

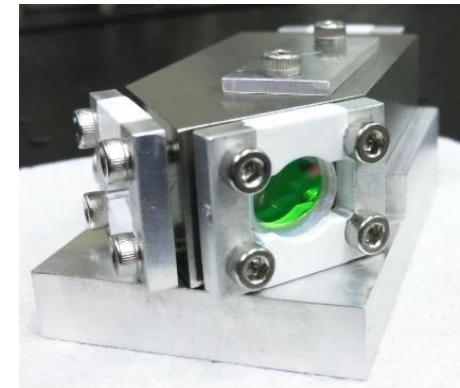
重力波観測と量子技術

道村唯太

東京大学 大学院理学系研究科 物理学専攻

自己紹介

- 1987年 誕生
- 2009年 東京大学 物理 坪野研に配属
重力に関する実験ならなんでもやりたい
宇宙重力波望遠鏡DECIGOの前哨衛星の干渉計実験
- 2010年 LCGT(その後KAGRA)の予算が通る
みんな慌てる。干渉計の設計をやることに
- 2011年 ローレンツ不変性の検証実験開始
- 2014年 助教 (2013年に坪野研→安東研)
- 2015年 博士(理学)取得
- 2016年 LIGOが初検出発表。ショックを受ける。
- 2017年 初の連星中性子星合体。さらにショックを受ける。
- 最近ではKAGRAをやりつつ、DECIGO、巨視的量子力学検証、アクシオン探査、ダークマター探査などいろいろな規模のレーザー干渉計実験

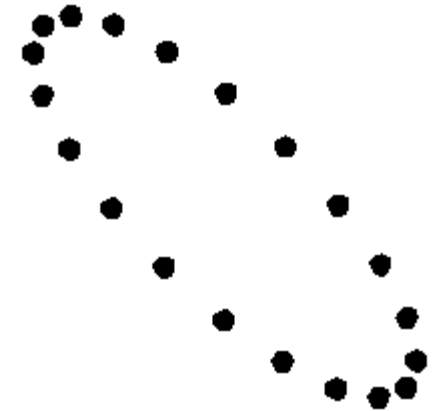
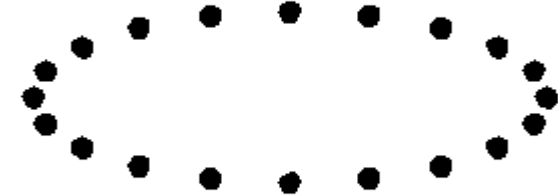
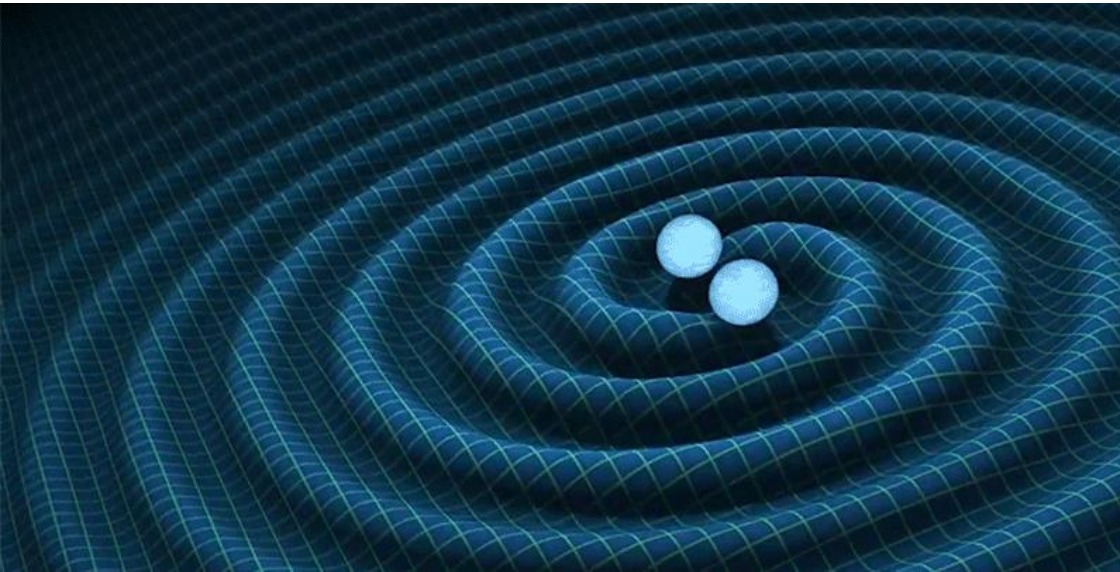


今回のお話

- レーザー干渉計型**重力波検出器の技術**
 - 重力波
 - 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
 - 特に**量子雑音**について
 - 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
 - 重力波観測の今後の目標
 - 様々な量子雑音低減技術

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
- コンパクト連星合体、超新星爆発、パルサー、インフレーションなど



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

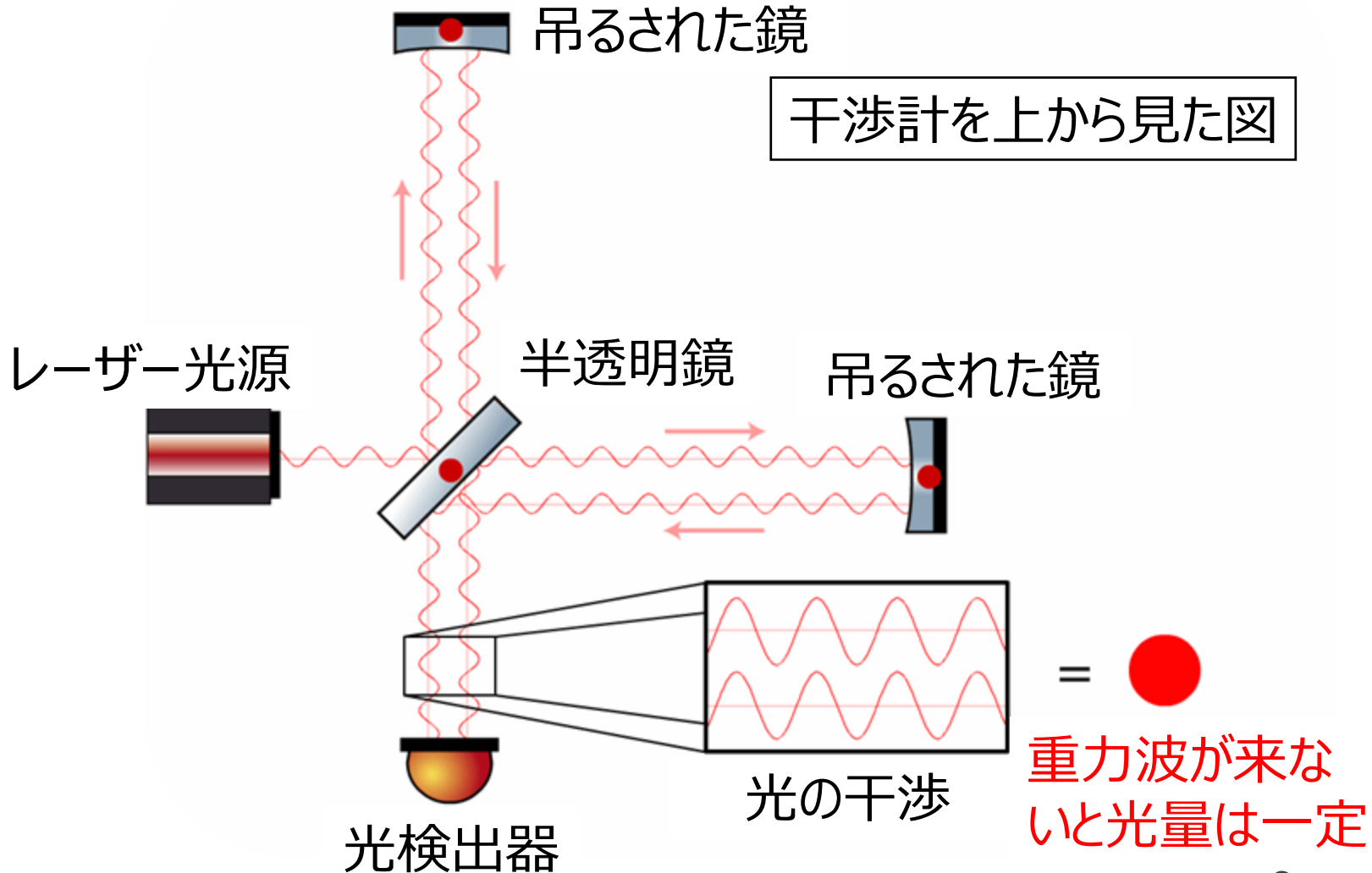


LIGO-India (approved)



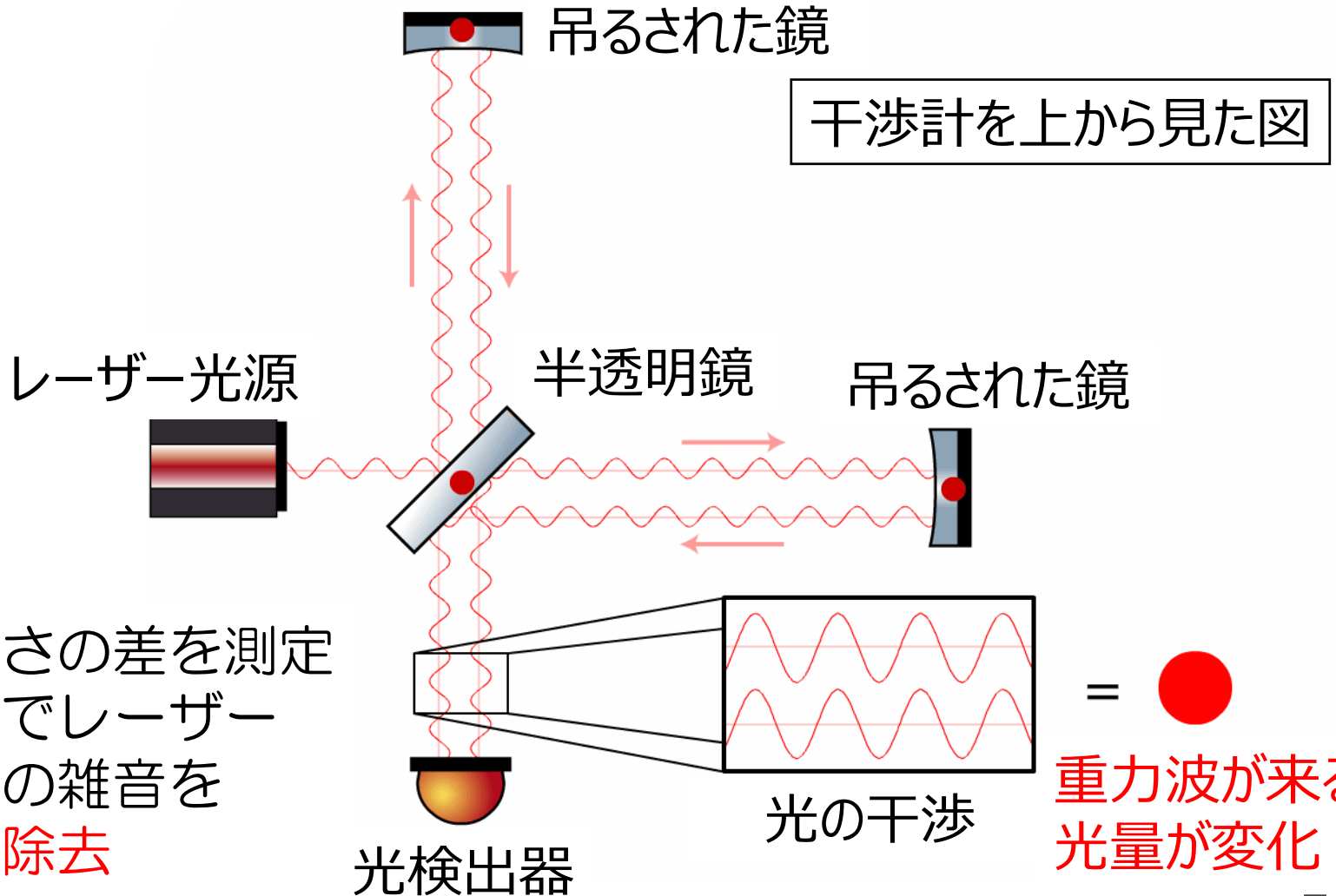
レーザー干渉計型重力波検出器

- 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

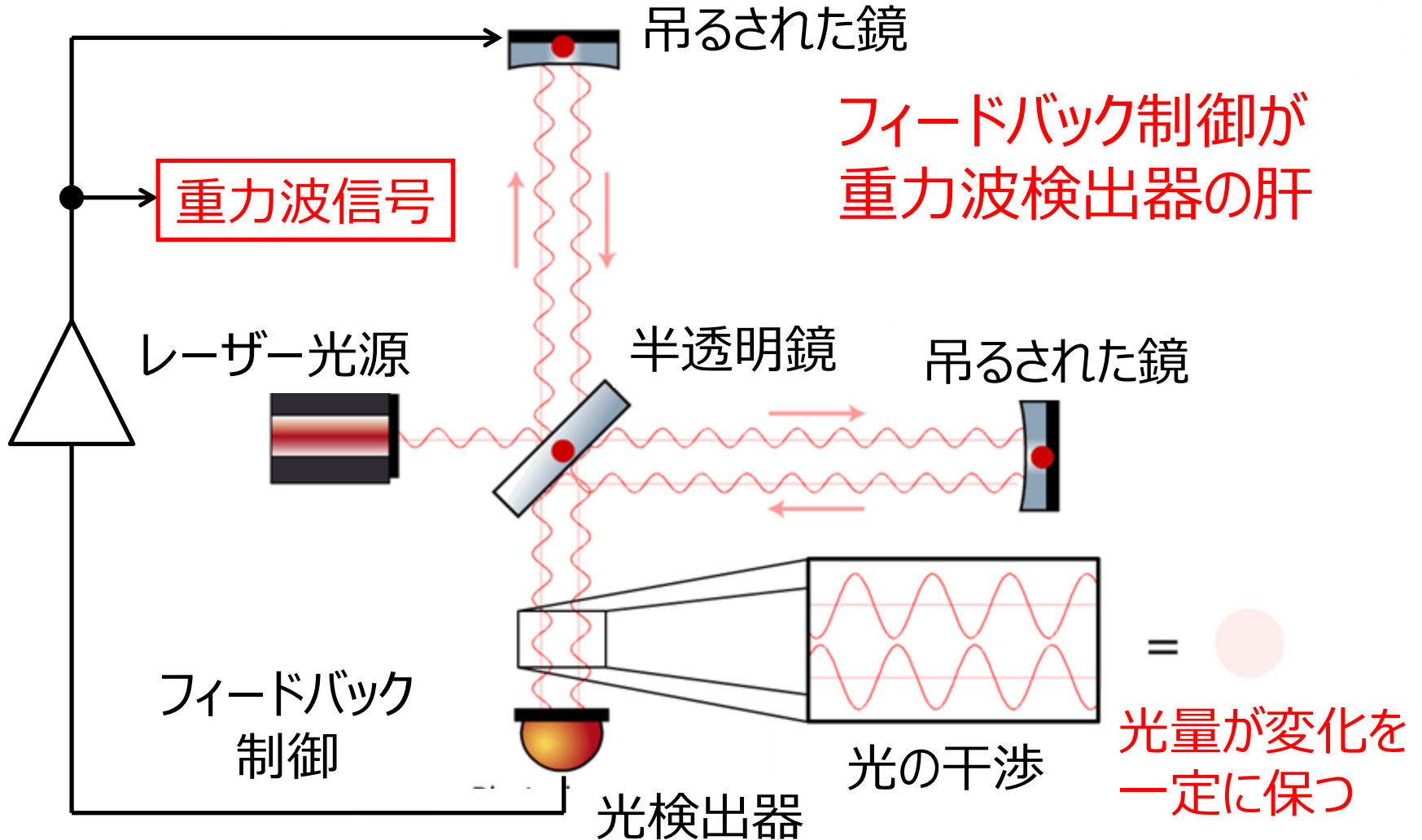
- 両腕の長さの差を干渉縞の変化として測定



両腕の長さの差を測定
することでレーザー
光源由来の雑音を
同相雑音除去

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



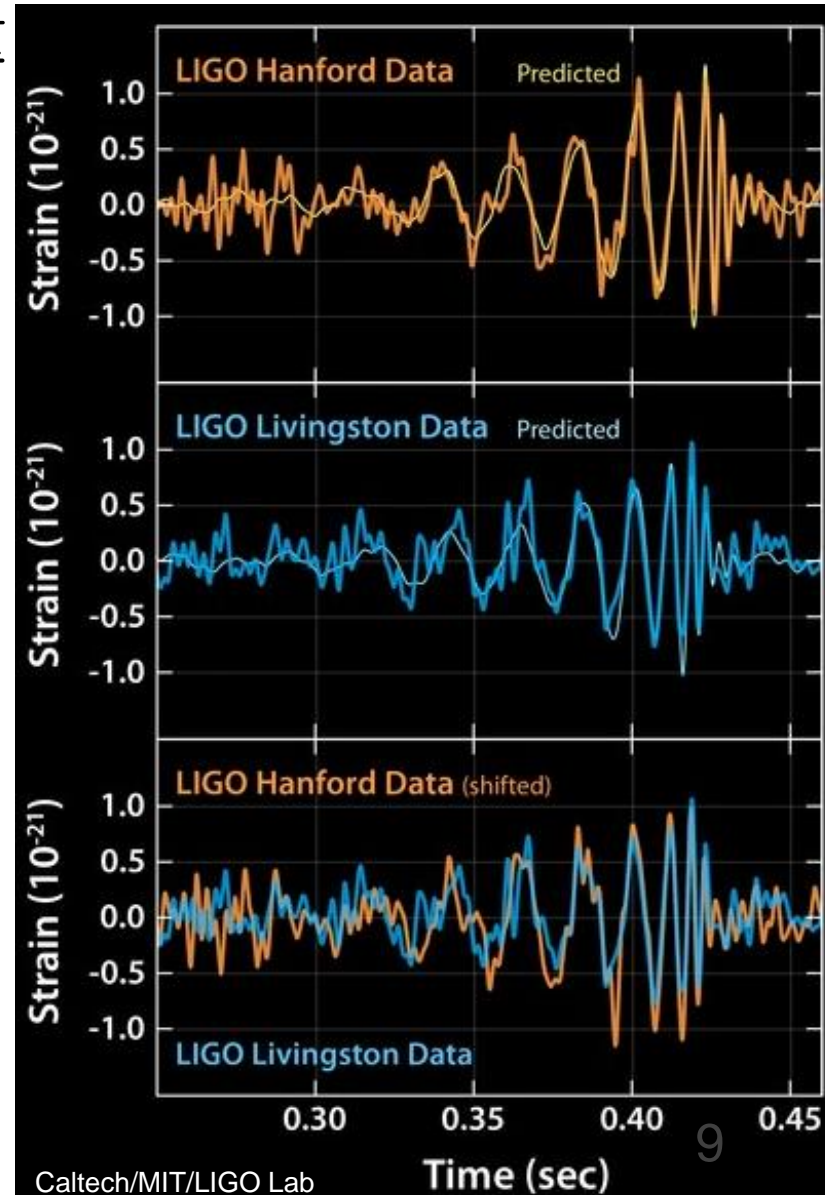
重力波による空間の歪み量

- GW150914の空間の歪み量
 $h \sim 10^{-21}$

- 距離の変化割合で表す

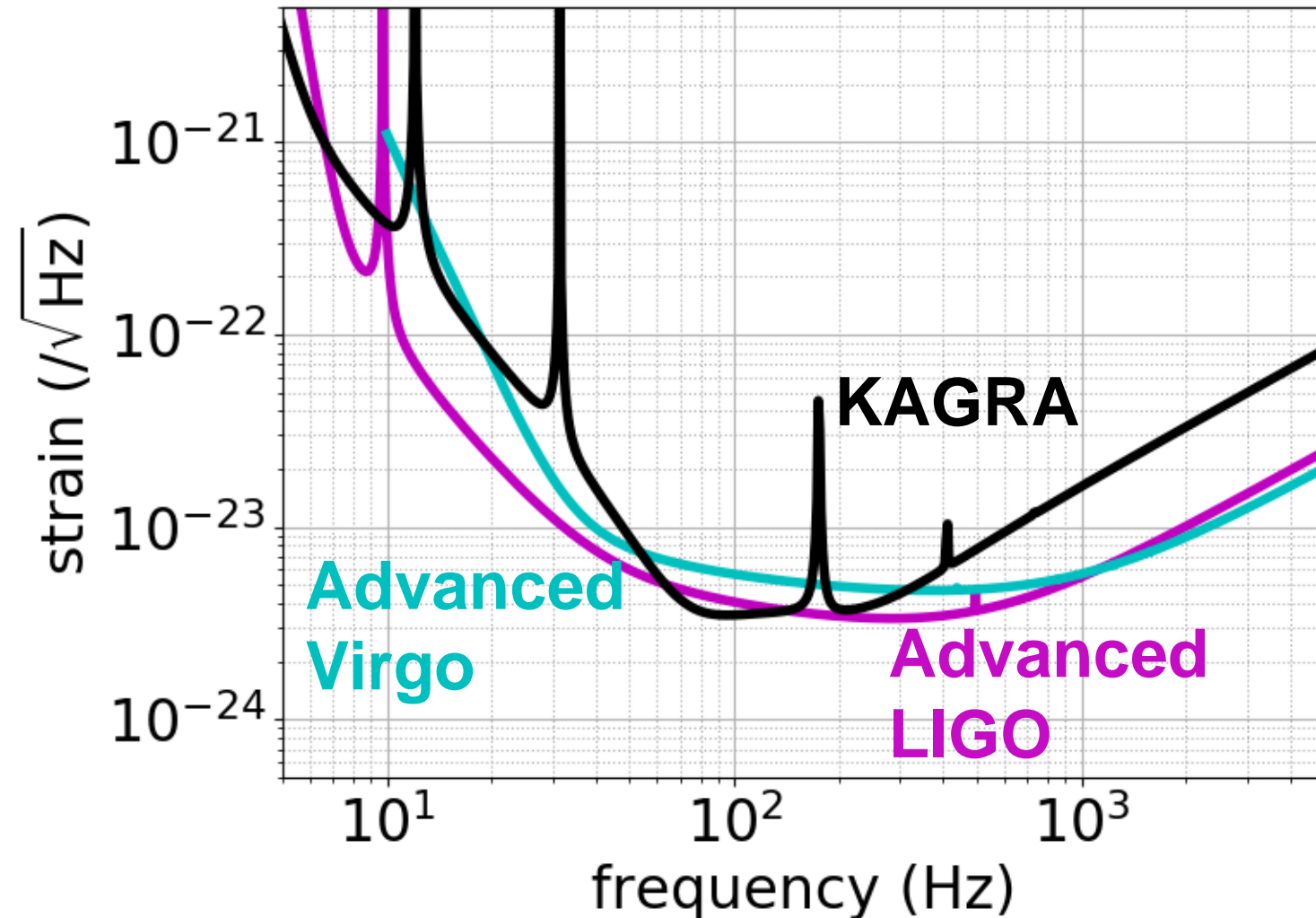
$$h = \frac{\delta L}{L}$$

- 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



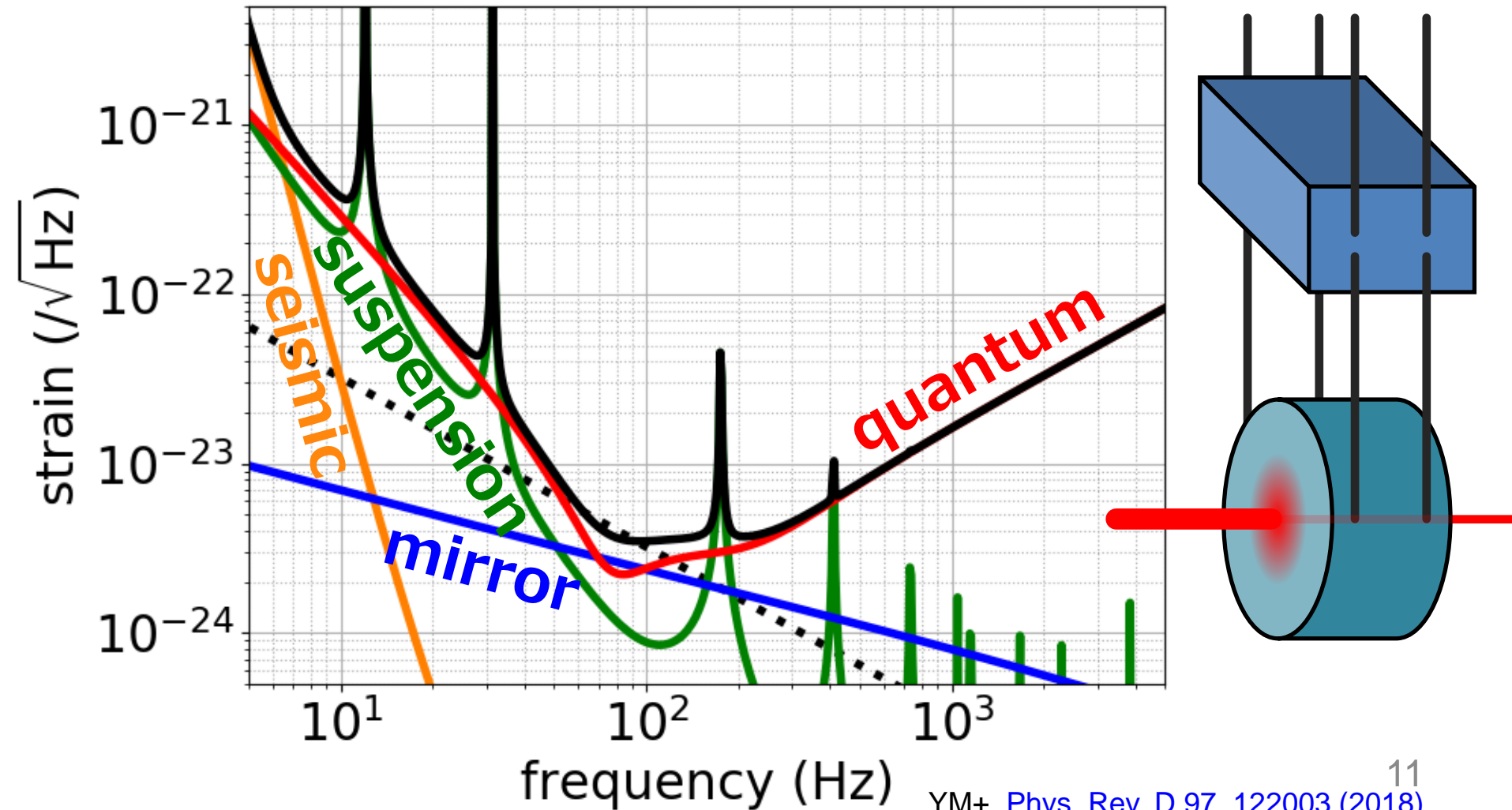
設計感度

- aLIGO、AdV、KAGRAはどれも同等の設計感度



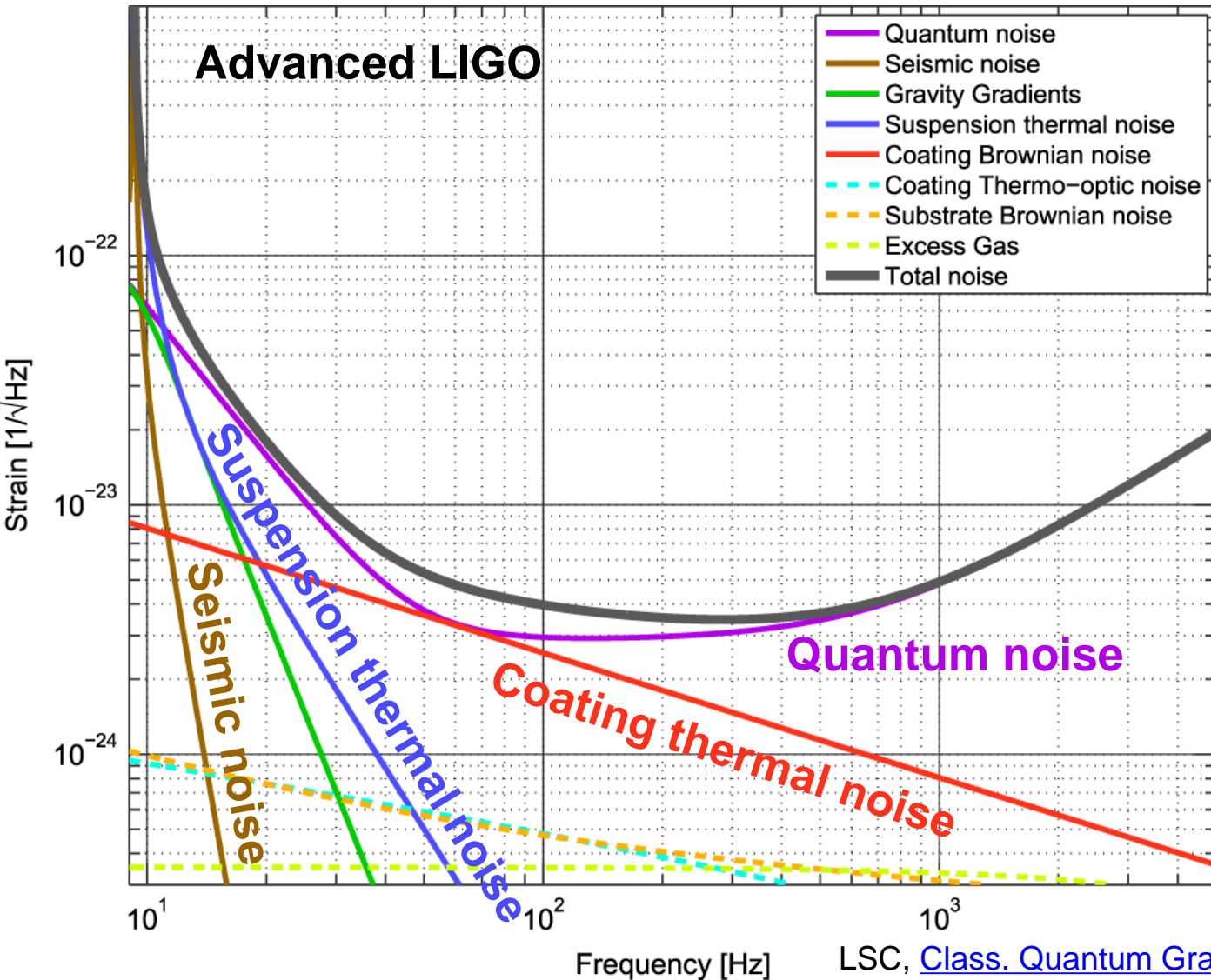
原理的な雑音源

- 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



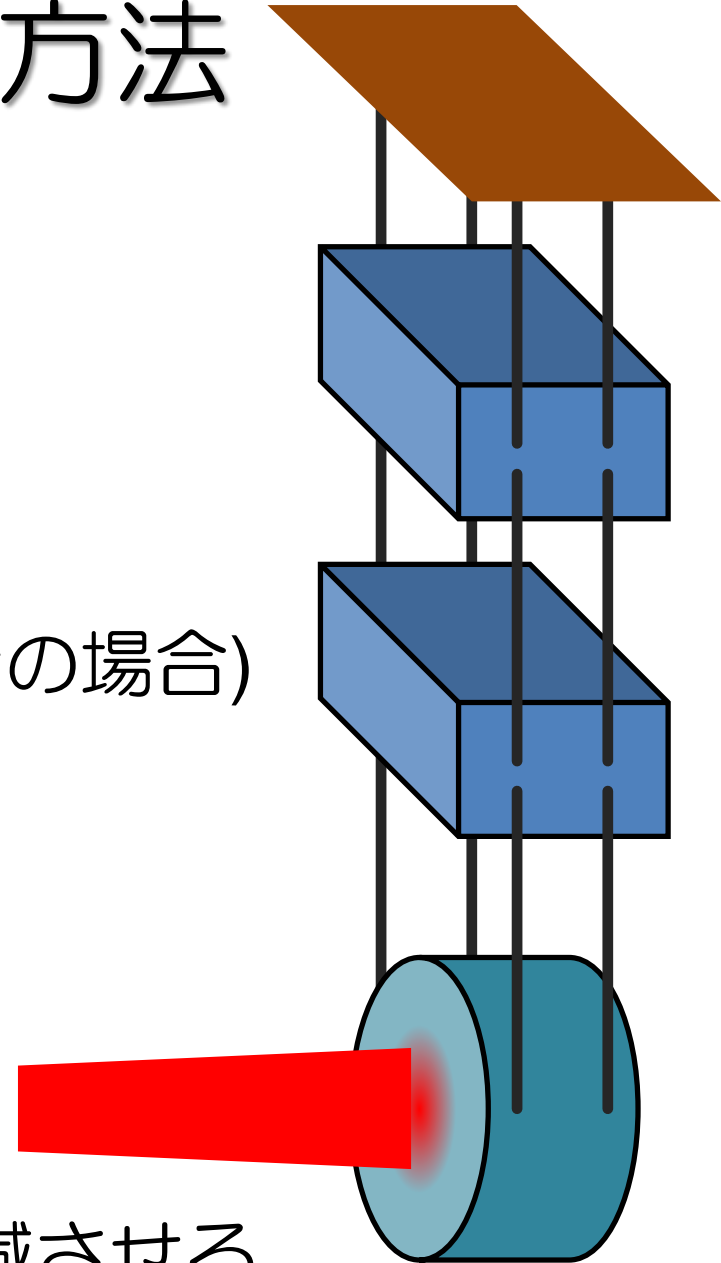
原理的な雑音源

- aLIGOも同様に、ほとんど量子雑音で決まる



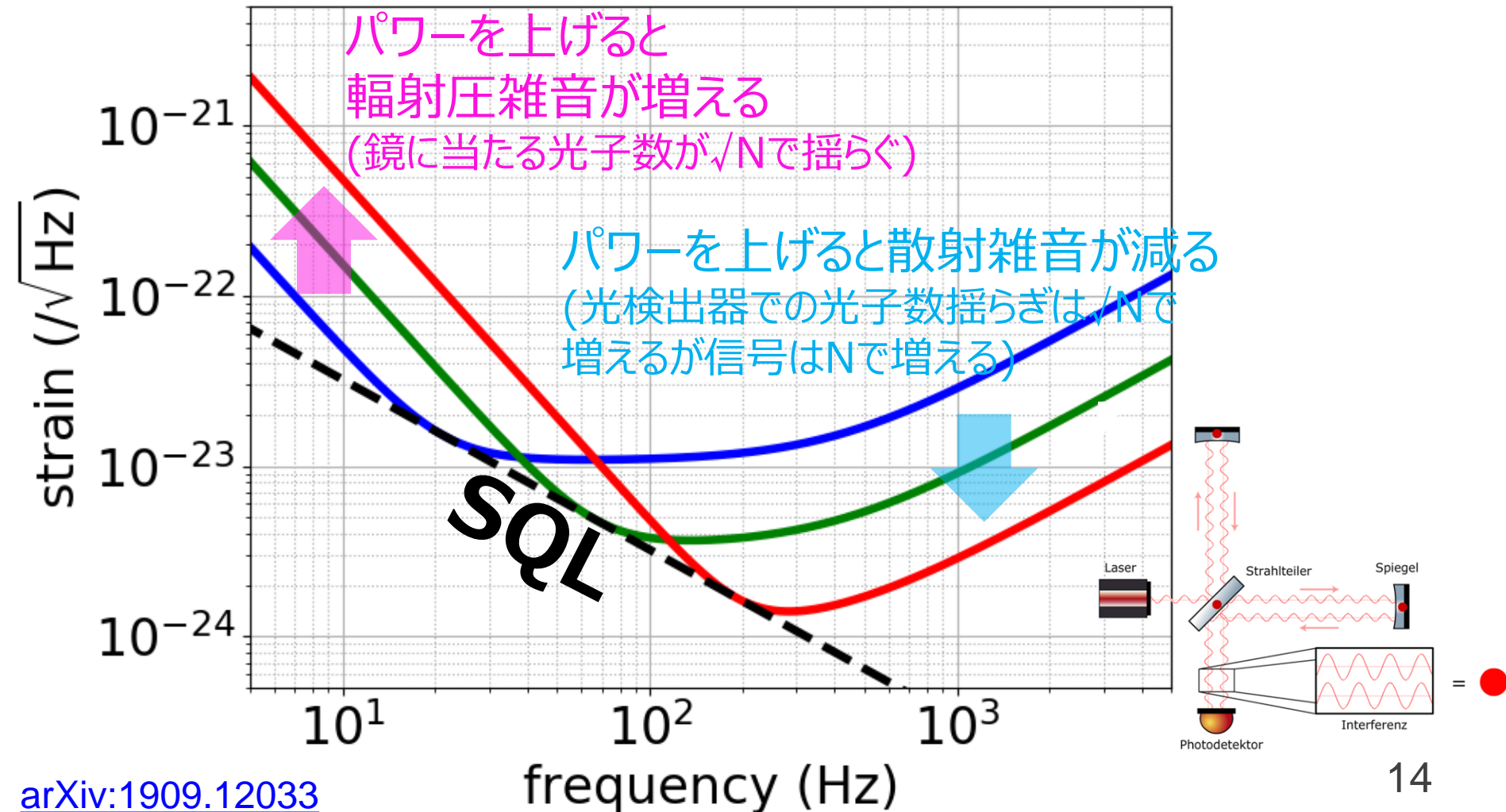
雑音源と低減方法

- **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
- 長基線長化は全ての雑音を低減させる



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

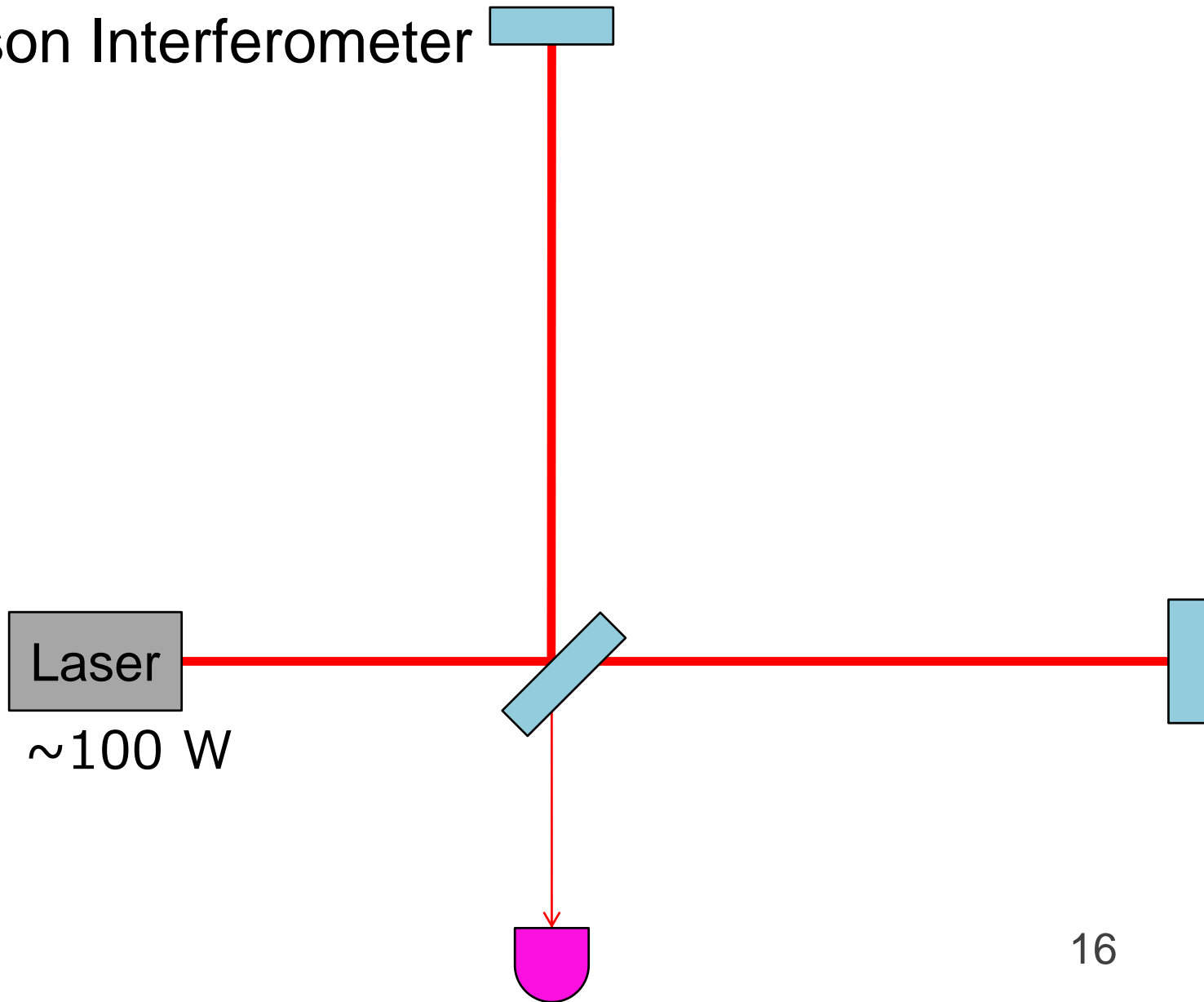
- 標準量子限界

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

鏡を重く、
基線長を長く
するのが重要

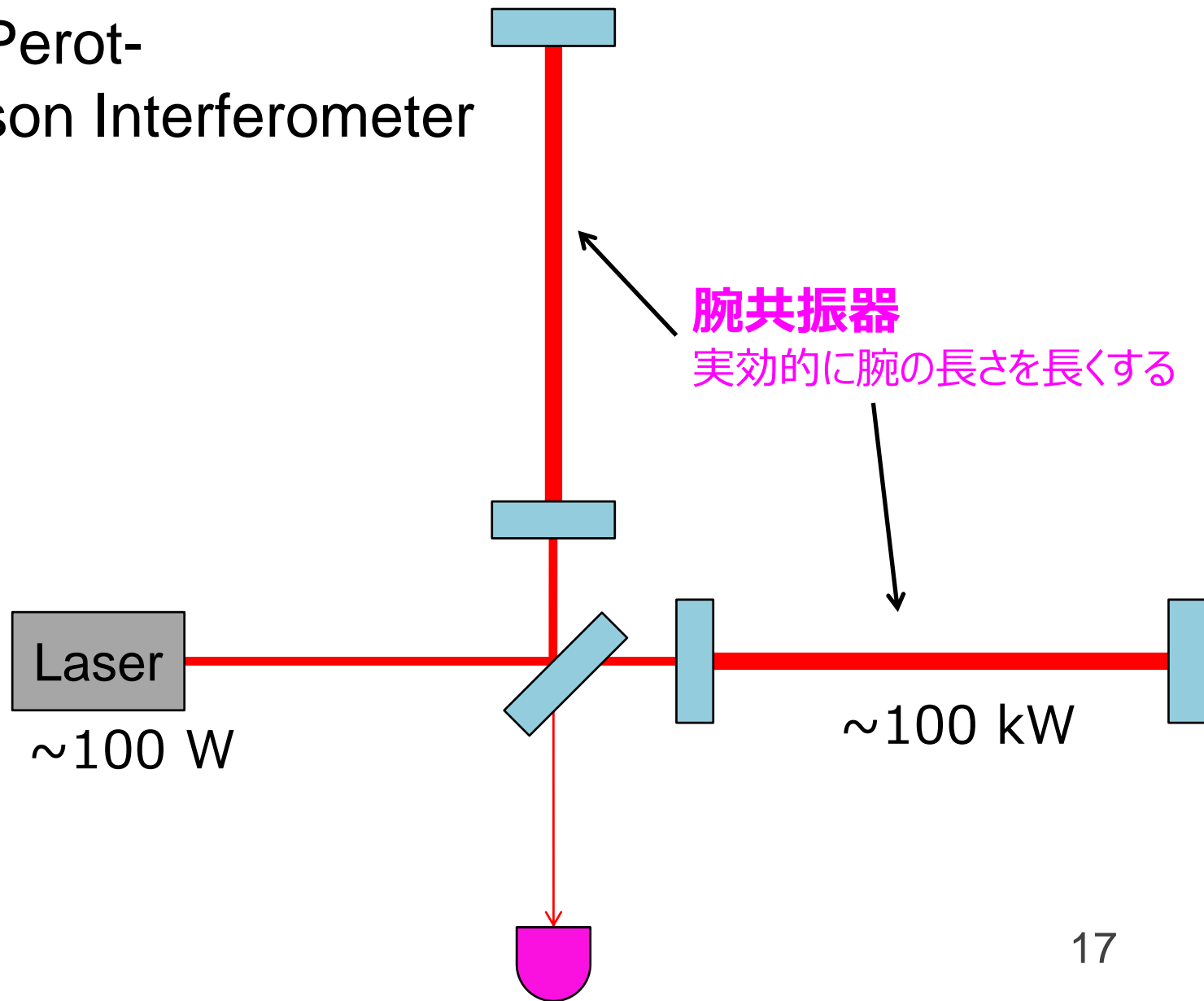
干渉計構成の工夫

- Michelson Interferometer (MI)



干渉計構成の工夫

- Fabry-Perot-Michelson Interferometer (FPMI)

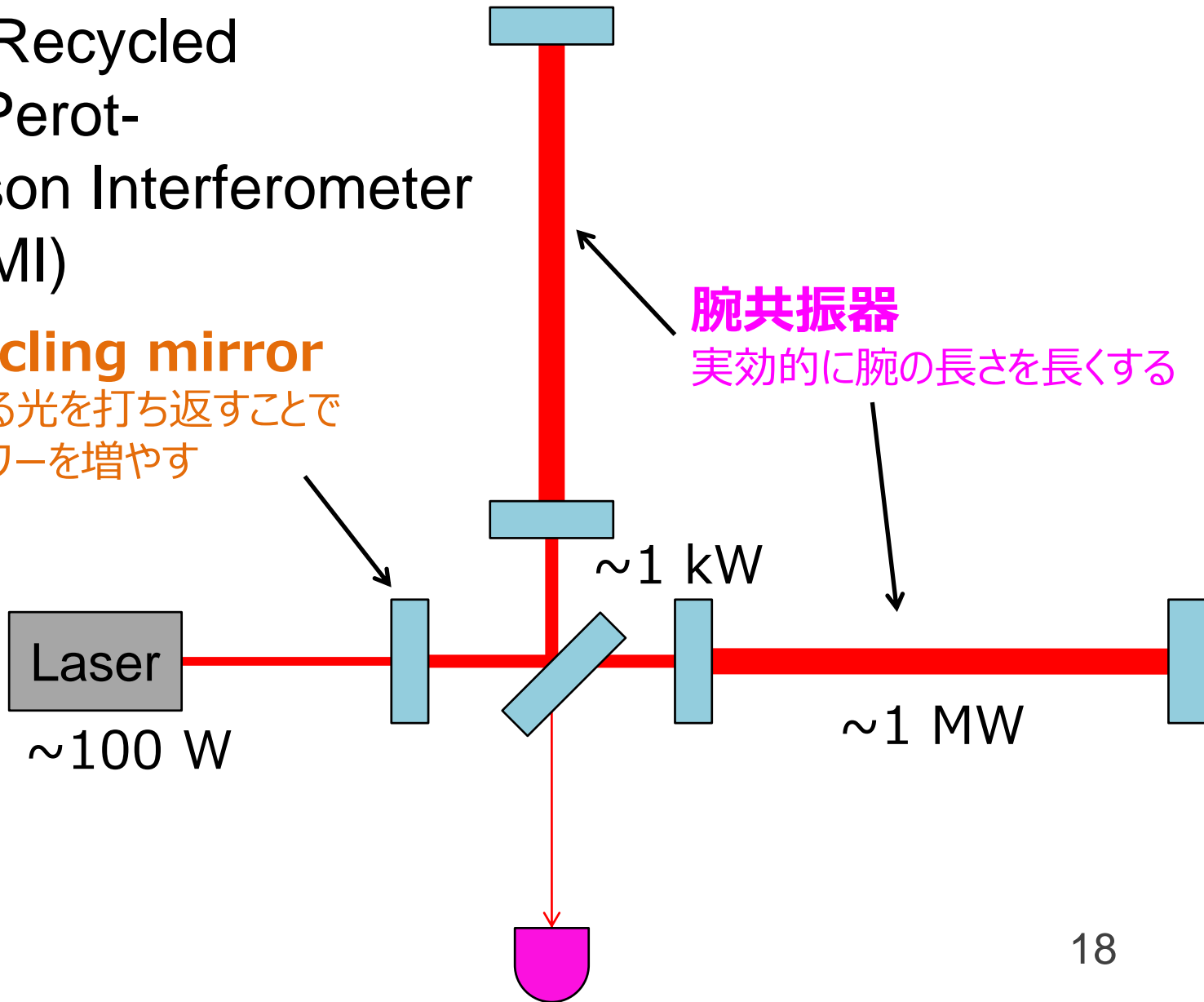


干渉計構成の工夫

- 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



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

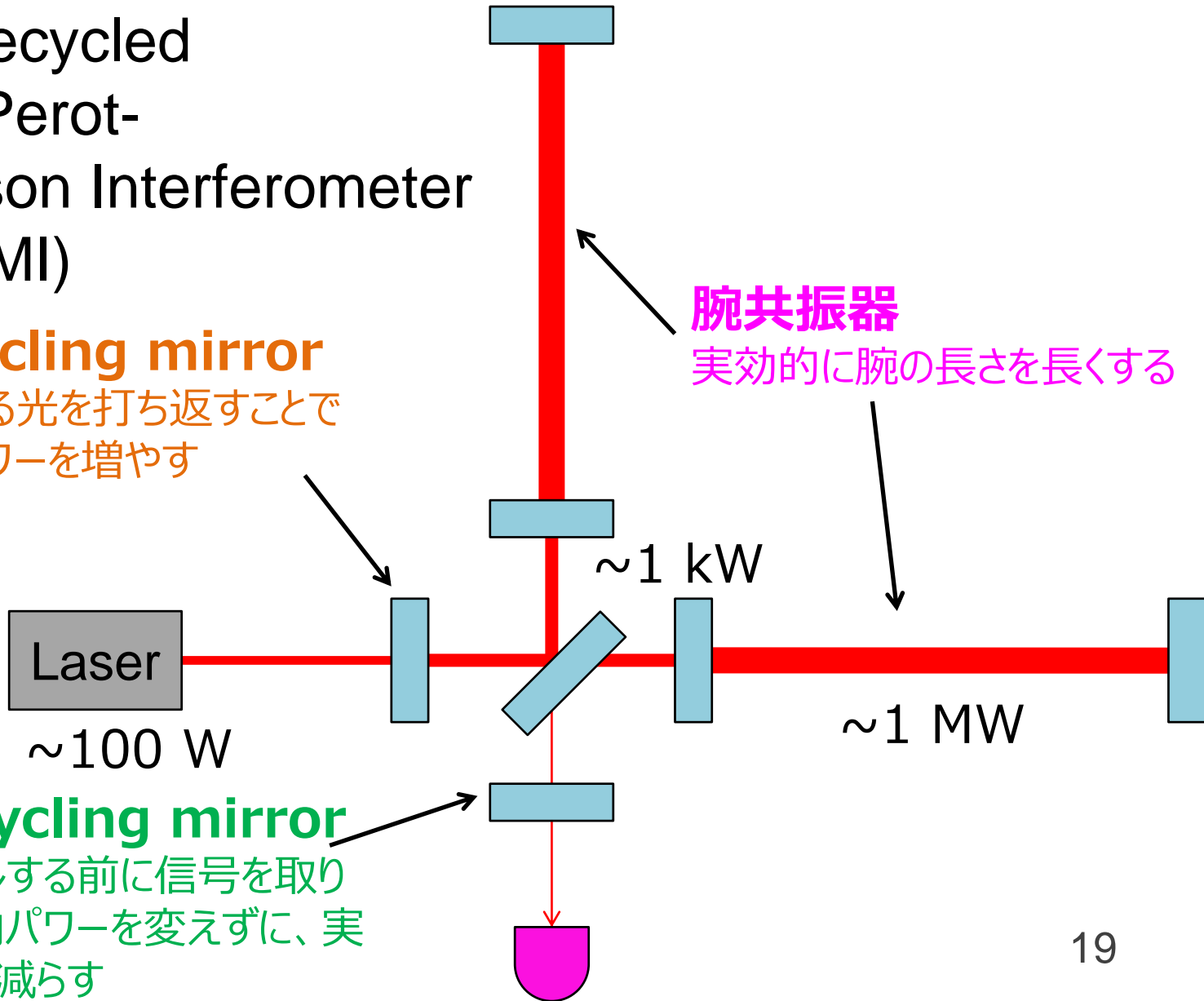
実効的に腕の長さを長くする

~1 kW

~1 MW

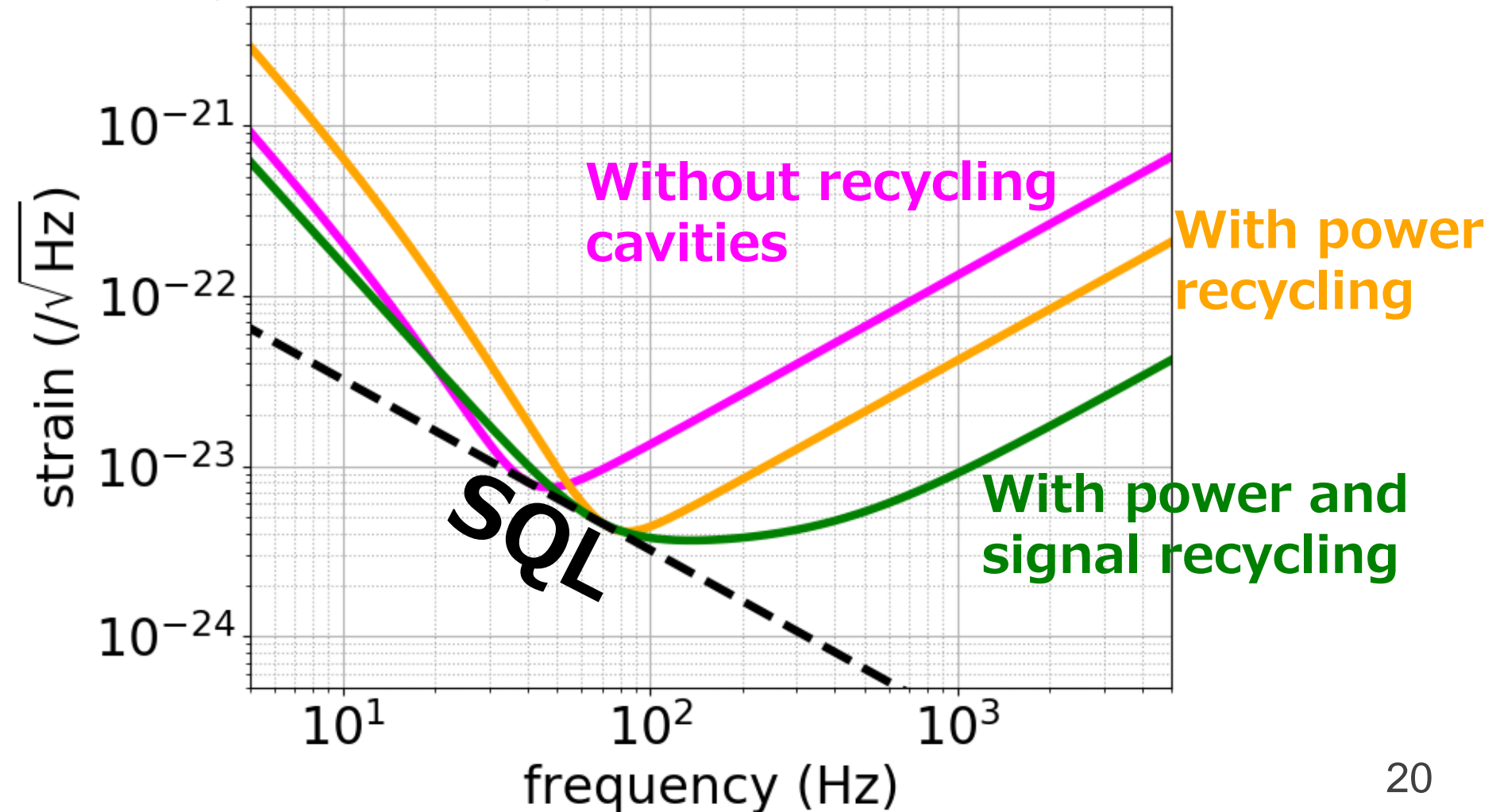
Signal recycling mirror

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



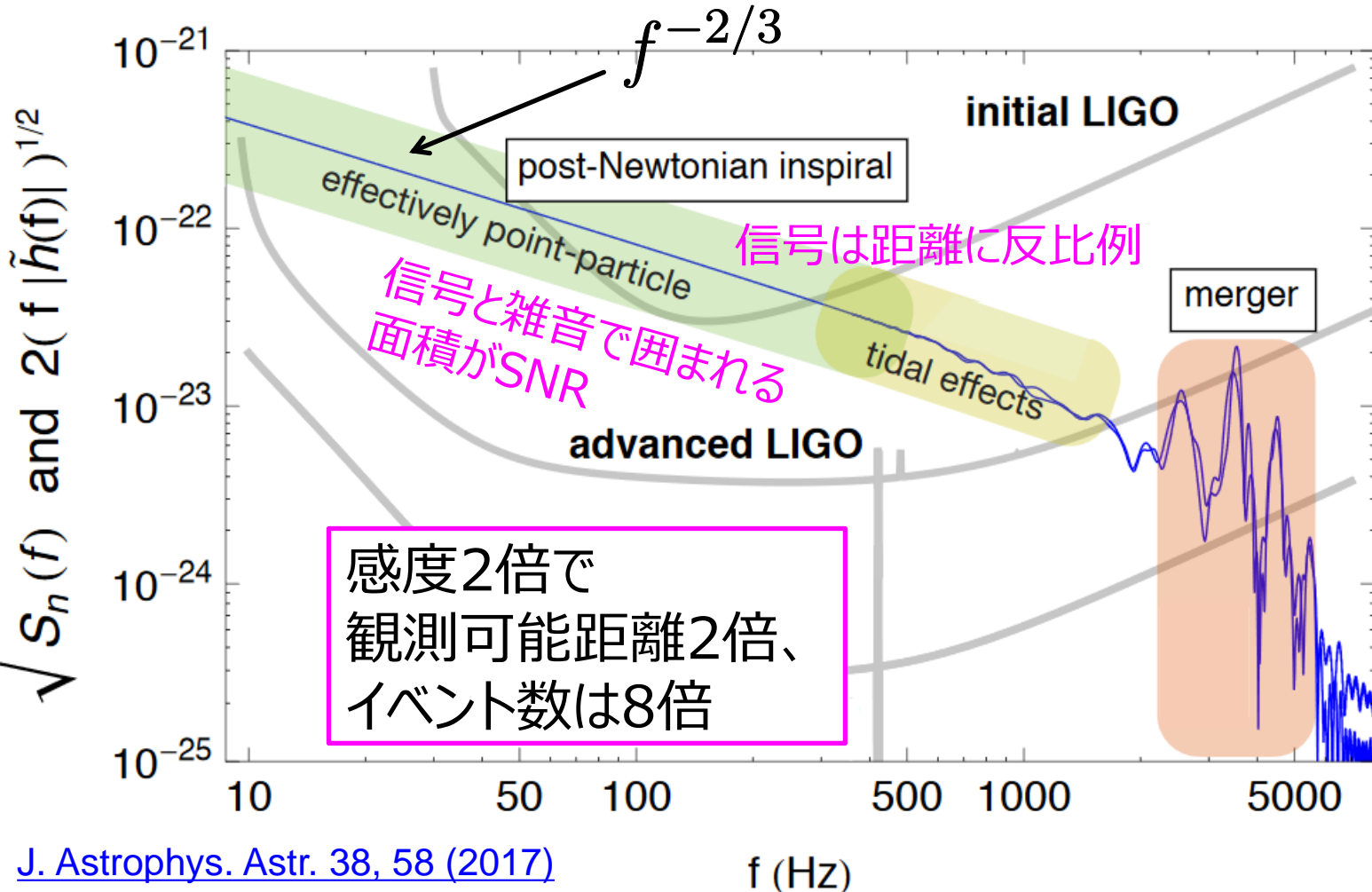
DRFPMIの感度

- 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



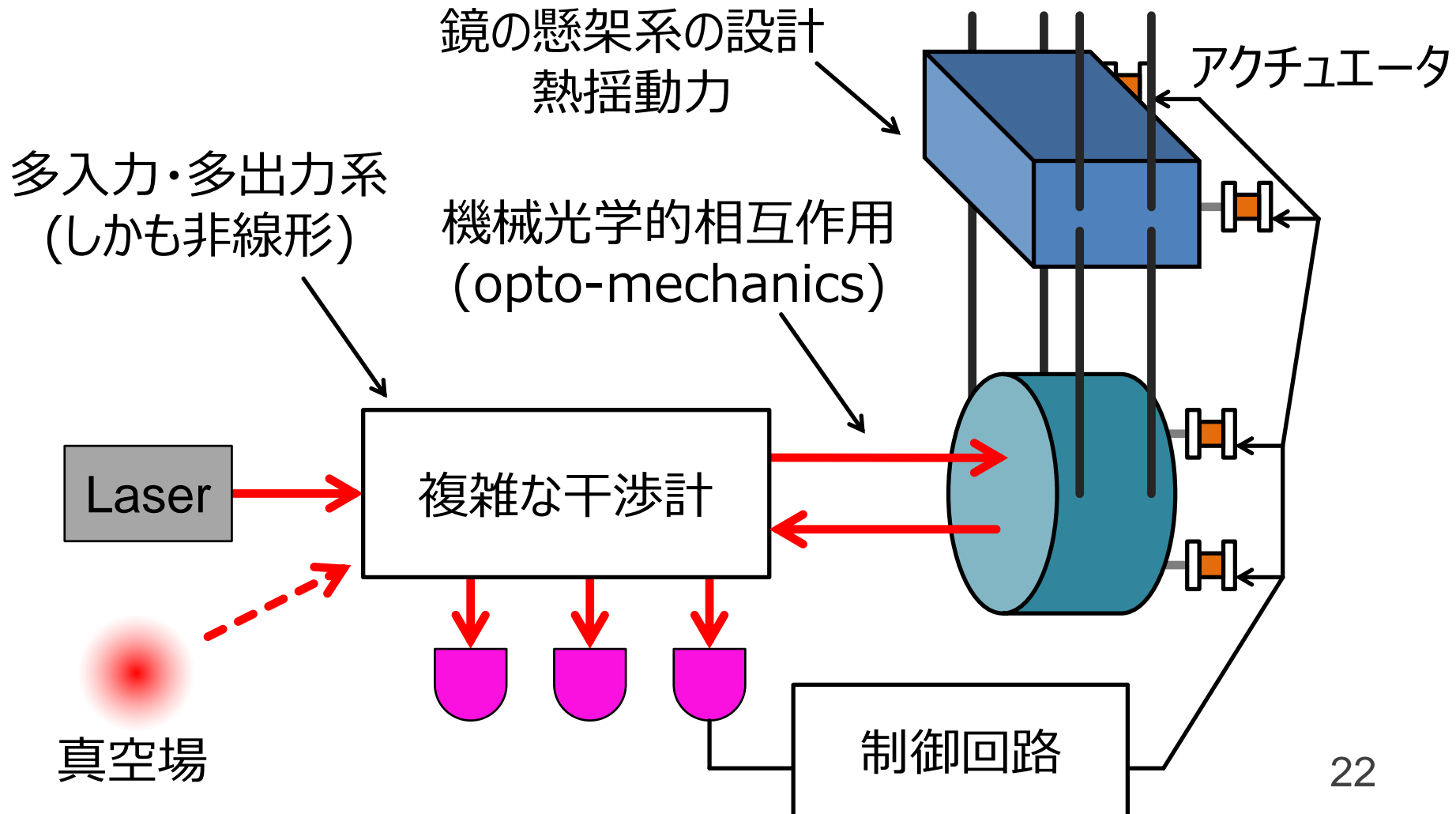
重力波検出器の性能指標

- 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

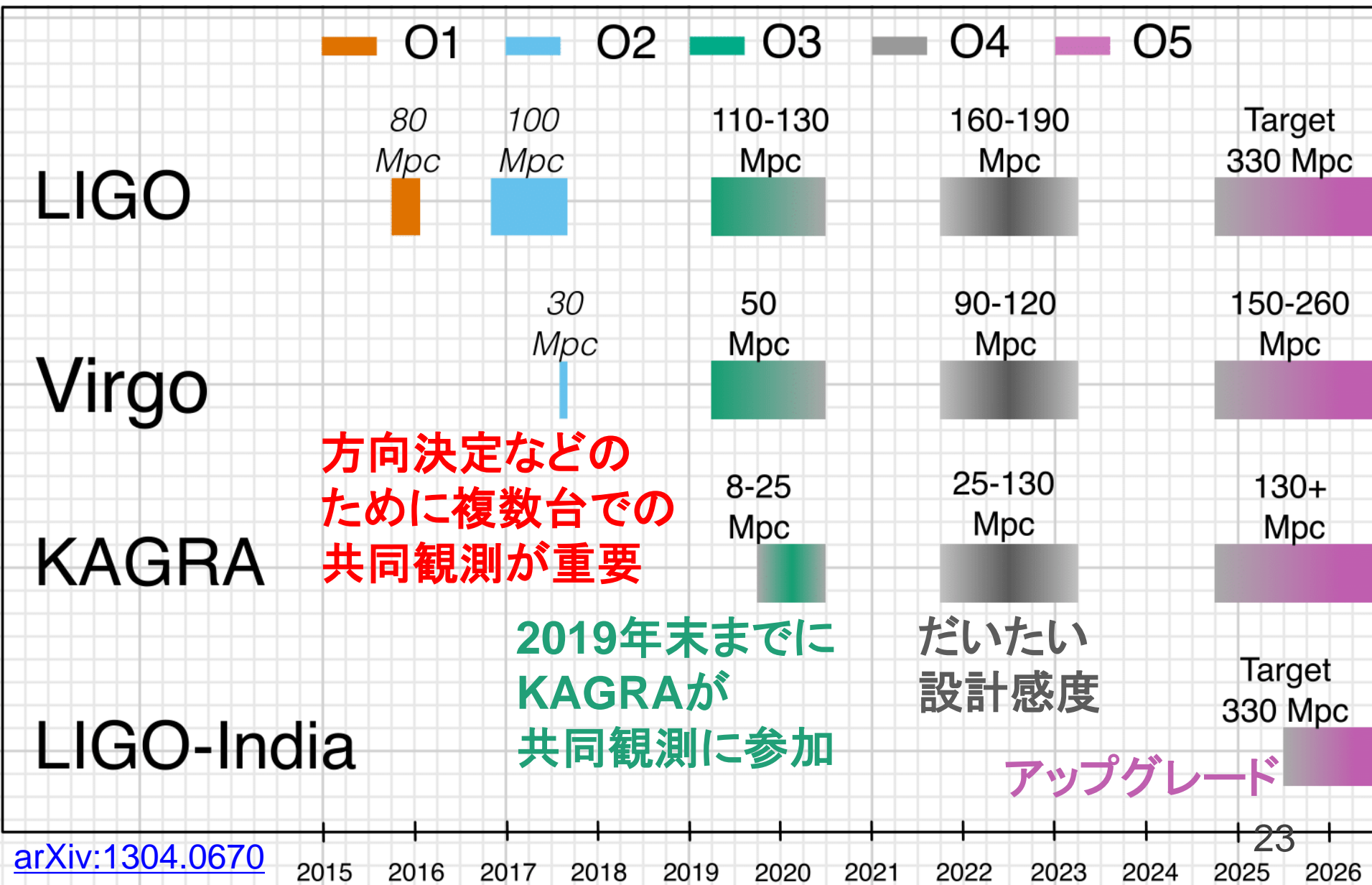


干渉計の深遠な世界

- 干渉計の制御や感度設計は複雑でそれ自体が面白い

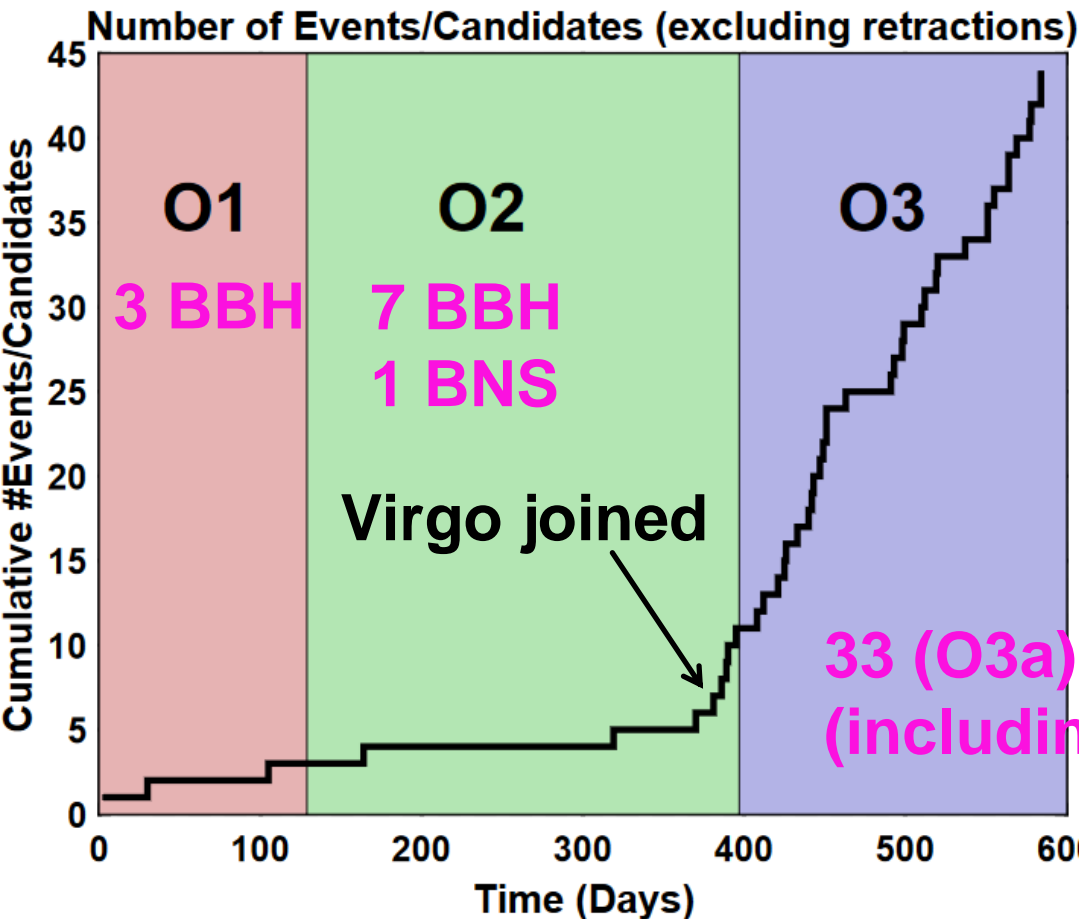


共同観測計画



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が出る
(約1分以内)

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

33 (O3a) + 1 (O3b) Candidates
(including 4 NSBH? 4 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>

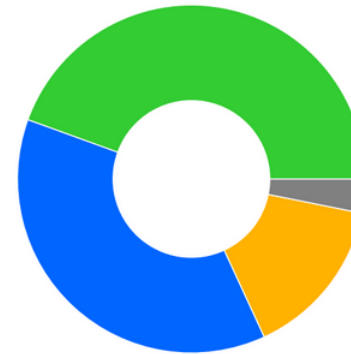
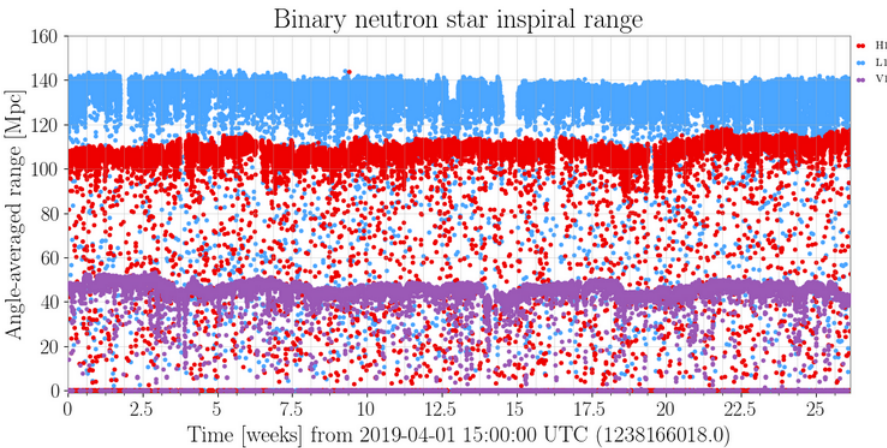
Gravitational Wave Detector Network

Operational Snapshot as of Nov 08, 07:32 UTC

Detector	Status	Duration
<u>GEO 600</u>	Unlocked	5:07
<u>LIGO Hanford</u>	Observing	9:25
<u>LIGO Livingston</u>	Observing	2:47
<u>Virgo</u>	Science	7:10
<u>KAGRA</u>	Future addition	

[Detector status summary pages](#)

[LVC links](#)



Network duty factor

[1238166018-1253977218]

- Triple interferometer [44.5%]
- Double interferometer [37.4%]
- Single interferometer [15.0%]
- No interferometer [3.2%]



H1 operational state

[1238166018-1253977218, state: all]

- Observing [71.2%]
- Ready [0.7%]
- Locked [3.0%]
- Not locked [25.0%]



L1 operational state

[1238166018-1253977218, state: all]

- Observing [75.8%]
- Ready [0.4%]
- Locked [3.7%]
- Not locked [20.1%]



Virgo operational state

[1238166018-1253977218, state: all]

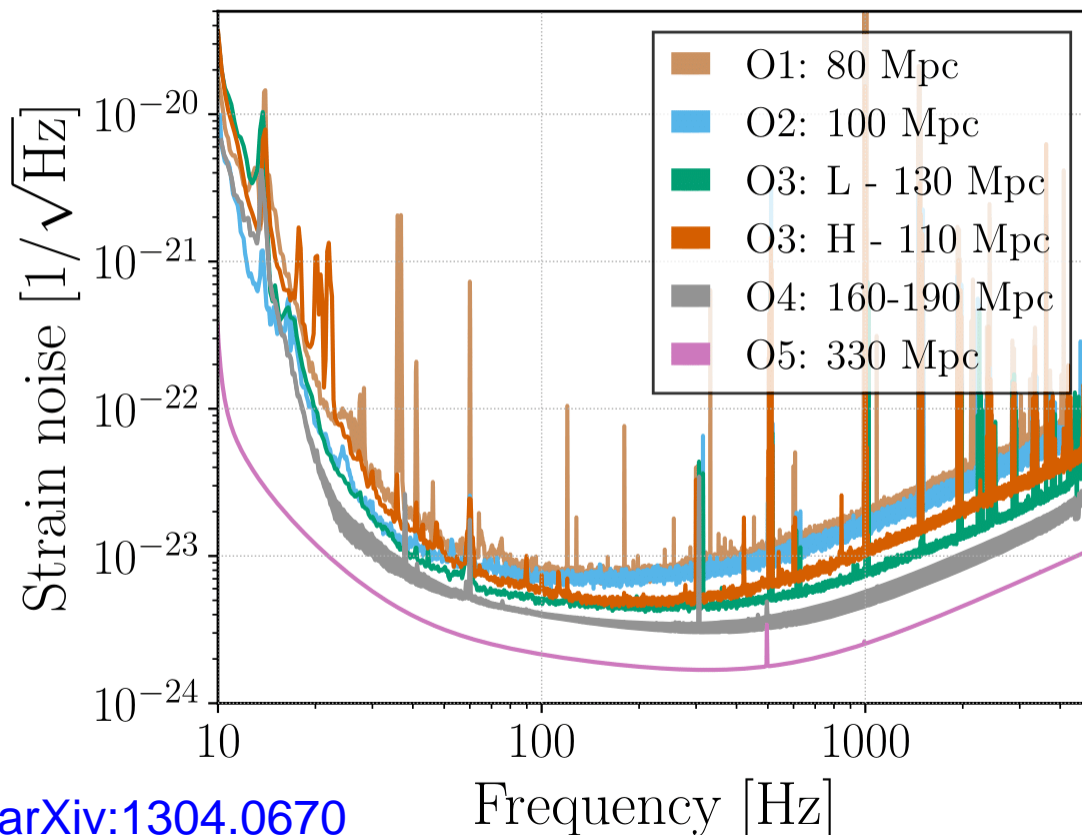
- Observing [76.3%]
- Locked [6.1%]
- Not locked [17.7%]

<https://summary.ligo.org/~detchar/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

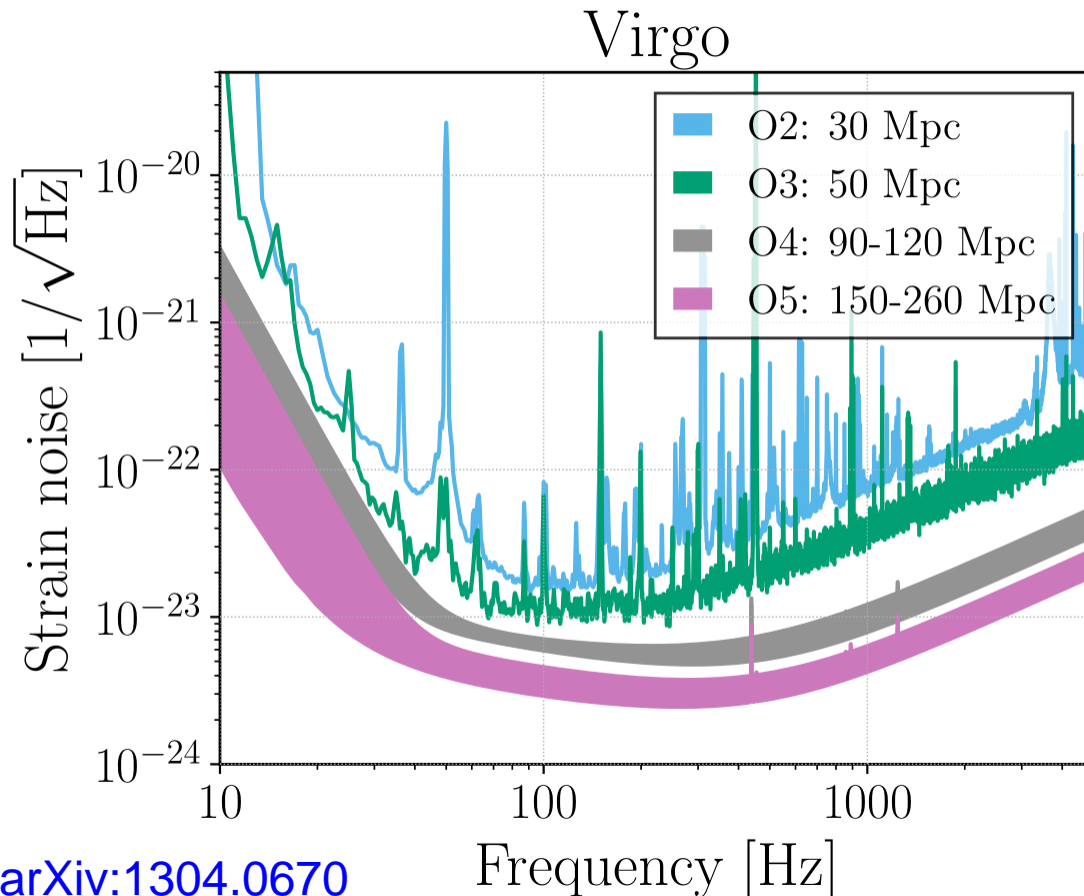


予算も承認

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

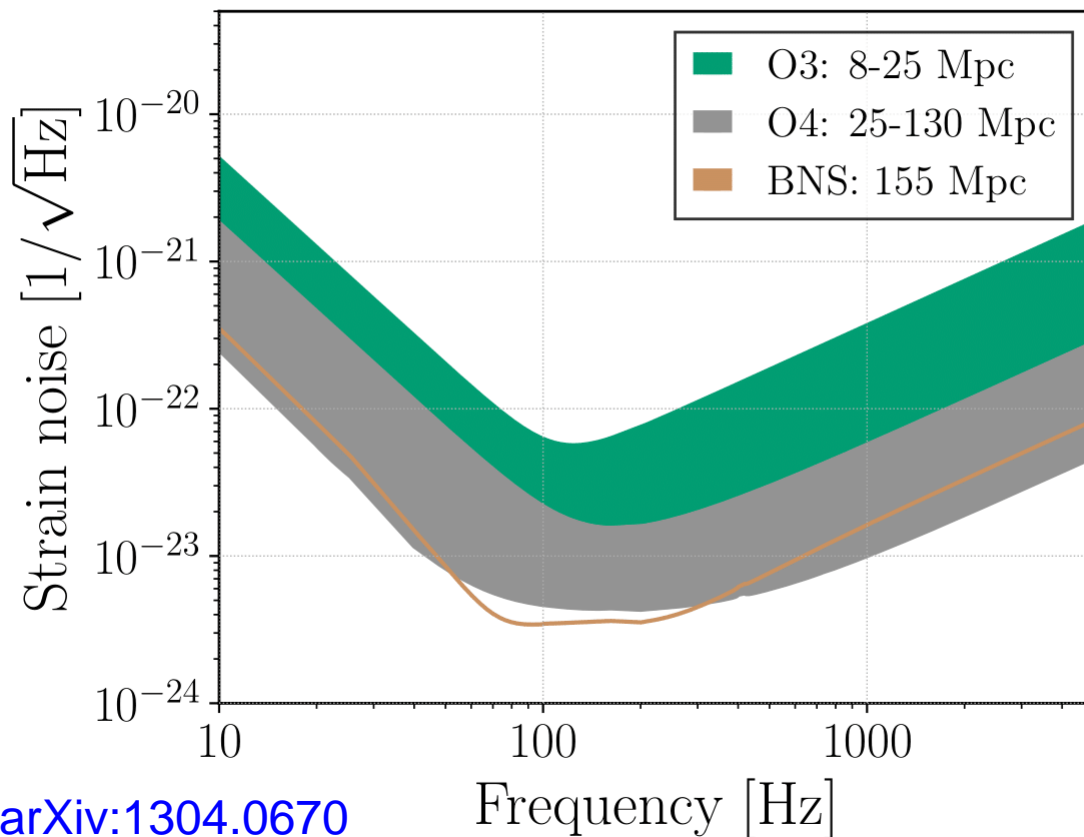


高周波でAdVの感度が設計より悪いのはsignal recycling mirrorがまだ入っていないため

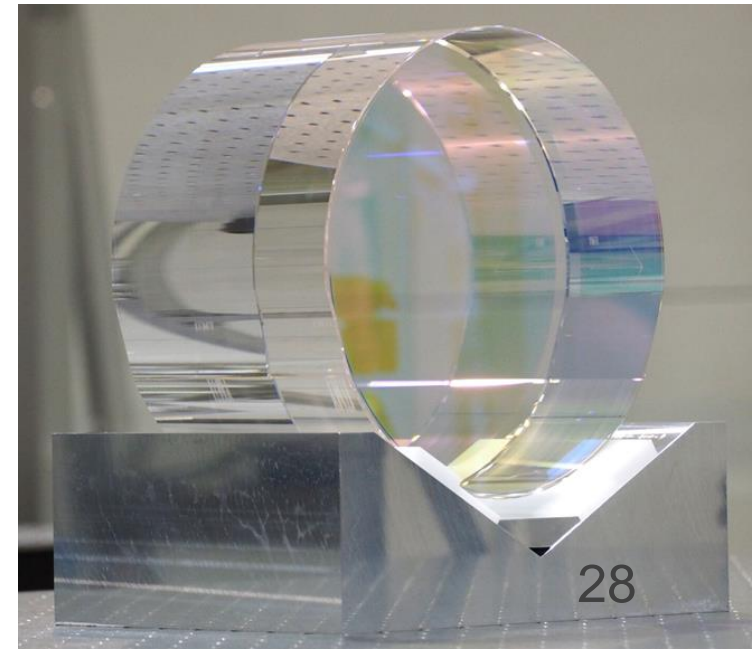
KAGRAの状況

- 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より感度は悪いが、2019年末までに**O3参加予定**

KAGRA



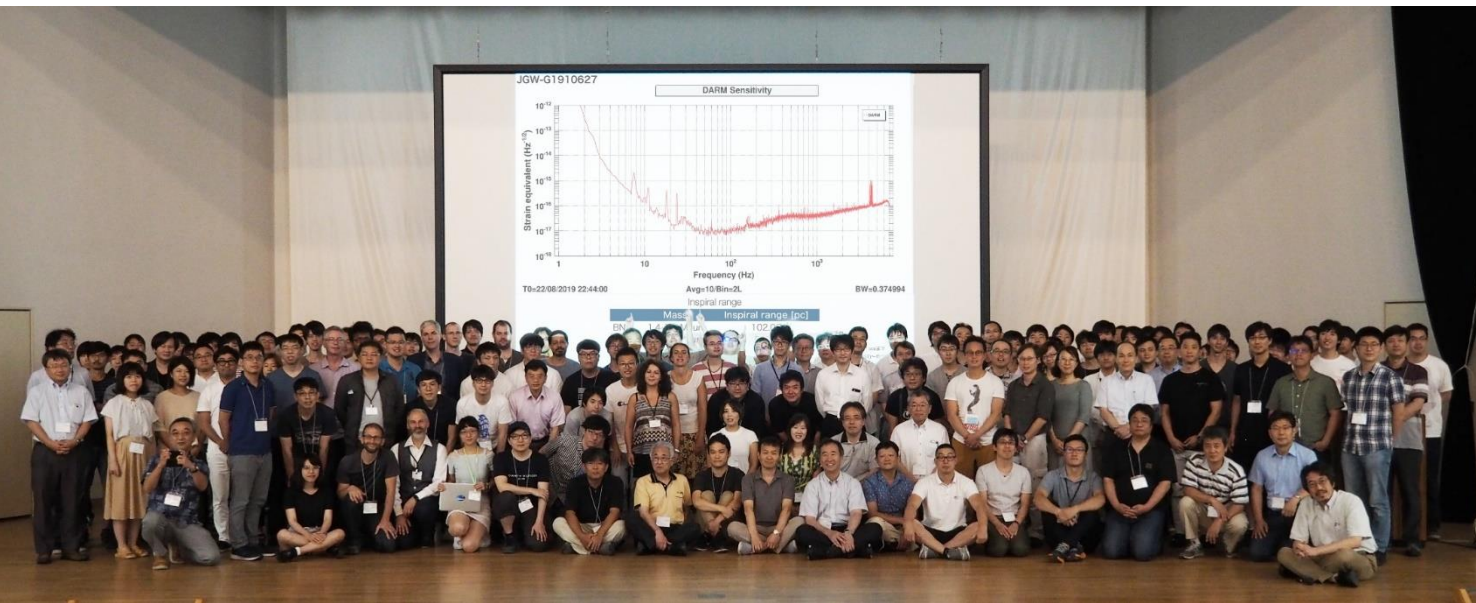
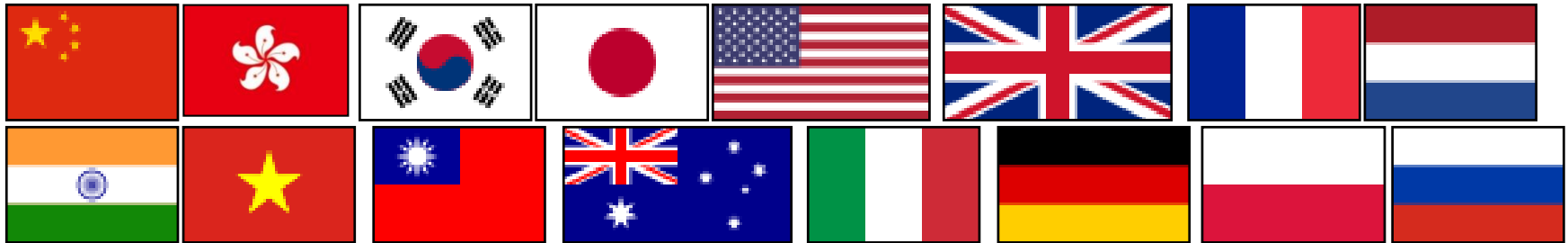
アップグレード計画は策定中



KAGRA計画



- 2010年に予算化
 - 110 institutes, 450+ collaborators (200 authors)
 - 低温と地下建設が特徴
- 参加大歓迎！



Aug 2019
F2F meeting
@ Toyama

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

東京大学宇宙線研究所
重力波観測研究施設



東北大学
ニュートリノ科学センター

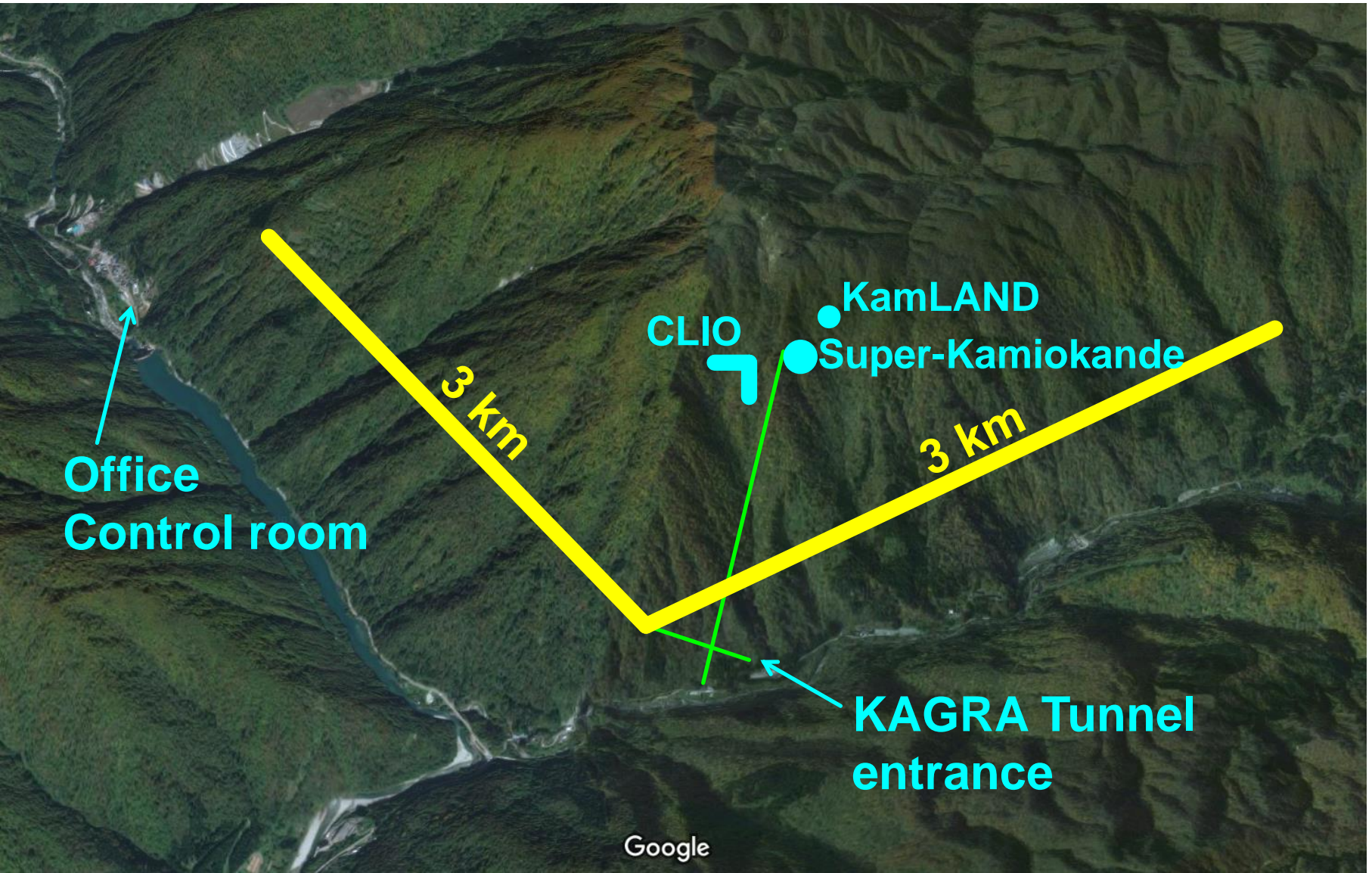
神岡町西茂住

神岡宇宙素粒子研究施設

Google

KAGRAの干渉計

- 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



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
- とはいえすぐには観測開始はできない

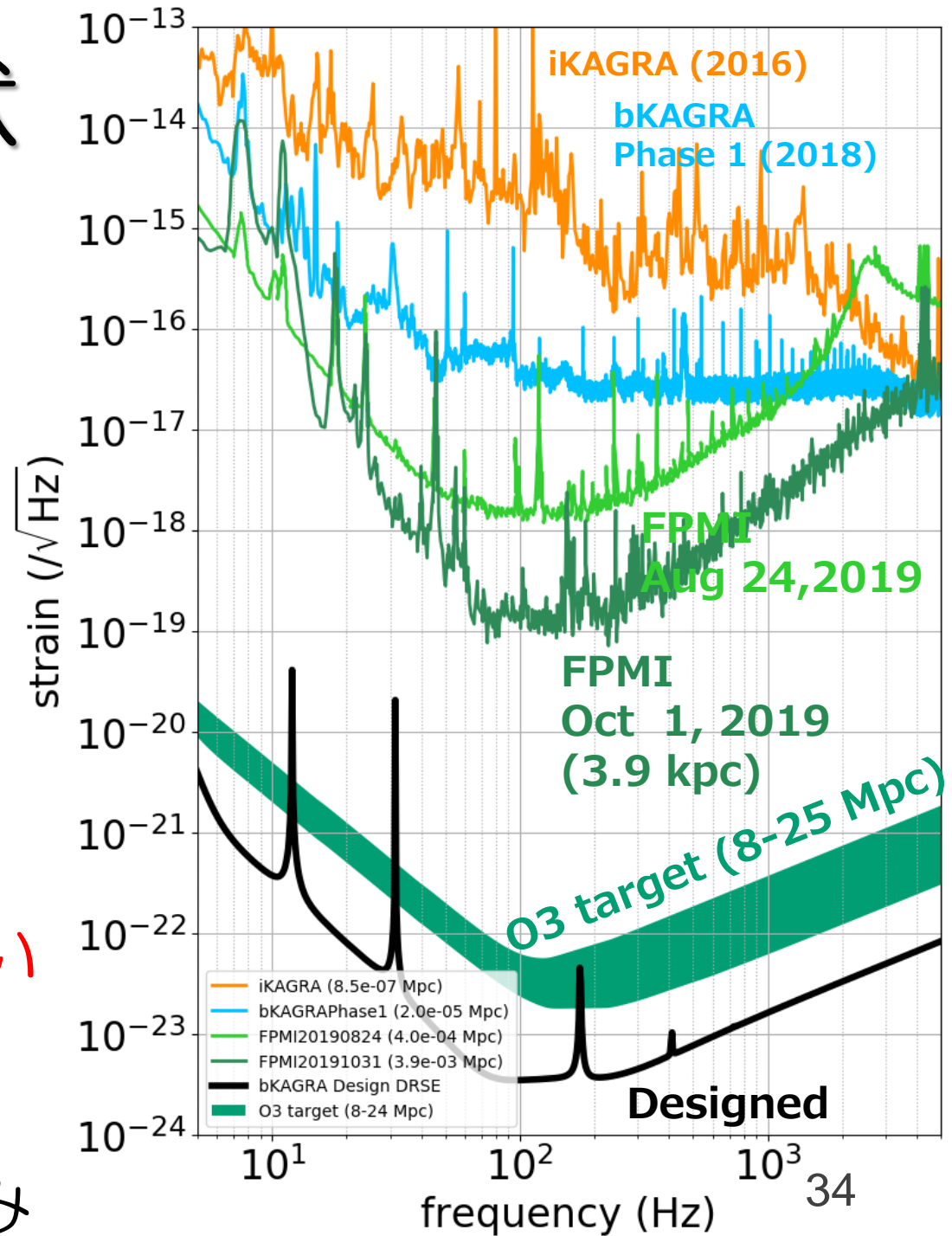


https://www.u-tokyo.ac.jp/focus/ja/articles/z0508_10010.html

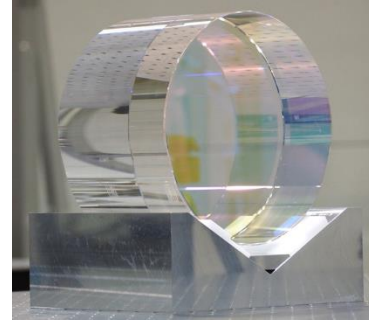


KAGRAの現状

- 現在の感度は4 kpc程度
- サファイア鏡の複屈折の影響が大きいことが6月に判明
- 現在まで power recycling と signal recycling がうまく動いていない
- 2019年末時点での最大到達感度は数Mpcになる見込み



複屈折の影響

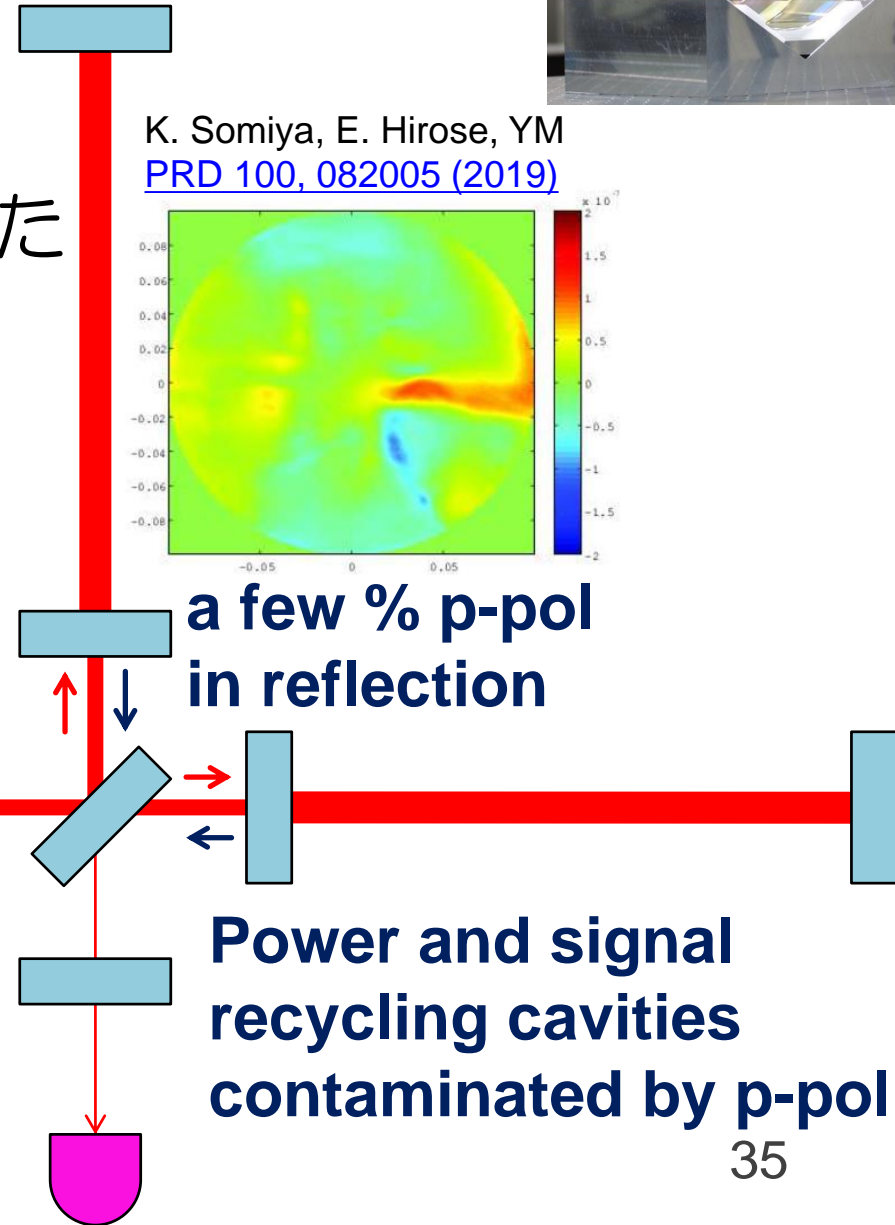
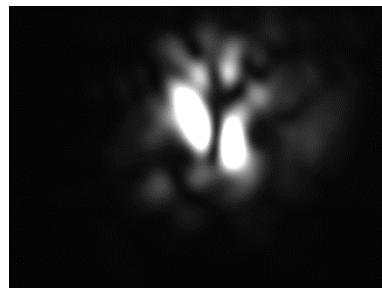


- サファイア結晶軸と光軸がずれており、複屈折の非一様性もあった
- O3参加時は Power recycling と signal recycling なしになる見込み(光学ロスが大きくなり、感度が悪い)

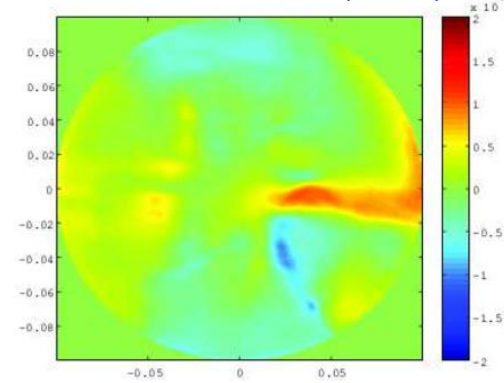
Laser

s-pol

p-pol beam shape from ITM reflection



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



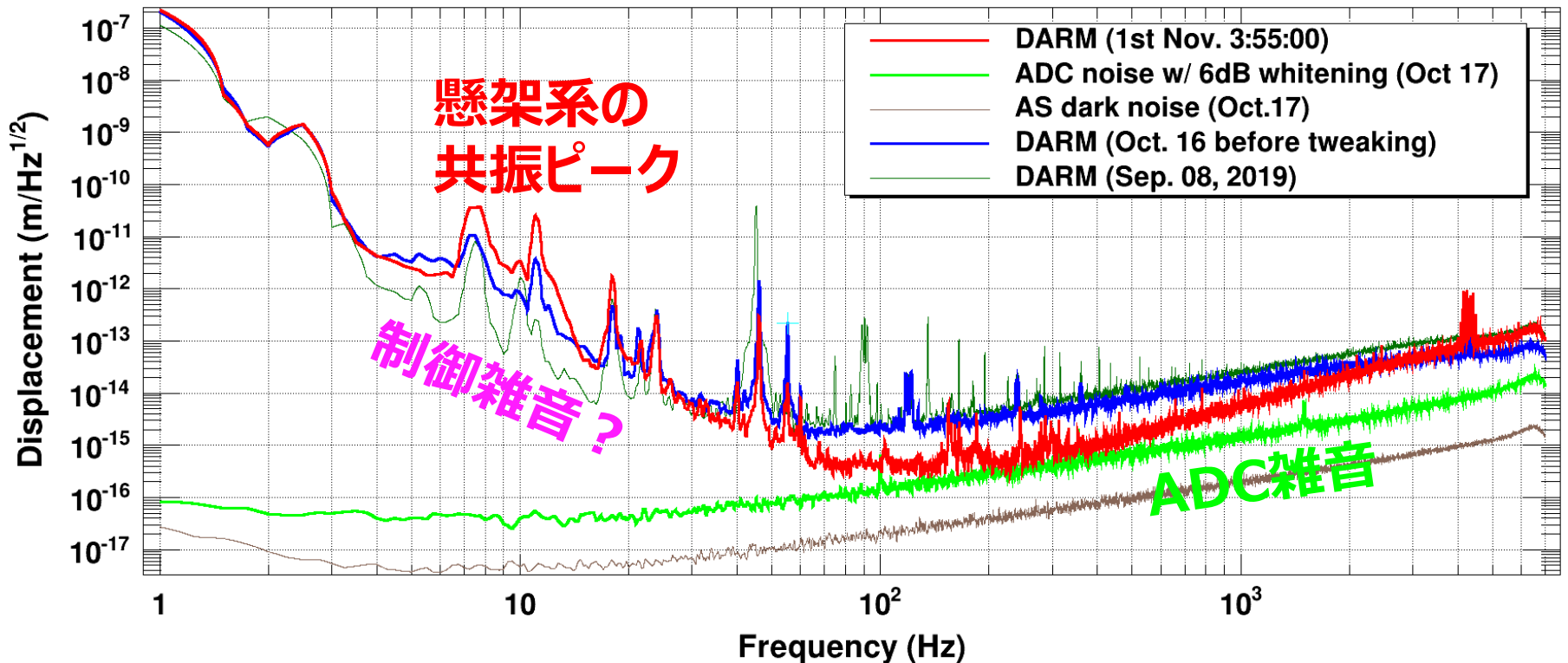
a few % p-pol in reflection

Power and signal recycling cavities contaminated by p-pol

KAGRAの現在の感度

- 重力波検出器はそう簡単には原理雑音までは到達しない

DARM Sensitivity



*T0=16/10/2019 17:46:49

Avg=10/Bin=2L

BW=0.374994

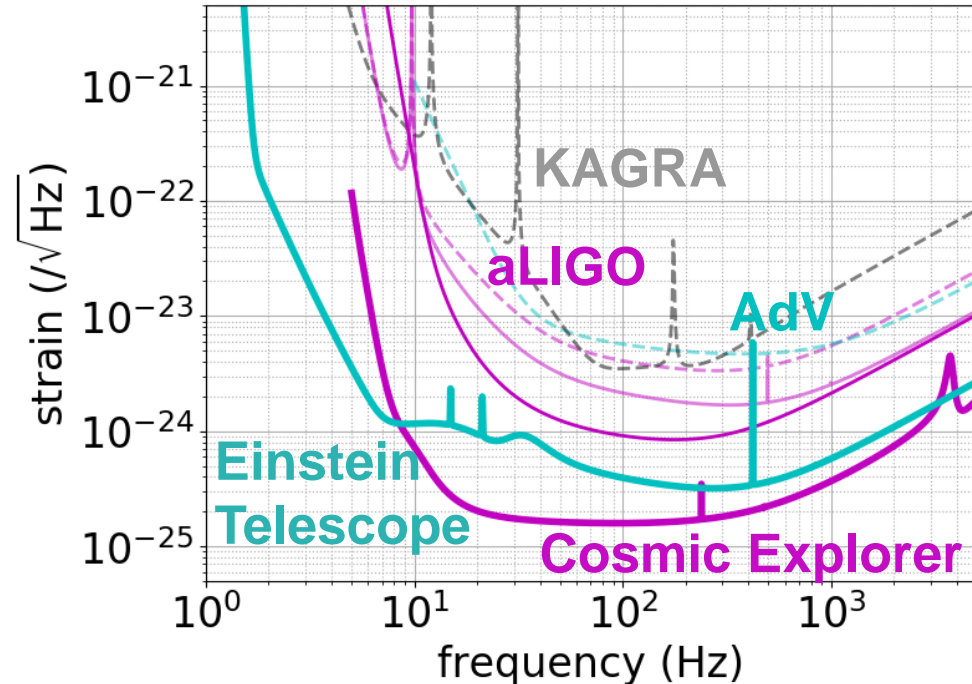
重力波観測の今後

- 感度向上によりイベント数を増やすこと、重力波源のパラメータ推定精度を上げることが重要
 - 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必要がある

→量子雑音低減技術が重要になってくる

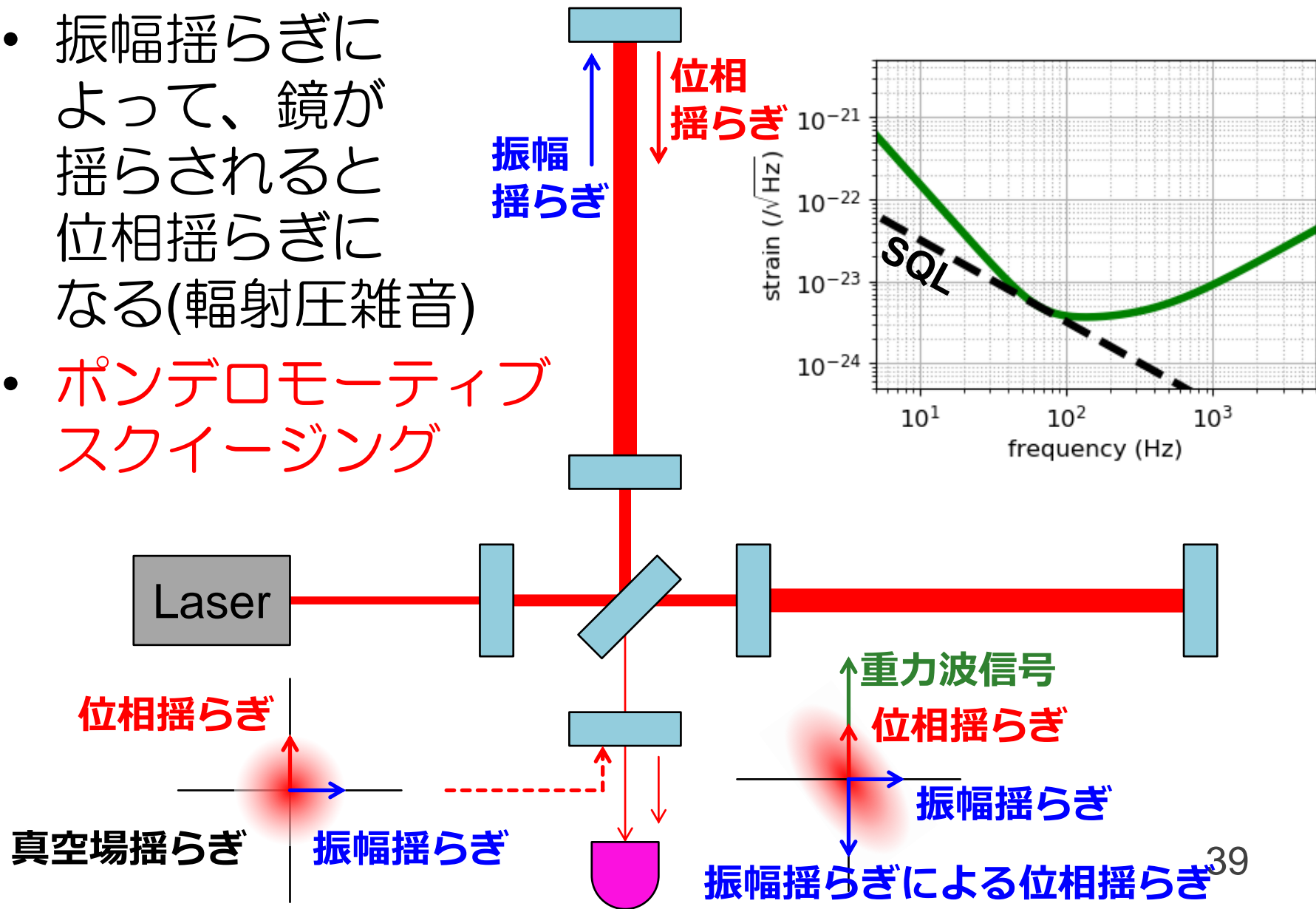
量子雑音低減技術

- スクイズド真空場の導入
周波数非依存ならすでにaLIGO、AdVに導入されている
- Back action evasion
KAGRAは設計に折り込み済み
- 光ばねの利用
KAGRAは設計に折り込み済み
- KAGRAやEinstein Telescope、Cosmic Explorerのような次世代干渉計では低温化により鏡の熱雑音が小さくなっているため、量子雑音低減が有効



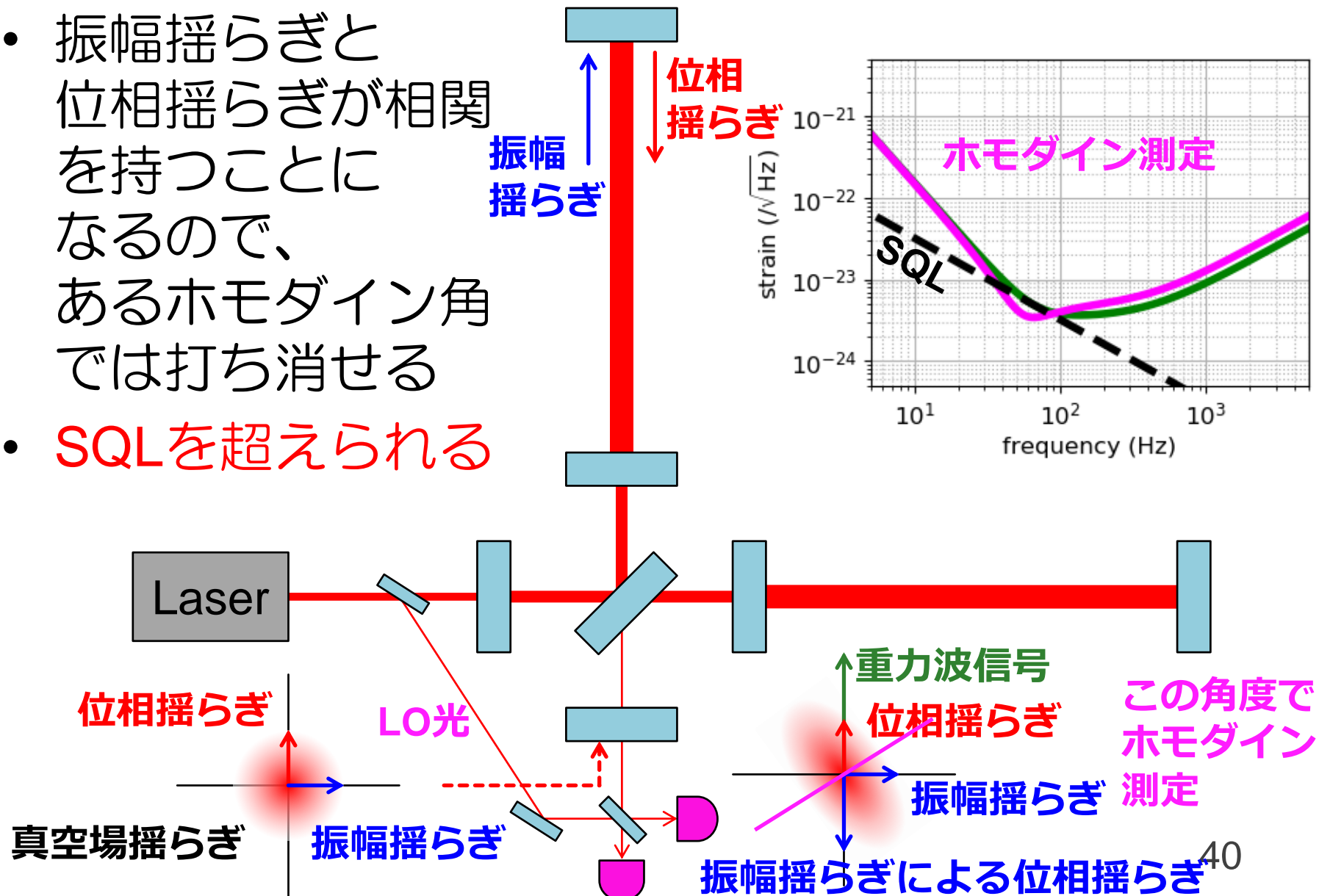
Back-Action Evasion測定

- 振幅揺らぎによって、鏡が揺らされると位相揺らぎになる(輻射圧雑音)
- **ポンデロモーティブスクィージング**



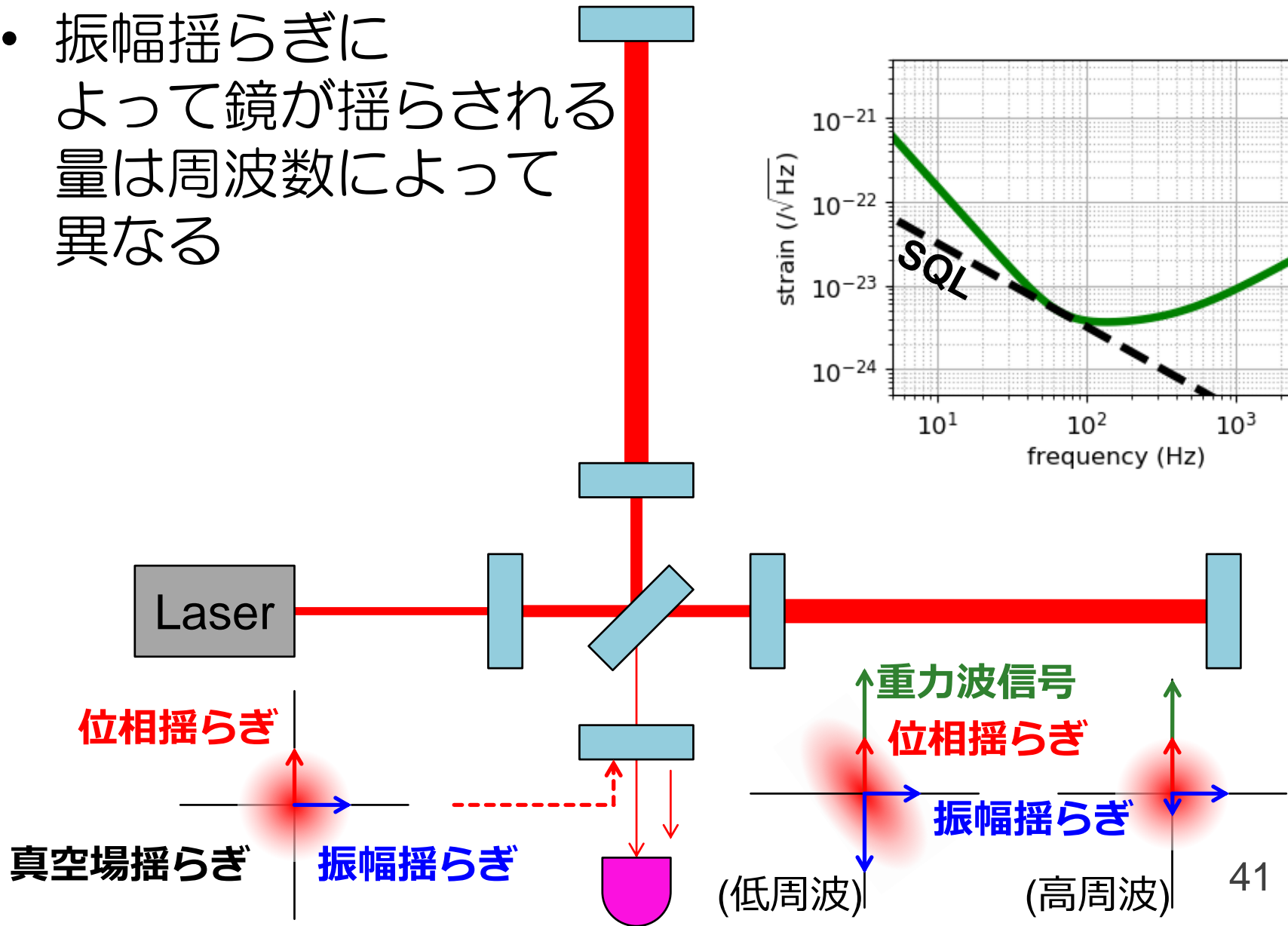
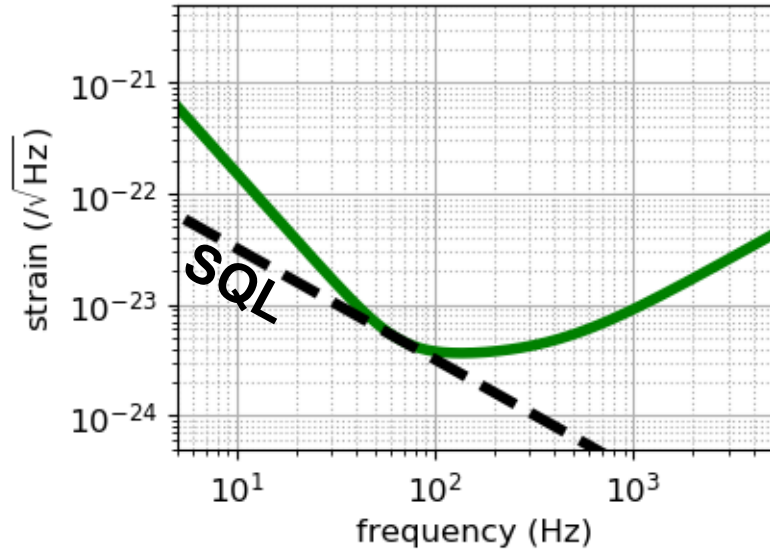
Back-Action Evasion測定

- 振幅揺らぎと位相揺らぎが相関を持つことになるので、あるホモダイン角では打ち消せる
- SQLを超えられる



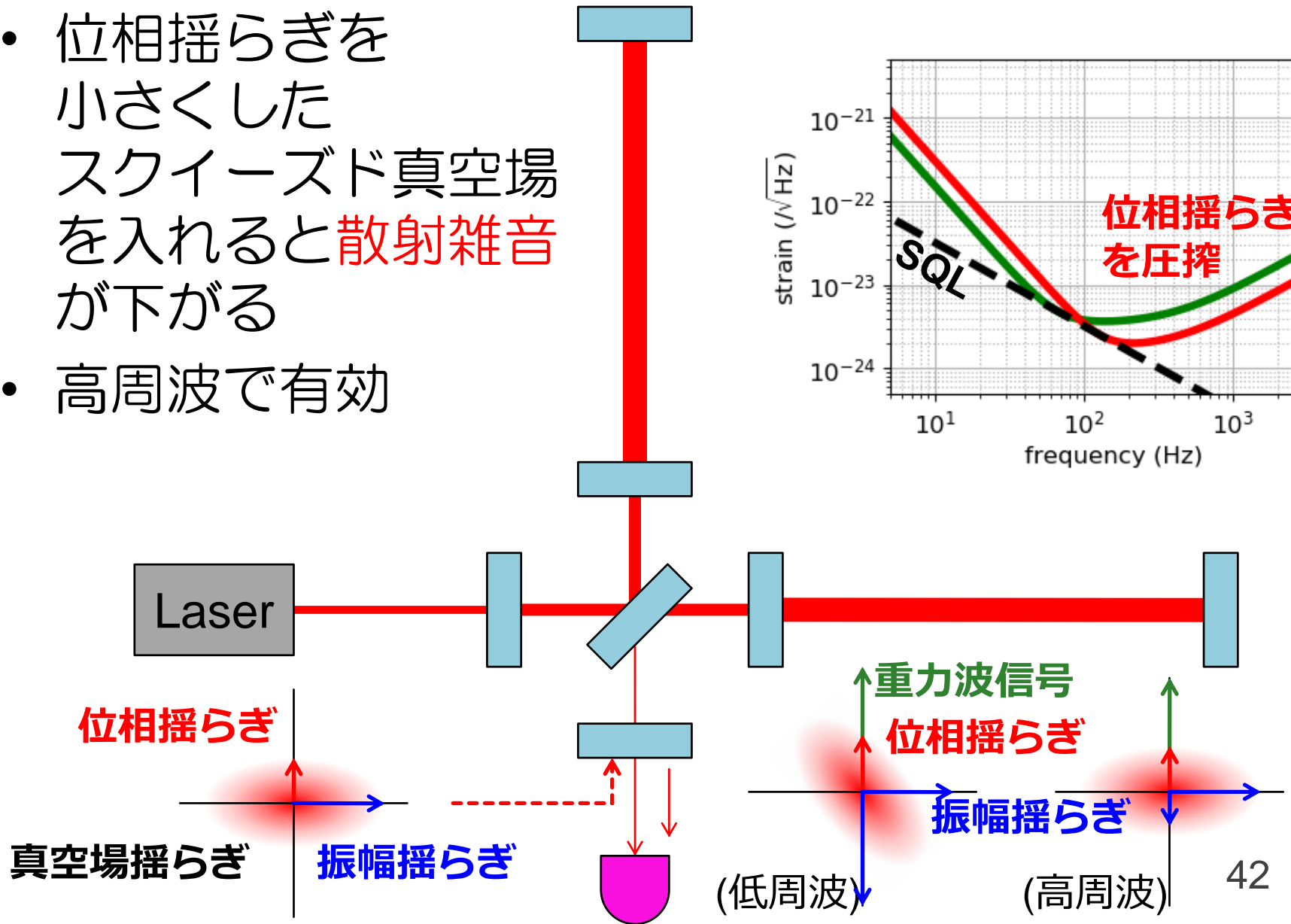
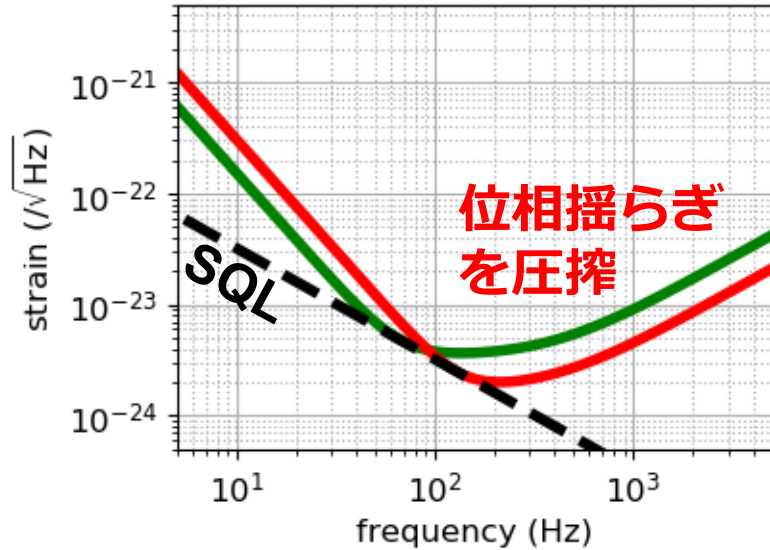
スクイーズド真空場の導入

- 振幅揺らぎによって鏡が揺らされる量は周波数によって異なる



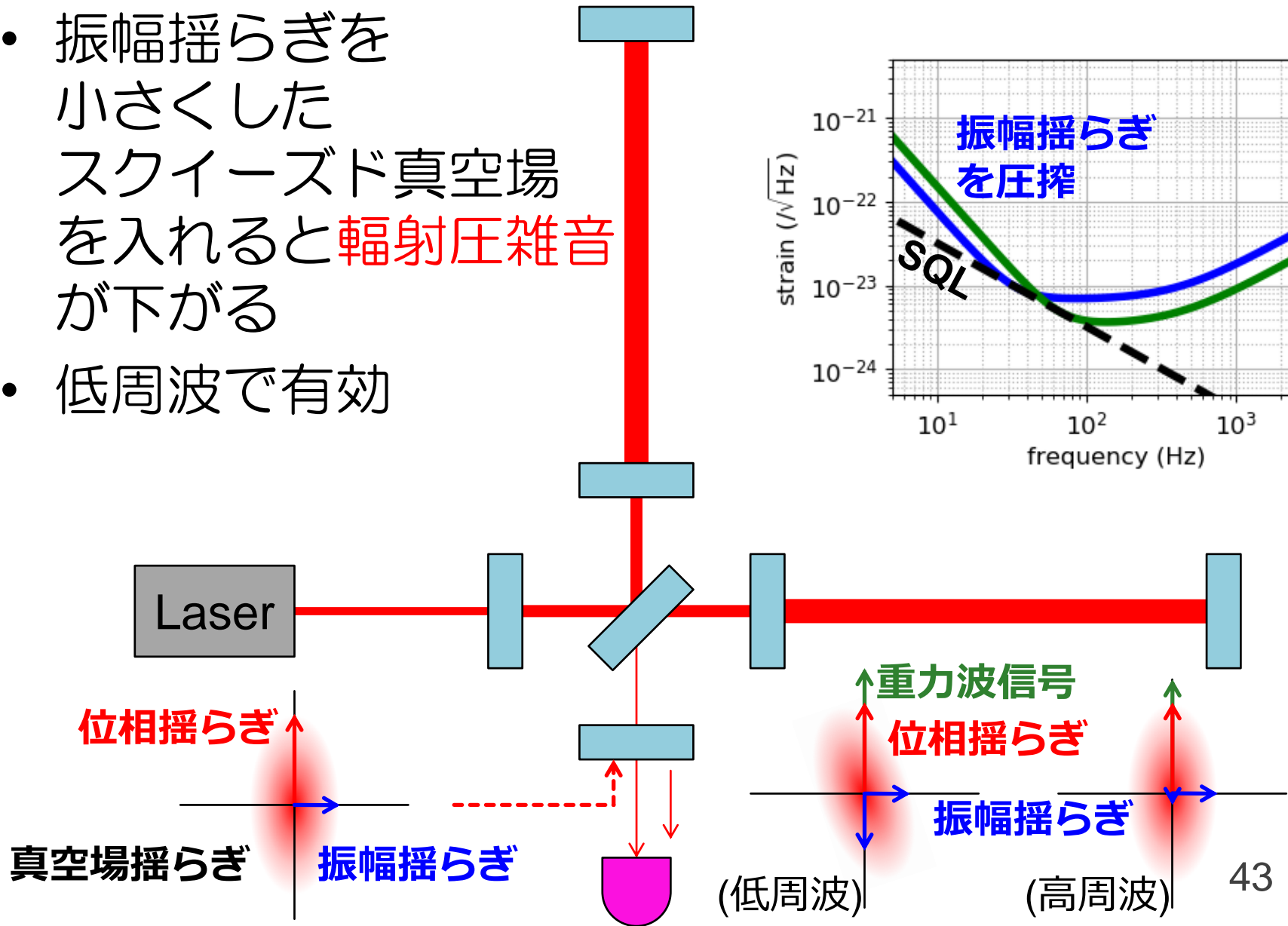
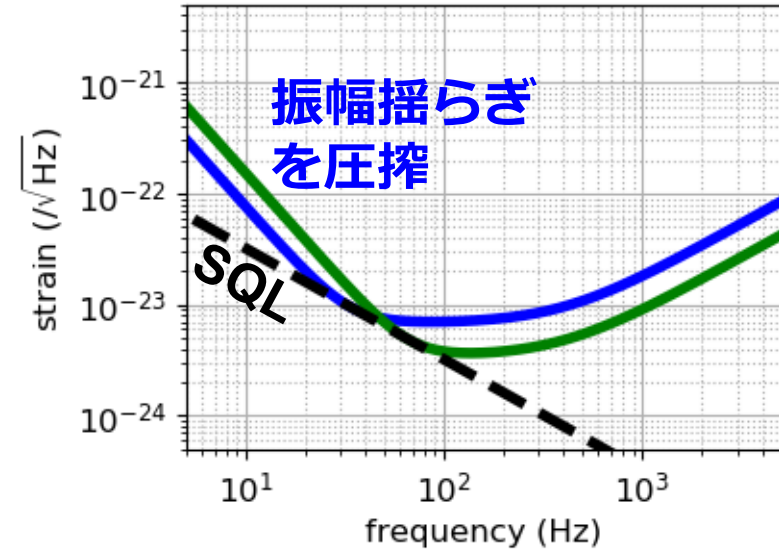
スクイーズド真空場の導入

- 位相揺らぎを小さくしたスクイーズド真空場を入れると**散射雑音**が下がる
- 高周波で有効



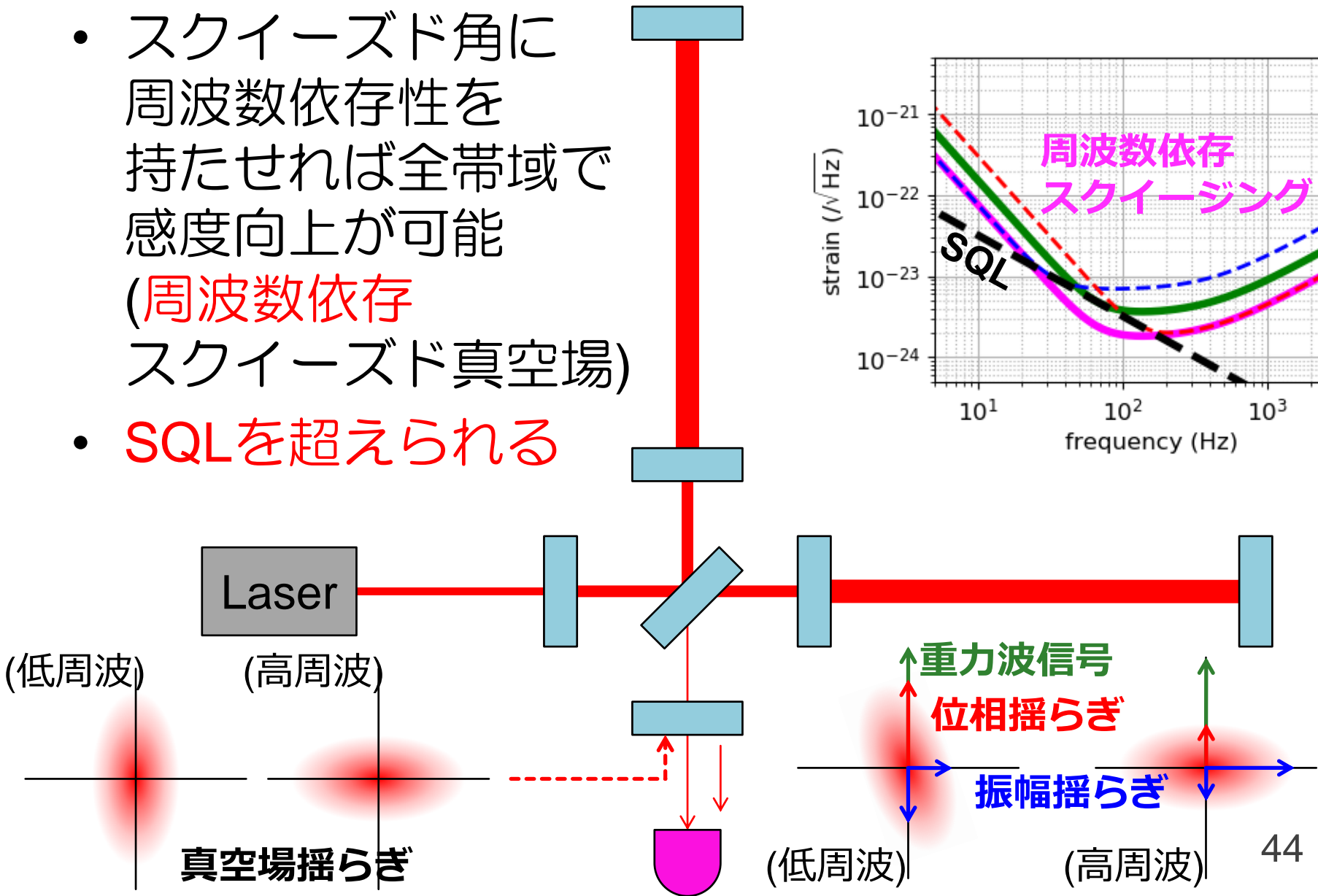
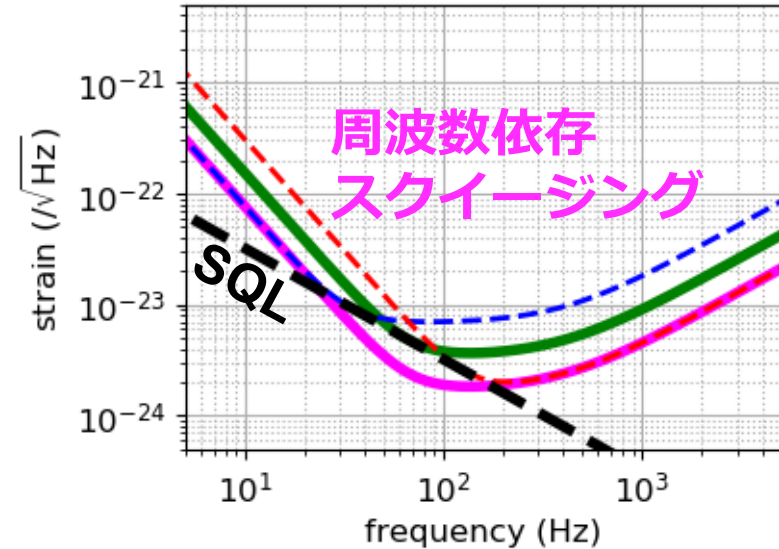
スクイーズド真空場の導入

- 振幅揺らぎを小さくしたスクイーズド真空場を入れると**輻射圧雑音**が下がる
- 低周波で有効



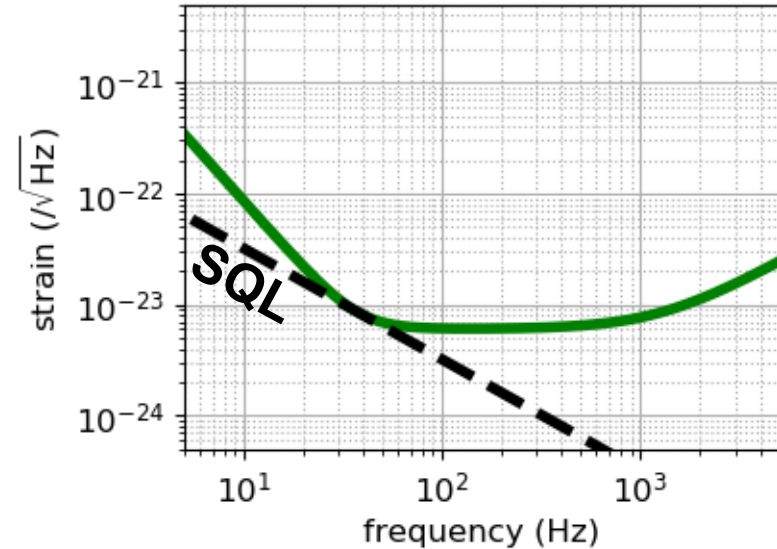
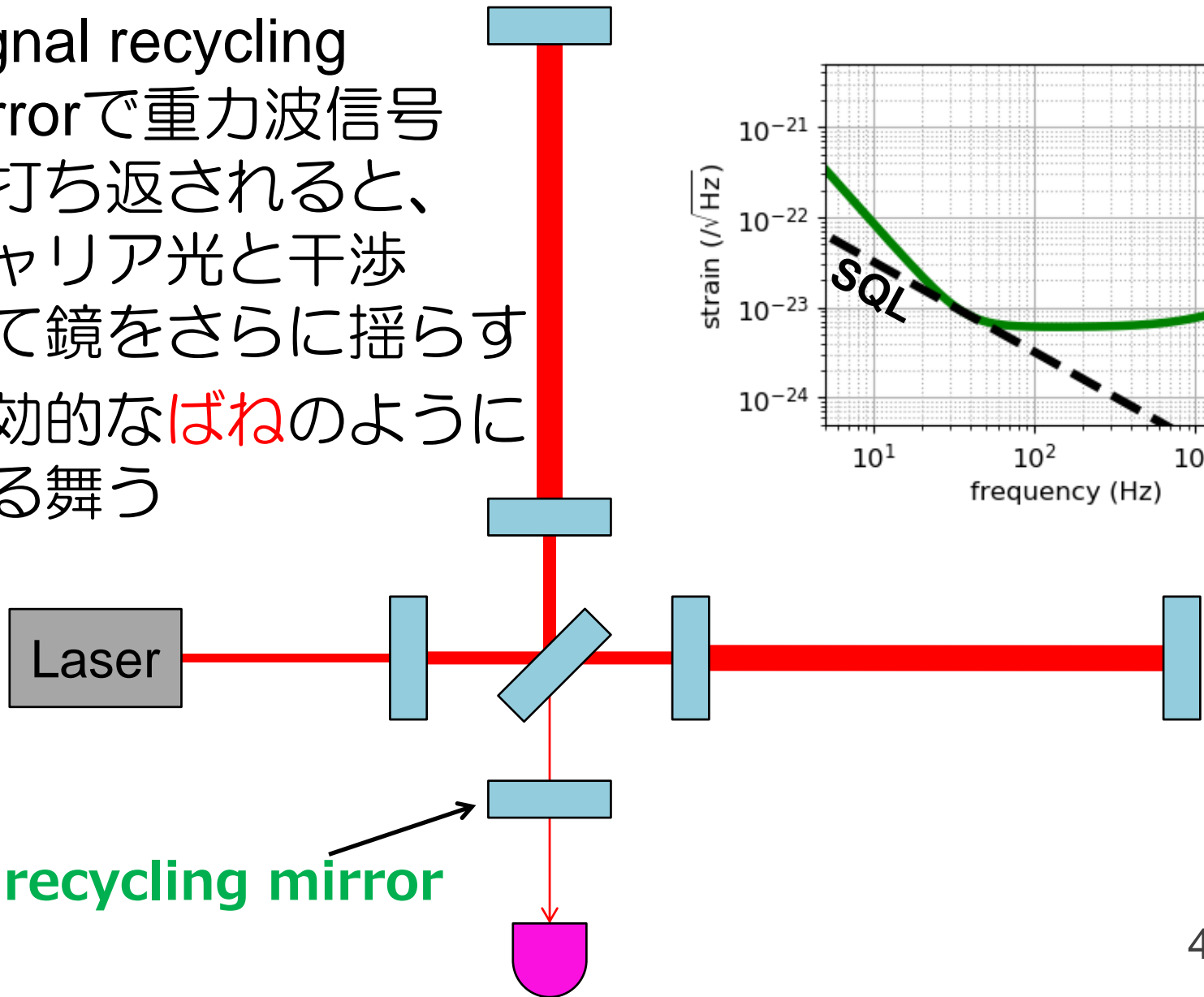
スクイーズド真空場の導入

- スクイーズド角に周波数依存性を持たせれば全帯域で感度向上が可能
(周波数依存スクイーズド真空場)
- SQLを超えられる



光ばねの利用

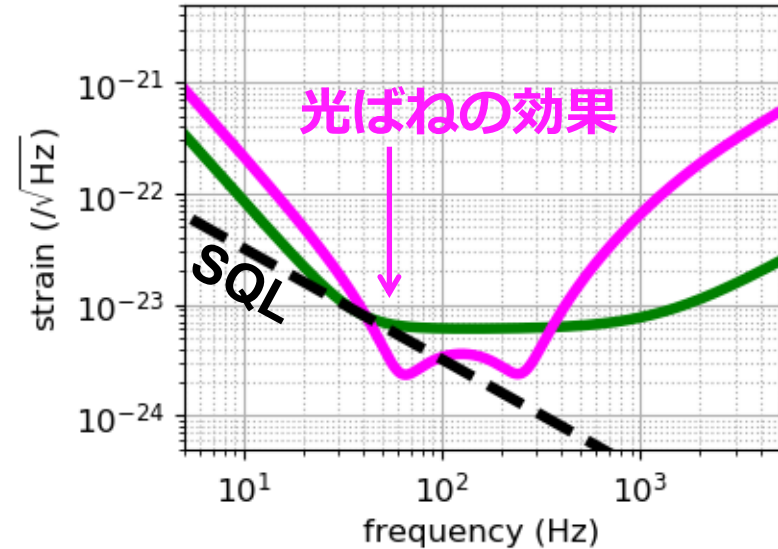
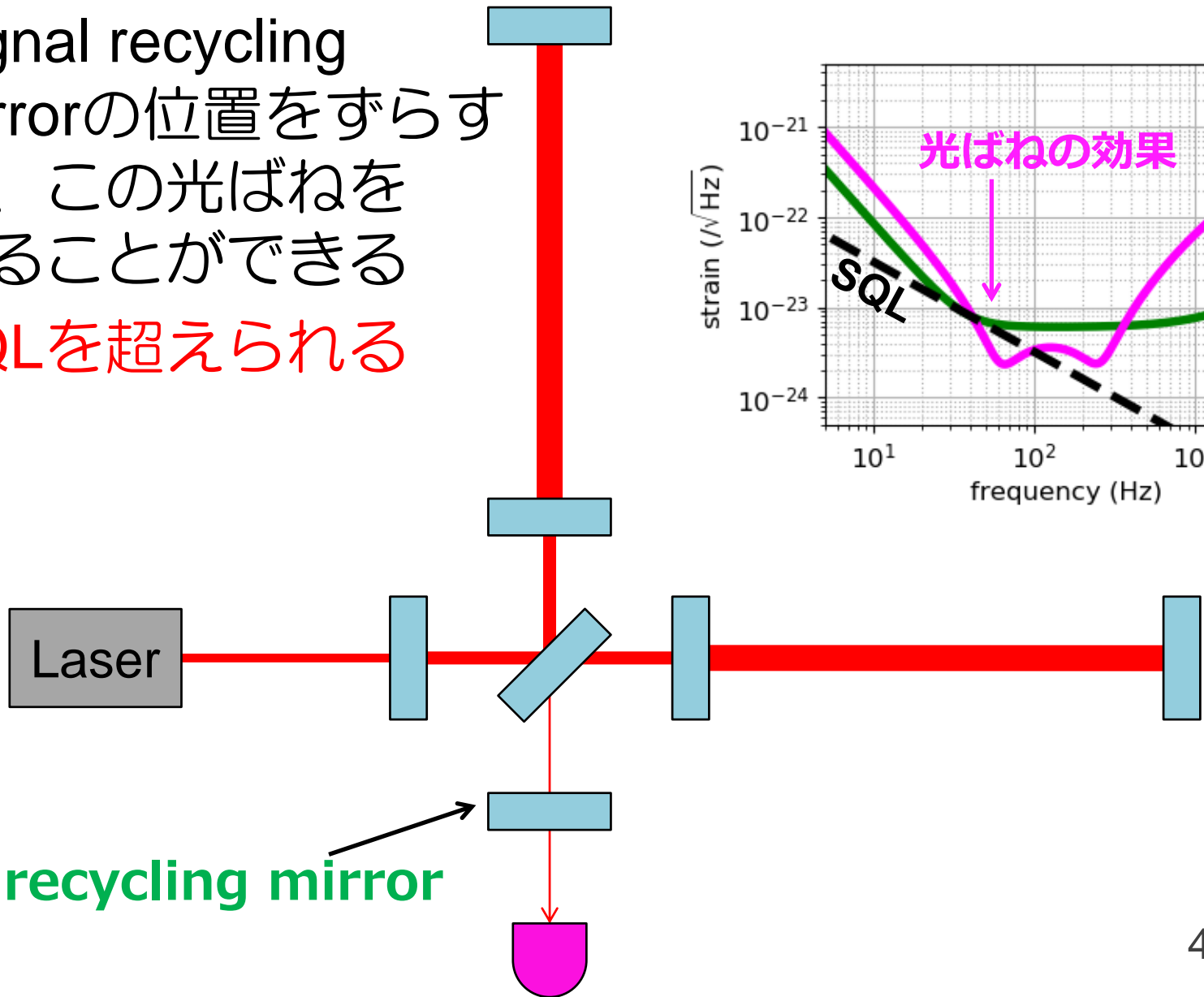
- Signal recycling mirrorで重力波信号が打ち返されると、キャリア光と干渉して鏡をさらに揺らす
- 実効的な**ばね**のように振る舞う



Signal recycling mirror

光ばねの利用

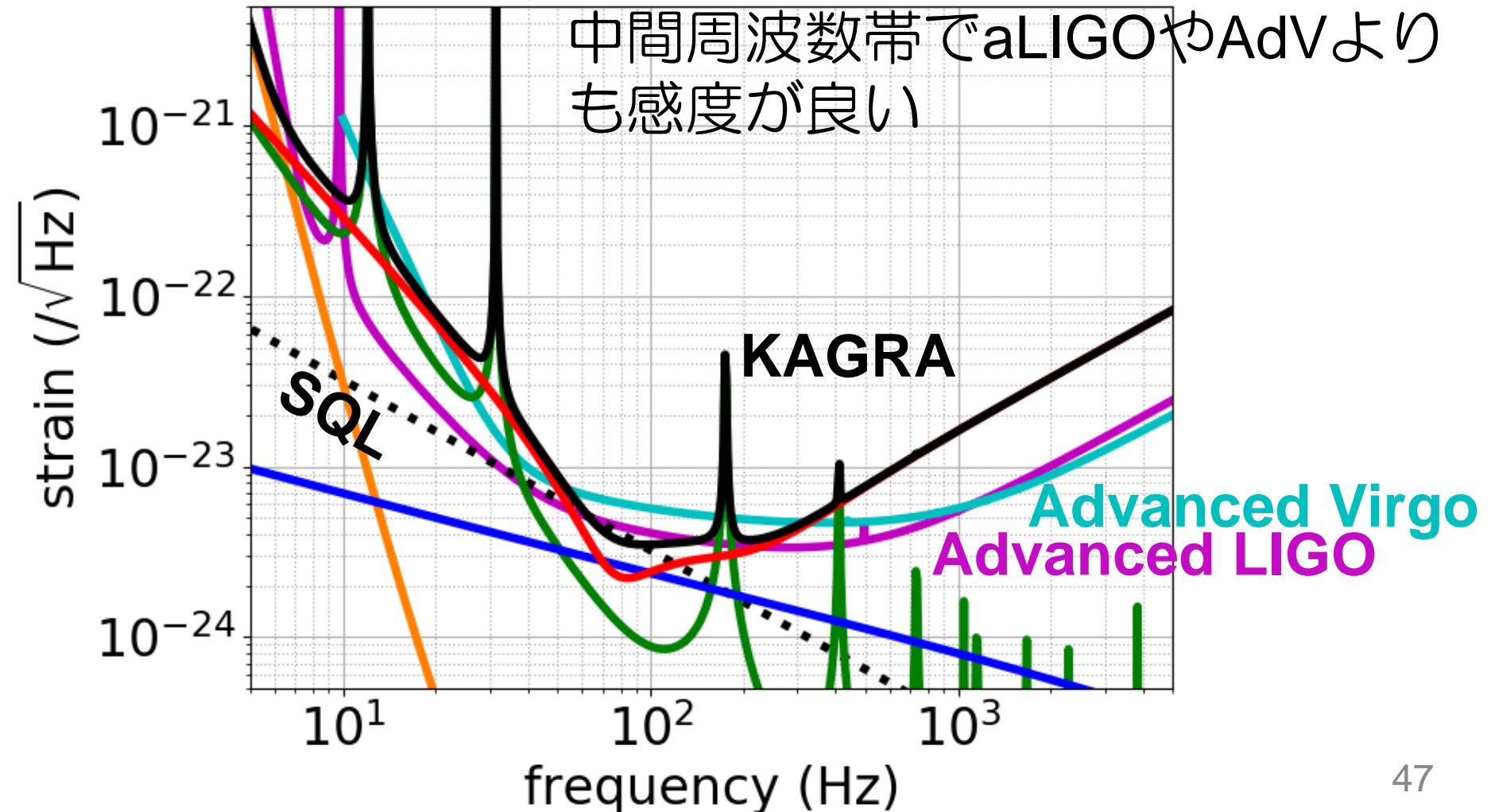
- Signal recycling mirrorの位置をずらすと、この光ばねを作ることができる
- SQLを超えられる



Signal recycling mirror

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、

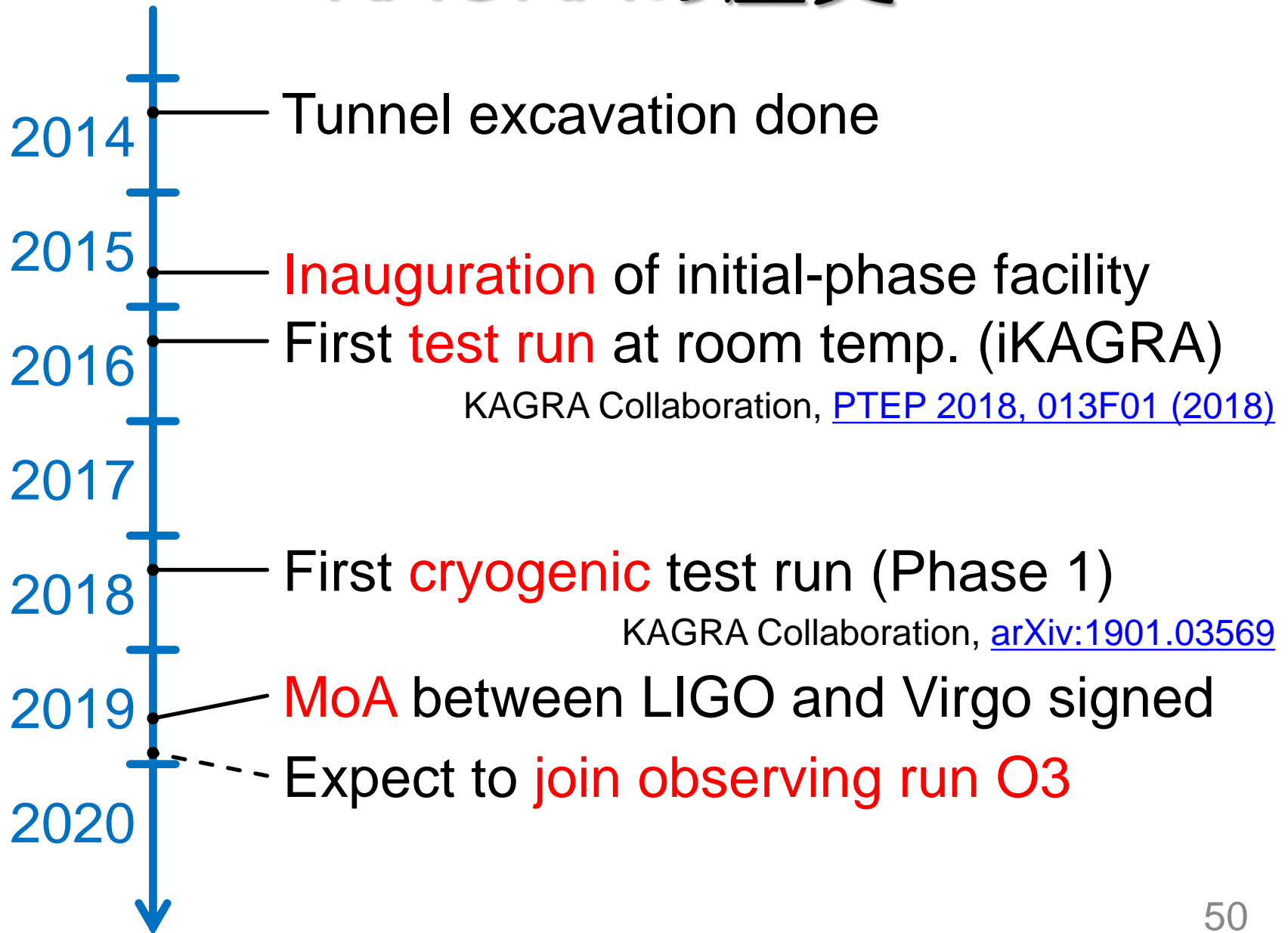


まとめ

- 重力波物理学・天文学は始まったばかり
- LIGO, Virgo, KAGRAのどれもまだ設計感度に到達しておらず、**今後数年で感度2倍以上** (イベントレート10倍程度)になる見込み
- KAGRAには不具合があるが、**2019年内に観測開始**を目指している
- 今後の感度向上には**量子雑音低減技術**が重要
- KAGRAは低温であることを活かし、**先進的な量子雑音低減技術を導入予定**

Supplemental Slides

KAGRAの歴史



KAGRA Joining Observation

- Improves 3+ detector **duty factor**
LHV 34 % \rightarrow LHVK 65 %
(assuming 70 % duty factor for single detector)

S. Haino,
[JGW-G1808212](#)

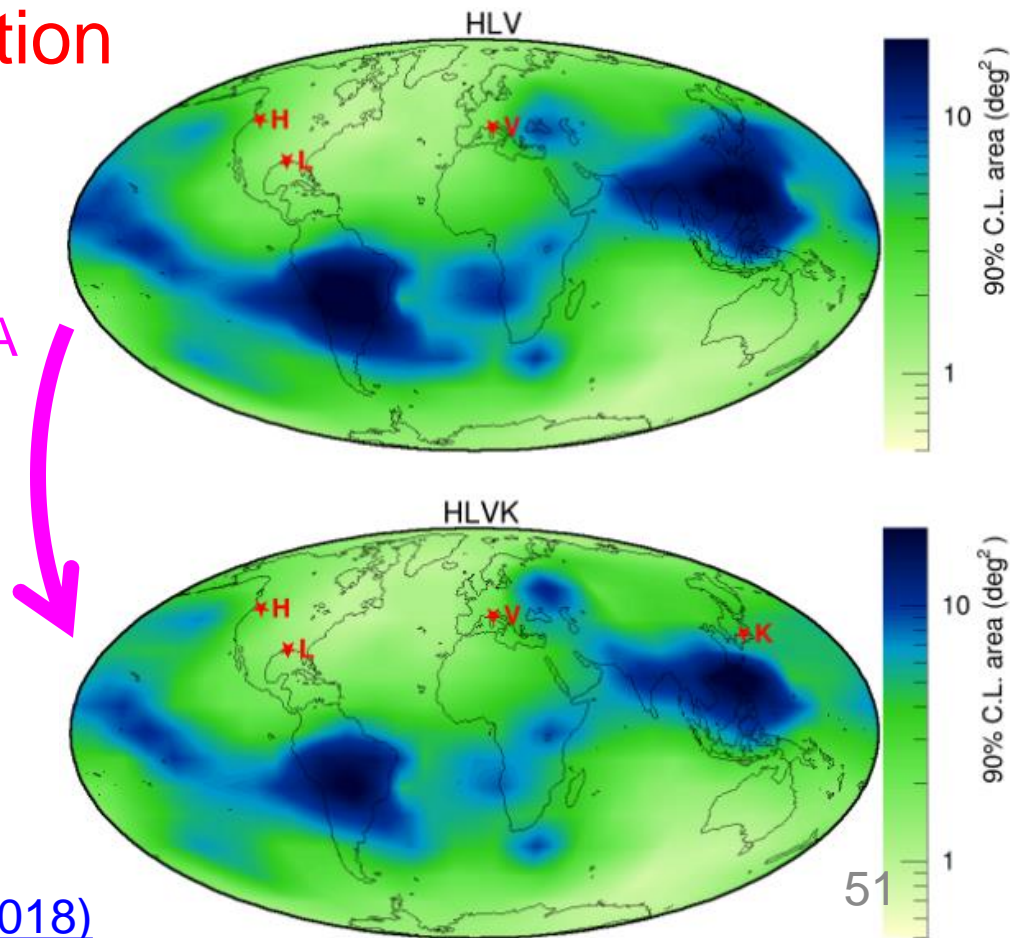
- Improves **sky localization**

1.5-1.25 Msun BNS at 40 Mpc
LH: 120 Mpc
V: 60 Mpc
K: 10 Mpc

With KAGRA

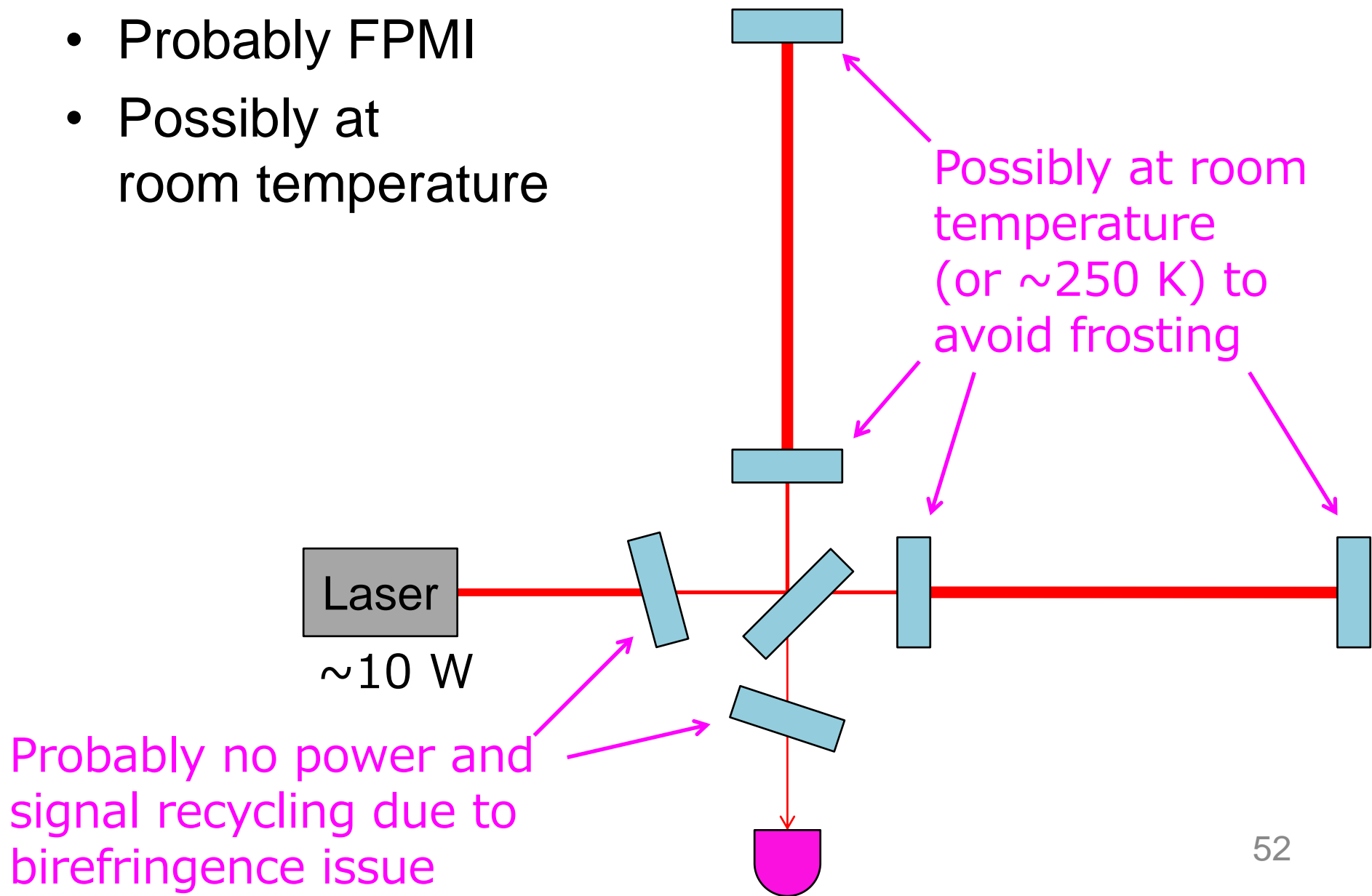
- Enables better GW **polarization** measurements, distinguish non-GR polarization

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



KAGRA in O3 (2019-2020)

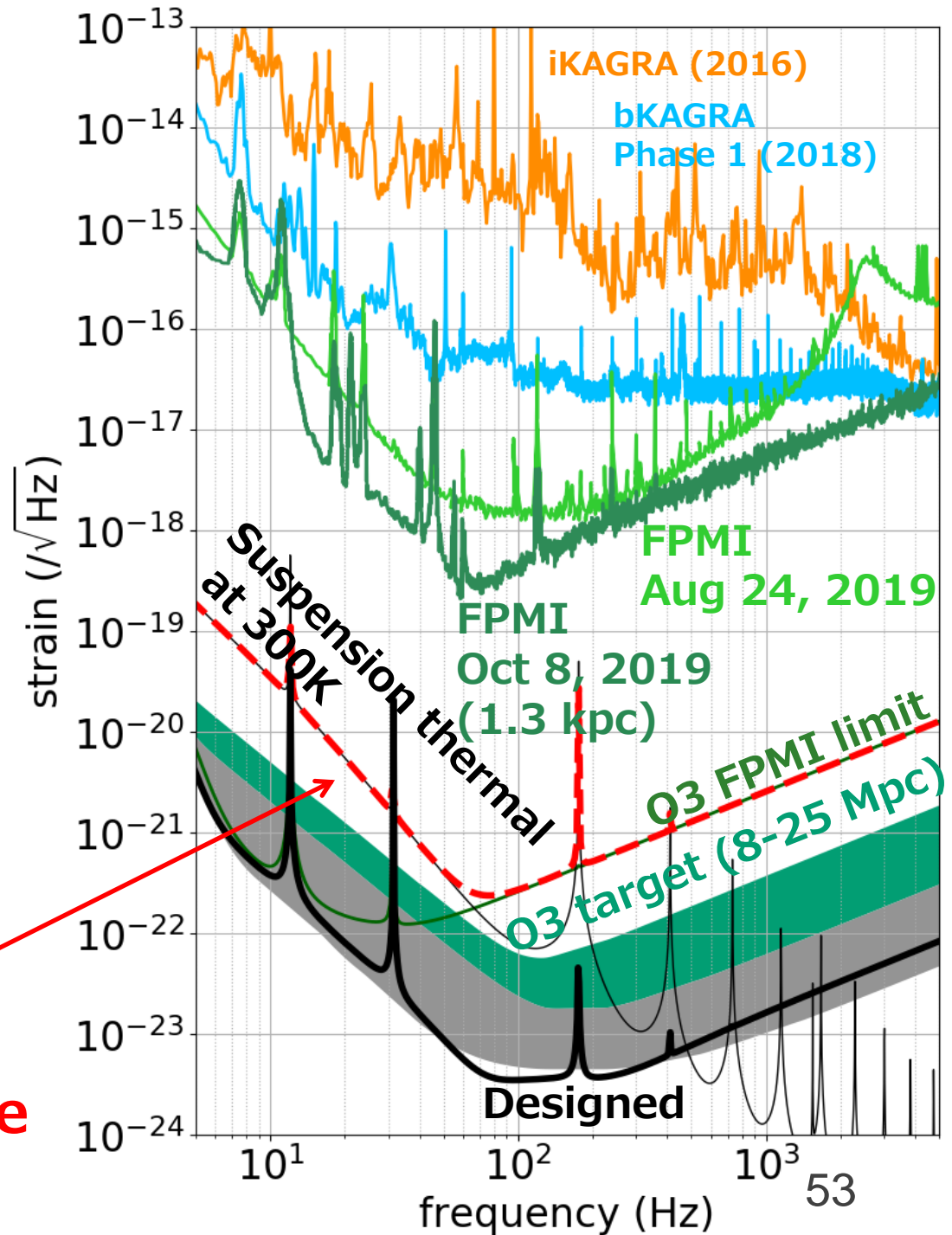
- Probably FPMI
- Possibly at room temperature



O3 Sensitivity

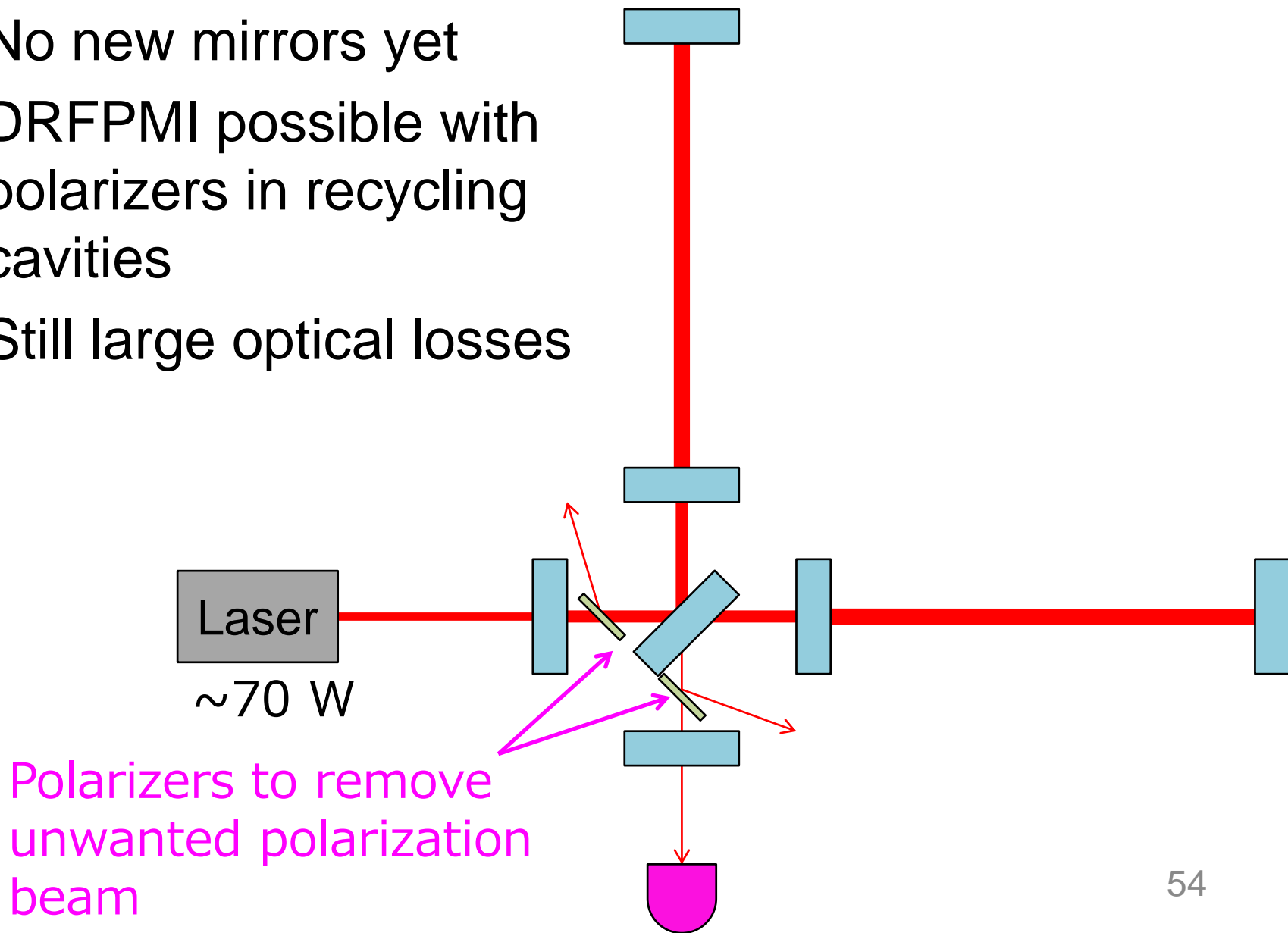
- Probably FPMI
- Possibly at room temperature
→ a few Mpc at max

O3 FPMI limit at room temperature (~2 Mpc)



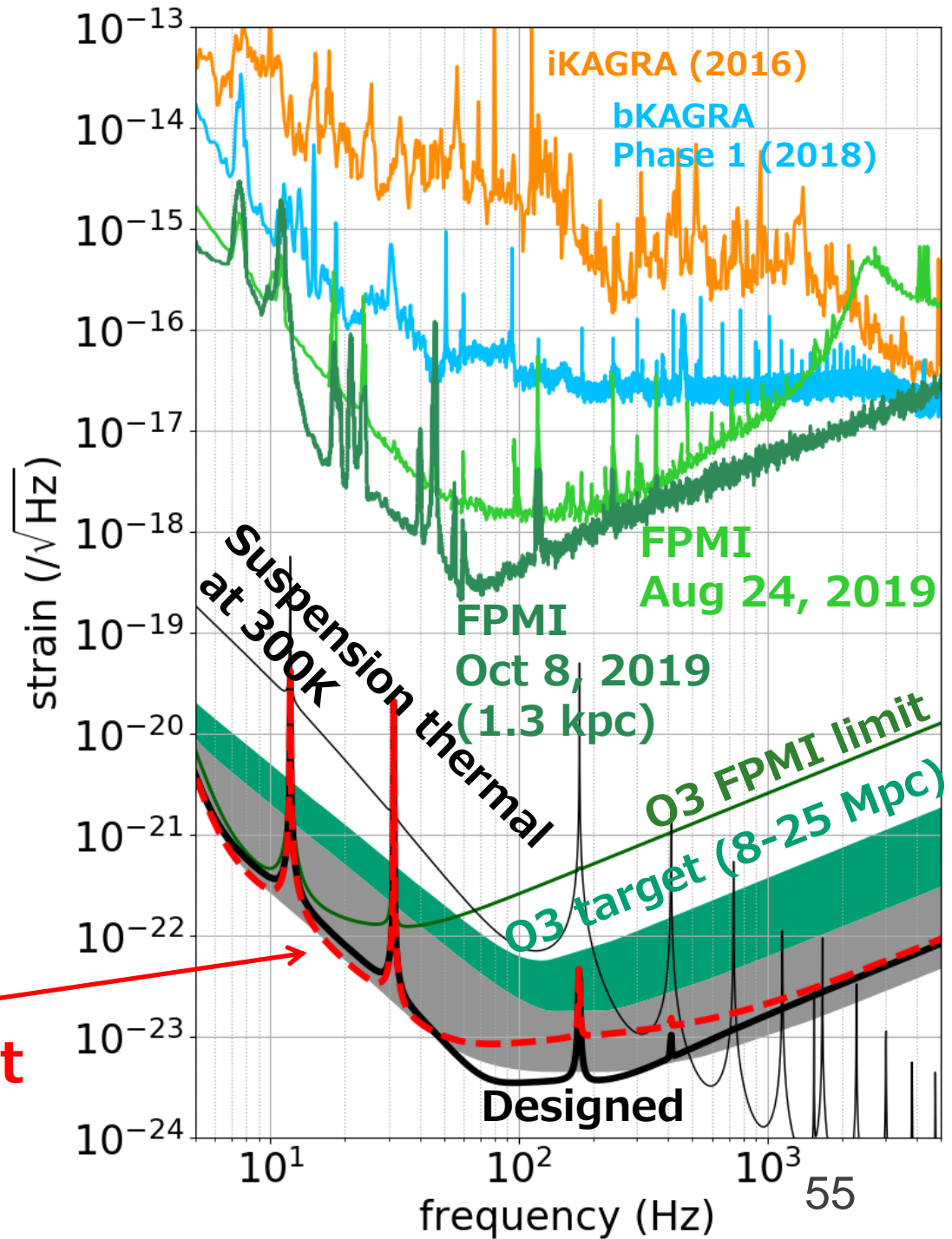
KAGRA in O4 (2021-2023)

- No new mirrors yet
- DRFPMI possible with polarizers in recycling cavities
- Still large optical losses



O4 Sensitivity

- DRFPMI with large optical losses
→ **~80 Mpc at max**



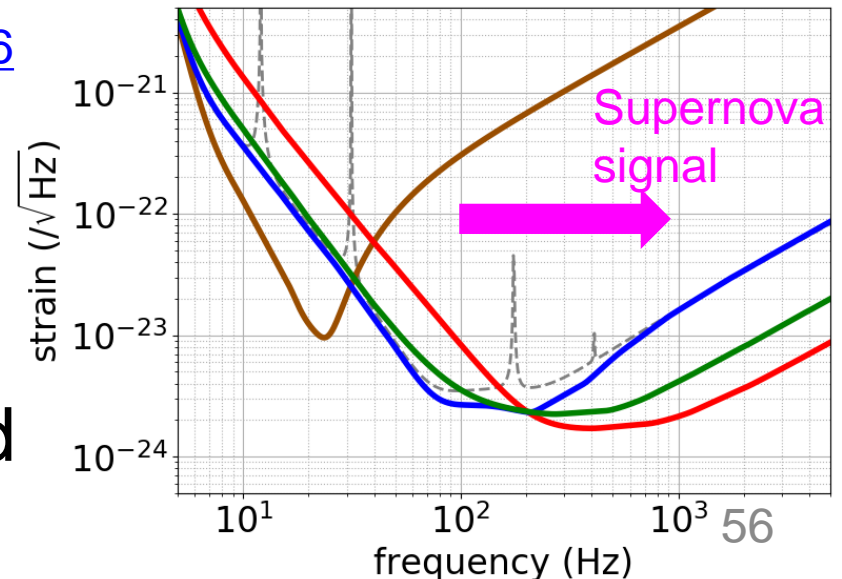
**O4 DRFPMI limit
(~80 Mpc)**

Future Plan for O5?

- Options will be
 - Reduce power to focus on low frequencies (intermediate-mass black holes)
 - Increase power to focus on high frequencies (neutron star physics)
 - Heavier mirror for better mid-frequencies
 - Frequency dependent squeezing for broadband

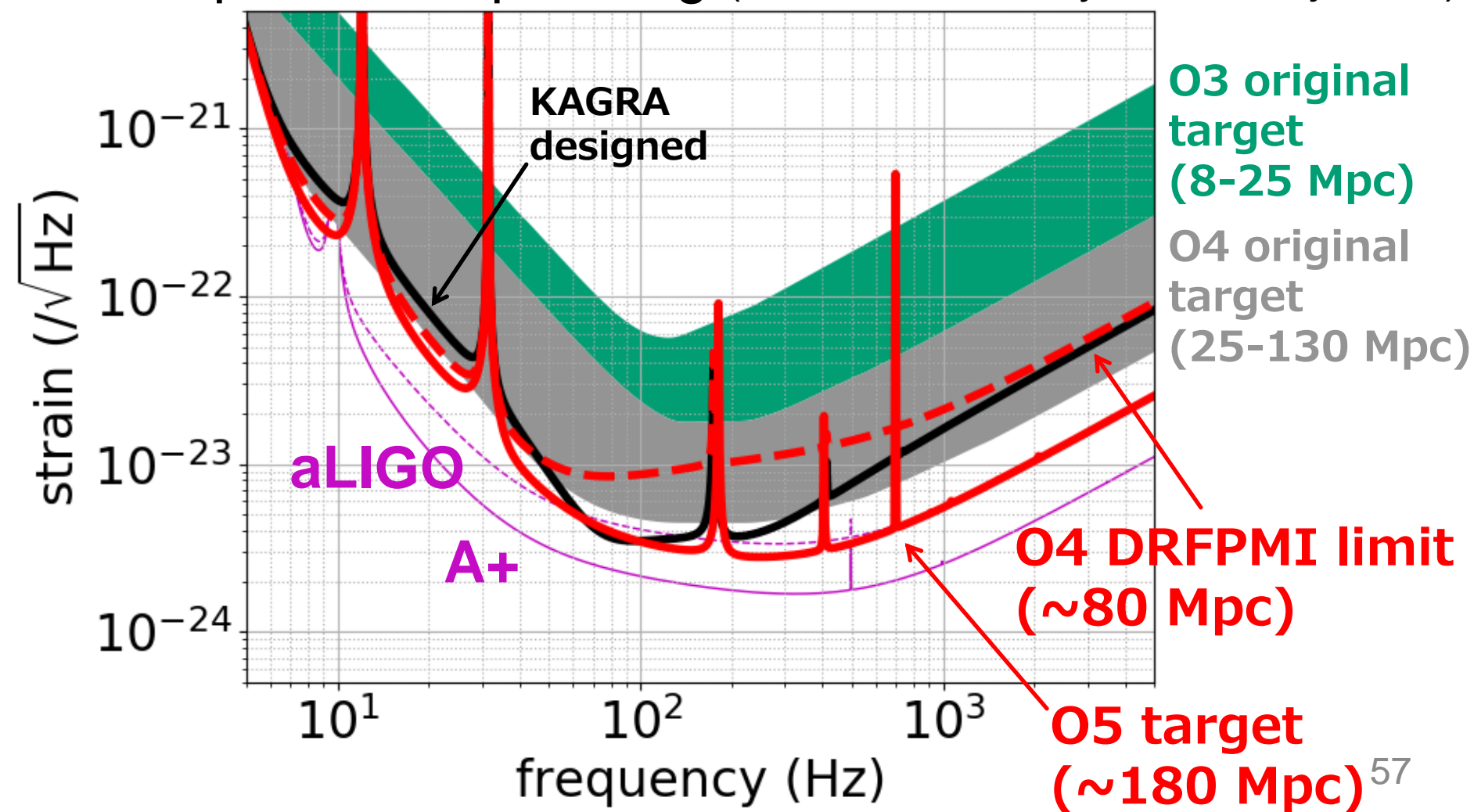
YM+, [arXiv:1906.02866](https://arxiv.org/abs/1906.02866)

- **FDSQZ** seems to be technically most feasible, and broadband improvement was favored not to miss any science



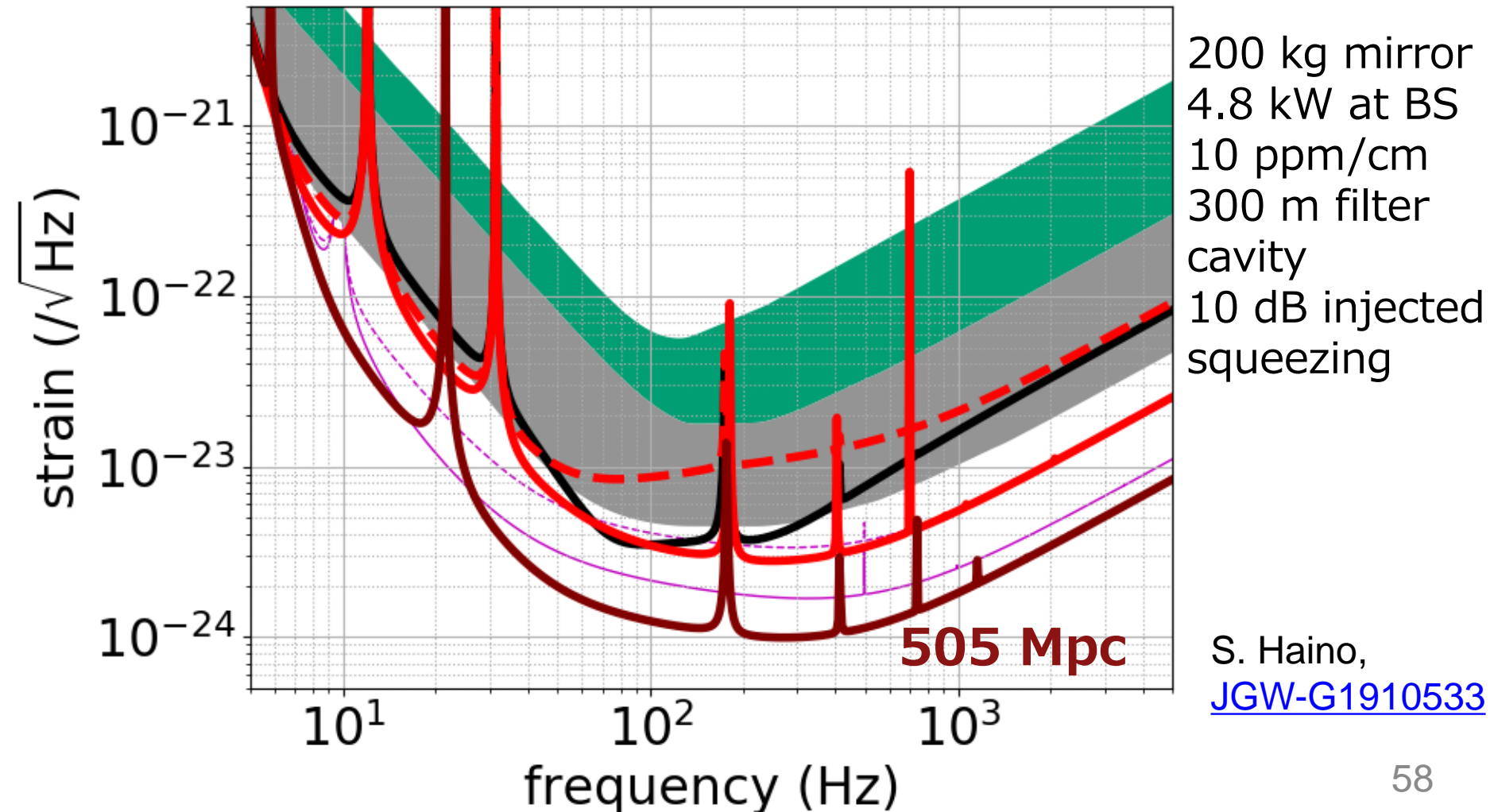
O5 Prospects

- With non-birefringent mirrors and frequency dependent squeezing (60 m filter cavity, 10 dB injected)



Beyond O5, Longer Term Plan

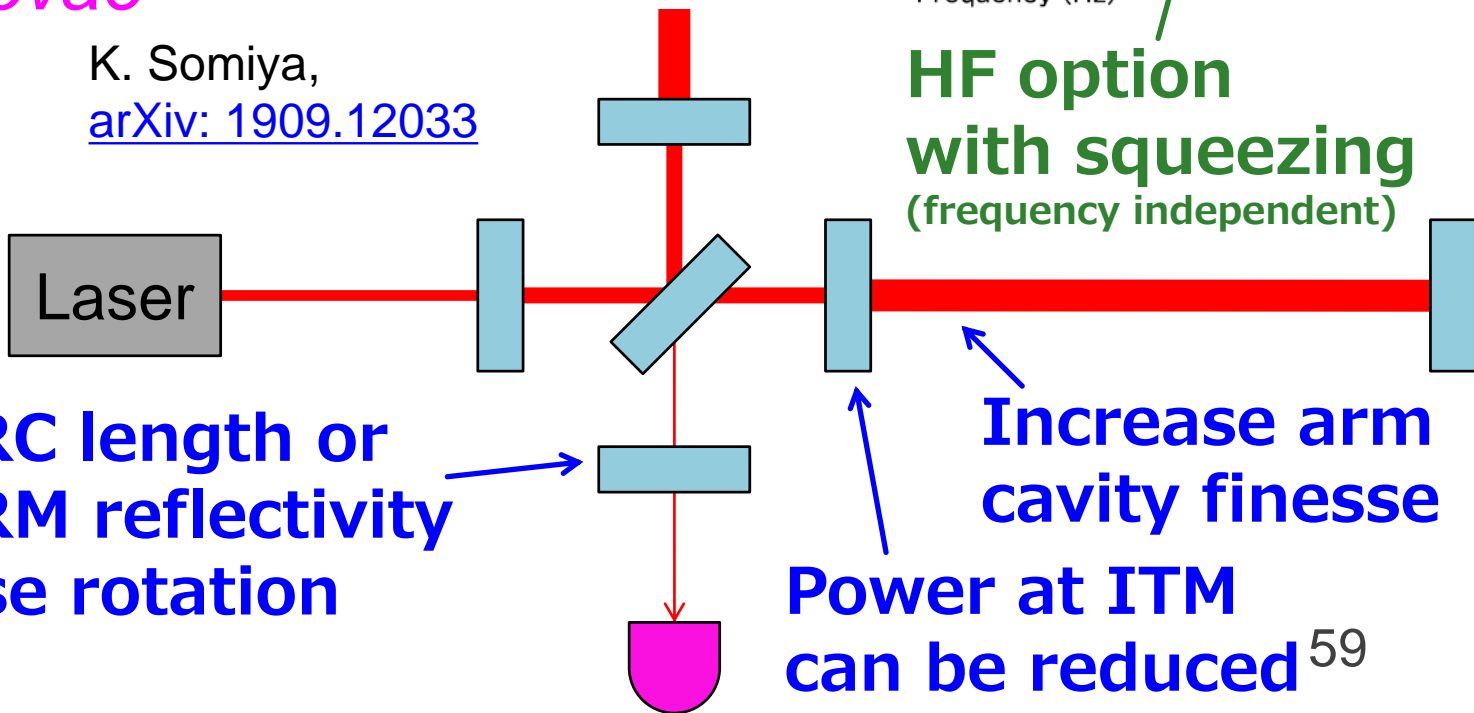
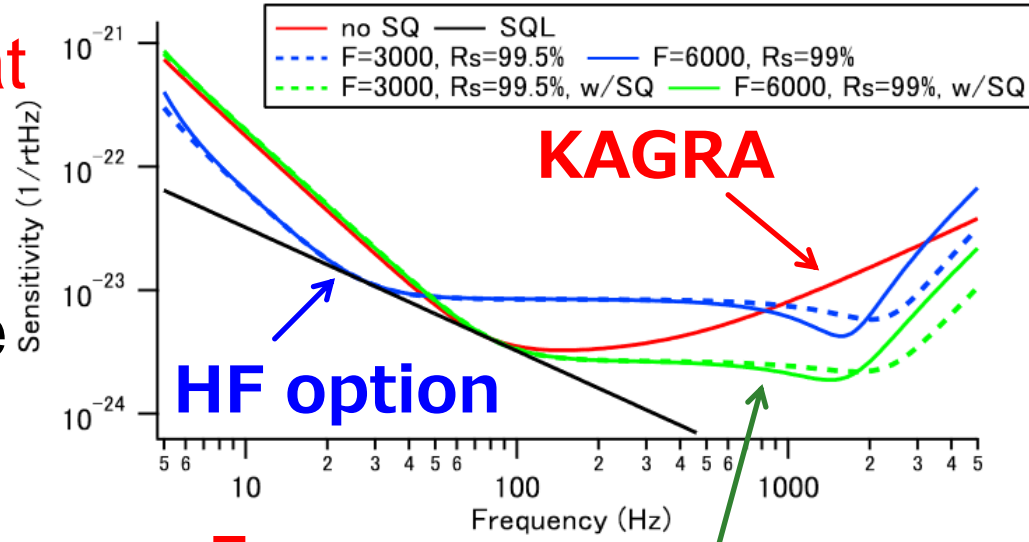
- If we are very optimistic (but not too crazy), further improvement is possible



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)

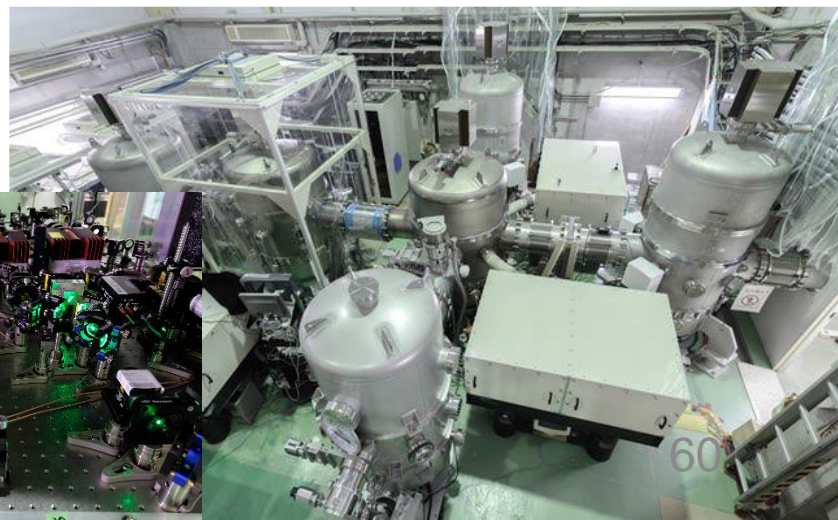


Increase SRC length or
 Increase SRM reflectivity
 → SRC phase rotation
 creates dip

Power at ITM
 can be reduced ⁵⁹

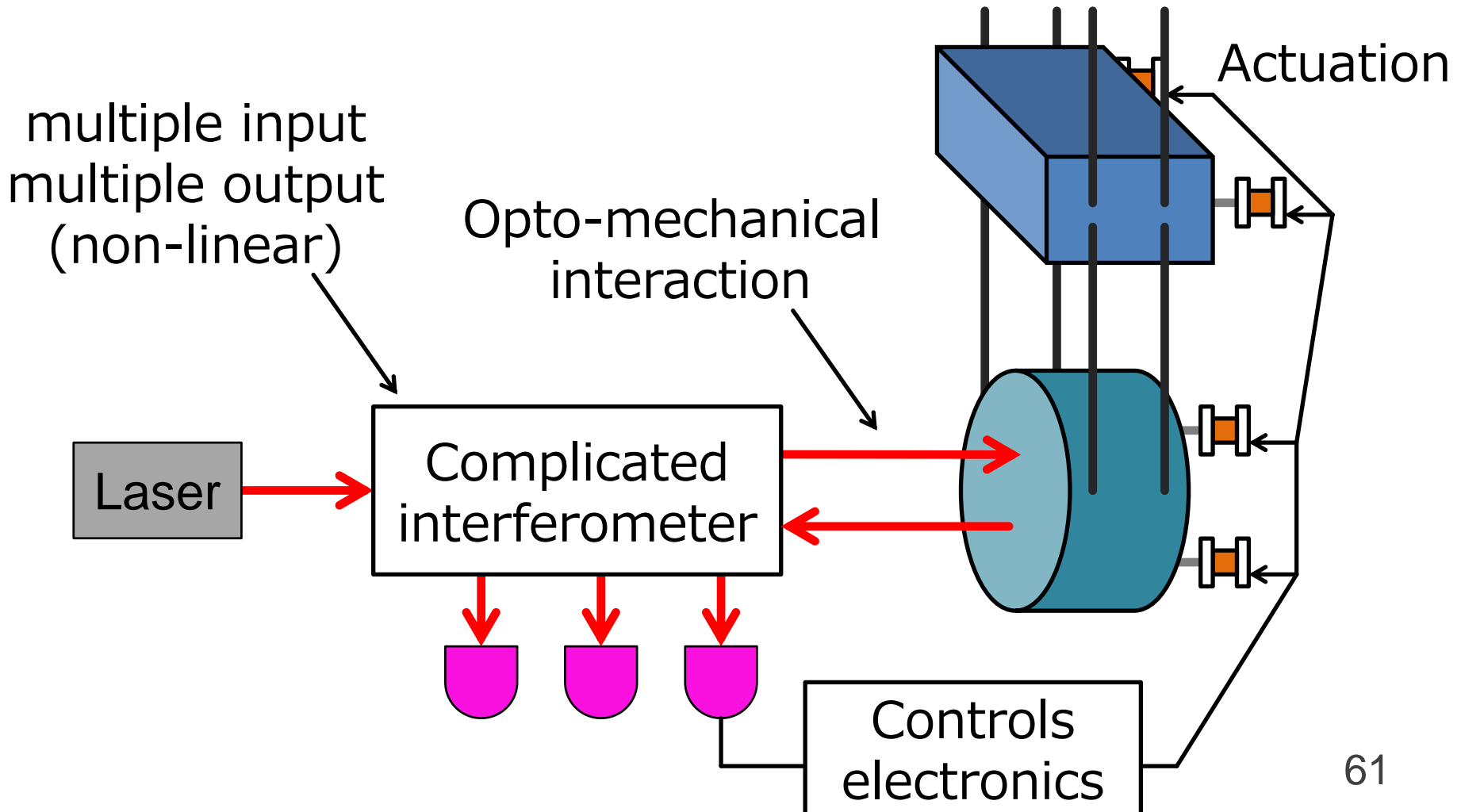
Active R&D Ongoing

- **Frequency dependent squeezing** experiment using TAMA300 facility (NAOJ) E. Capocasa+, [PRD 93, 082004 \(2016\)](#)
- Sapphire mirror **absorption** and **birefringence** measurements (NAOJ)
different company? annealing?
- **Coating** thermal noise measurement at cryogenic temperatures (NAOJ) [JGW-G1808966](#)
- **Newtonian noise** detector development (UTokyo)
- **Optical spring** experiments (Tokyo Tech, UTokyo) etc...



Profound World of Interferometer

- Interferometer controls and sensitivity design is really complicated and interesting



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)

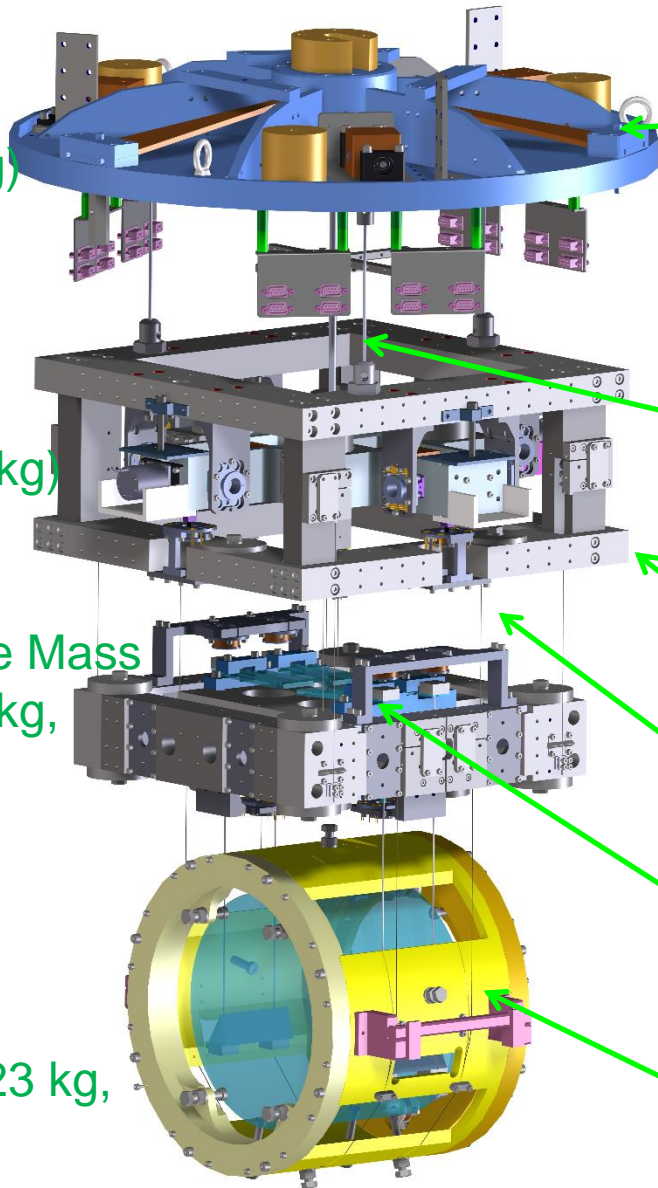
IRM suspended by 4 CuBe fibers

Test Mass
(Sapphire, 23 kg,
22 K)

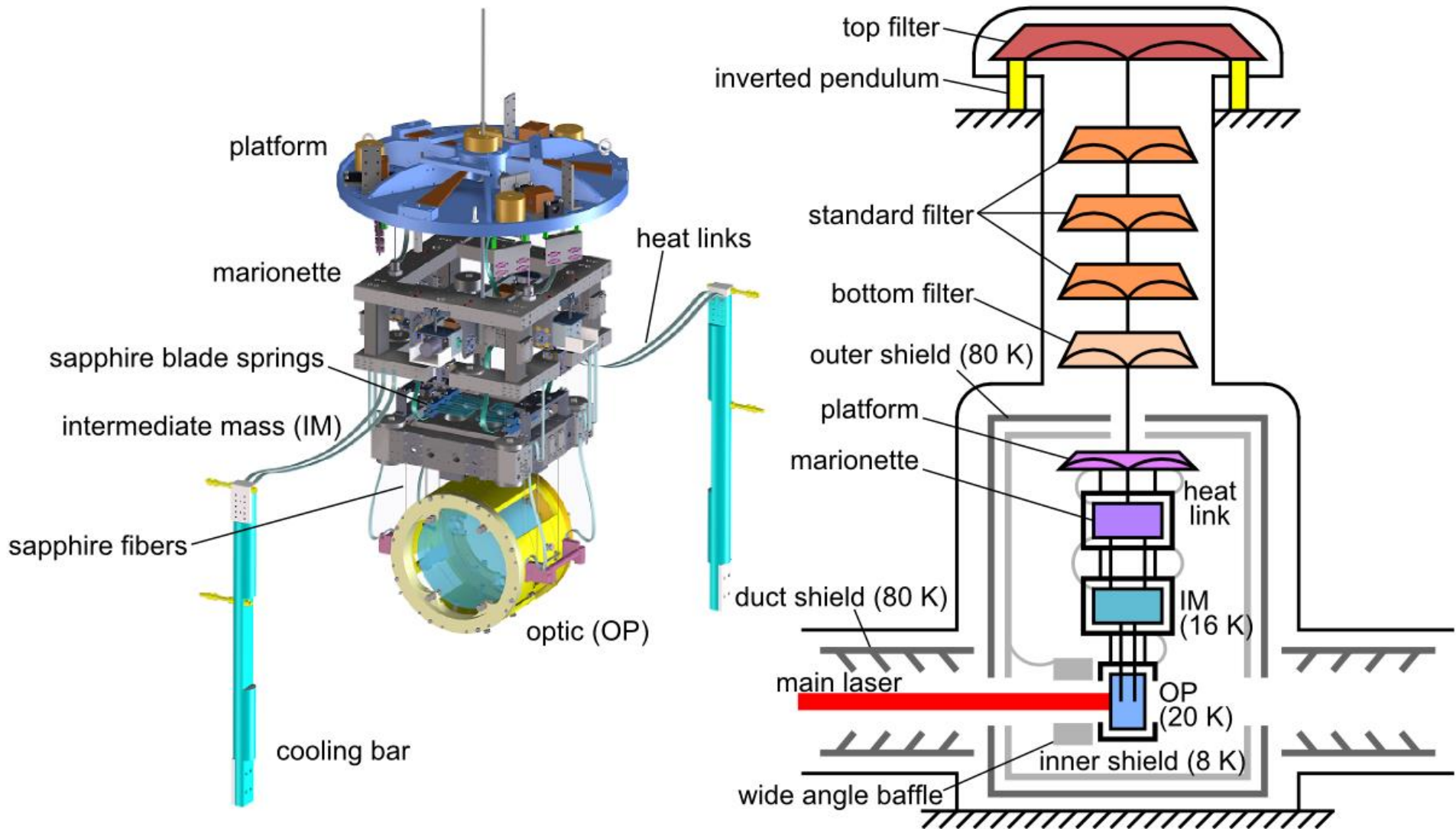
4 sapphire blades

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



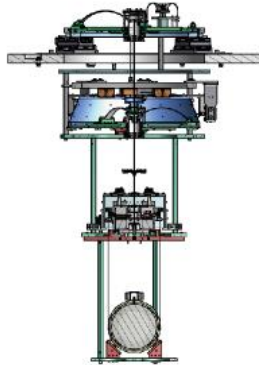
Type-B

3.1 m



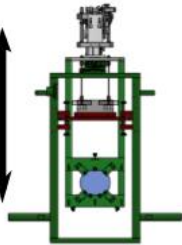
Type-Bp

1.7 m

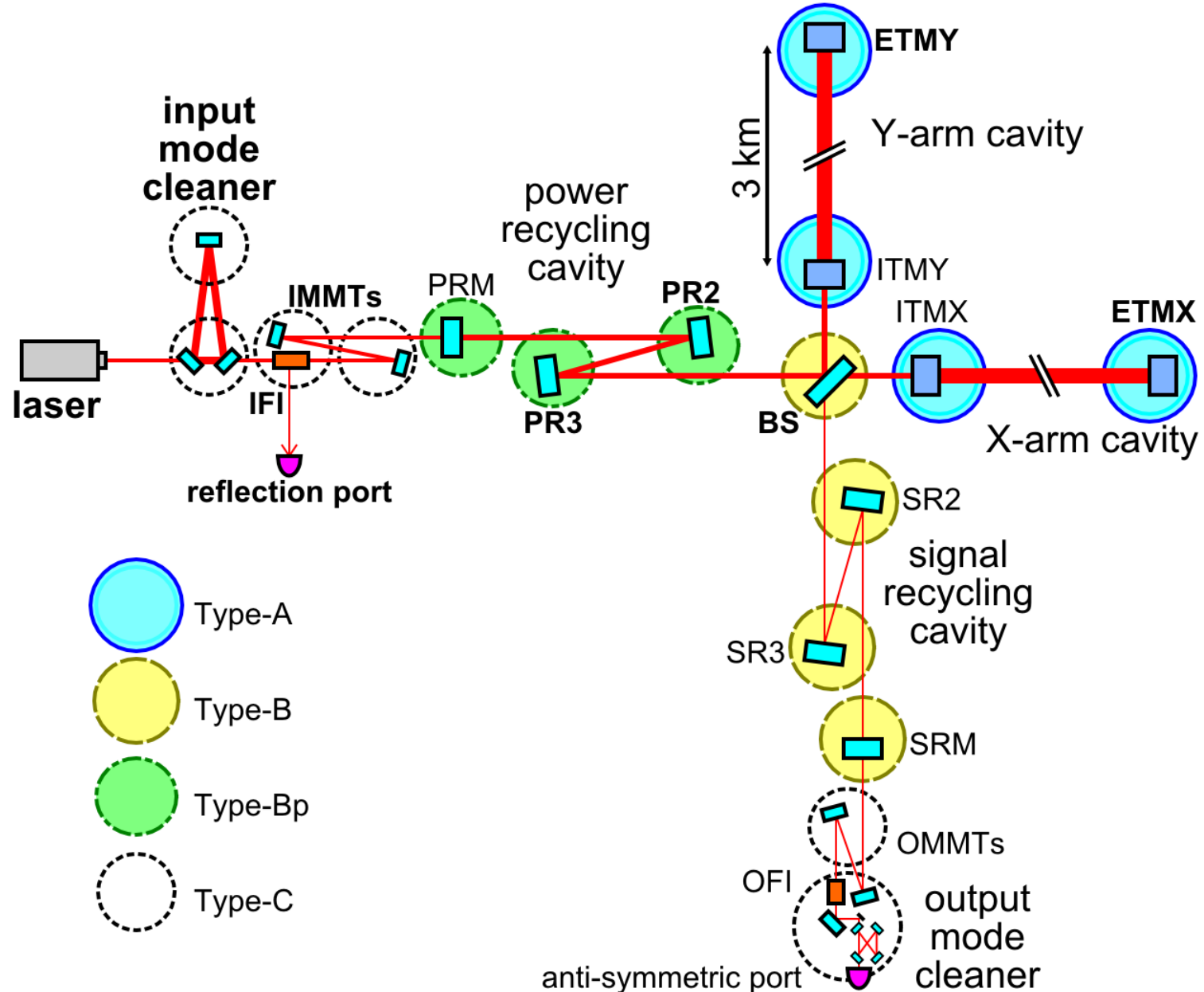


Type-C

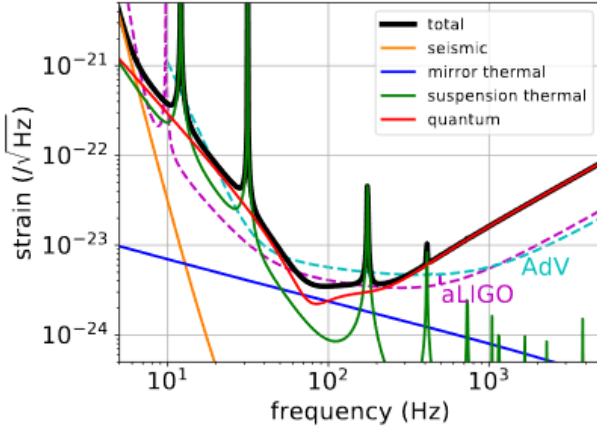
0.4 m



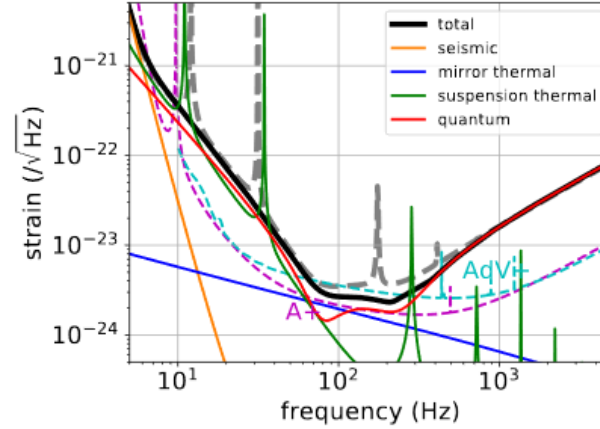
KAGRA Interferometer



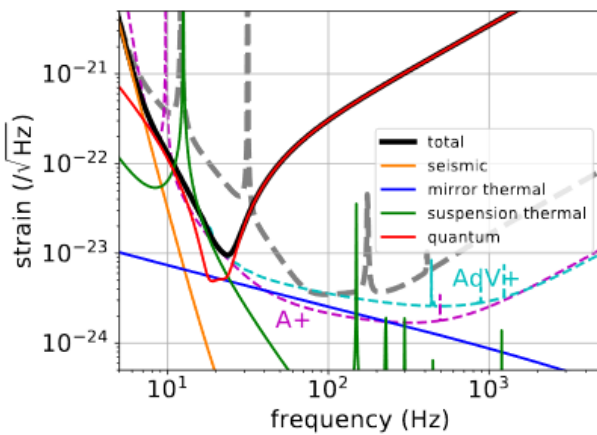
Possible KAGRA Upgrade Plans



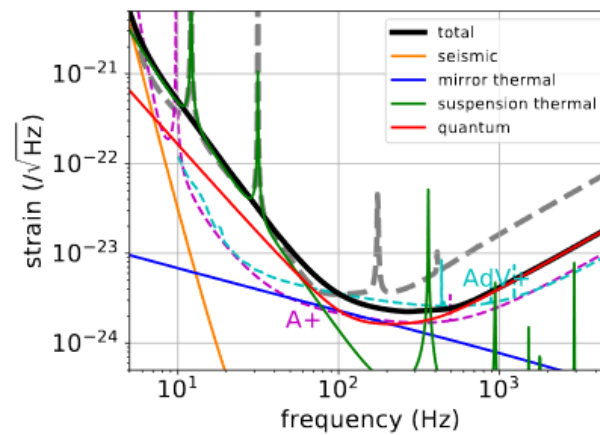
(a) bKAGRA



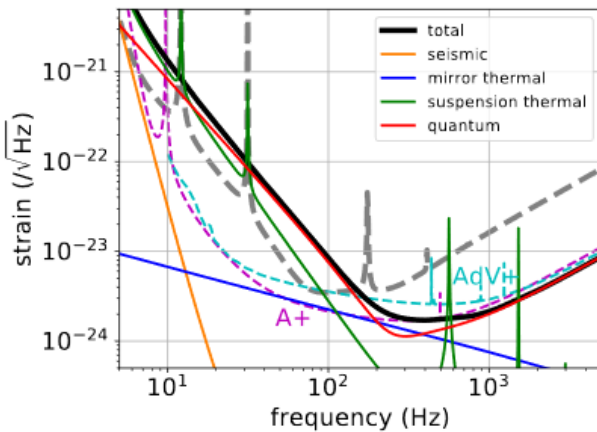
(d) 40kg



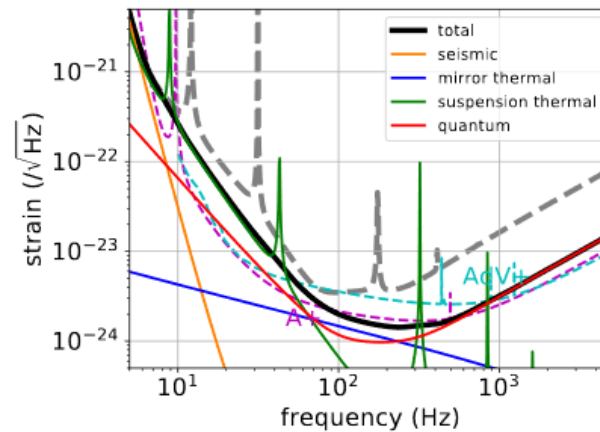
(b) LF



(e) FDSQZ



(c) HF



(f) Combined

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

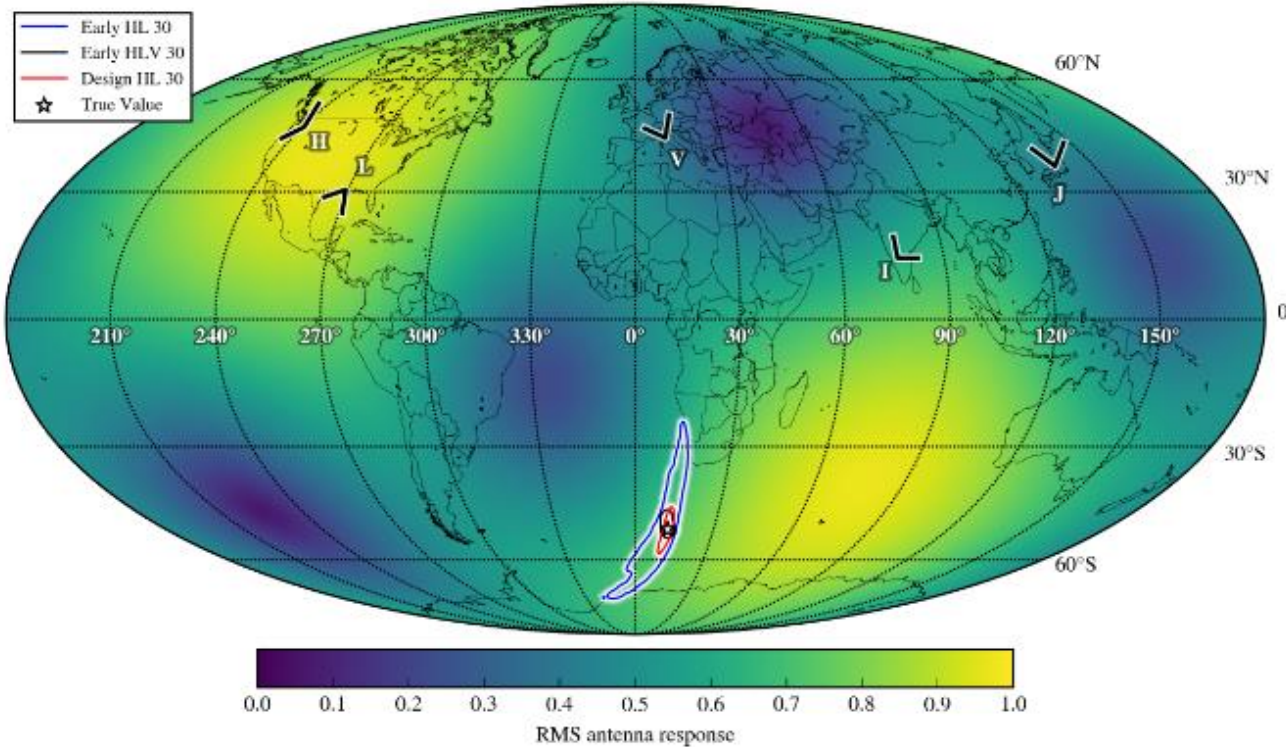
Possible KAGRA Upgrade Plans

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

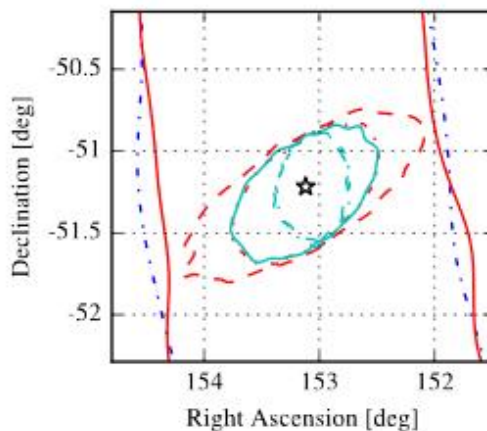
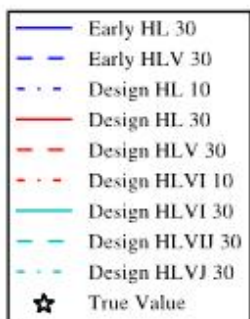
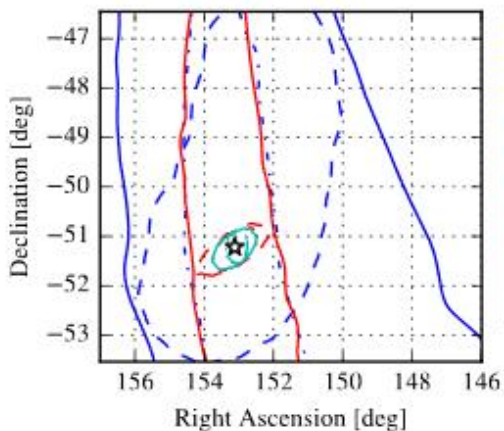
[CQG 34, 174003 \(2017\)](#)



Sky localization
 HLV 0.57 deg²
 HLVK 0.13 deg²

Distance error
 HLV 179 Mpc
 HLVK 98 Mpc

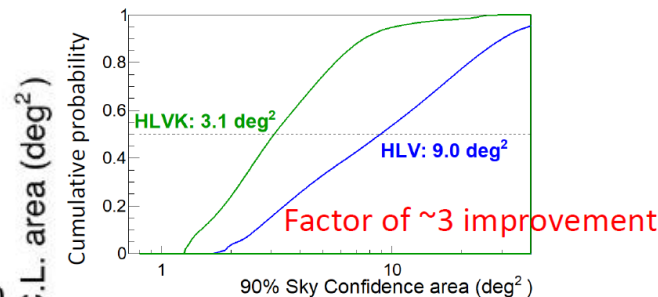
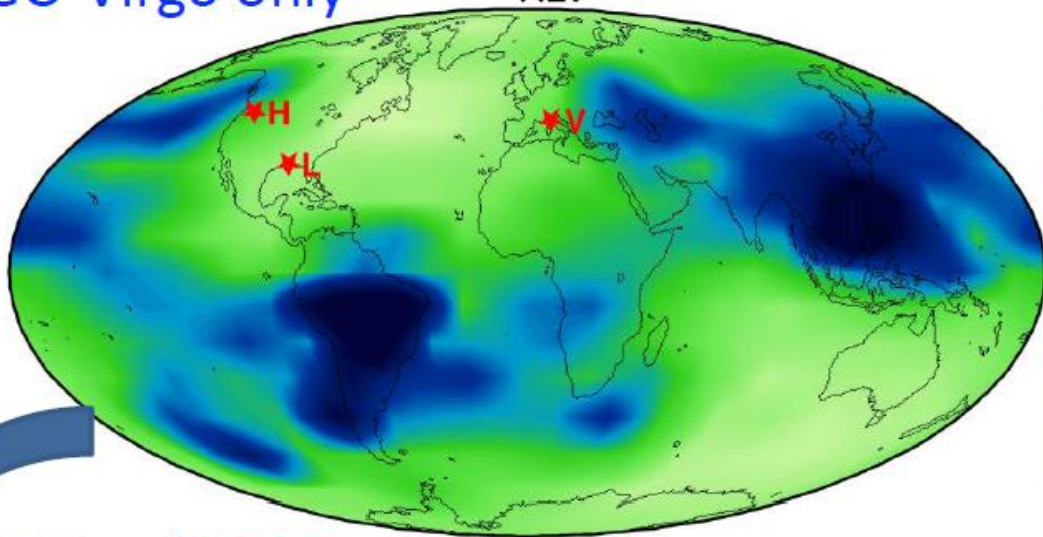
(with designed sensitivity,
 90% credible)



Sky Localization

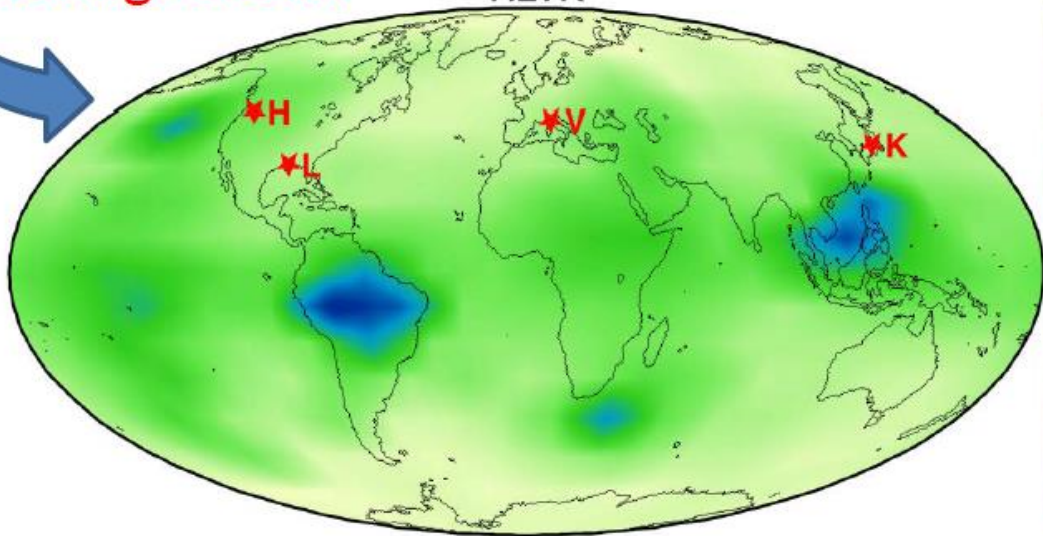
LIGO-Virgo only

HLV



Adding KAGRA

HLVK



BNS at 150 Mpc
(with designed sensitivity)

Calculation
by S. Haino