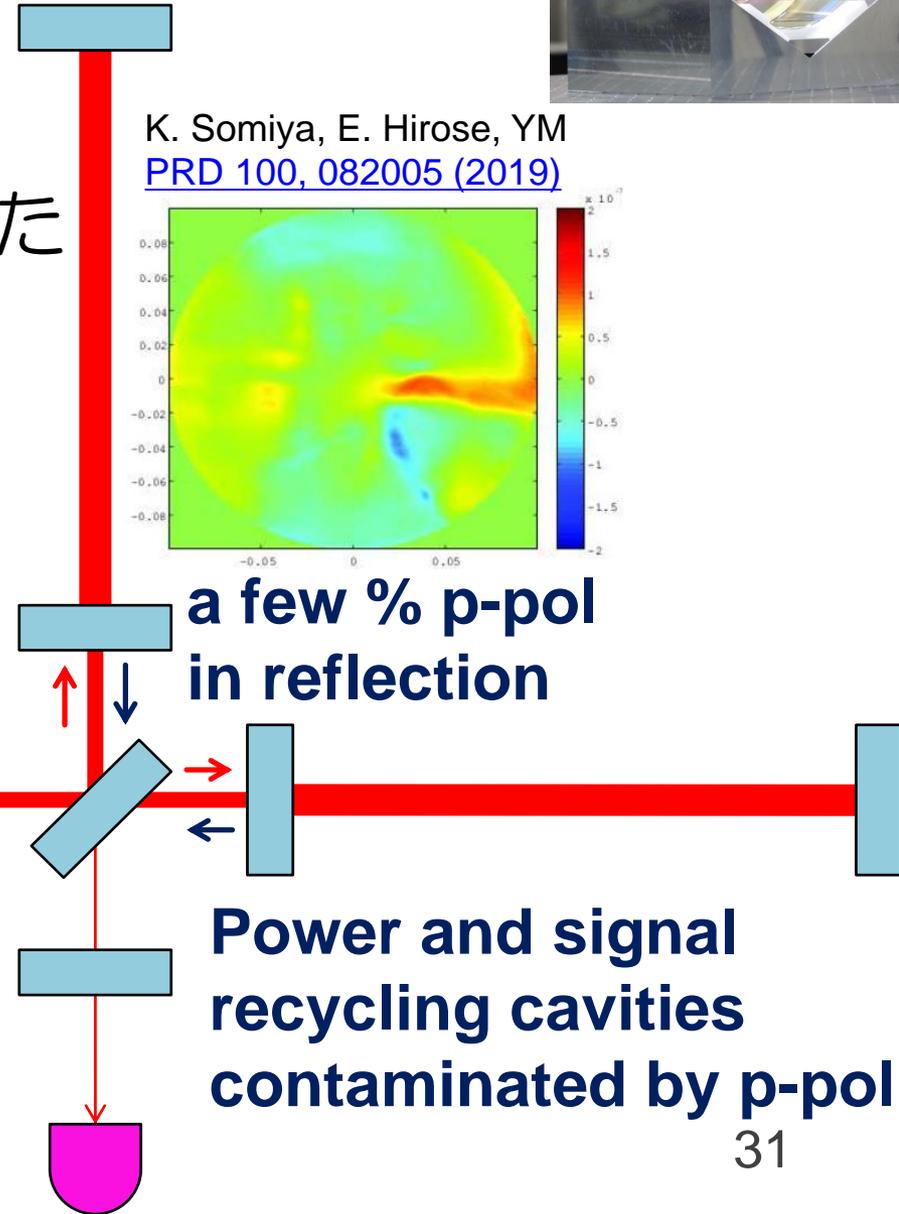


- サファイア結晶軸と光軸がずれており、**複屈折の非一様性**もあった
- O3参加時は Power recycling と signal recycling なしになる見込み(光学ロスが大きくなり、感度が悪い)

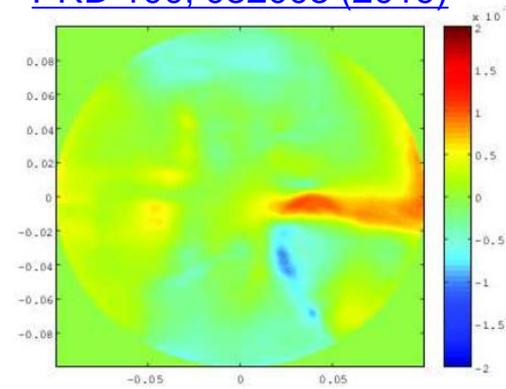
Laser

s-pol →

p-pol beam shape from ITM reflection



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



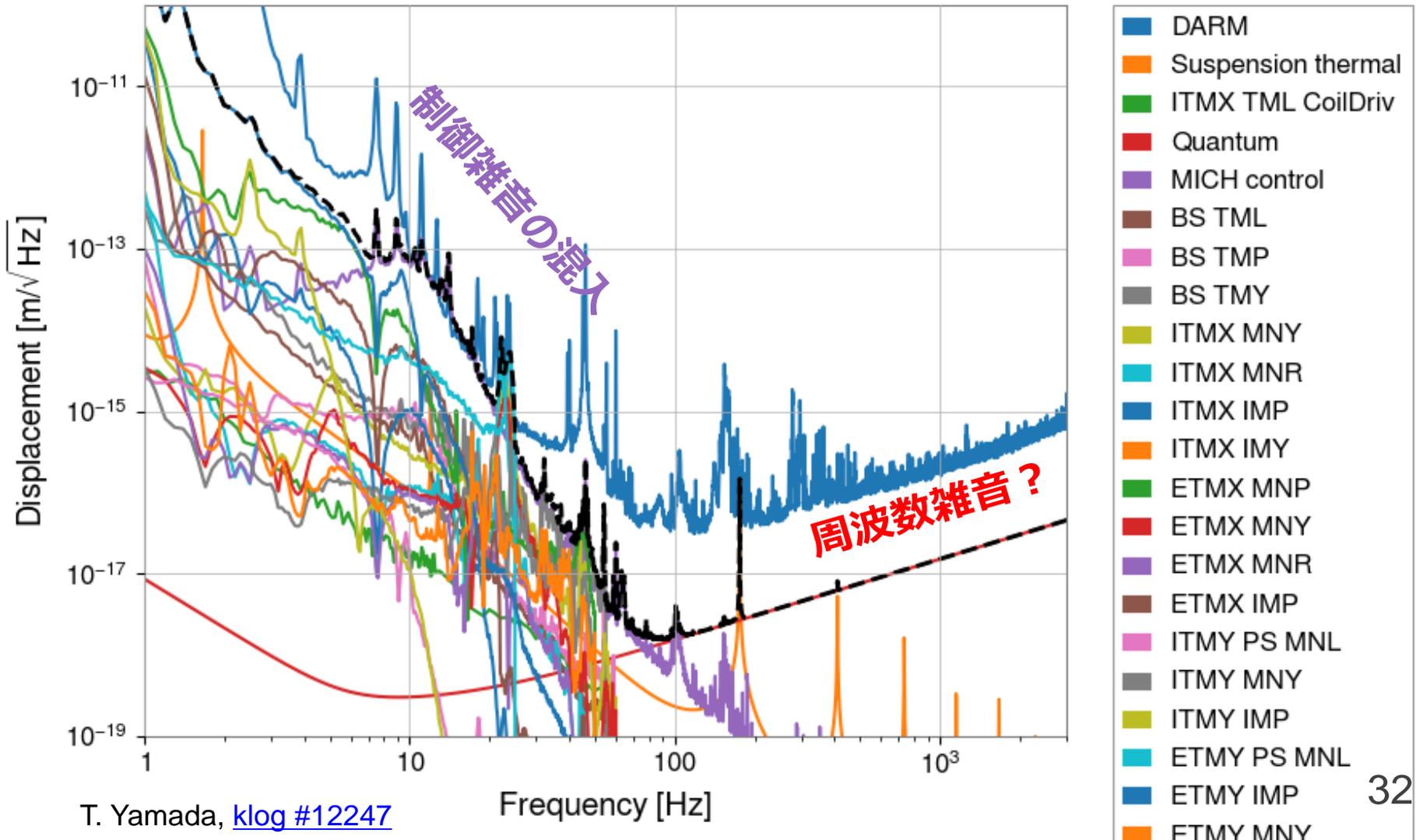
a few % p-pol in reflection

Power and signal recycling cavities contaminated by p-pol

KAGRAの現在の雑音源

- 制御雑音やレーザー周波数雑音で感度が制限

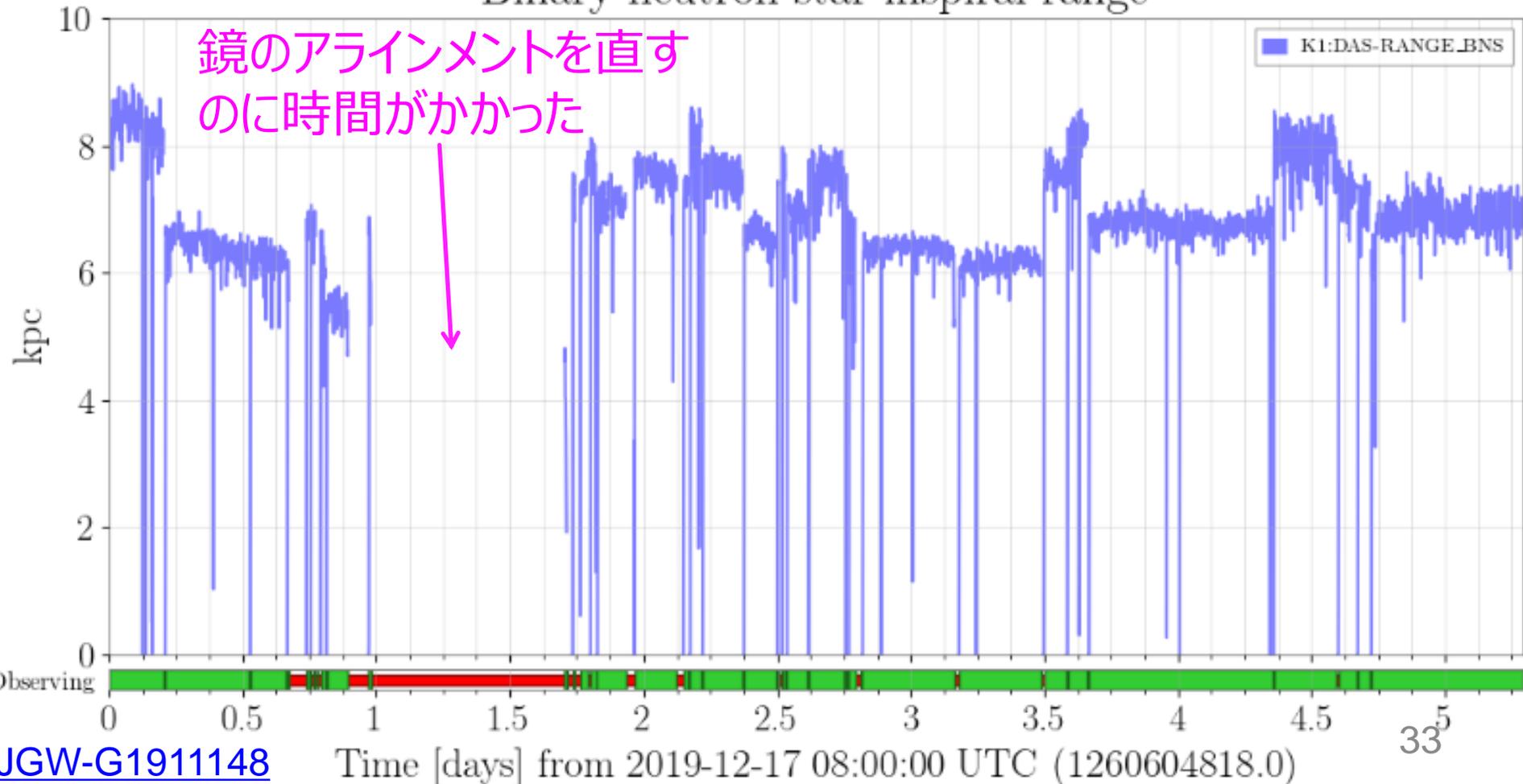
NB from 2019 Dec 6 13:12:00 to 2019 Dec 6 13:17:00



12月17-24日の試験運転

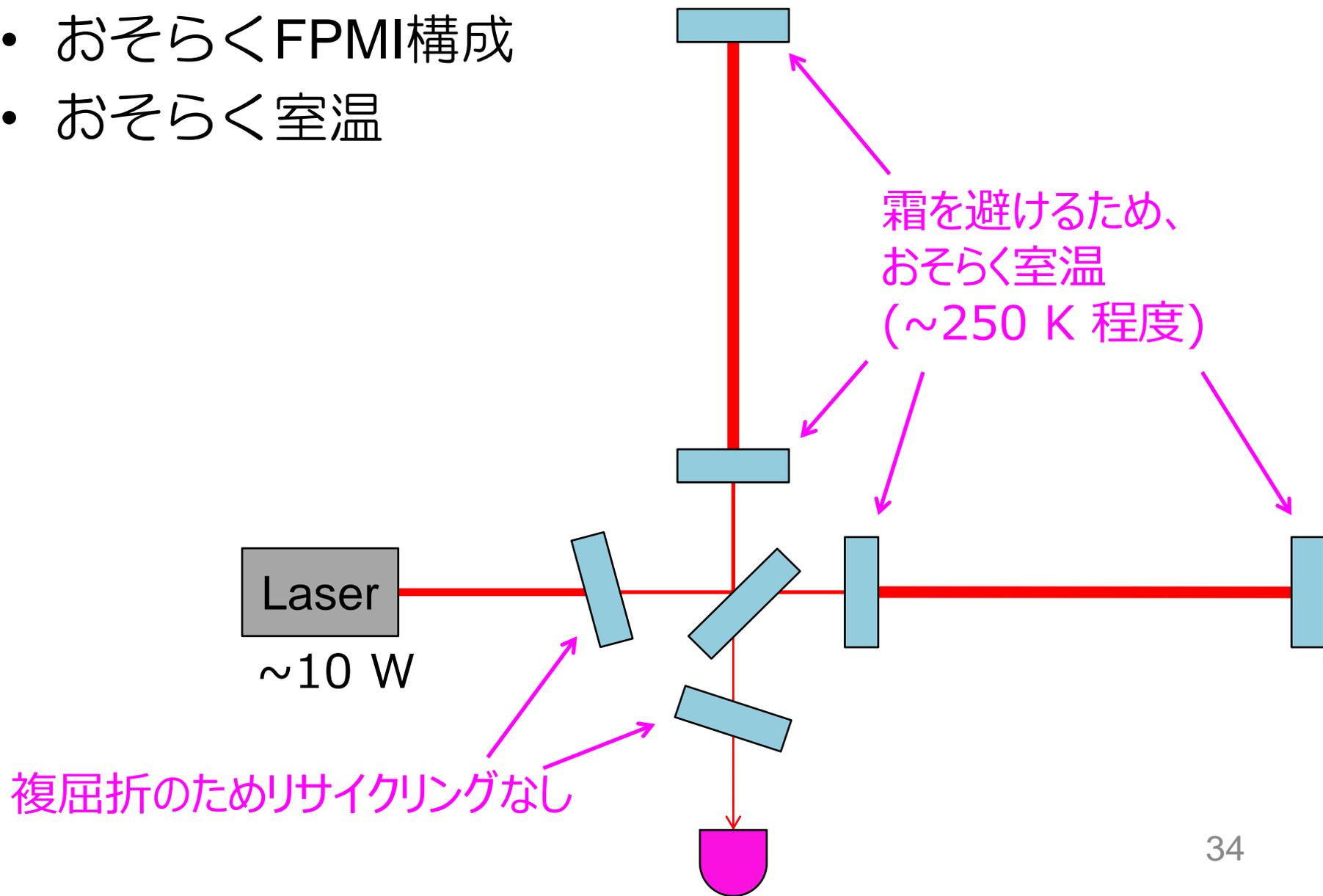
- 7 kpc程度の感度 (直前に電気系の不具合があったため)
- 稼働率 80%程度

Binary neutron star inspiral range



KAGRA in O3 (2020年2月-4月)

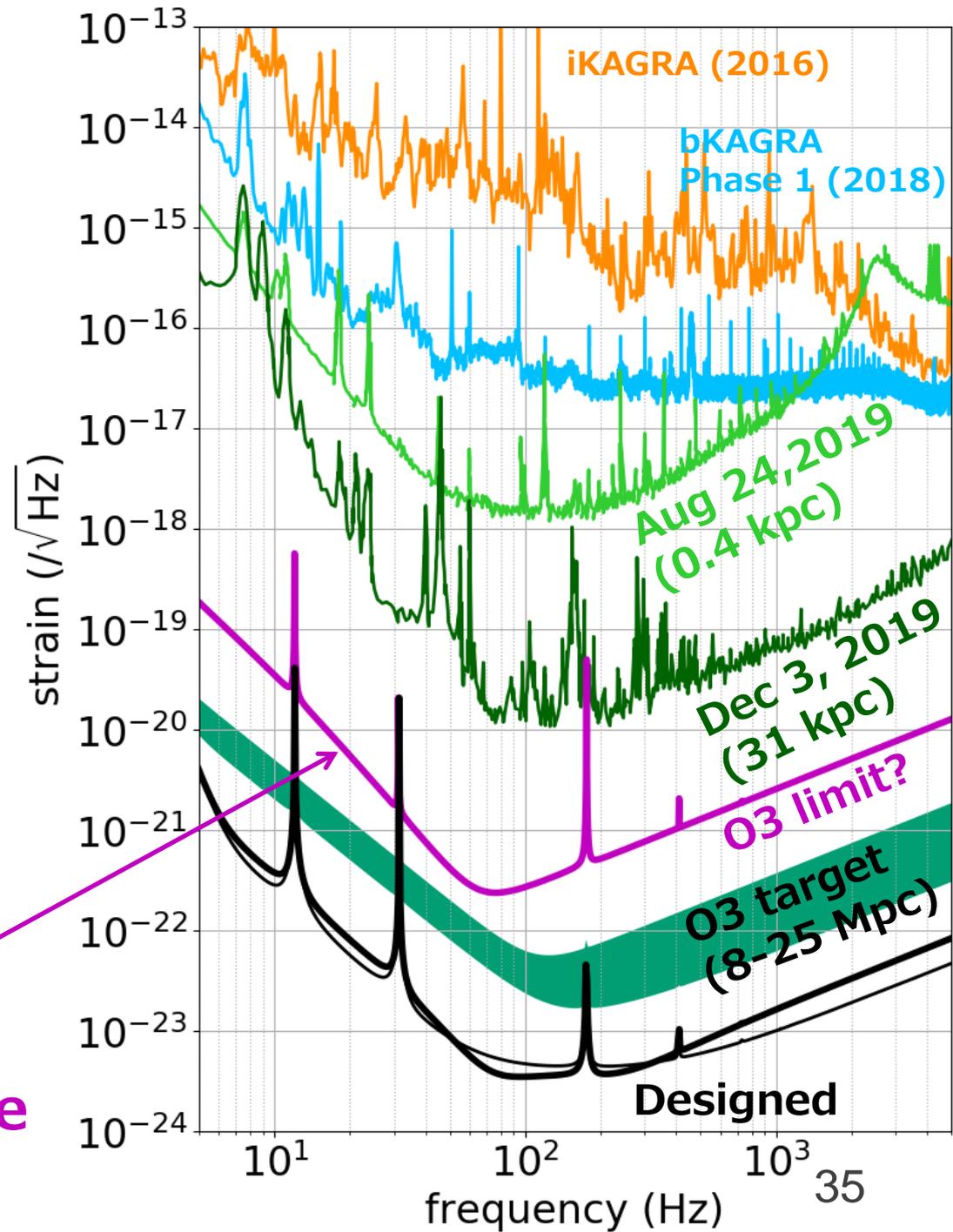
- おそらくFPMI構成
- おそらく室温



O3での感度

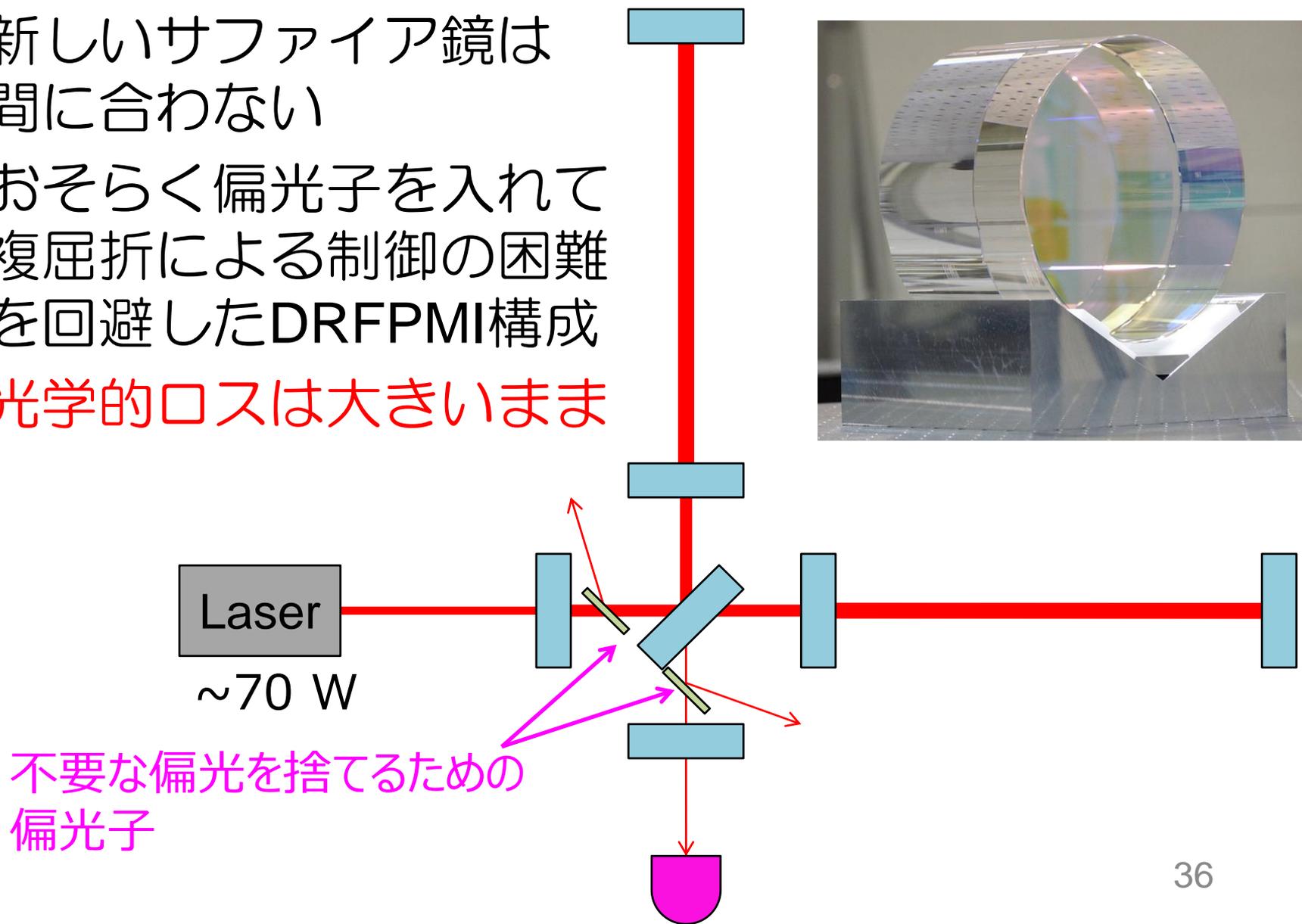
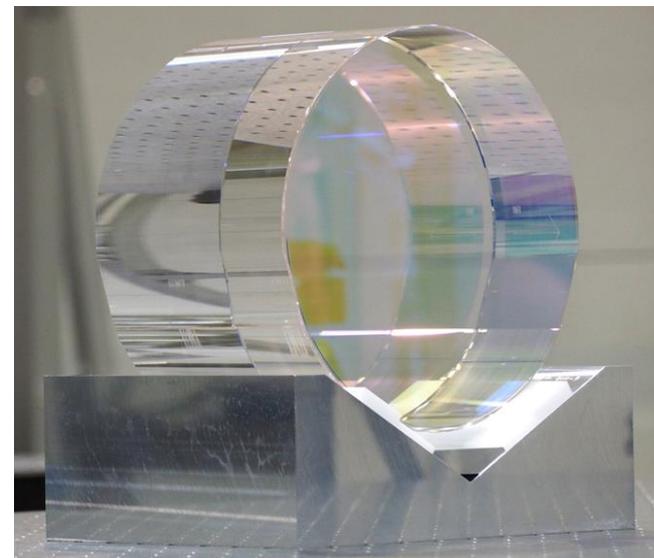
- おそらくFPMI構成
- おそらく室温
→ 最大でも
2 Mpc程度
- 1 Mpcが共同観測
の条件だが、
出なくても
2020年2月から
運転開始予定

O3 FPMI limit at
room temperature
(~2 Mpc)



KAGRA in O4 (2021-2023)

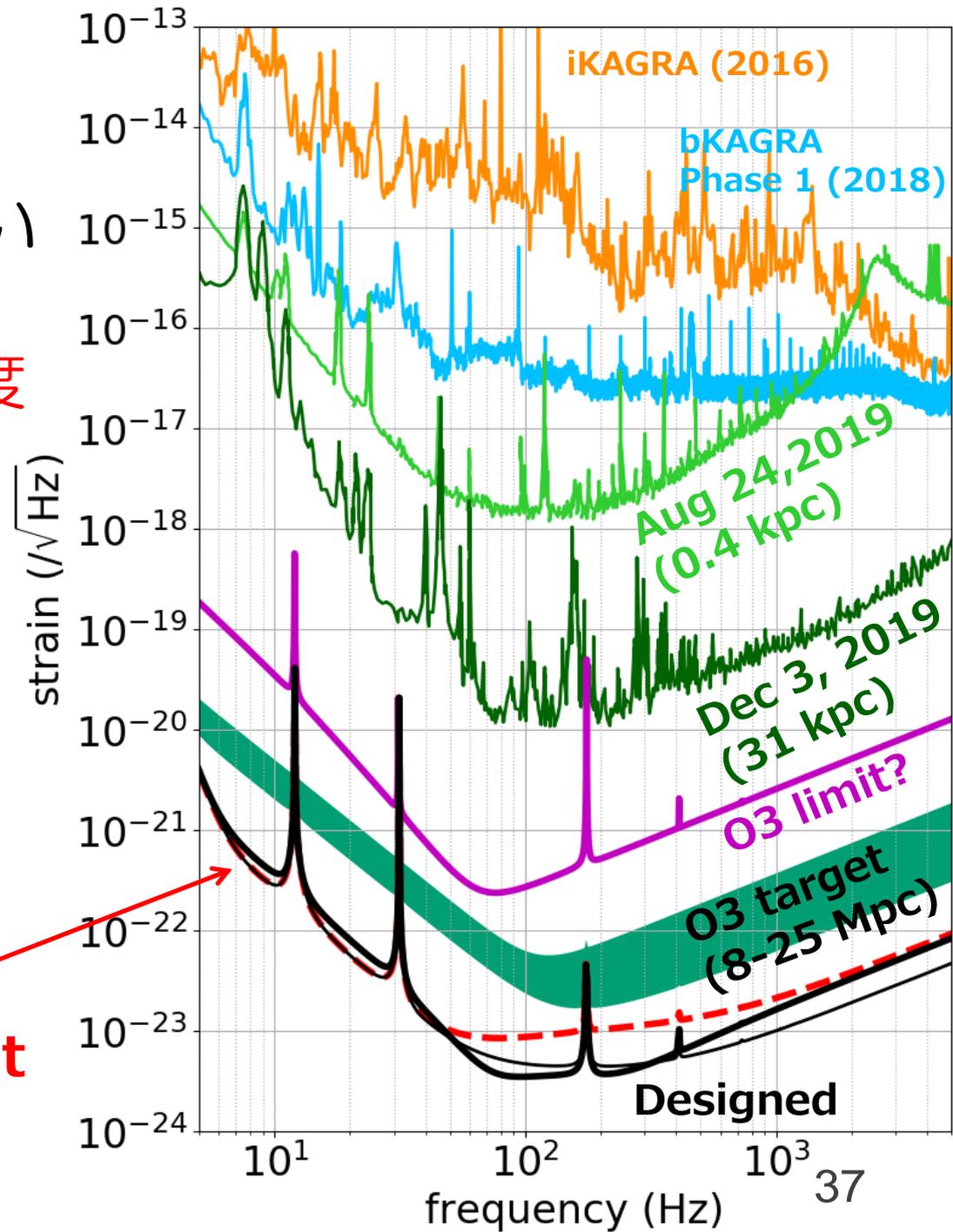
- 新しいサファイア鏡は間に合わない
- おそらく偏光子を入れて複屈折による制御の困難を回避したDRFPMI構成
- 光学的ロスは大いまま



不要な偏光を捨てるための偏光子

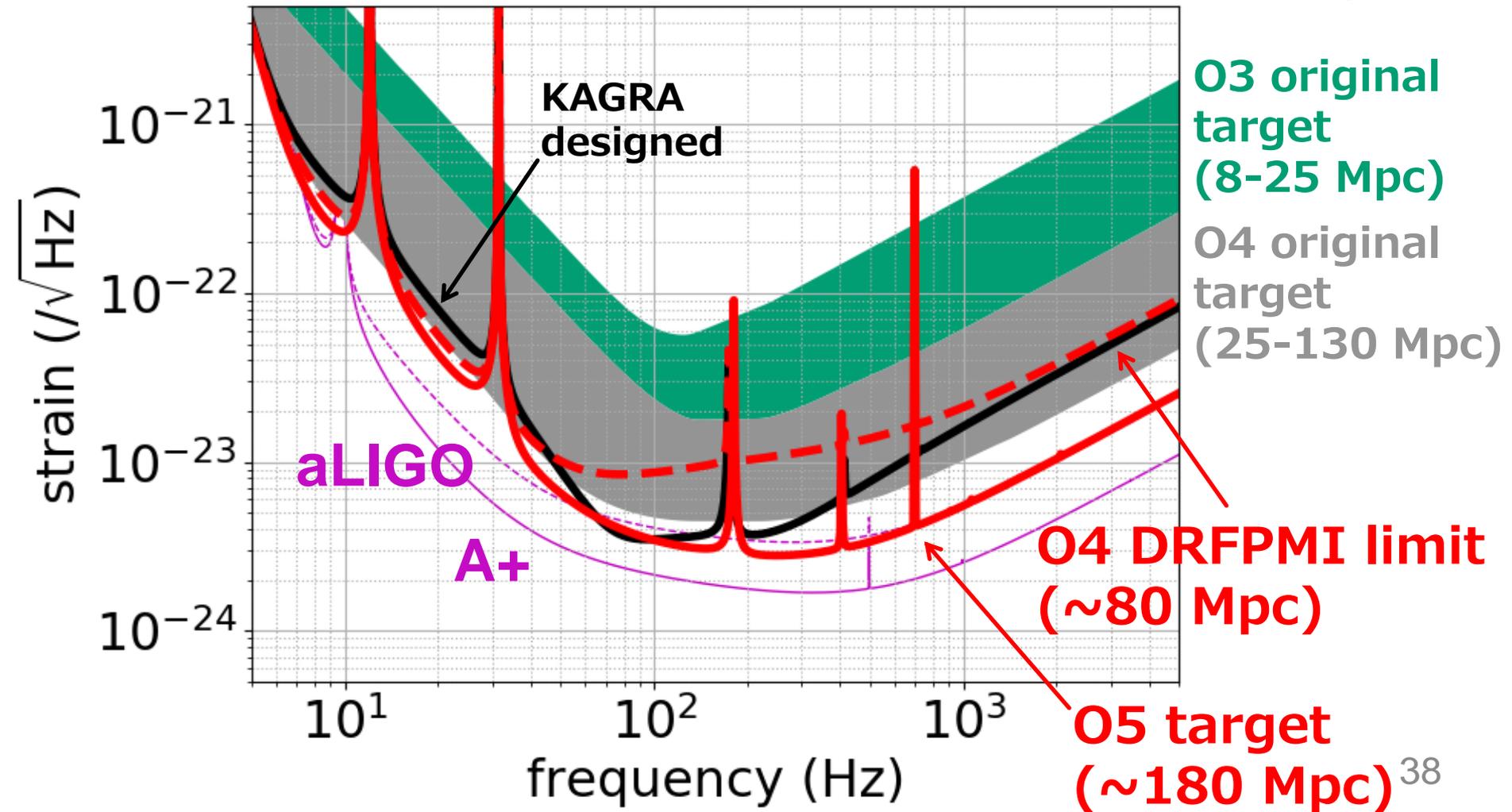
O4での感度

- 光学的ロスの大きいDRFPMI構成
→ 最大80 Mpc程度



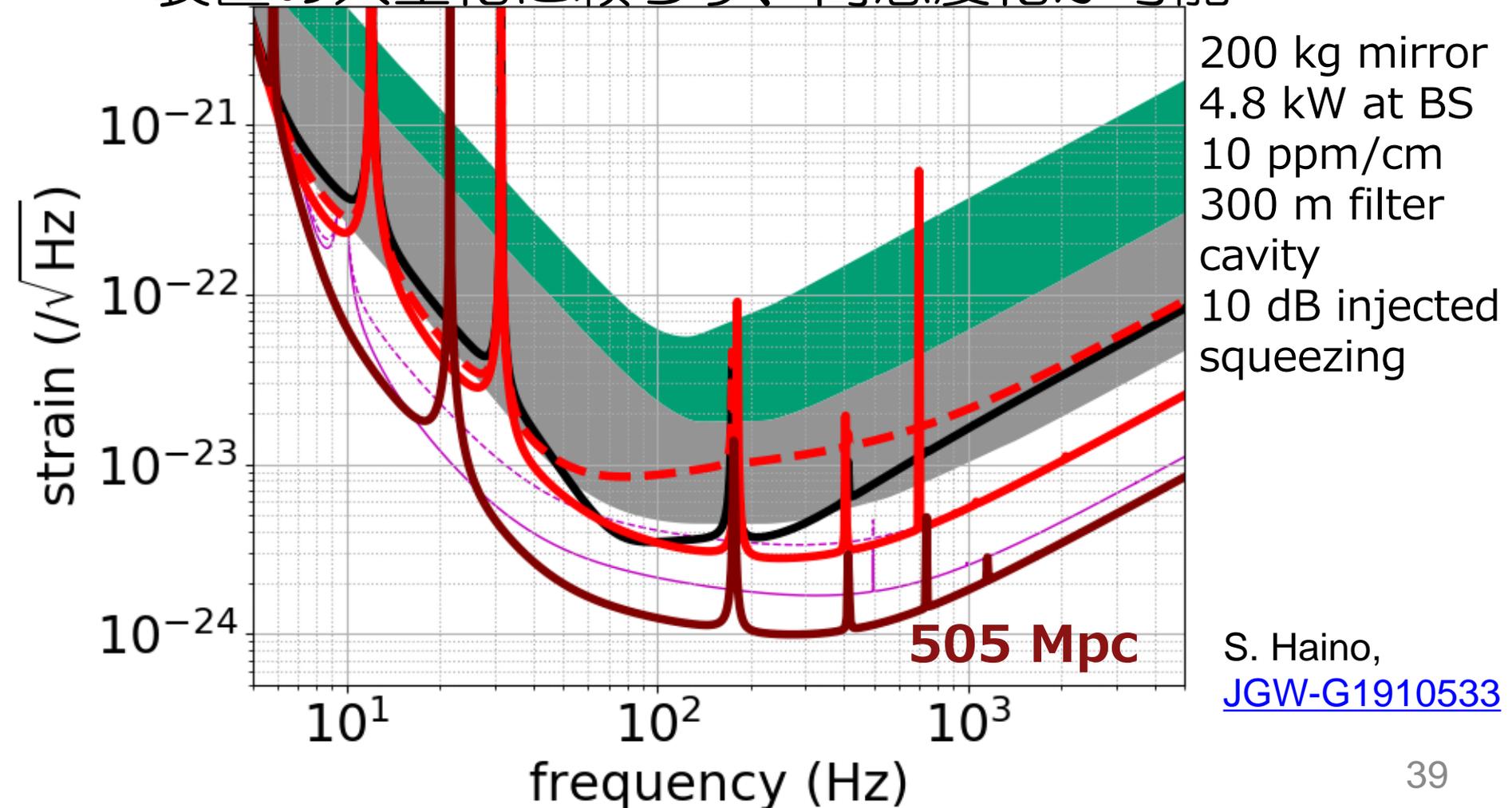
O5 (2024-)の計画

- 複屈折の少ない新しいサファイア鏡と周波数依存スクイーミングの導入(60 m filter cavity, 10 dB injected)



より長期的な将来計画案

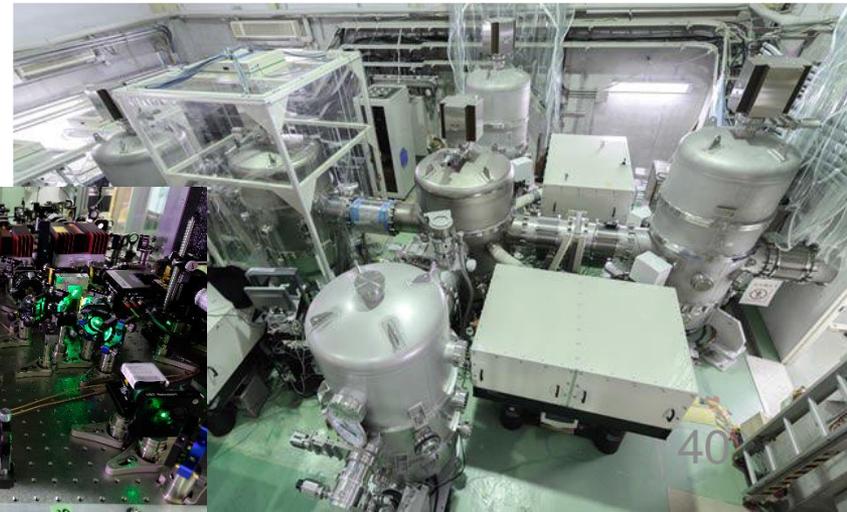
- (ほどほどに)楽観的になれば500 Mpcも可能
- 装置の大型化に頼らず、高感度化が可能



R&Dが活発に行われている

- TAMA300施設(忘却の彼方...)を用いた**周波数依存スクリーニング**の実証実験 (国立天文台) [E. Capocasa+, PRD 93, 082004 \(2016\)](#)
- サファイア鏡の熱吸収、複屈折の測定 (国立天文台)
別の会社? アニールリング?
- 低温での**コーティング熱雑音**の直接測定実験 (国立天文台)
- **重力勾配雑音**測定器の開発 (東京大学) [JGW-G1808966](#)
- **光ばね**による感度向上
実証実験
(東京工業大学,
東京大学)

.....などなど

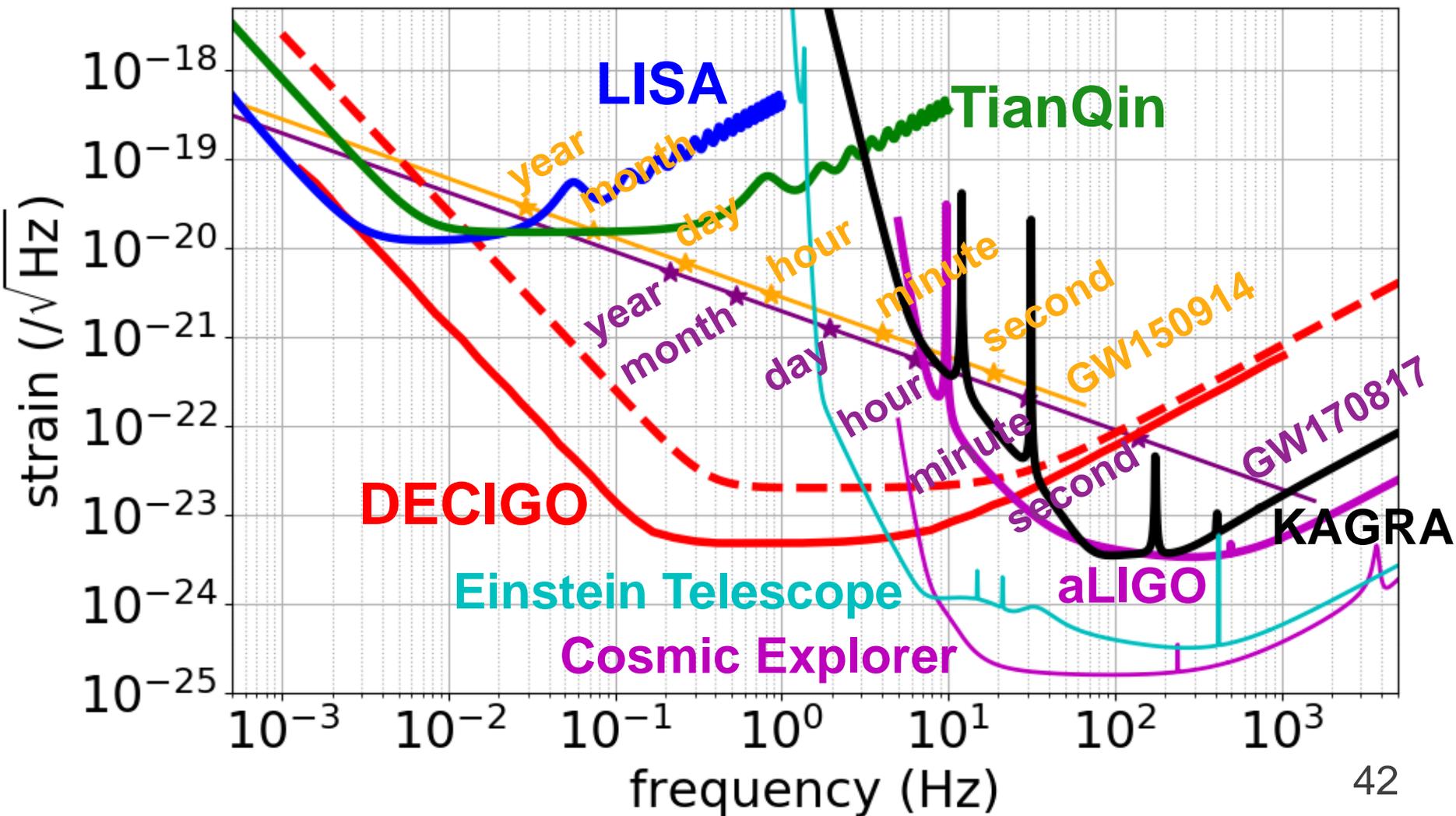


重力波観測の今後

- こうした感度向上によりイベント数と、重力波源のパラメータ推定精度を上げることが可能
 - 重い恒星質量ブラックホールの起源
 - 連星中性子星合体と重元素合成の関係
 - 中性子星の状態方程式
 - ハッブル定数の精密測定
 - ブラックホールリングダウンの測定によるNo-hair theoremの検証
 - 一般相対論を超える偏極モードの探査
 - また、超新星爆発のようなレアイベントの検出可能性も上げることができる
- まだまだ検出器の技術開発が重要

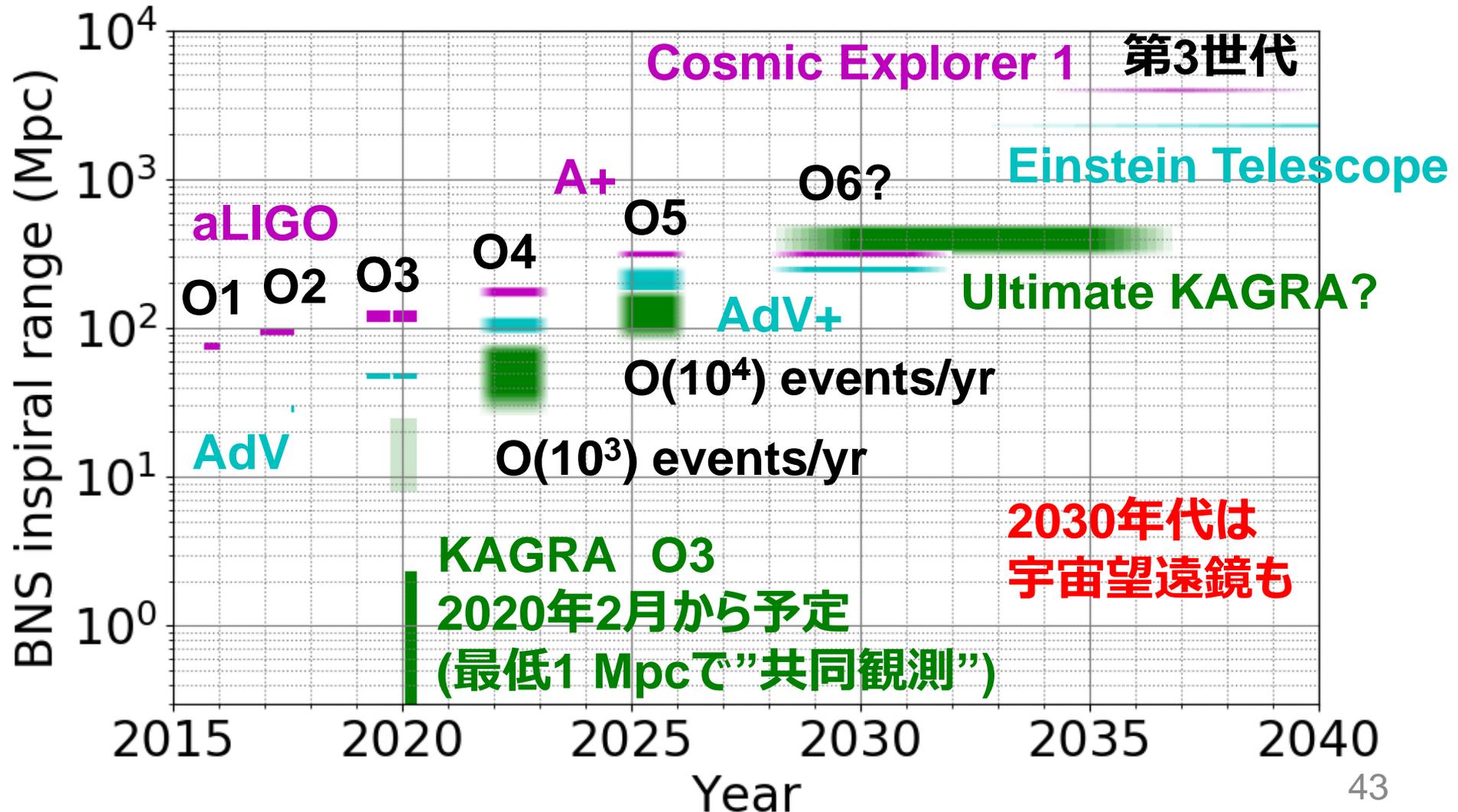
高感度化と多波長重力波観測

- 2030年代以降は地上の第3世代、宇宙重力波望遠鏡



まとめ

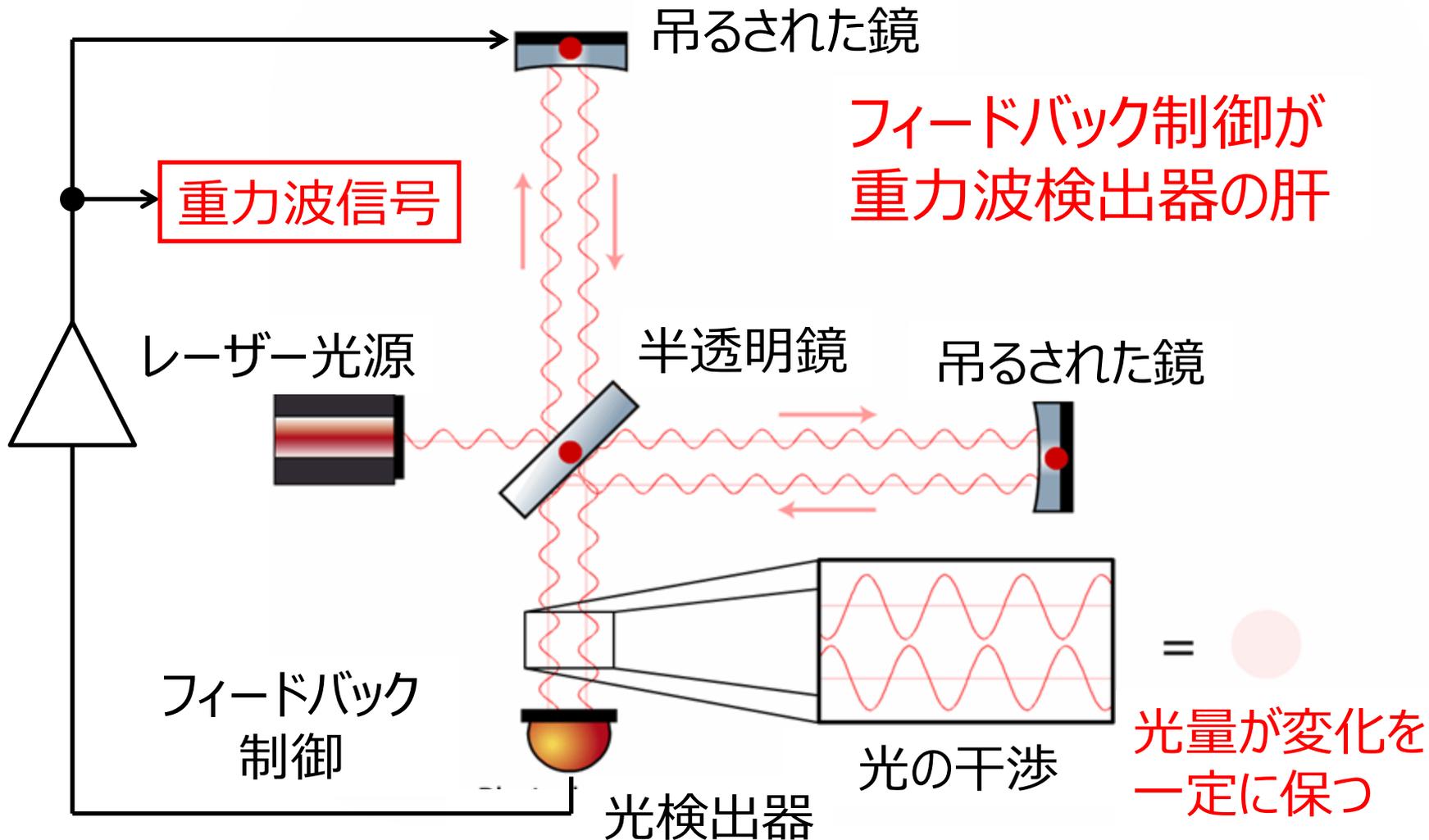
- 重力波物理学・天文学はまだまだ始まったばかり



Supplemental Slides

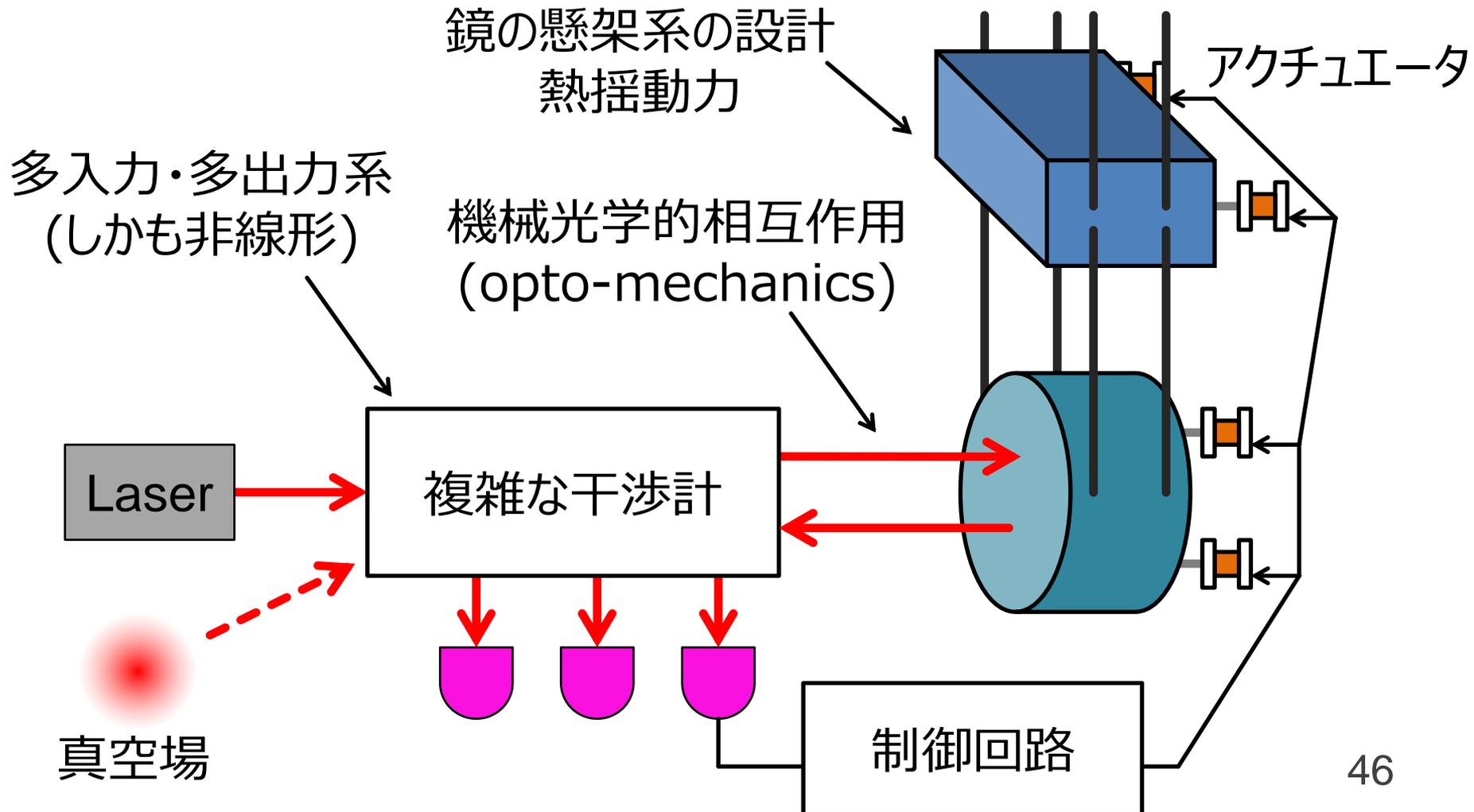
レーザー干渉計の制御

- 干渉縞が変化しないよう鏡の位置を制御



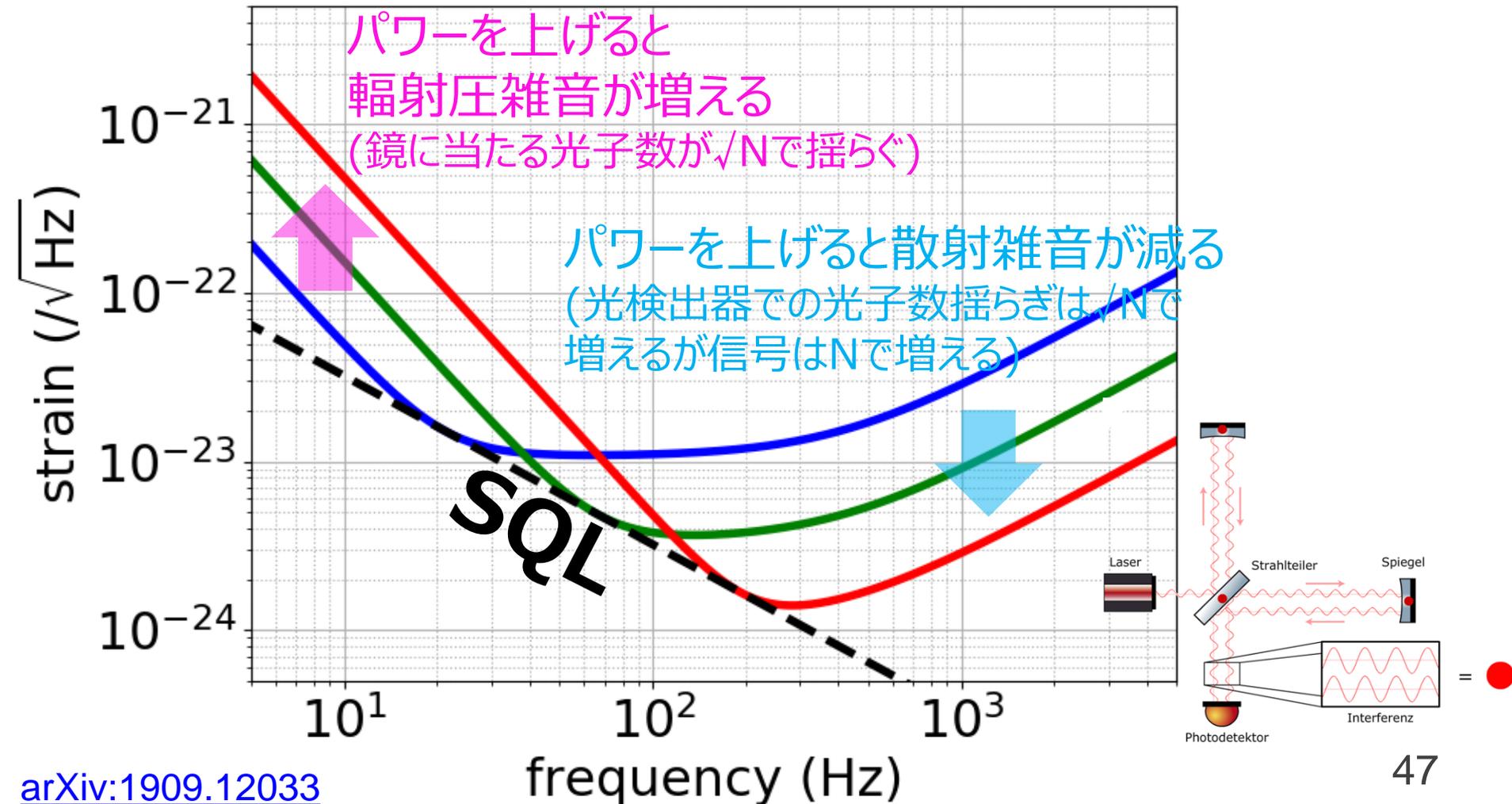
干渉計の深遠な世界

- 干渉計の制御や感度設計は複雑でそれ自体が面白い



量子雑音と標準量子限界

- 単純にレーザーパワーを変えるだけでは超えられない感度限界(**Standard Quantum Limit**)が存在する



量子雑音の表式

- 量子雑音

$$\sqrt{S_h(f)} = \sqrt{\frac{h_{\text{SQL}}^2}{2} \left(\frac{1}{\kappa} + \kappa \right)}$$

レーザー光の
位相雑音と
振幅雑音に相当
→不確定性関係

レーザー周波数

散射雑音

輻射圧雑音

レーザーパワー @ BS

$$8\omega_0 I_0$$

$$\kappa = \frac{8\omega_0 I_0}{mL^2\omega^2(\gamma^2 + \omega^2)}$$

鏡の質量

基線長

腕共振器の
線幅

重力波の周波数

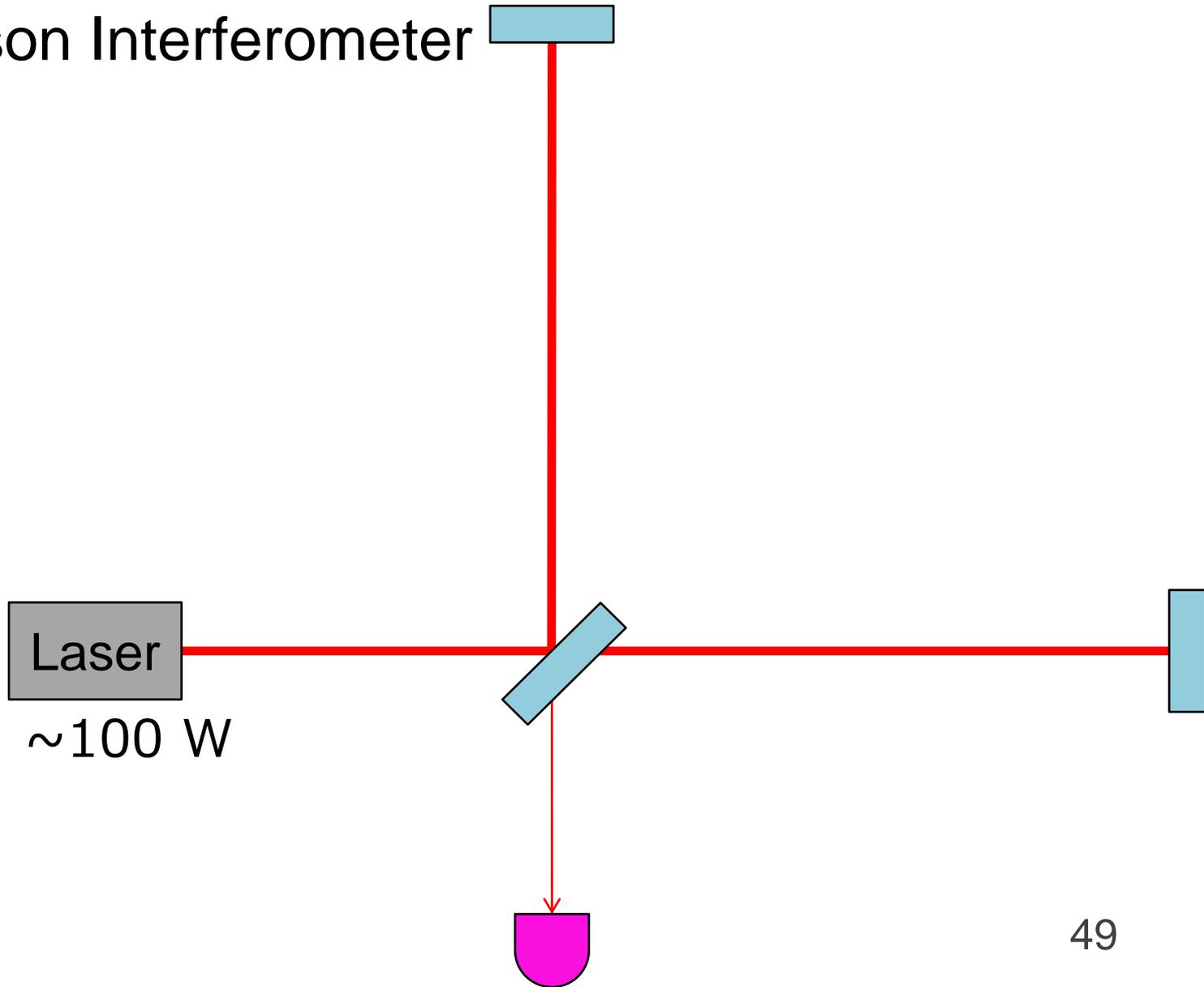
- 標準量子限界

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

鏡を重く、
基線長を長く
するのが重要

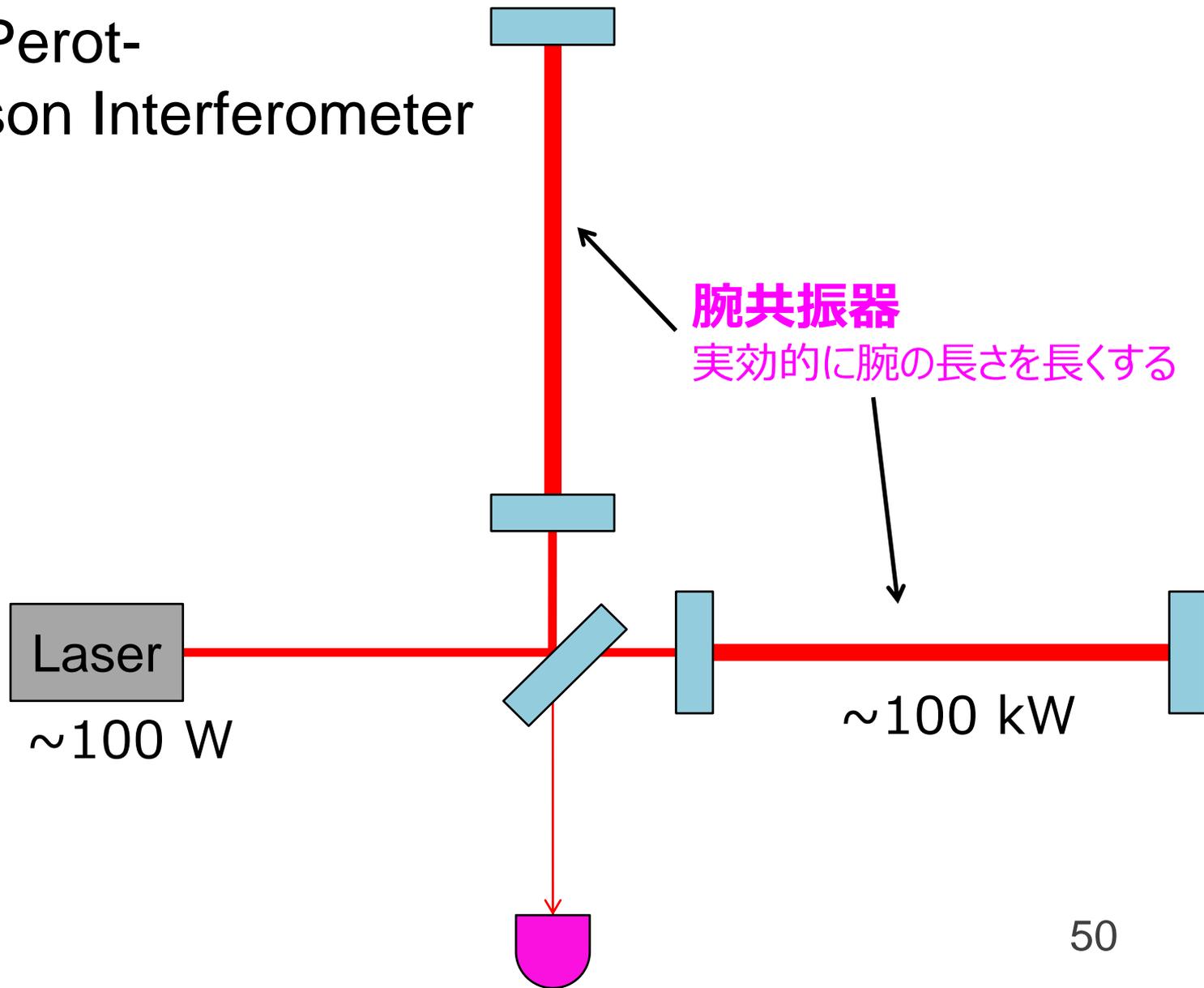
干渉計構成の工夫

- Michelson Interferometer (MI)



干渉計構成の工夫

- Fabry-Perot-Michelson Interferometer (FPMI)

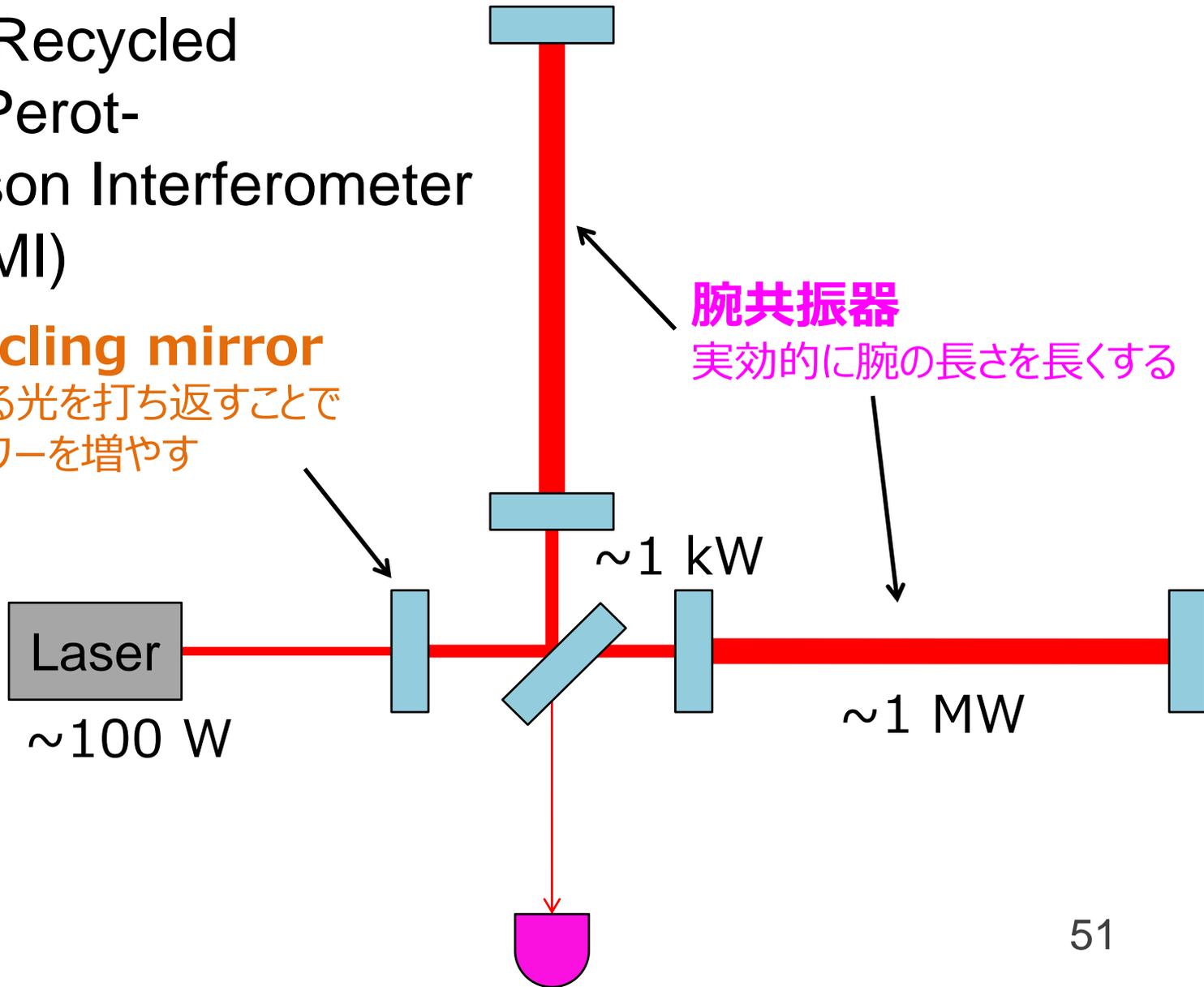


干渉計構成の工夫

- Power Recycled Fabry-Perot-Michelson Interferometer (PRFPMI)

Power recycling mirror

光源側に戻ってくる光を打ち返すことで実効的に入射パワーを増やす



腕共振器

実効的に腕の長さを長くする

~1 kW

~1 MW

Laser
~100 W

干渉計構成の工夫

- Dual Recycled Fabry-Perot-Michelson Interferometer (DRFPMI)

Power recycling mirror

光源側に戻ってくる光を打ち返すことで実効的に入射パワーを増やす

Laser
~100 W

腕共振器

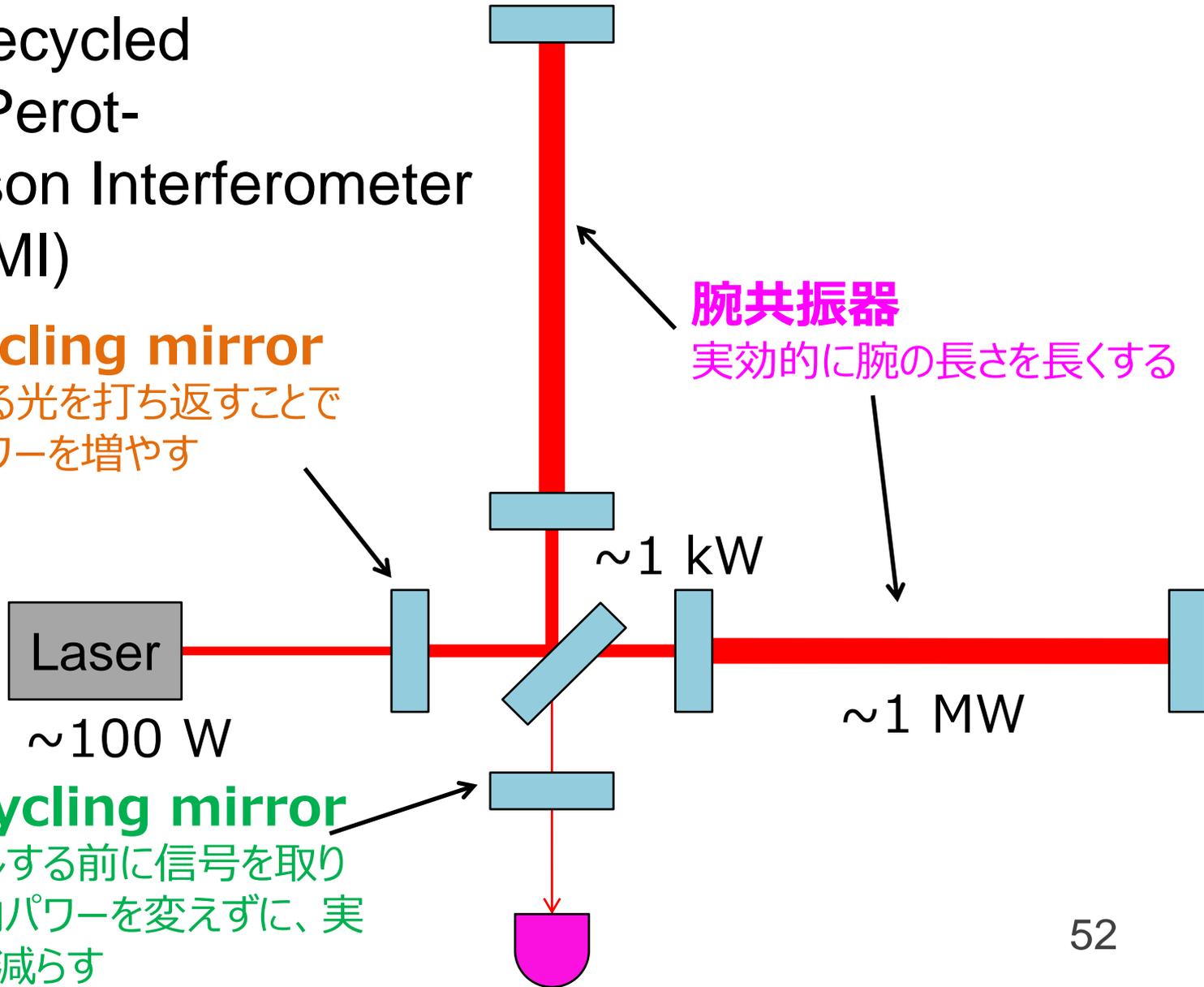
実効的に腕の長さを長くする

~1 kW

~1 MW

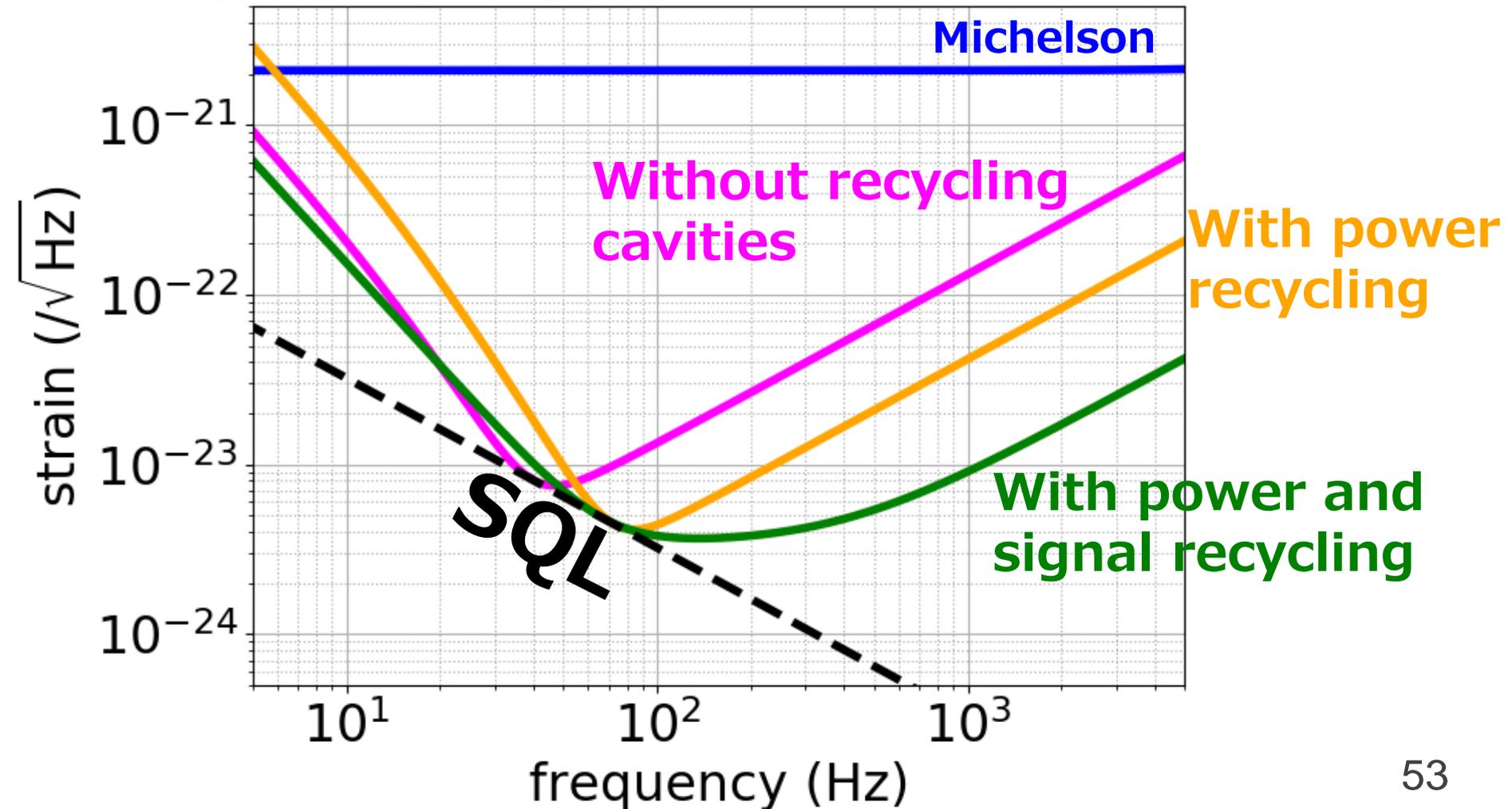
Signal recycling mirror

信号がキャンセルする前に信号を取り出すことで、腕内パワーを変えずに、実効的にフィネスを減らす



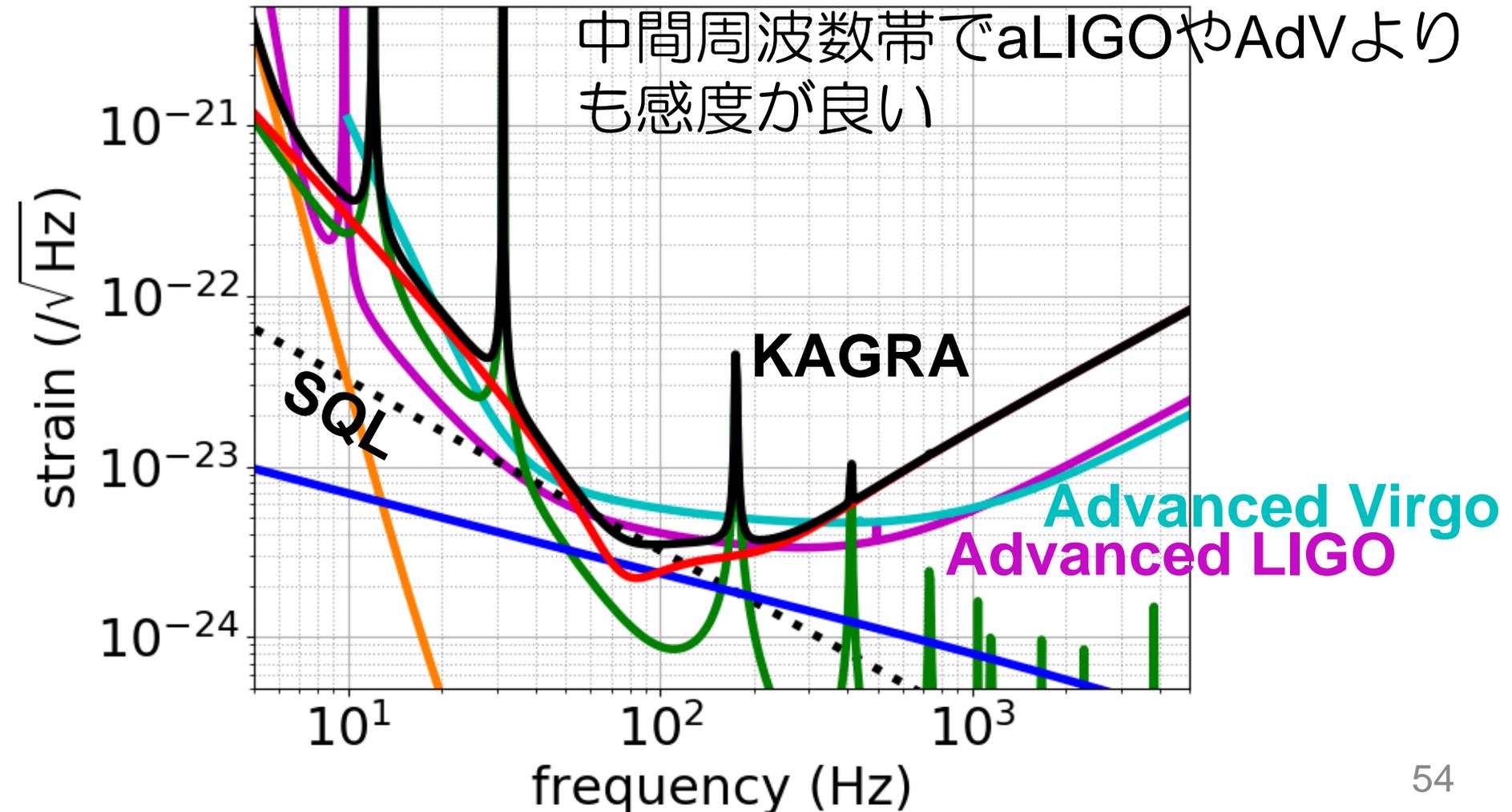
DRFPMIの感度

- Power recyclingで実効的にパワーを増やし、Signal recyclingで観測帯域を広げる



KAGRAの量子技術

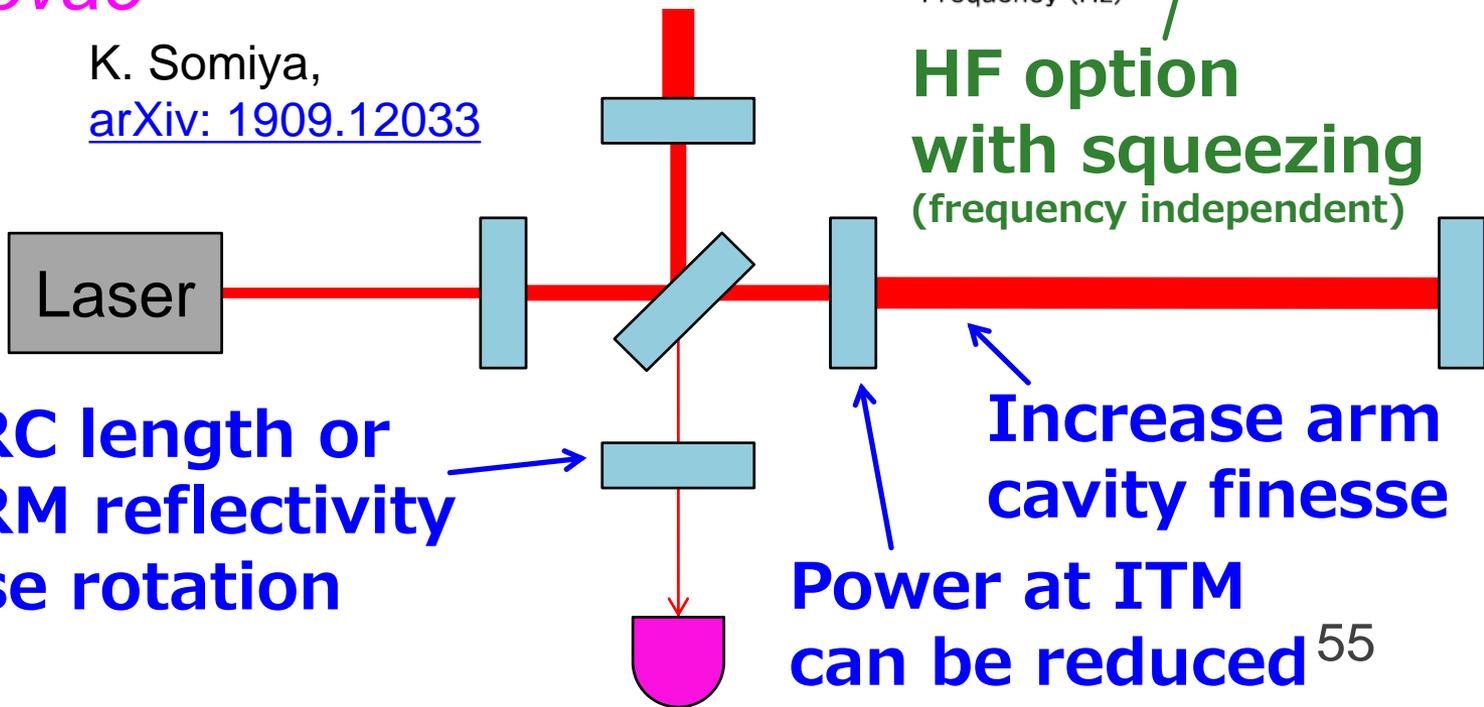
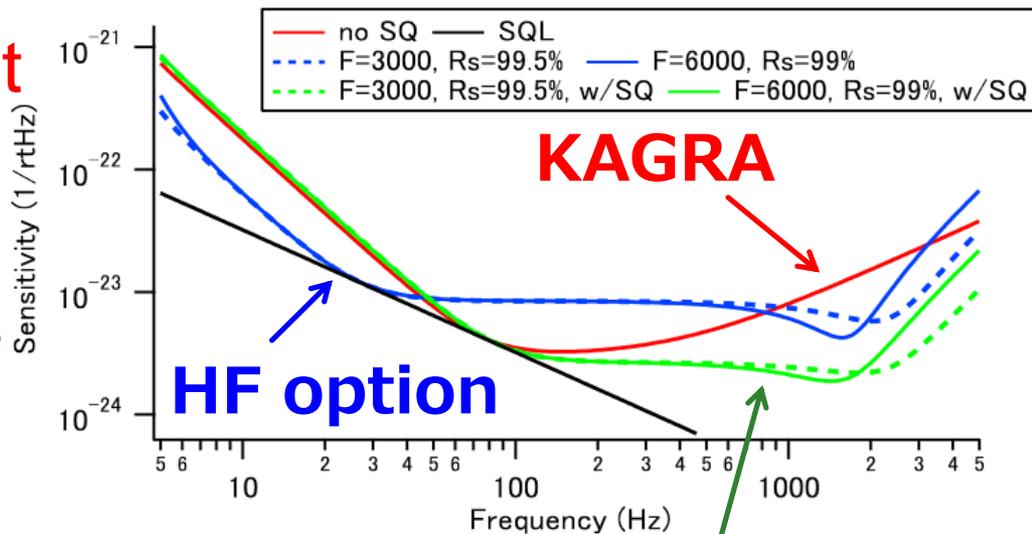
- KAGRAではホモダイン測定やSignal recycling cavity detuningによりSQLを突破予定で、



High Frequency Option?

- We can make a **dip at high frequency** to probe neutron star physics, enhance the chance of detecting *supernovae*

K. Somiya,
[arXiv: 1909.12033](https://arxiv.org/abs/1909.12033)



Increase SRC length or
 Increase SRM reflectivity
 → SRC phase rotation
 creates dip

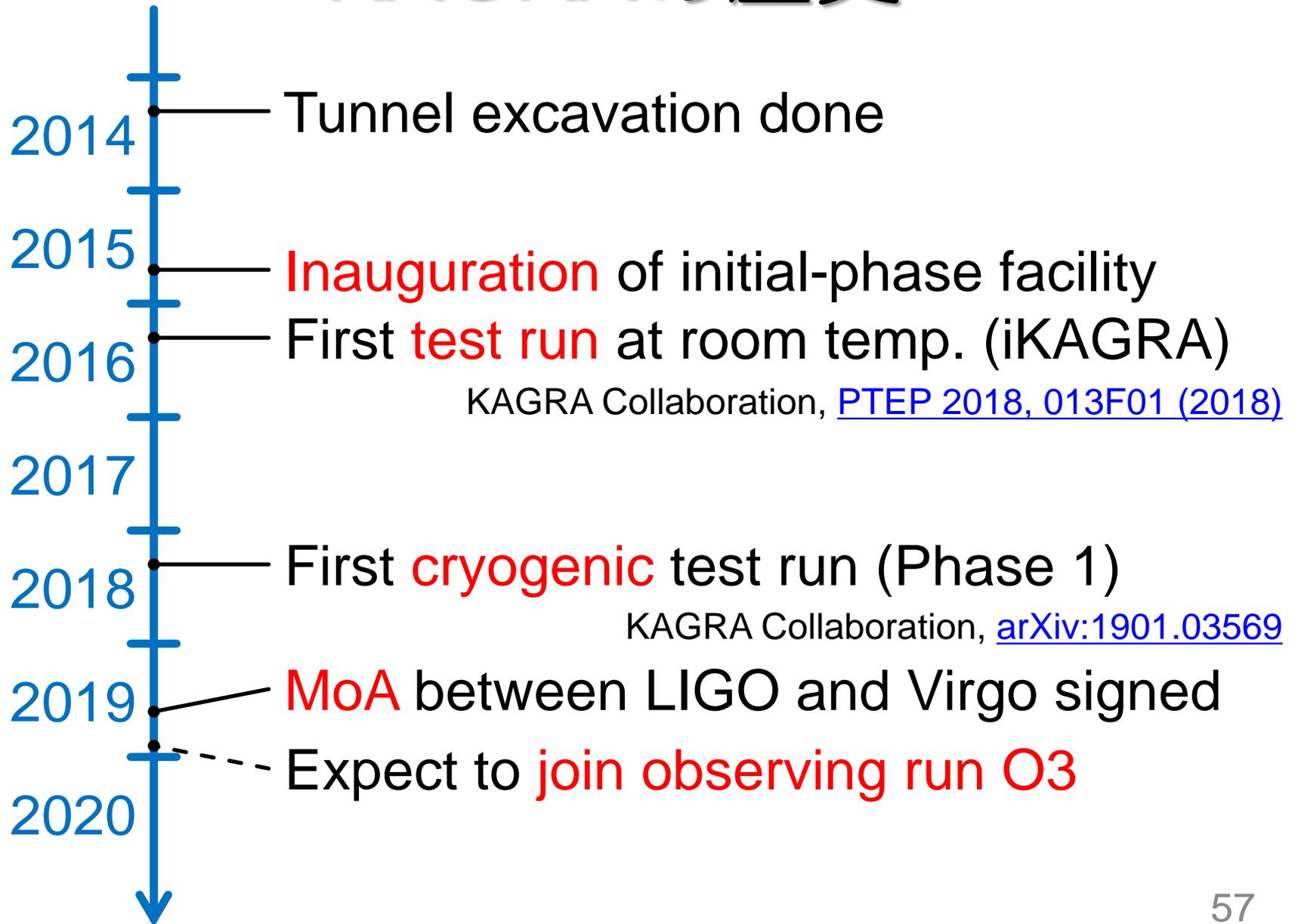
Increase arm
 cavity finesse
 Power at ITM
 can be reduced⁵⁵

茂住オフィス

- 東京から北陸新幹線で2時間、
富山駅から車で南へ1時間くらい



KAGRAの歴史



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](#)

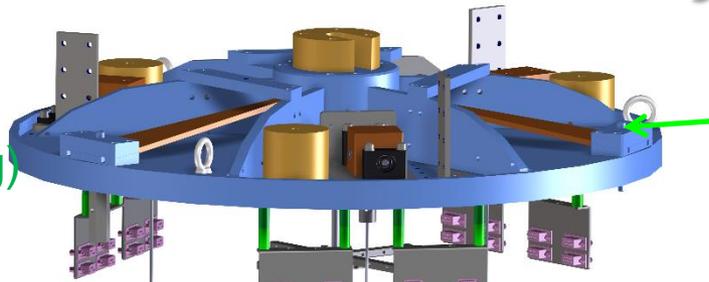
- **Optical parameters**
 - Mirror transmission: 0.4 % for ITM, 10 % for PRM, 15.36 % for SRM
 - Power at BS: 674 W
 - Detune phase: 3.5 deg (DRSE case)
 - Homodyne phase: 135.1 deg (DRSE case)
- **Sapphire mirror parameters**
 - TM size: 220 mm dia., 150 mm thick
 - TM mass: 22.8 kg
 - TM temperature: 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

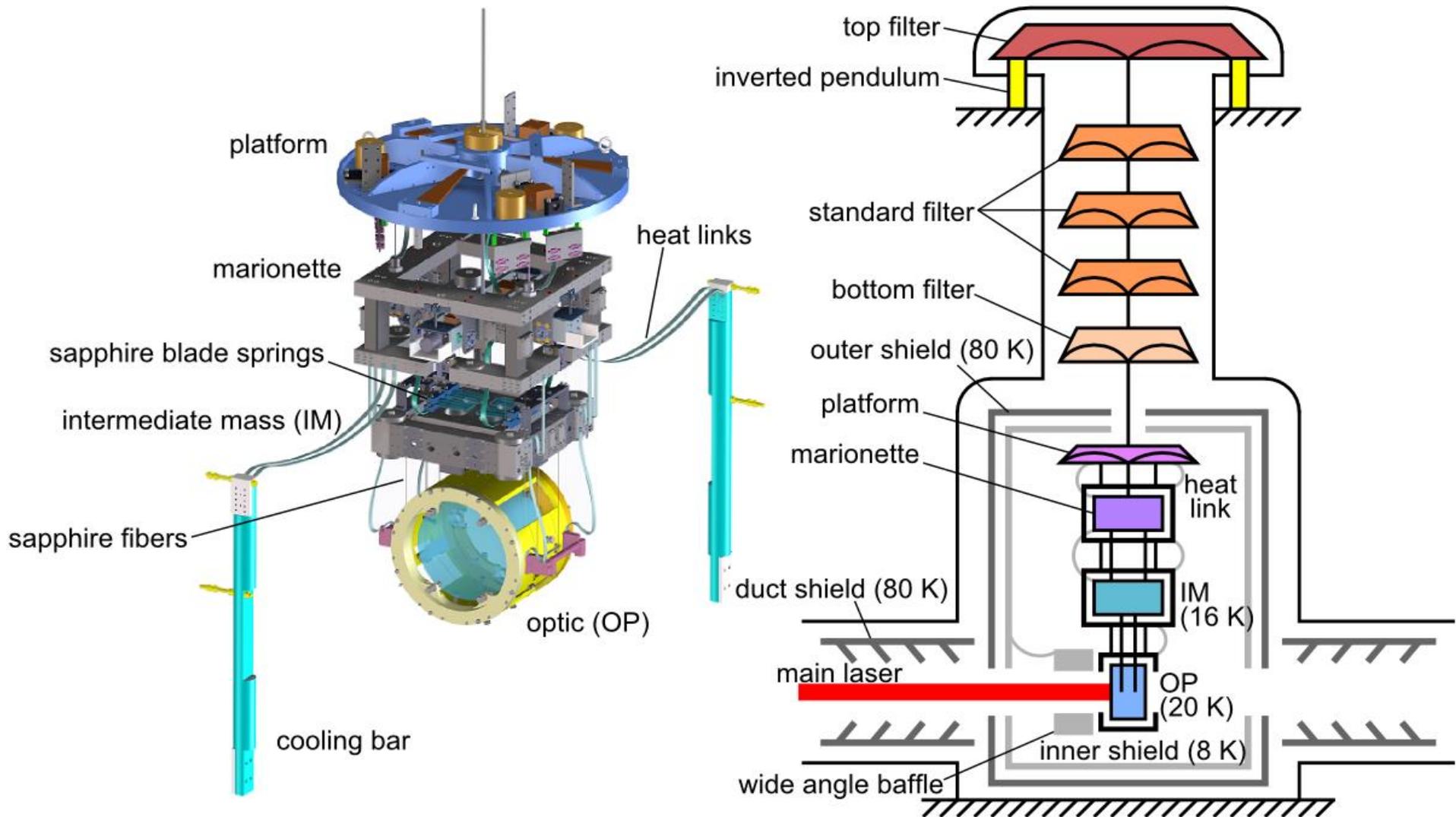
Test Mass
(Sapphire, 23 kg,
22 K)

4 sapphire blades

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

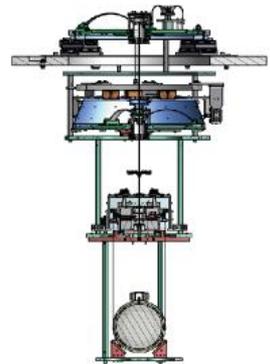
Type-B

3.1 m



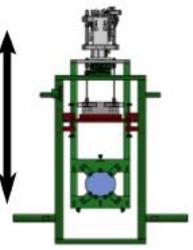
Type-Bp

1.7 m

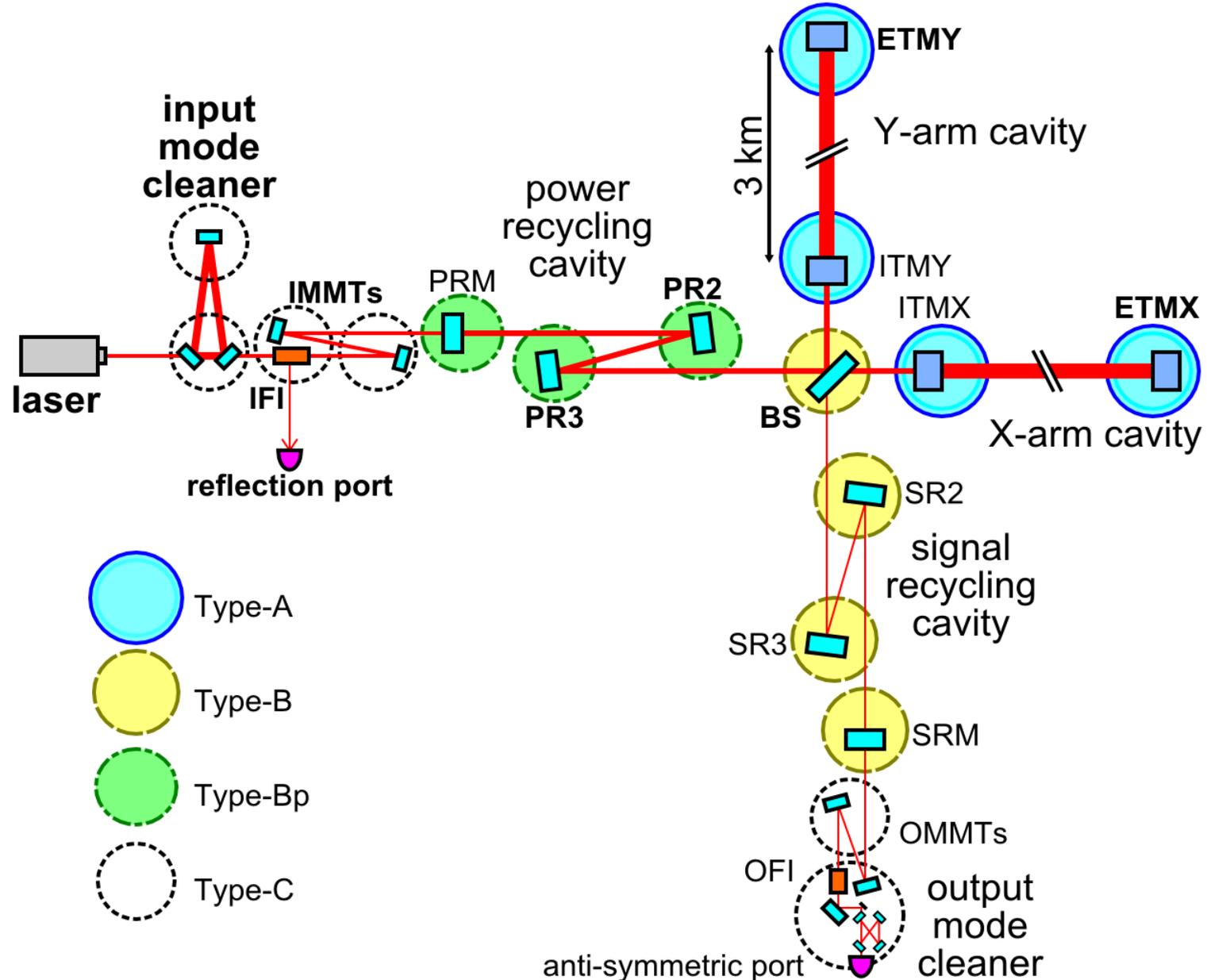


Type-C

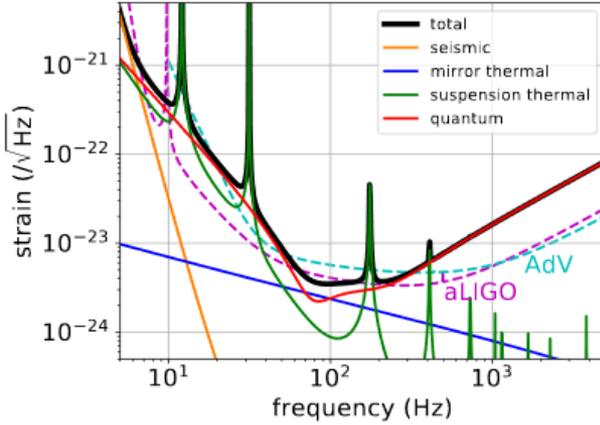
0.4 m



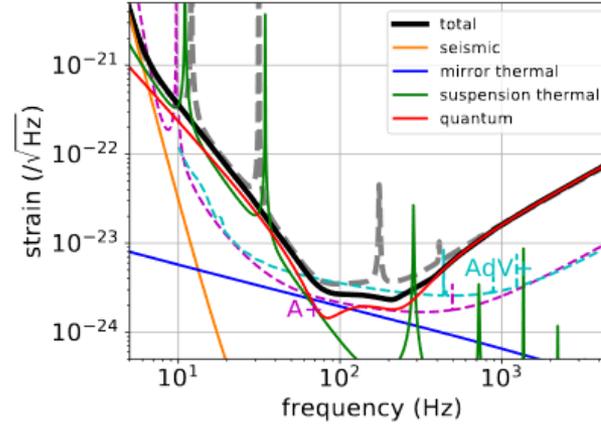
KAGRA Interferometer



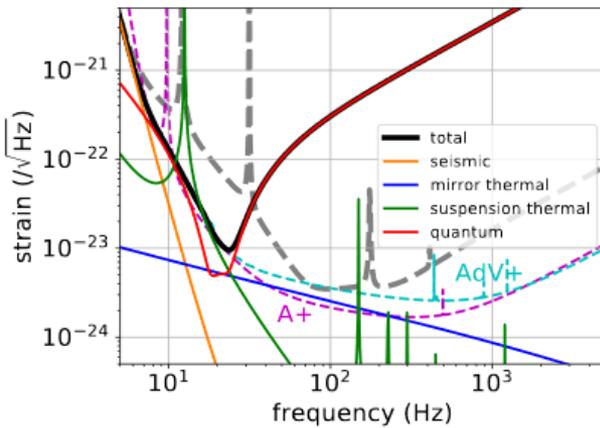
Possible KAGRA Upgrade Plans



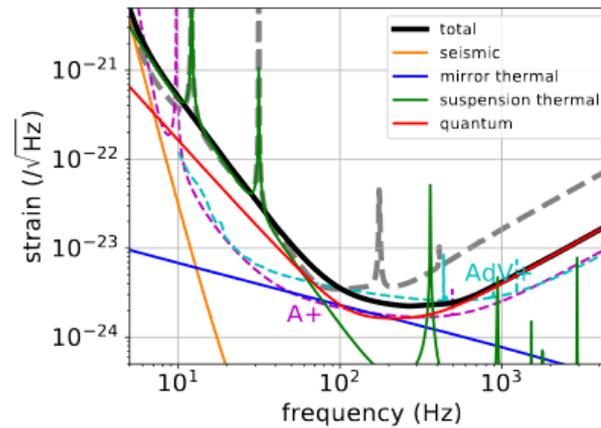
(a) bKAGRA



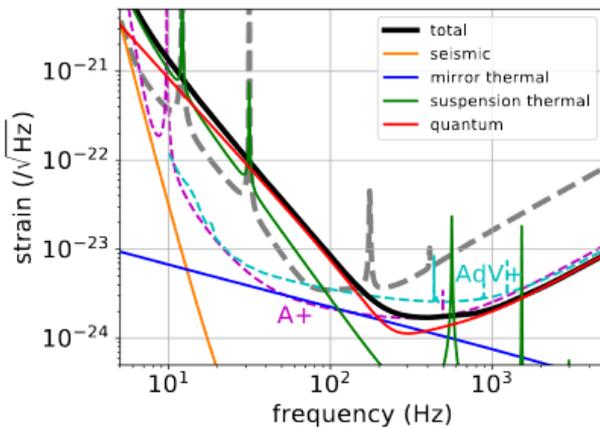
(d) 40kg



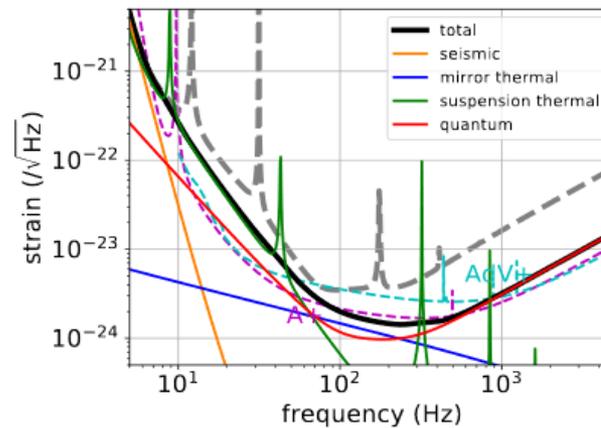
(b) LF



(e) FDSQZ



(c) HF



(f) Combined

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

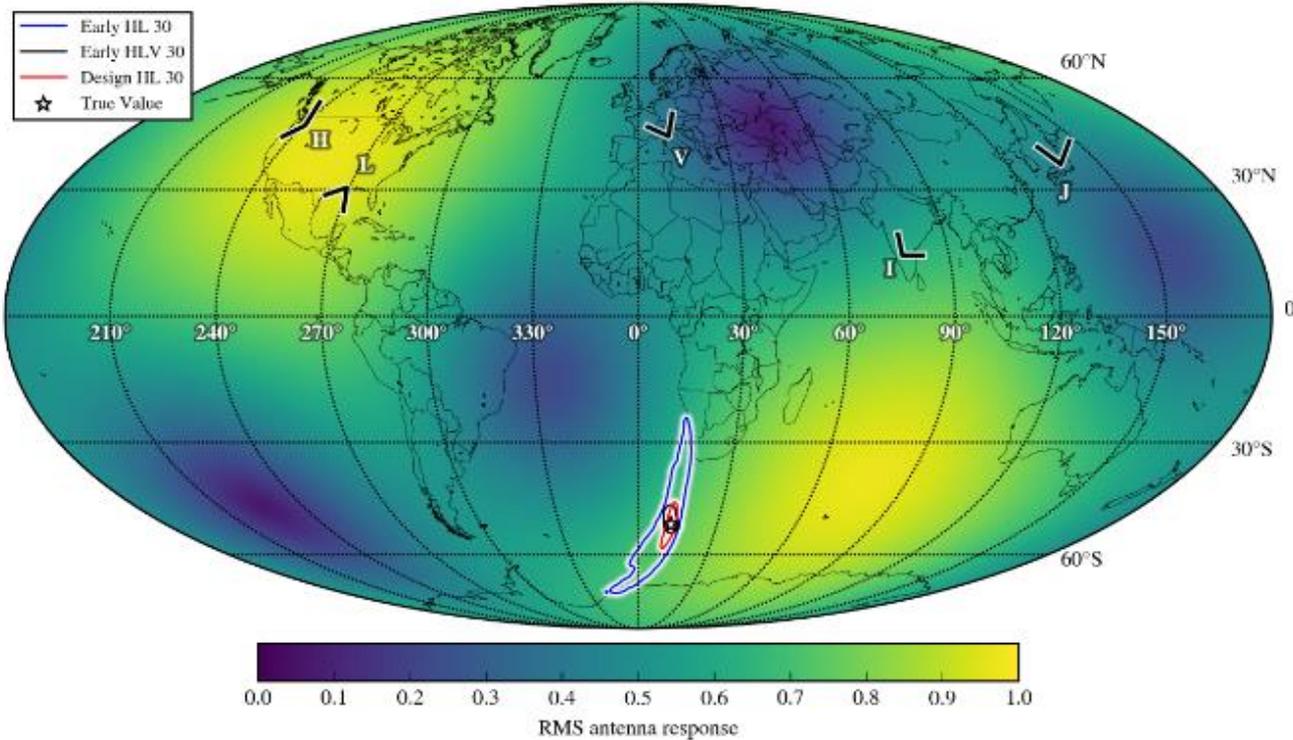
Possible KAGRA Upgrade Plans

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

GW150914 with KAGRA

[CQG 34, 174003 \(2017\)](#)



Sky localization
 HLV 0.57 deg²
 HLVK 0.13 deg²

Distance error
 HLV 179 Mpc
 HLVK 98 Mpc

(with designed sensitivity,
 90% credible)

