

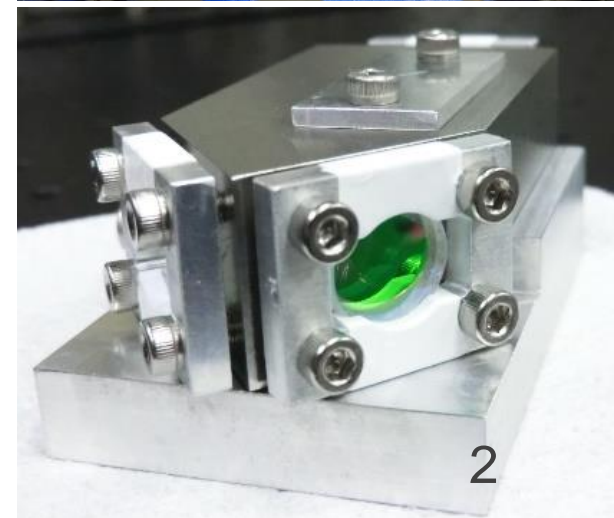
# レーザー干渉計型 重力波検出器と 巨視的量子力学

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

- 道村 唯太 (みちむら ゆうた)  
東京大学 大学院理学系研究科 物理学専攻 助教
- **重力波望遠鏡**の開発
  - 大型低温重力波望遠鏡KAGRA  
のレーザー干渉計開発
  - 宇宙重力波望遠鏡DECIGO
- その精密距離計測技術を利用した  
**基礎物理実験**
  - Lorentz不変性の検証実験
  - アクシオンの探査実験
  - 巨視的量子力学の検証実験  
などなど



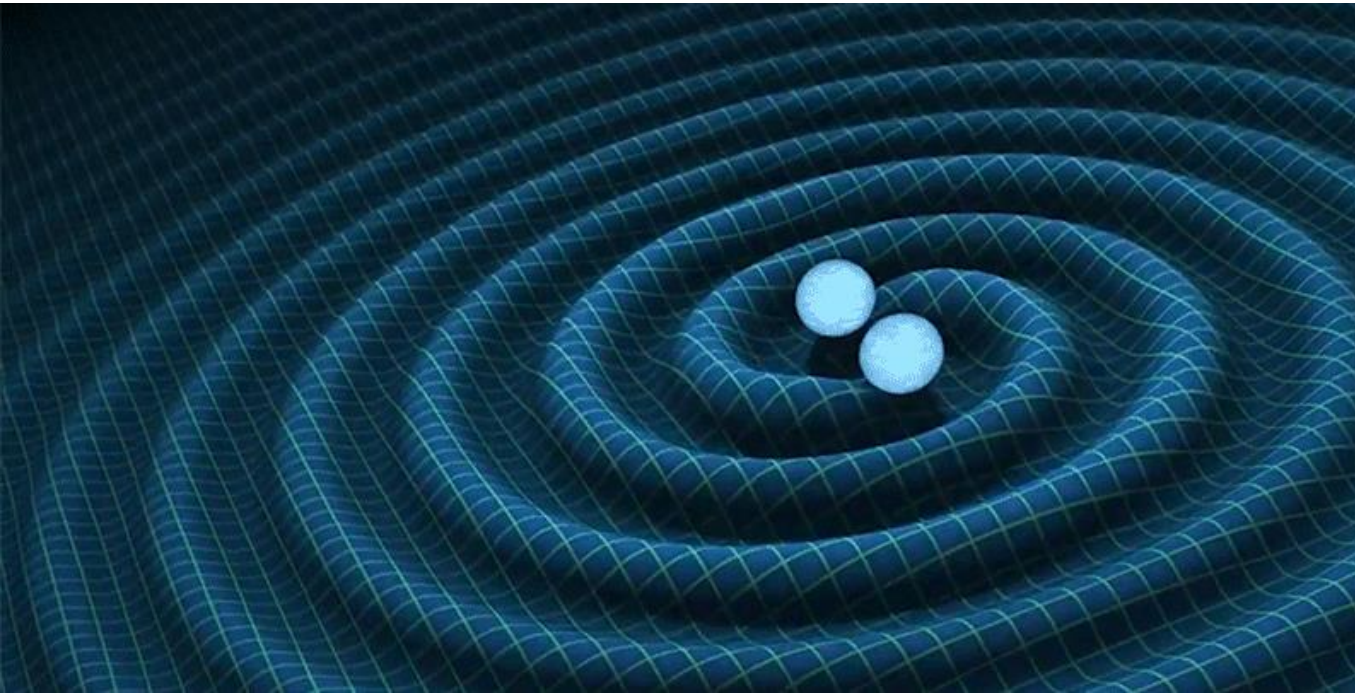
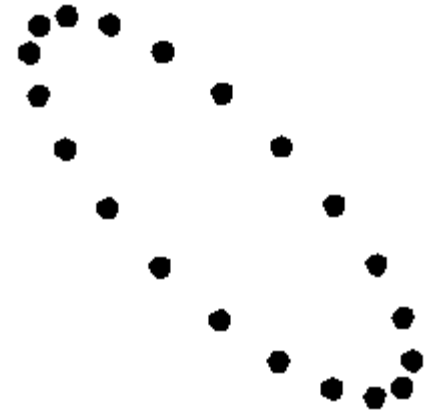
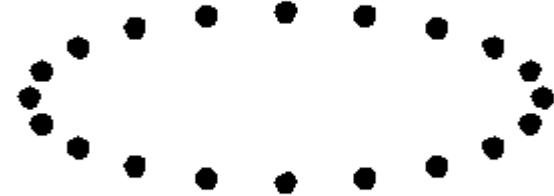
# 今回のお話

- レーザー干渉計型**重力波検出器**の原理
  - 重力波
  - 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の開発状況と将来計画
- レーザー干渉計を用いた**巨視的量子力学**
  - 量子力学の検証装置としての重力波検出器
  - ミリグラムスケール実験の紹介

# 重力波検出器

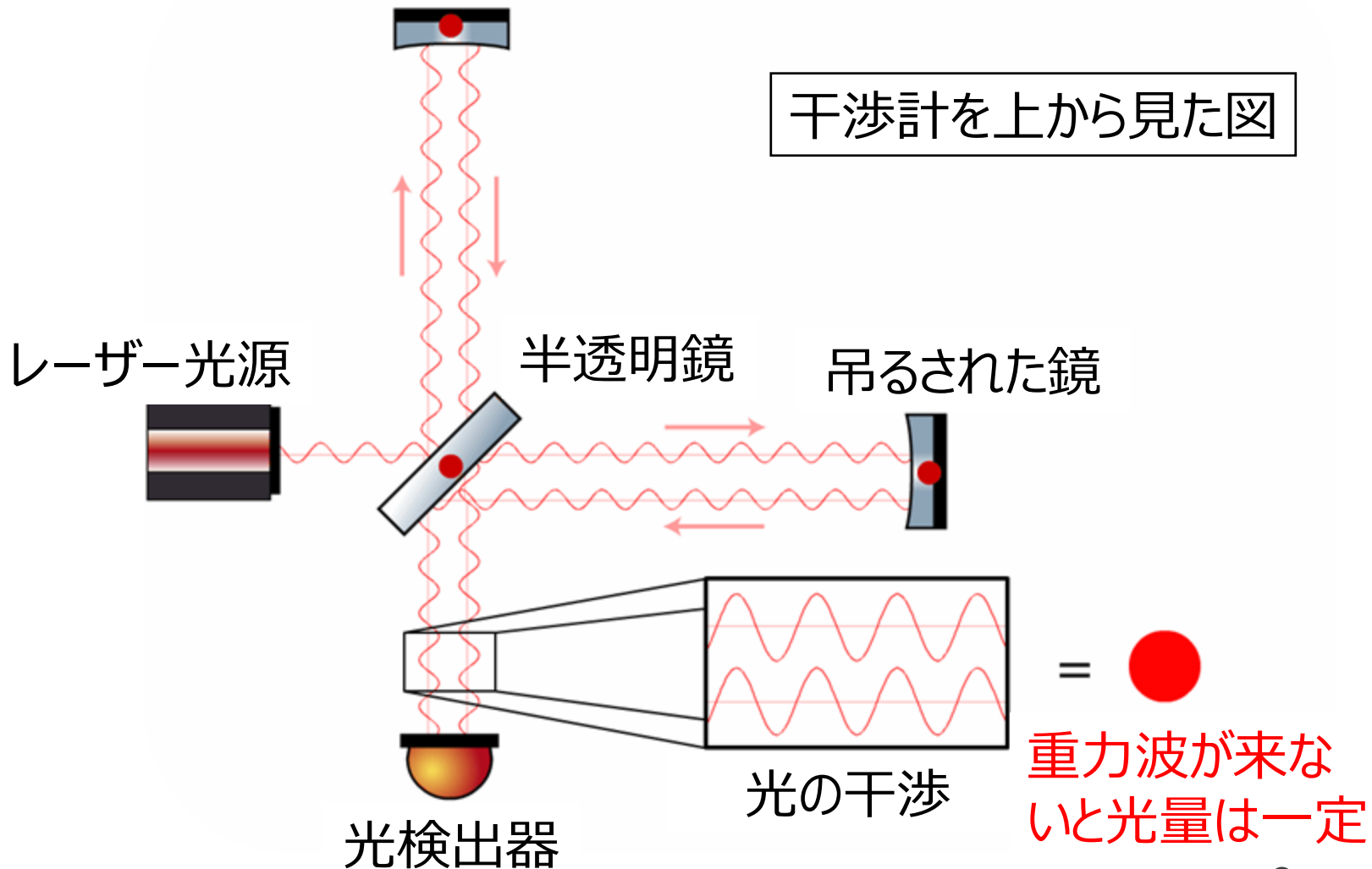
# 重力波とは？

- 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



# レーザー干渉計型重力波検出器

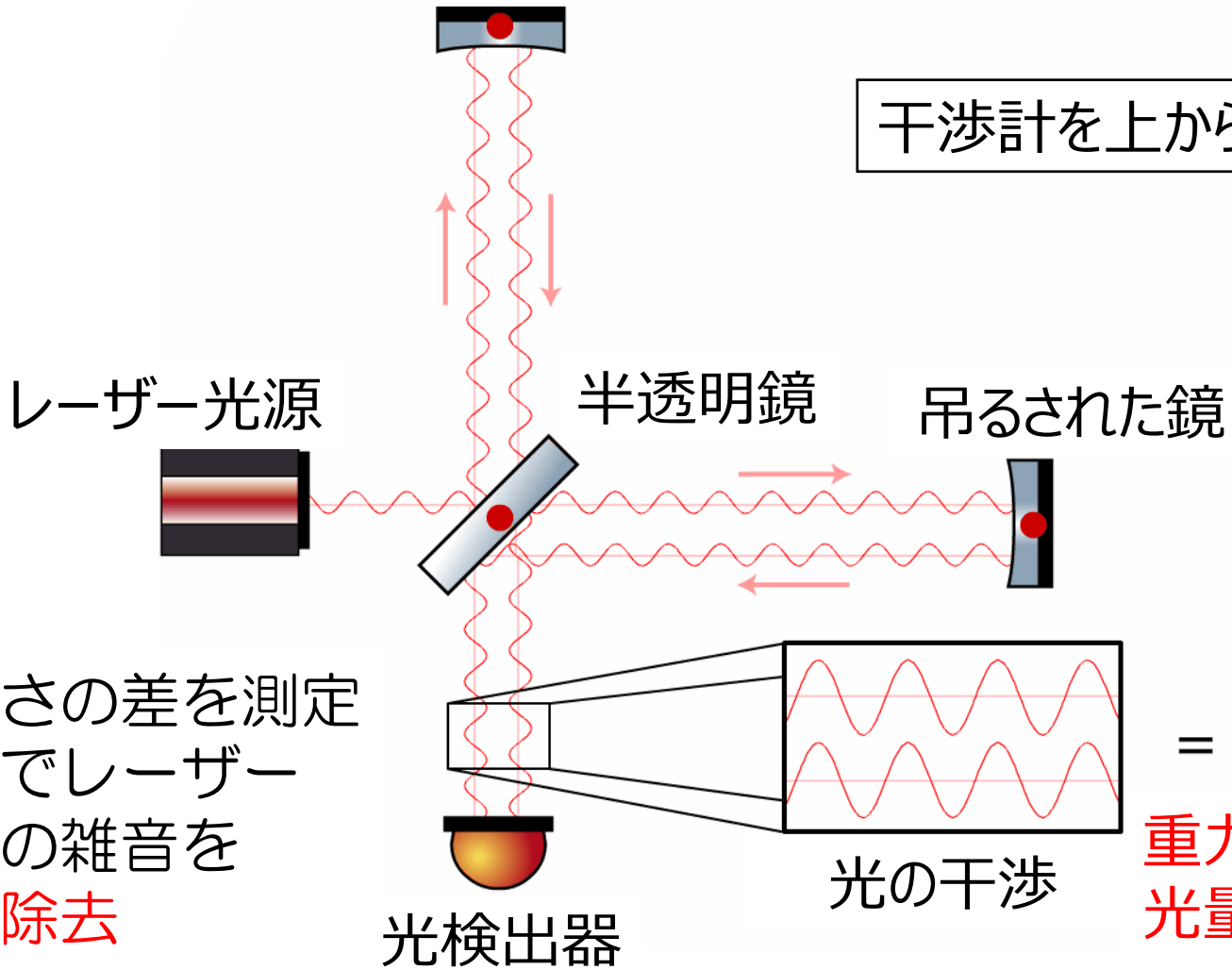
- 両腕の長さの差を干渉縞の変化として測定



# 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

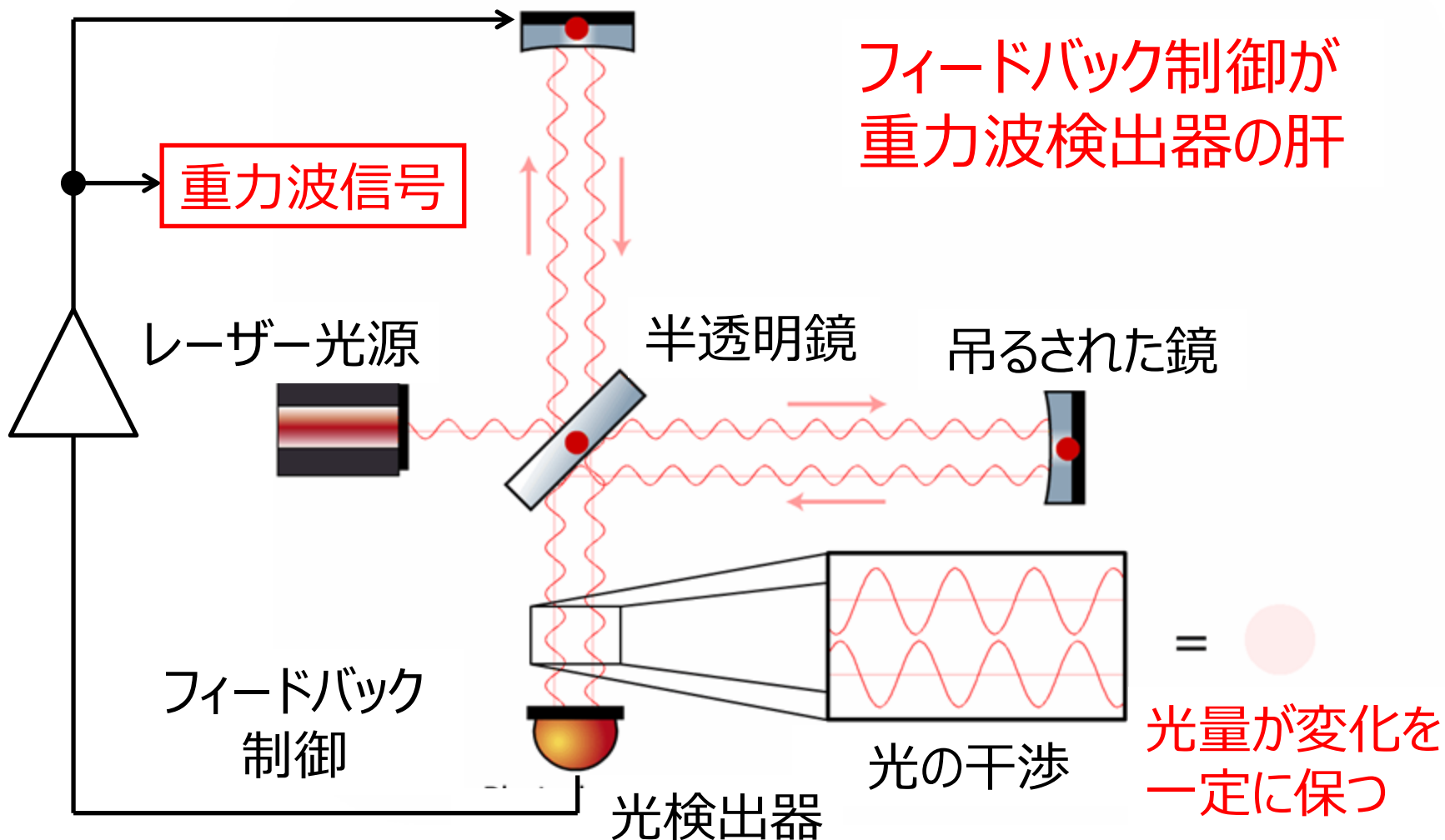
干渉計を上から見た図



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





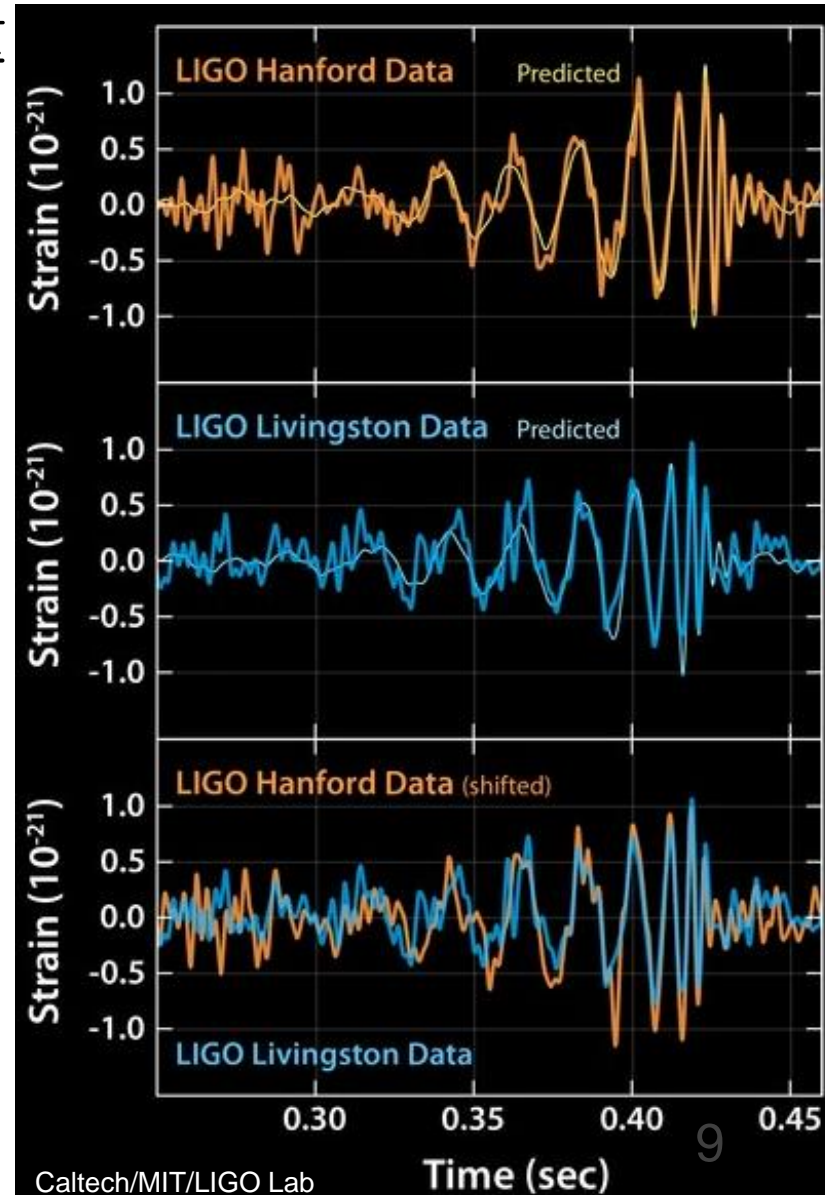
# 重力波による空間の歪み量

- GW150914の空間の歪み量  
 $h \sim 10^{-21}$

- 距離の変化割合で表す

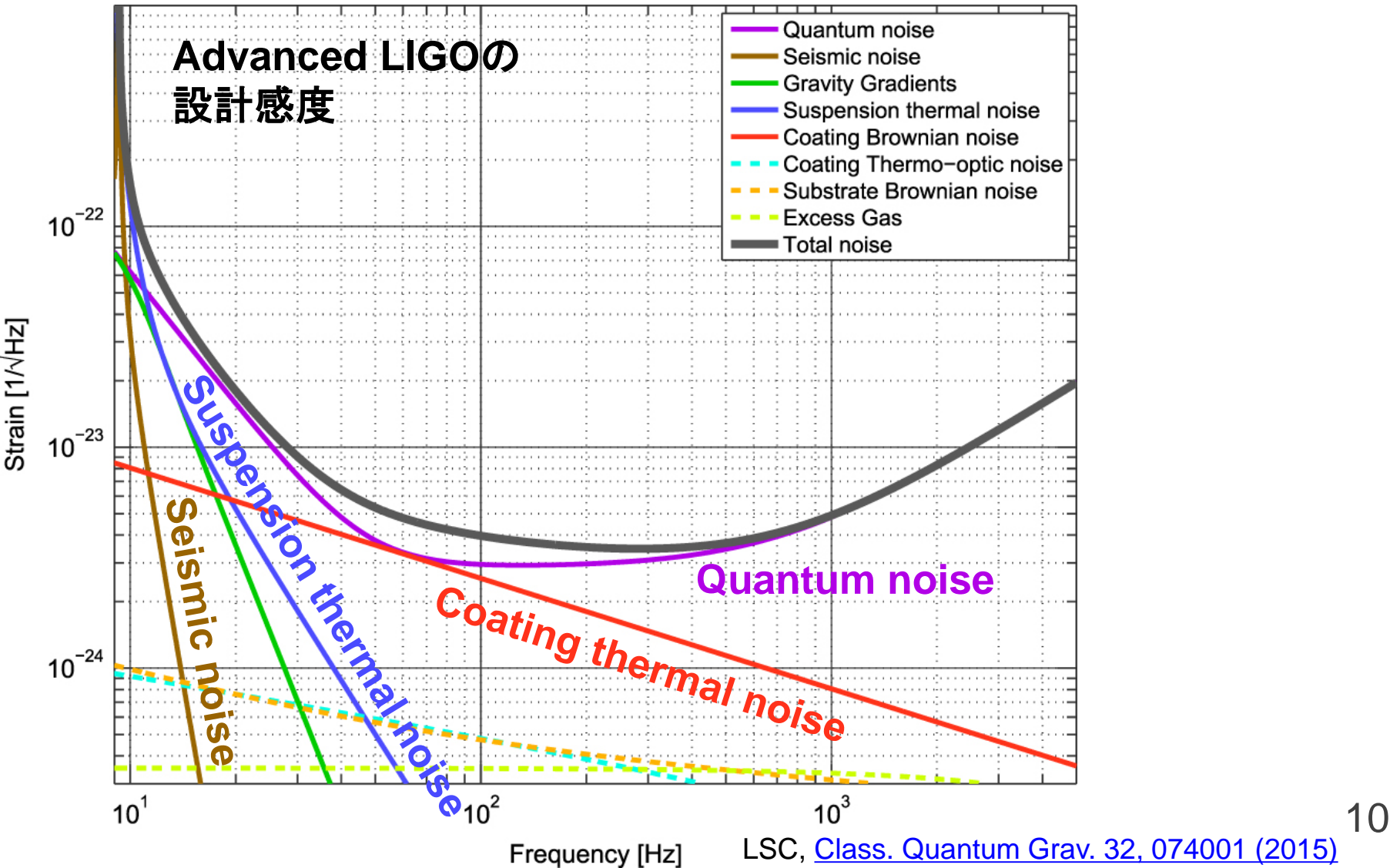
$$h = \frac{\delta L}{L}$$

- 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



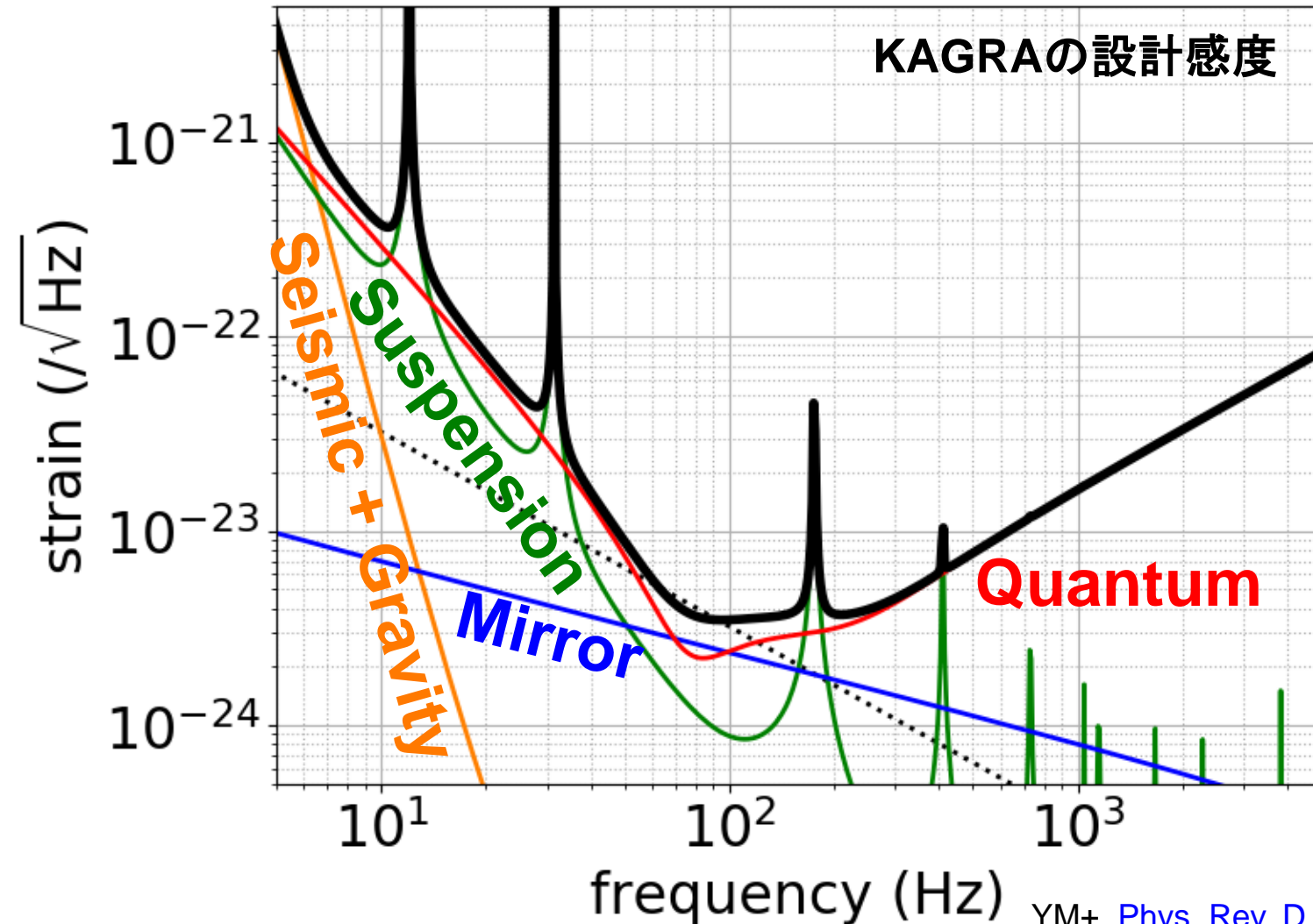
# 重力波検出器の設計感度

- ほとんどの領域で量子雑音



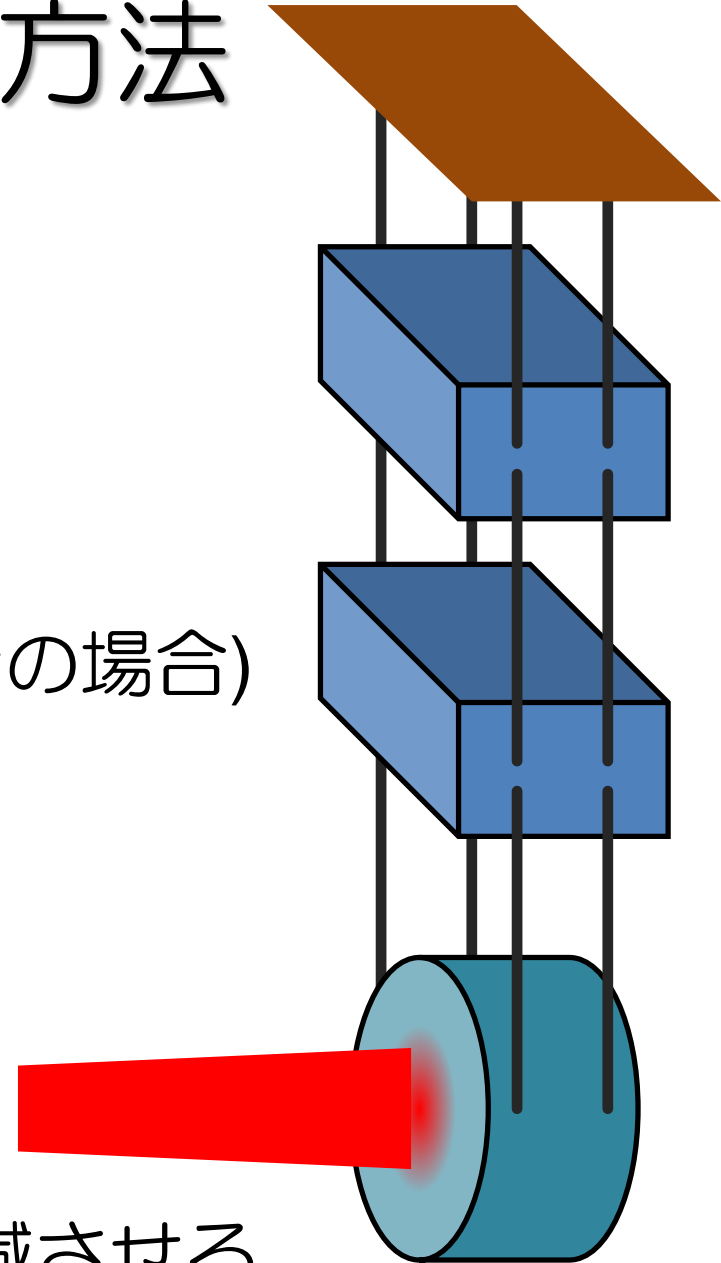
# 重力波検出器の設計感度

- ほとんどの領域で量子雑音



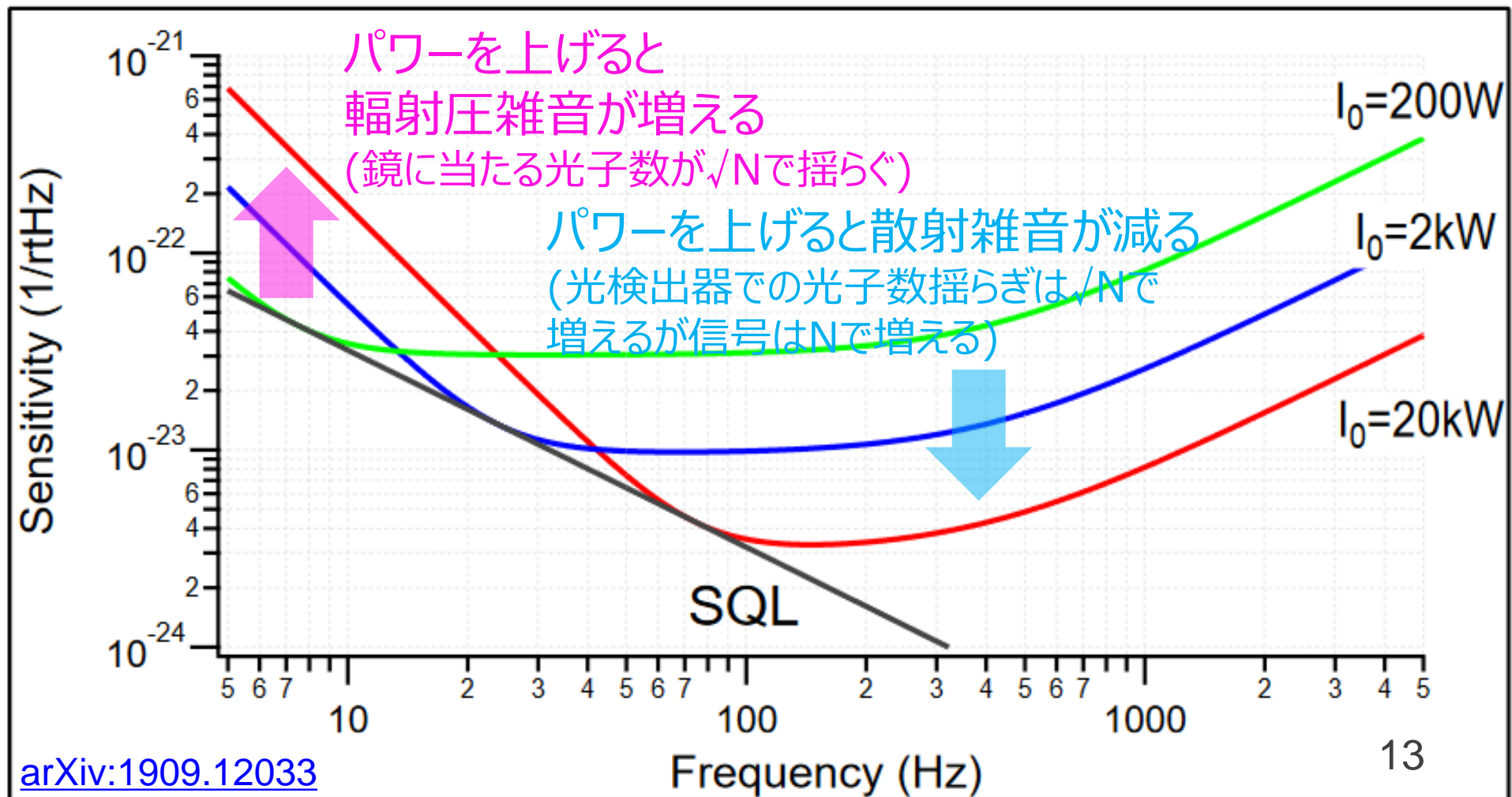
# 雑音源と低減方法

- **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

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

レーザー周波数 散射雑音 輻射圧雑音  
 レーザーパワー @ BS

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

鏡の質量 ↑ ↑ ↑ ↑  
 基線長 腕共振器の 重力波の周波数  
 線幅

- 標準量子限界

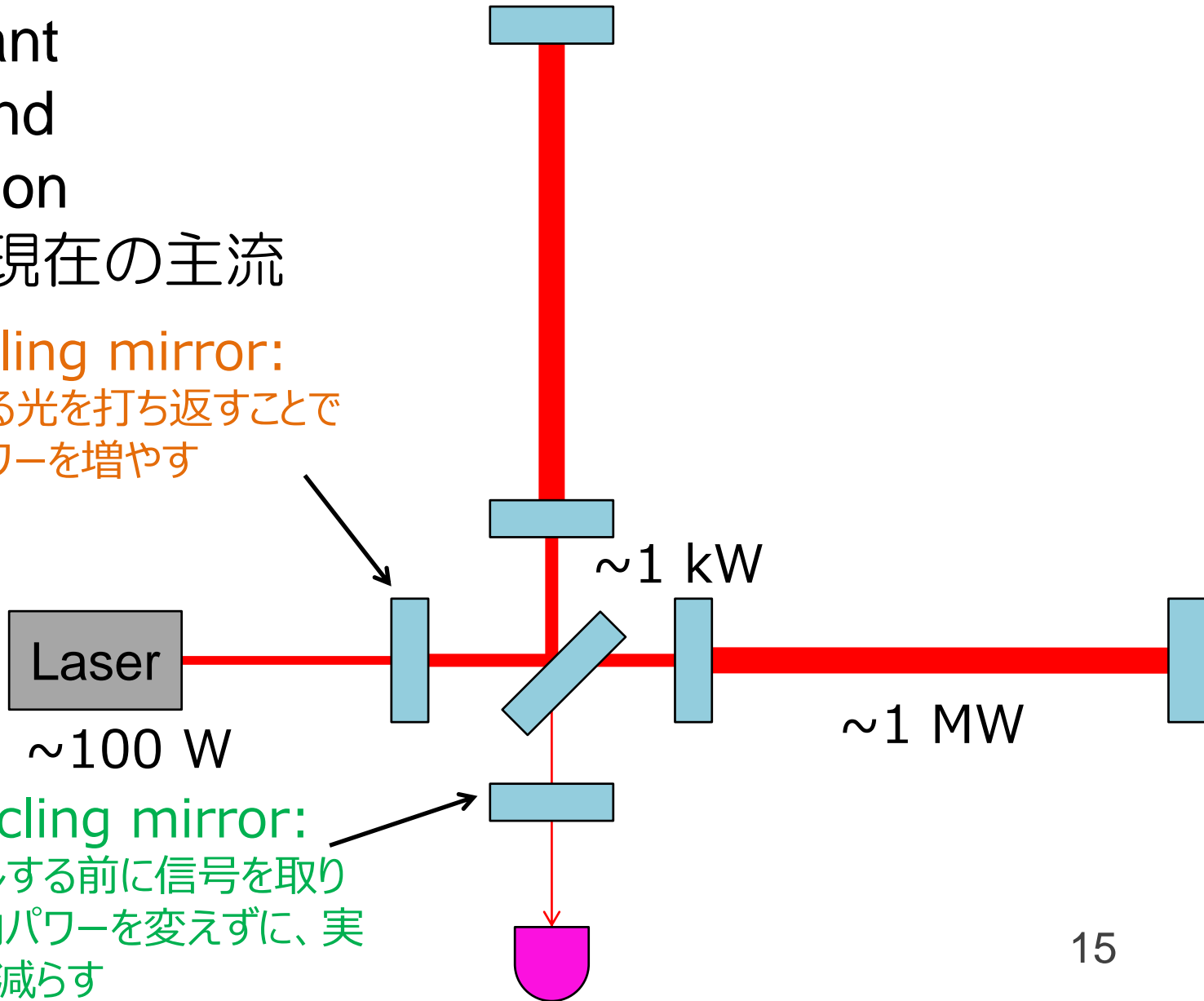
$$h_{\text{SQL}} = \sqrt{\frac{8\hbar}{m\omega^2 L^2}}$$

鏡を重く、  
 基線長を長く  
 するのが重要

# 干渉計構成の工夫

- Resonant Sideband Extraction  
構成が現在の主流

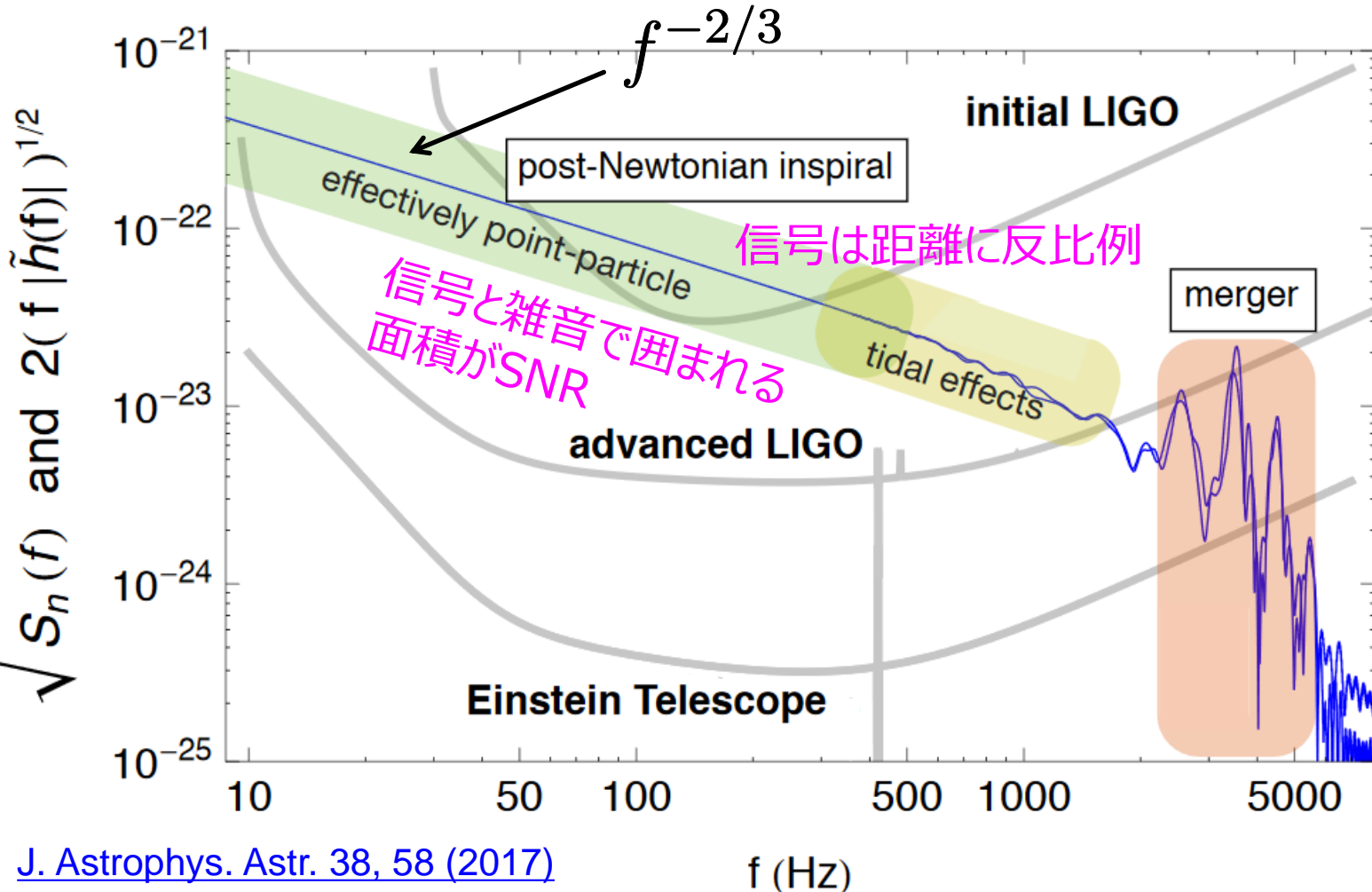
Power recycling mirror:  
光源側に戻ってくる光を打ち返すことで  
実効的に入射パワーを増やす



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





# インスパイラルレンジ

- インスパイラル信号に対する観測可能距離

$$\mathcal{R} = \frac{0.442}{\rho_{\text{th}}} \left(\frac{5}{6}\right)^{1/2} \frac{c}{\pi^{2/3}} \left(\frac{GM_c}{c^3}\right) \left[ \int_{f_{\text{min}}}^{f_{\text{max}}} \frac{f^{-7/3}}{S_n(f)} df \right]^{1/2}$$

方向、偏極に対する  
全天平均

SNR threshold  
(8とすることが多い)

検出器の雑音スペクトル  
インスパイラル波形の周波数依存性  
(characteristic strainで)

- 積分はISCO周波数  
までにしたりする

$$f_{\text{max}} = \frac{c^3}{6^{3/2} \pi GM_{\text{tot}}}$$

Chirp mass (detector frame)

$$\mathcal{M}_c = \frac{(m_1 m_2)^{3/5}}{(m_1 + m_2)^{1/5}}$$

source frameでは

$$m_{\text{source}} = m_{\text{detector}} / (1+z)$$

# 重力波国際観測ネットワーク

**GEO-HF**



**Advanced LIGO**



**Advanced Virgo**



**Advanced LIGO**



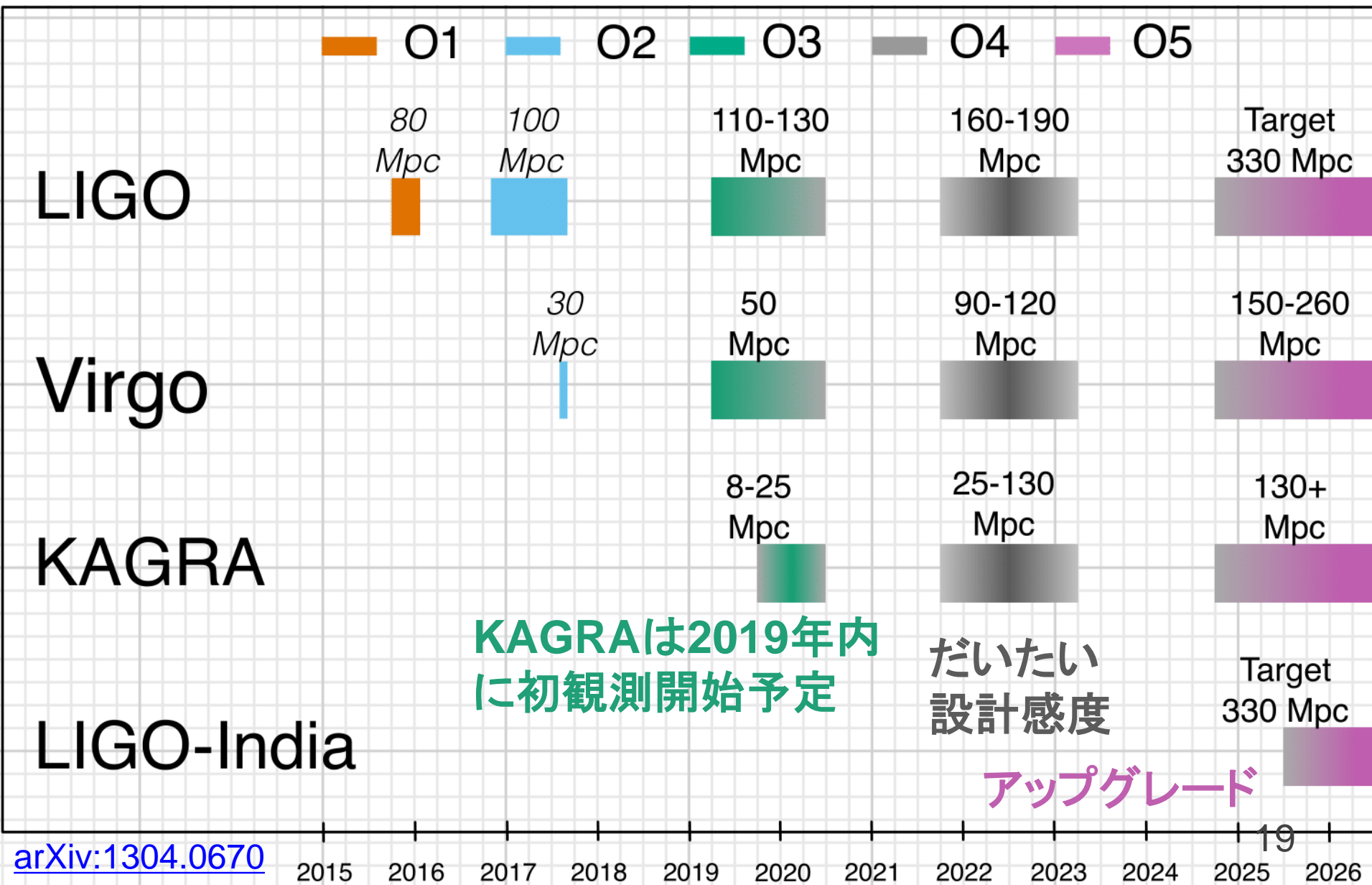
**KAGRA**



**LIGO-India (approved)**

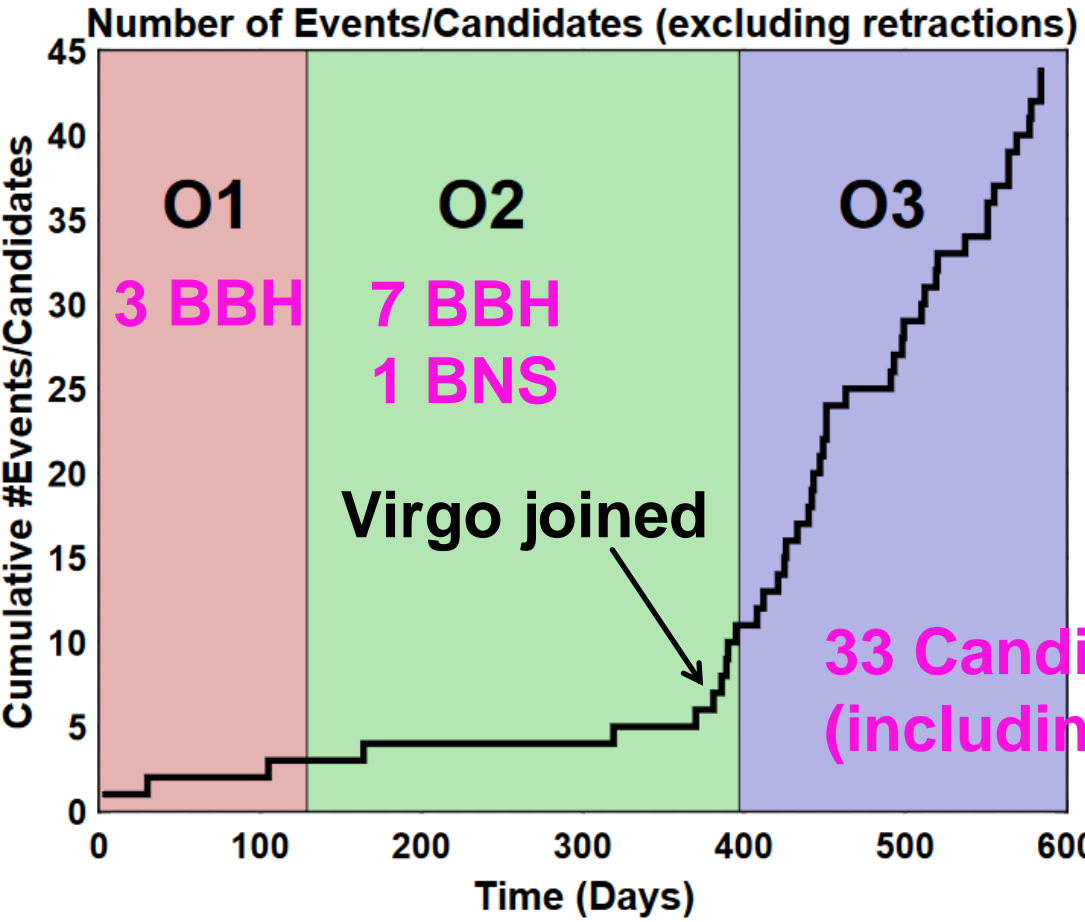


# 共同観測計画



# O3観測の現状

- 2019年4月1日-2019年9月30日 O3a
- 2019年11月1日-2020年4月30日 O3b予定
- 今月は1ヶ月の観測中断中(真空のメンテ、干渉計再調整など)



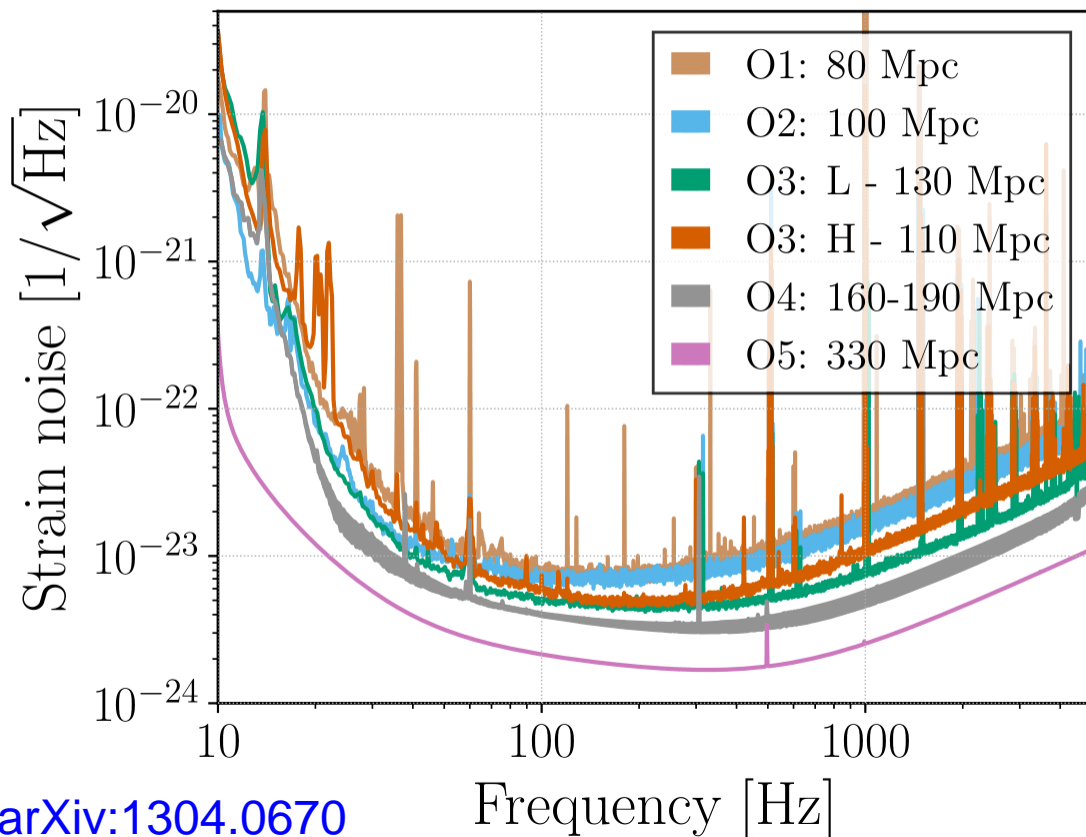
O3から重力波候補は自動的に  
Public Alertが出る  
(約1分以内)

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

# 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

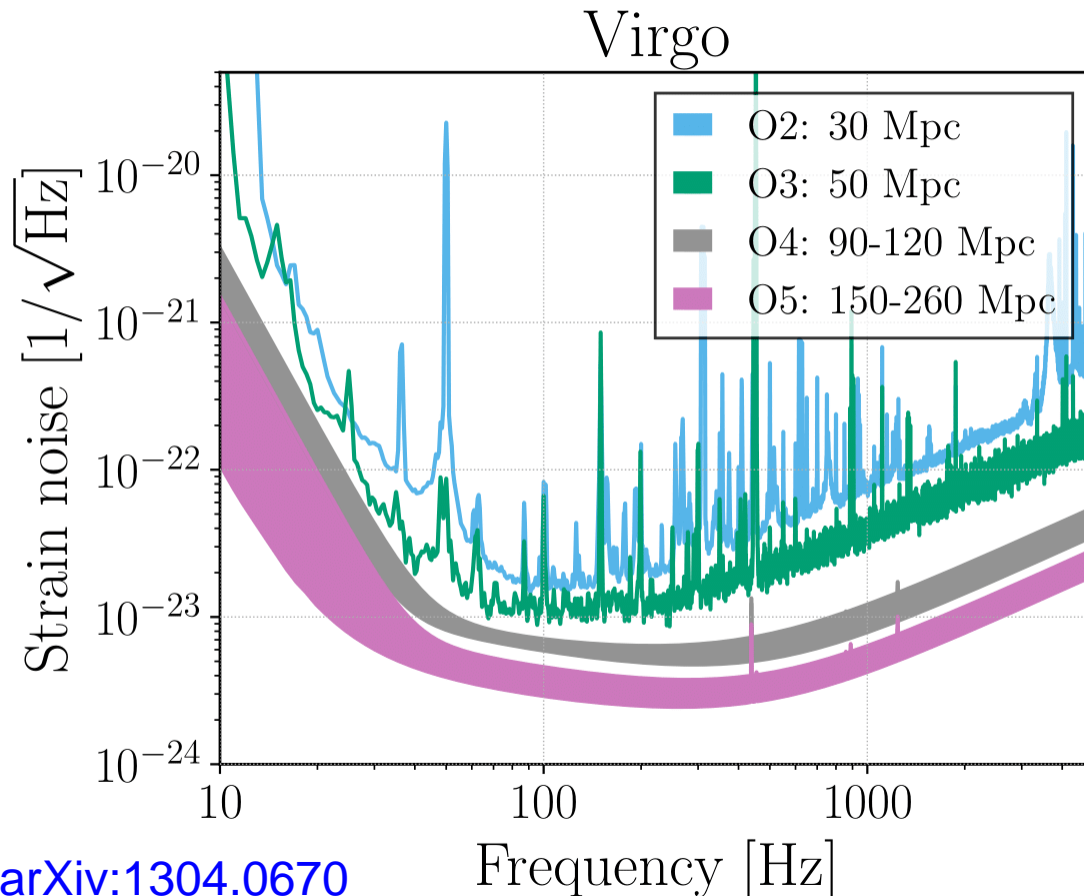


予算も承認

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

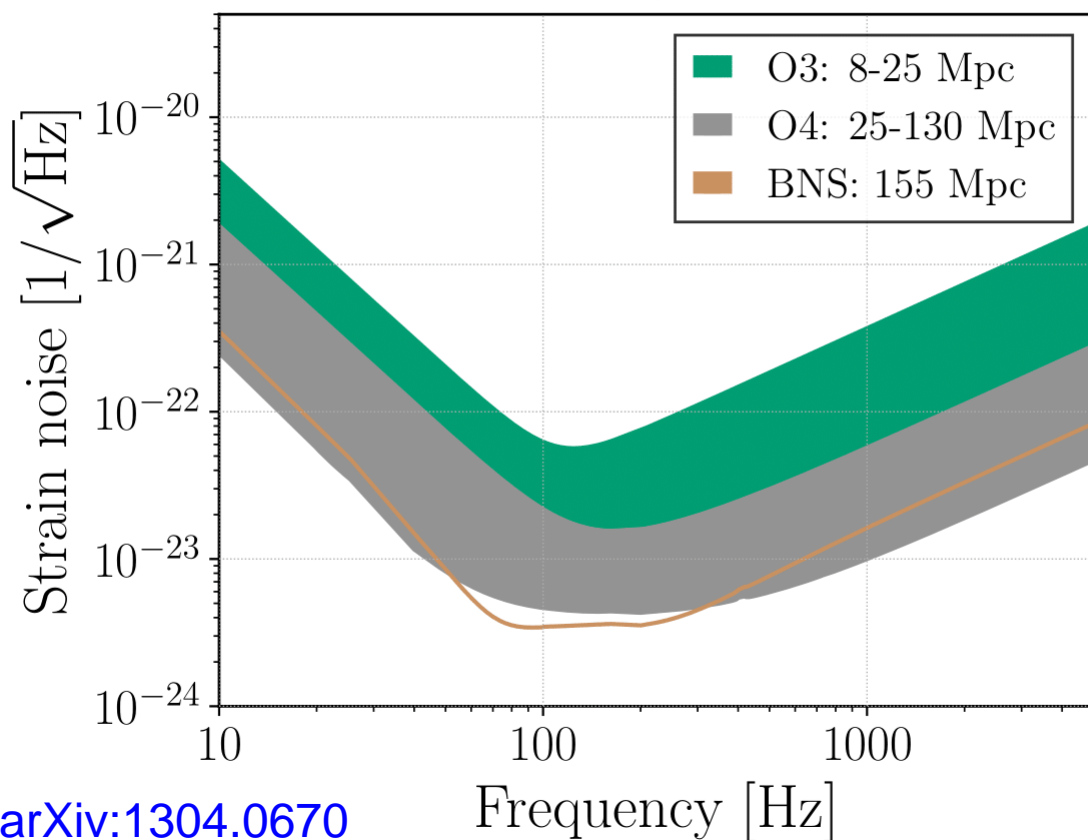


高周波でAdVの感度が設計より悪いのはsignal recycling mirrorがまだ入っていないため

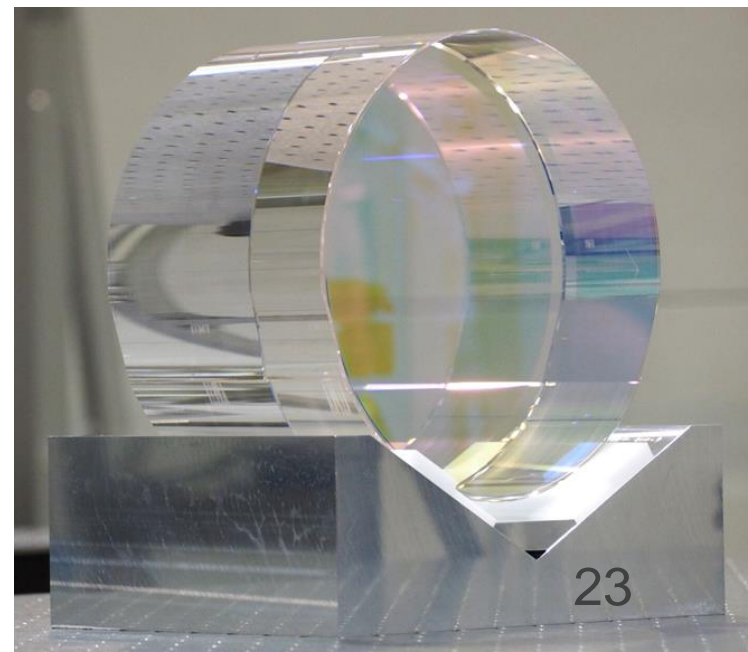
# KAGRAの状況

- 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



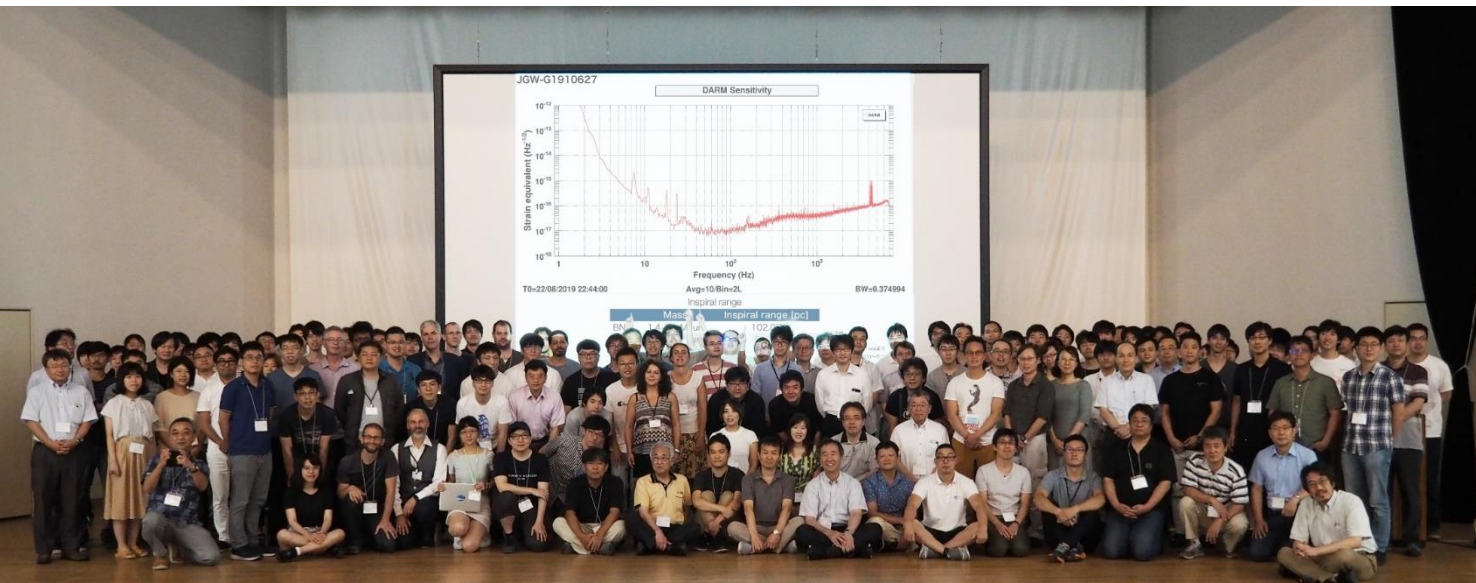
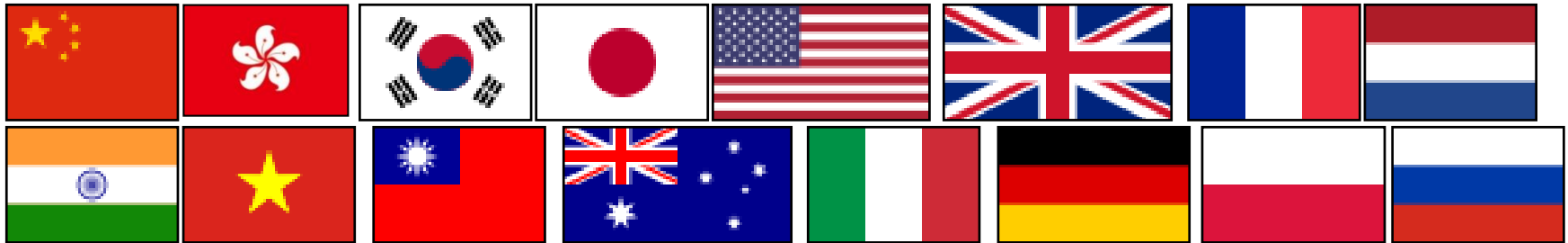
23

# 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



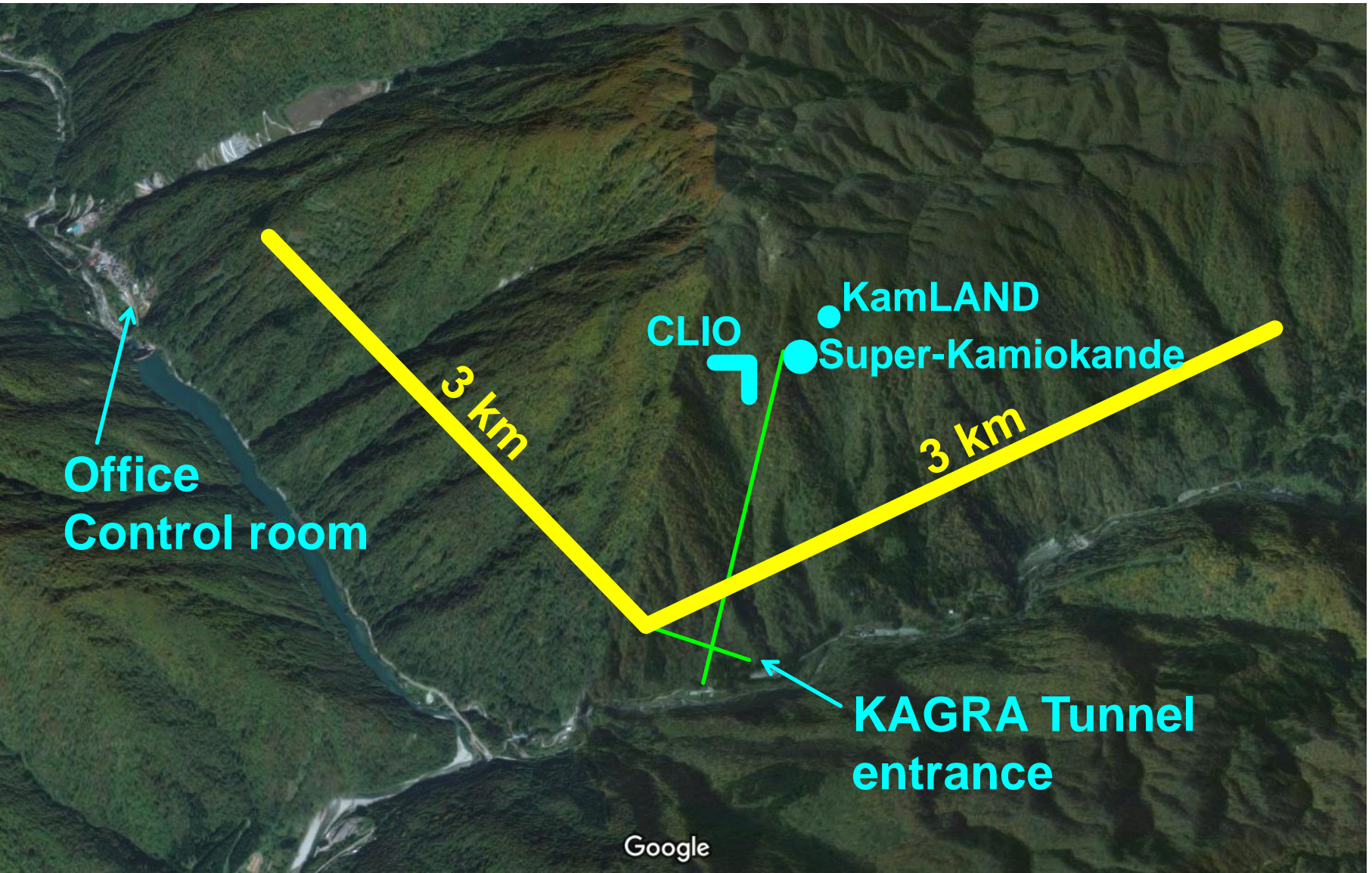
# 茂住オフィス

- 大阪からサンダーバードと北陸新幹線で3時間、  
富山駅から車で南へ1時間くらい



# KAGRAの干渉計

- 池ノ山の中にある



# かぐらトンネル

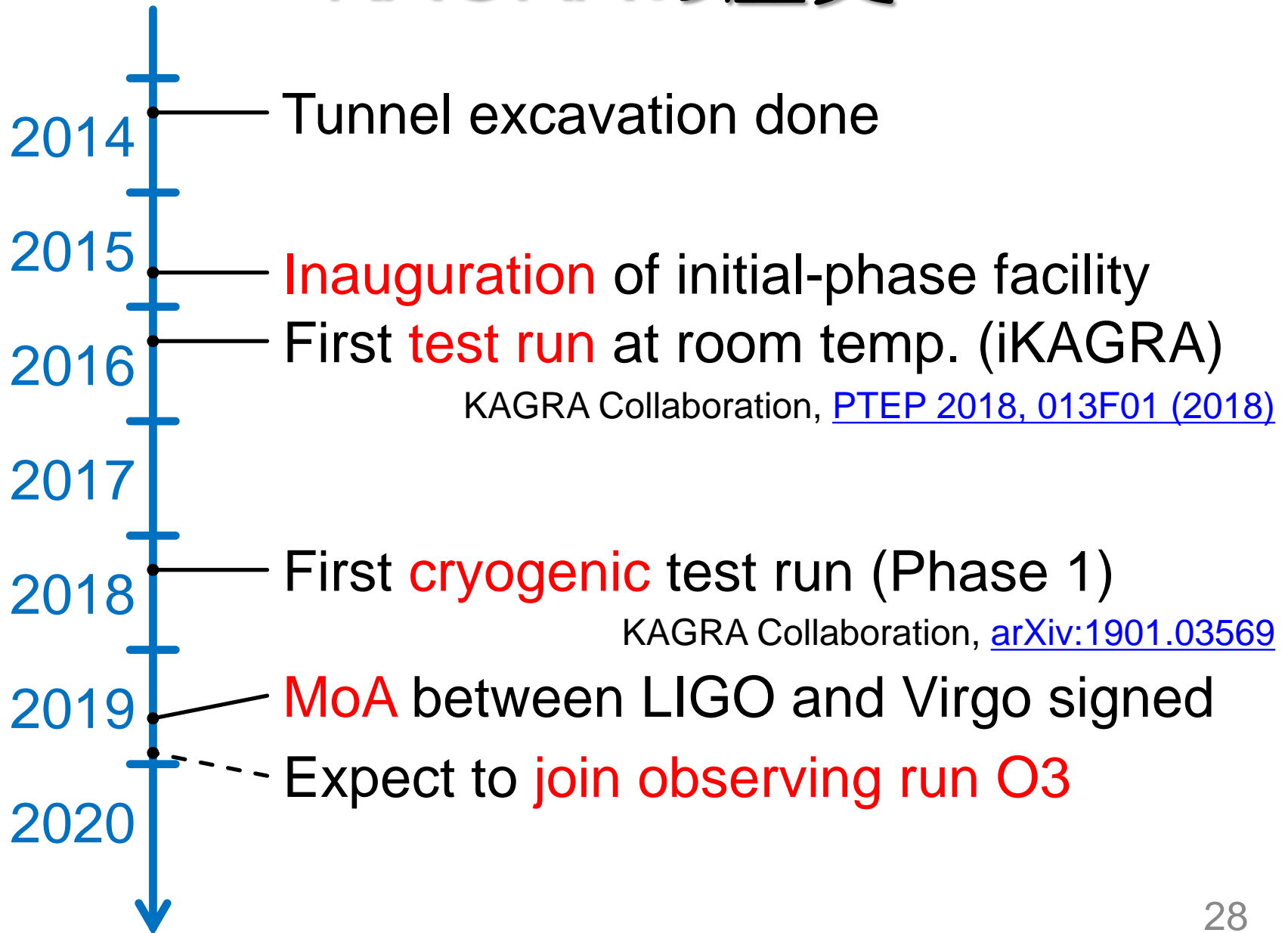
- 2本の3km真空パイプの中をレーザー光が往復



Entrance  
(2016.2.8)



# KAGRAの歴史



# 10月4日のKAGRA完成記念式典

- ほぼ全装置のインストール完了
- LIGO/Virgoとの共同観測運転の研究協定を結んだ

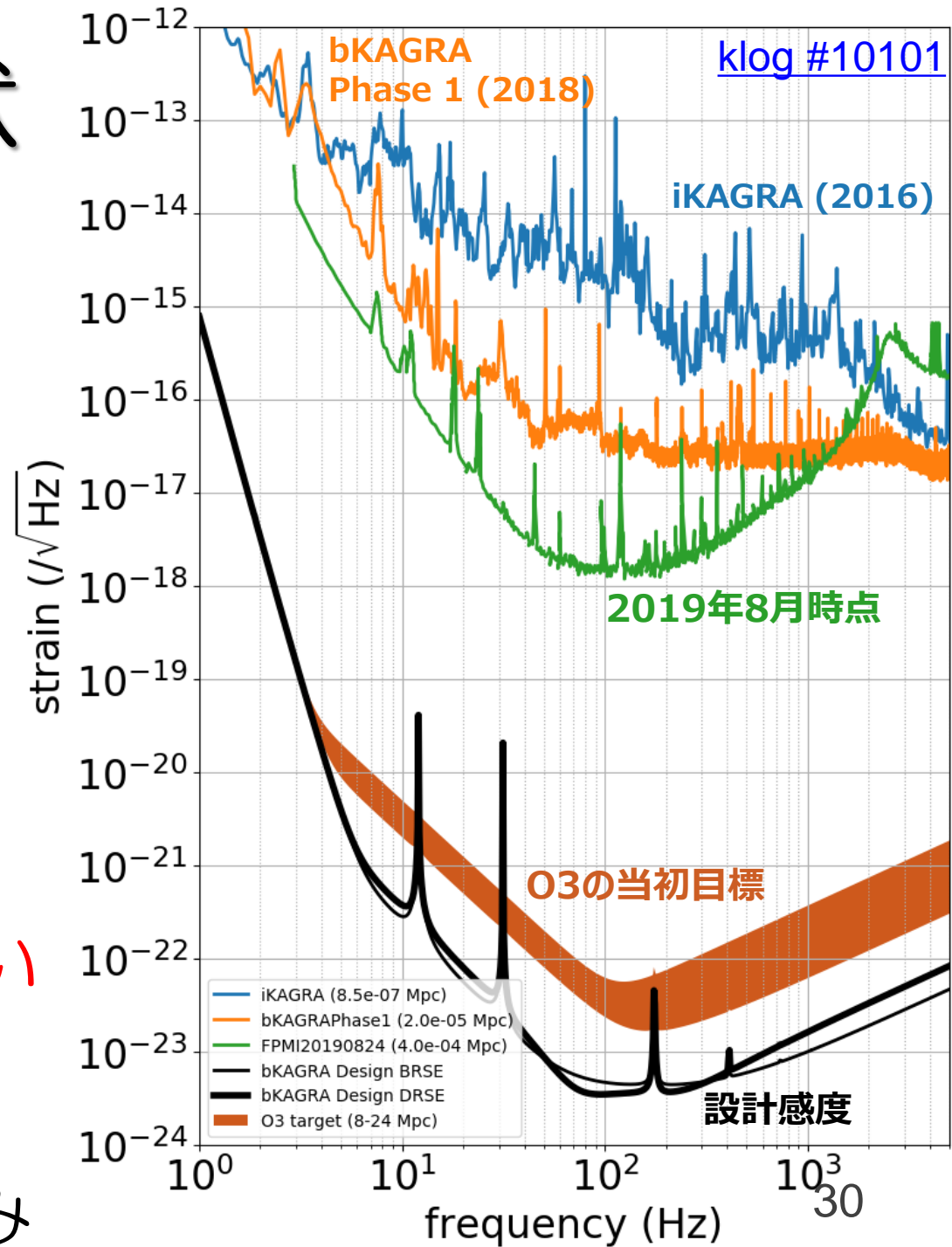


[https://www.u-tokyo.ac.jp/focus/ja/articles/z0508\\_10010.html](https://www.u-tokyo.ac.jp/focus/ja/articles/z0508_10010.html)

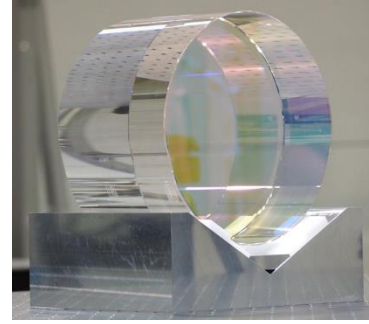


# KAGRAの現状

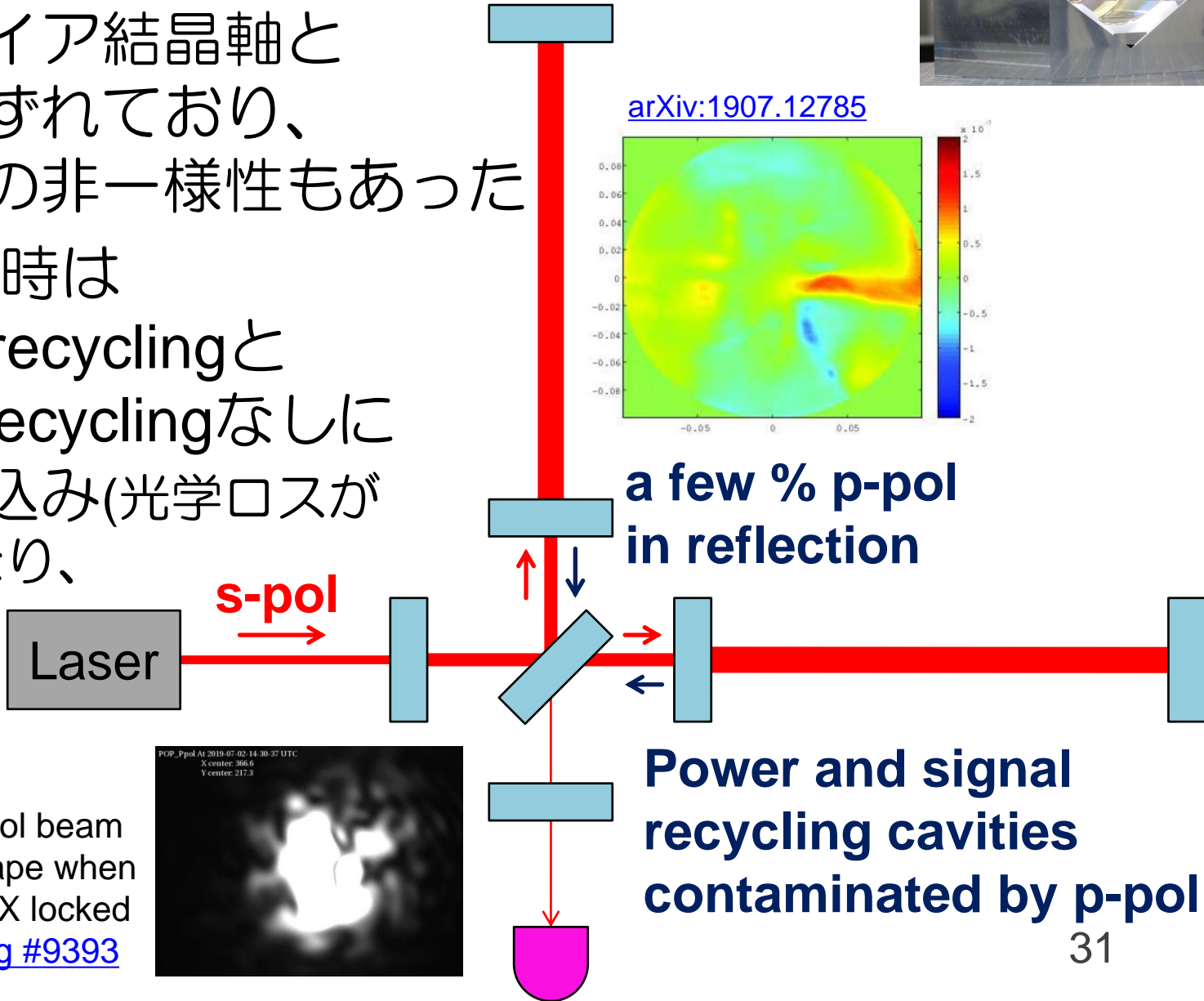
- 現在の感度は1 kpc程度
- サファイア鏡の複屈折の影響が大きいことが6月に判明
- 現在まで power recycling と signal recycling がうまく動いていない
- 2019年末自転での最大到達感度は数Mpcになる見込み



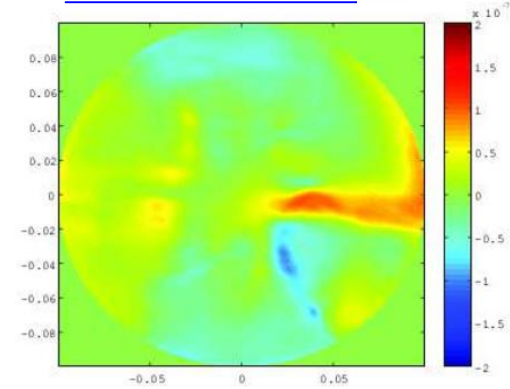
# 複屈折の影響



- 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)

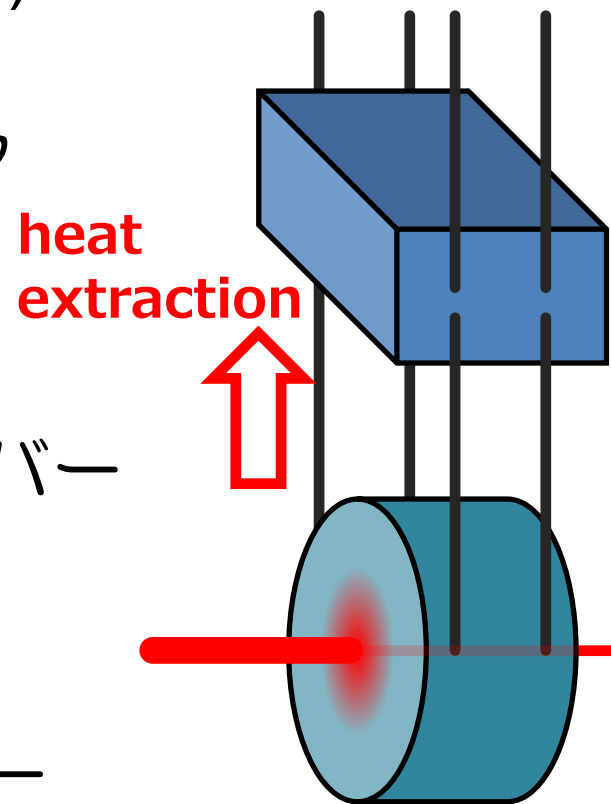


[arXiv:1907.12785](https://arxiv.org/abs/1907.12785)



# KAGRAの将来計画？

- 現在の干渉計で唯一の低温干渉計
- ハイパワー(400 kW)と低温(20 K)の両立が必要
- KAGRAでは懸架するサファイアファイバーで排熱する
- 熱雑音的には細く、長いファイバーが有利
- 排熱的には太く、短いファイバーが有利

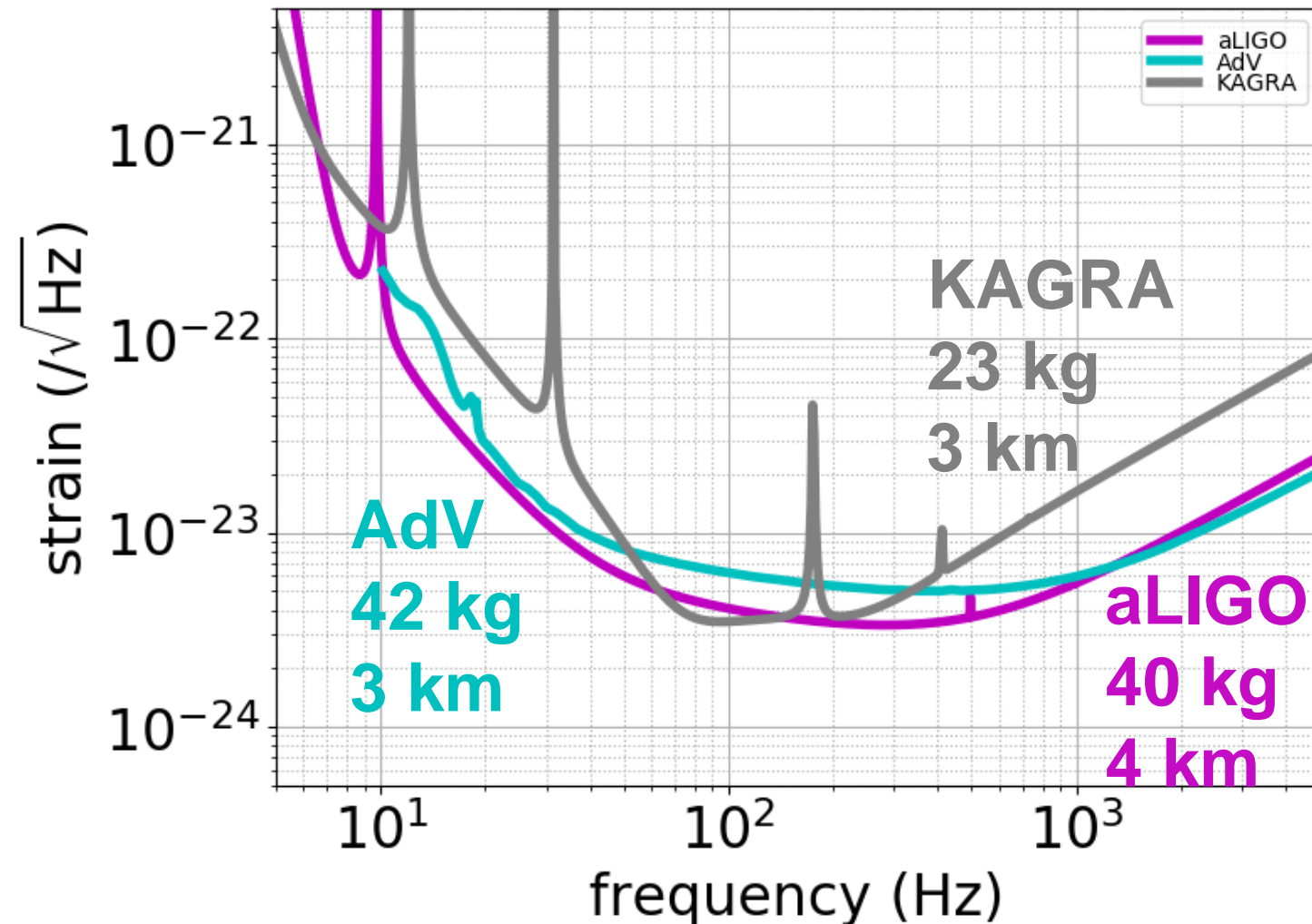


Y. Michimura+, [PRD 97, 122003 \(2018\)](#)

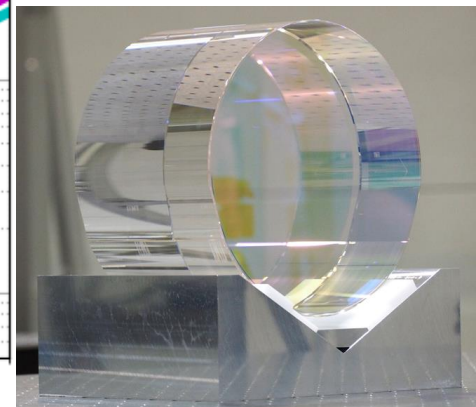


# LIGO, Virgoとの設計感度比較

- 鏡の質量が軽く、排熱のために太く短いファイバー(35 cm,  $\phi$ 1.6 mm)のため、**低周波で感度が悪い**

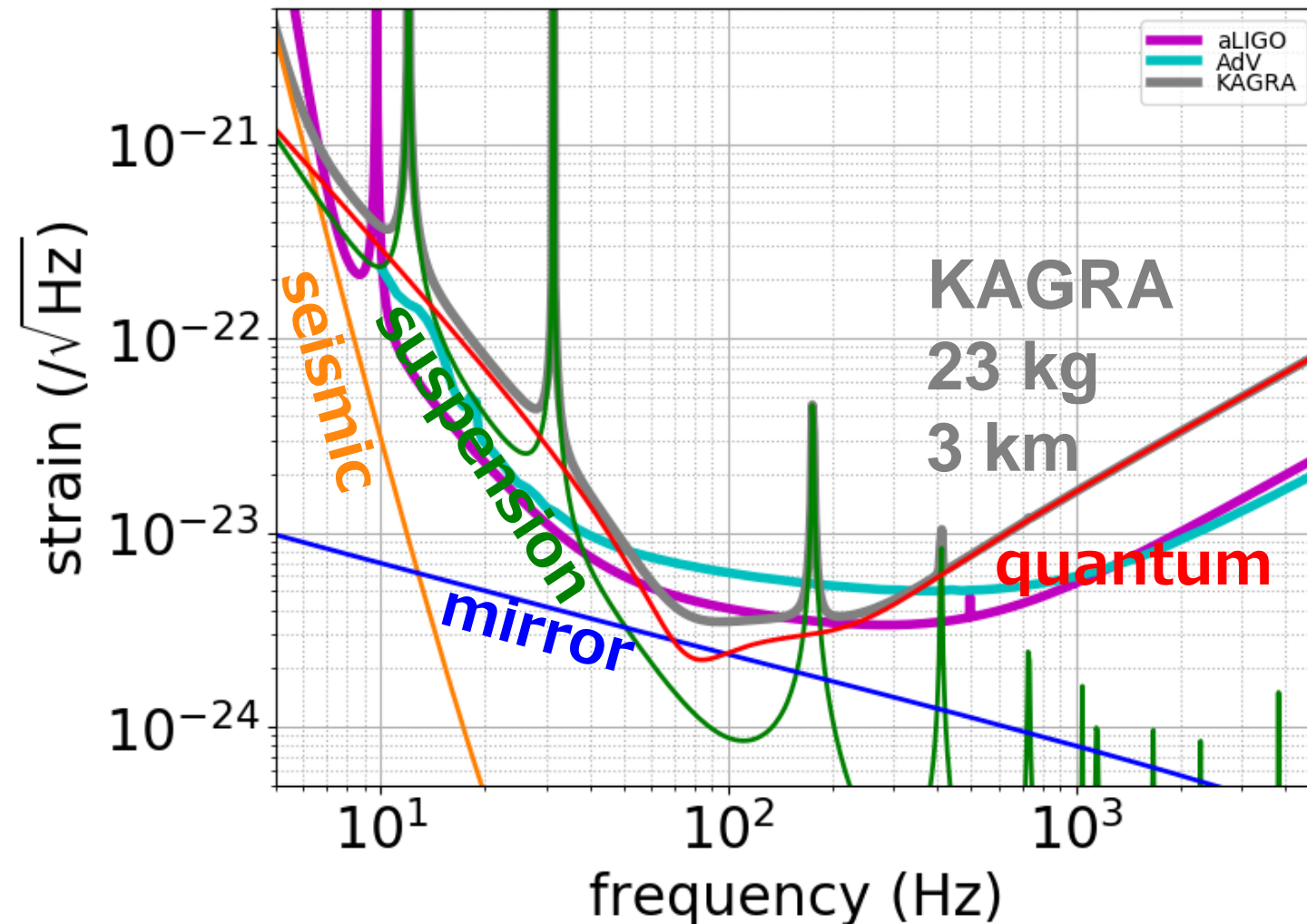


23 kgは  
サファイアと  
しては当時最  
大の鏡だった

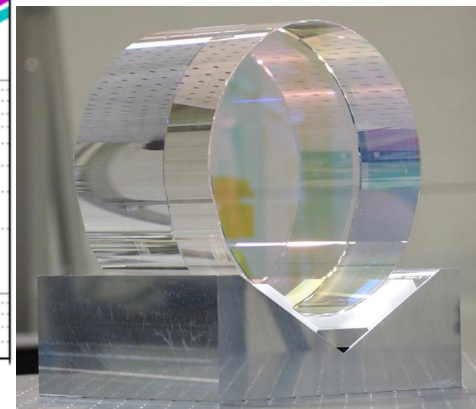


# LIGO, Virgoとの設計感度比較

- 鏡の質量が軽く、排熱のために太く短いファイバー(35 cm,  $\phi$ 1.6 mm)のため、**低周波で感度が悪い**

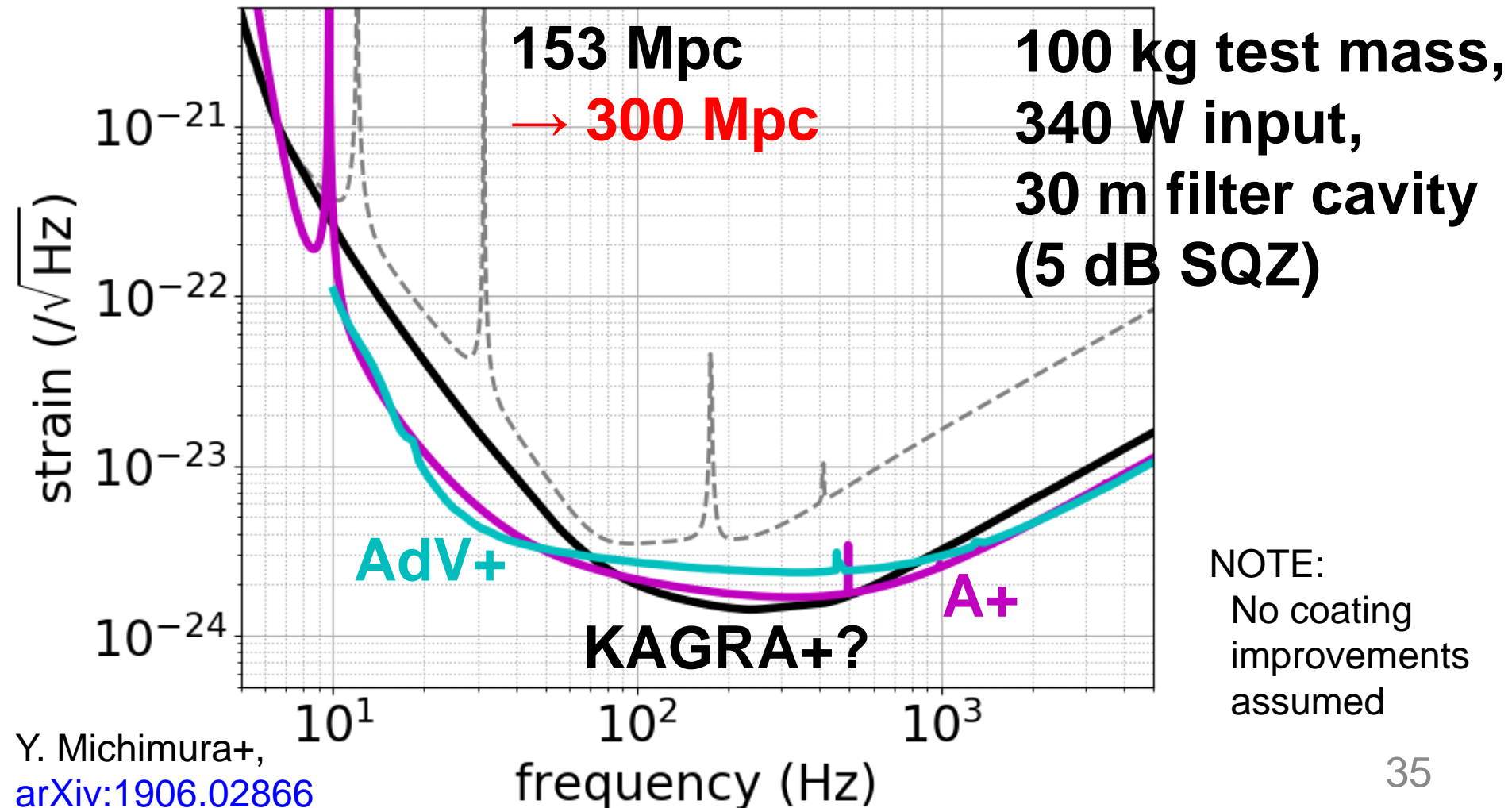


23 kgは  
サファイアと  
しては当時最  
大の鏡だった



# 長期的なアップグレード計画

- 複数の技術を用いれば**2倍の高感度化**は可能



# ではどのようにするか？

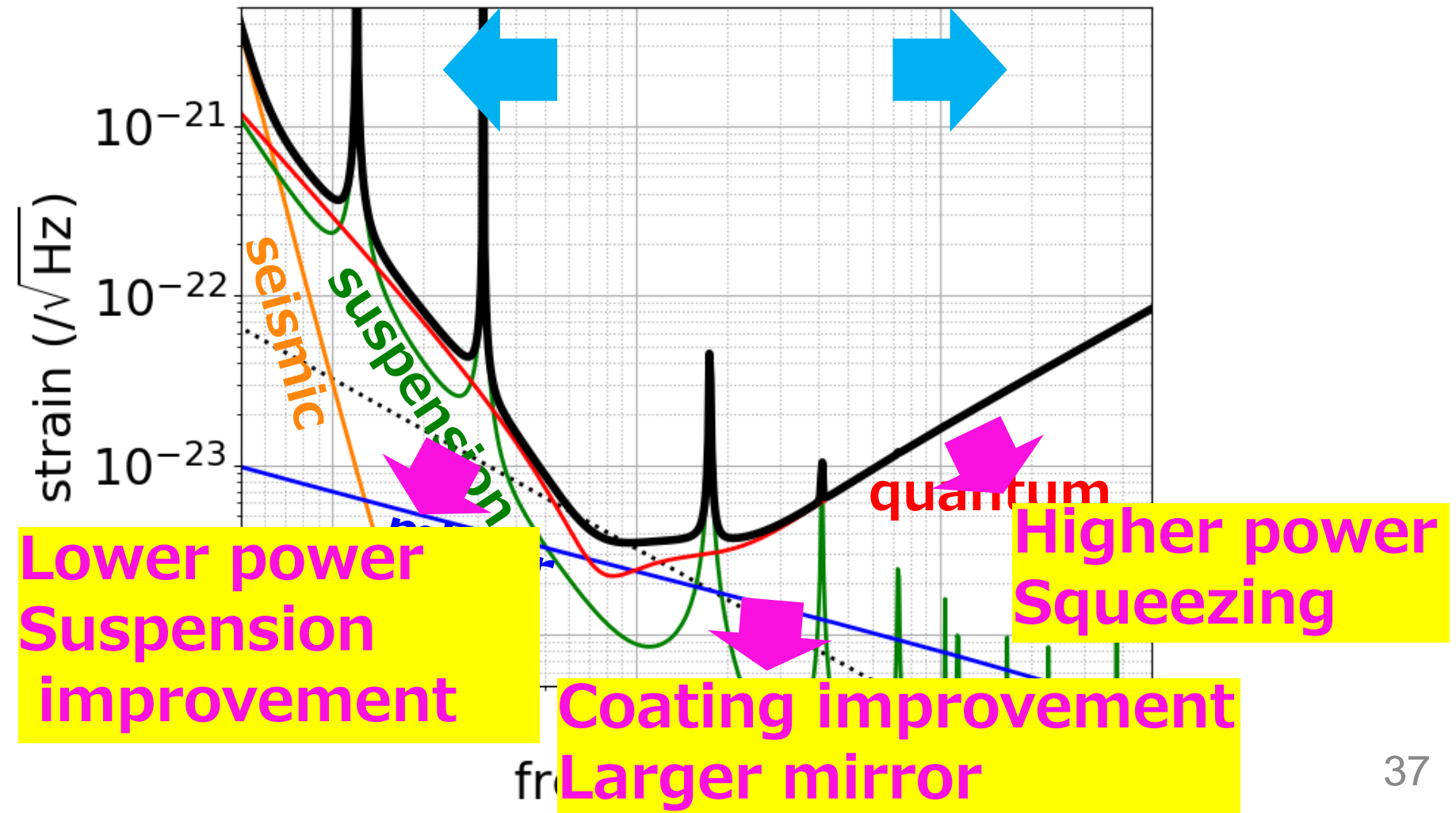
- 幅広いサイエンスをやるためには広帯域での感度向上が必要
- それには複数の技術が必要
  - 大質量サファイア鏡とその懸架系
  - 高出力レーザー
  - 周波数依存スクイーミング
- そしてこれらの技術は一気に導入することはできない
- どれからやるかは  
サイエンスへの影響と  
技術的成熟度  
による

# 短期的なアップグレード計画？

- それぞれの技術は別の周波数帯域で感度を上げる

**Black holes**

**Neutron stars**

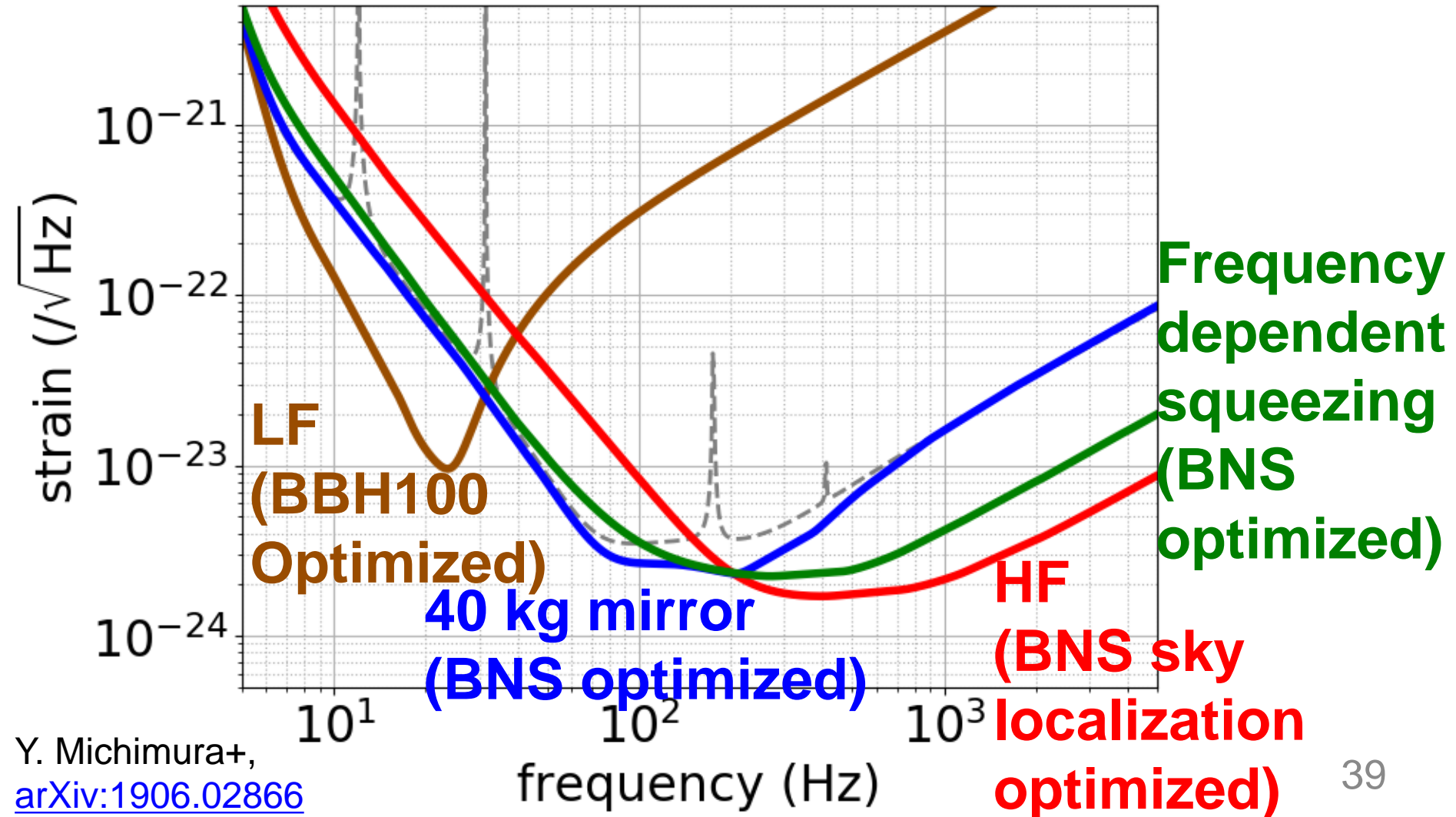


# 各周波数帯域でのサイエンス

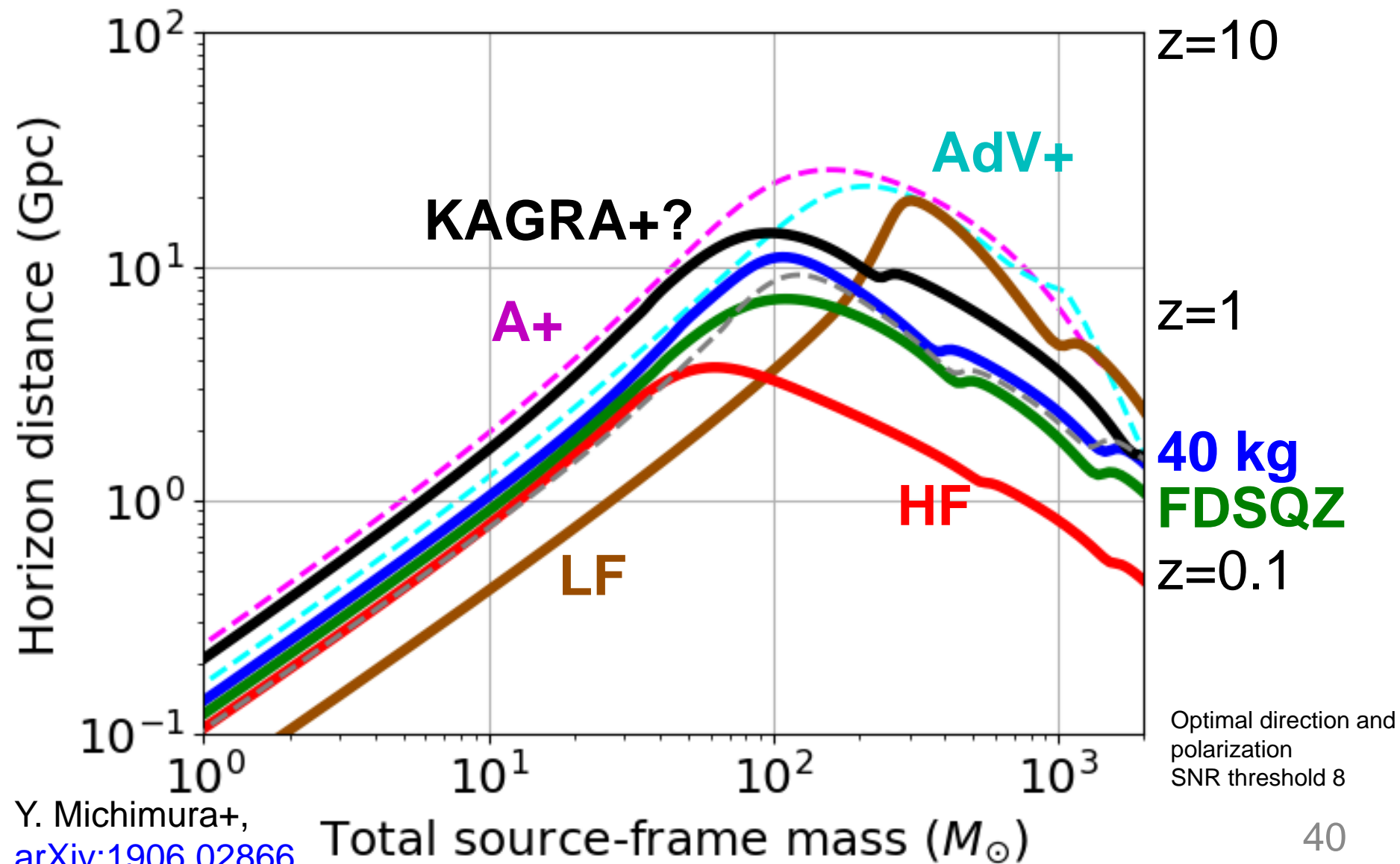
- **Low frequency**  
IMBHs and their spectroscopy  
(Stochastic GW background, cosmic string)
- **Broadband**  
Test of gravity  
Formation scenario of stellar-mass BBHs  
Multi-messenger observations  
Hubble constant  
(Supernovae and X-ray binaries)
- **High frequency**  
NS physics (EOS, post-merger, ejecta)  
Multi-messenger observations  
Hubble constant  
BH spectroscopy with stellar-mass BBHs  
(Isolated pulsars and magnetars)

# 短期的なアップグレード案

- 5年、5億円で可能そうなプラン



# 観測可能距離の比較

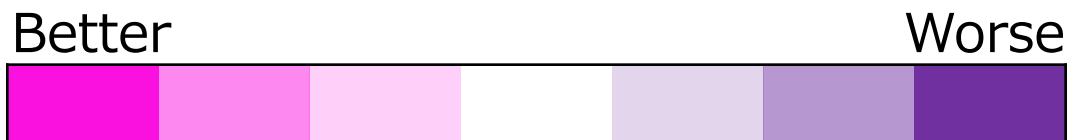




# 得られるサイエンスの比較

- それぞれ得意不得意がある

	LF	40kg	FDSQZ	HF	Longer
IMBH event rate	+			-	
NS event rate		+	+	+	+
NS tidal deformability					
Hubble constant by BBH		+	+		+
Hubble constant by BNS	-	+	+	+	+
GW polarization test	-				+
Stellar-mass BH spectroscopy		+	+	+	+
IMBH spectroscopy	+			-	+



+100% +50% +15% -15% -50% -100%

\* Compared with bKAGRA, assumed A+ and AdV+ Network

\* Summarized by A. Nishizawa *et al.* [JGW-G1909934](https://arxiv.org/abs/1909.0934)

# 最近の雰囲気

- サファイア鏡の複屈折問題が発覚し、サファイア鏡の改良はいずれにせよ必要
- 低周波特化には技術的雑音がどこまで下げられるかの問題があり、高周波特化にはハイパワーを本当に入れられるかの問題がある
- 鏡の改良と周波数依存スクリーニングを優先的に進めるべきという雰囲気になりつつある
- 国立天文台 三鷹の TAMA300施設でプロトタイプ実験
- サファイア鏡の R&Dも進行中

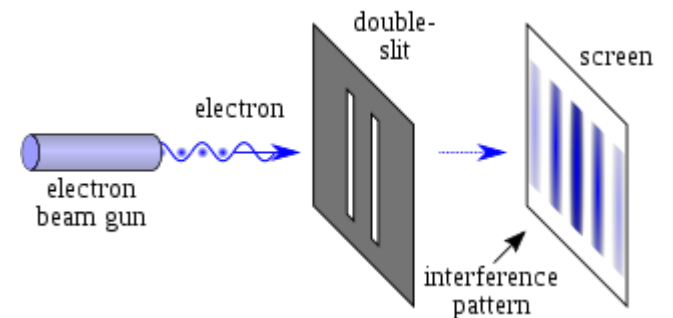
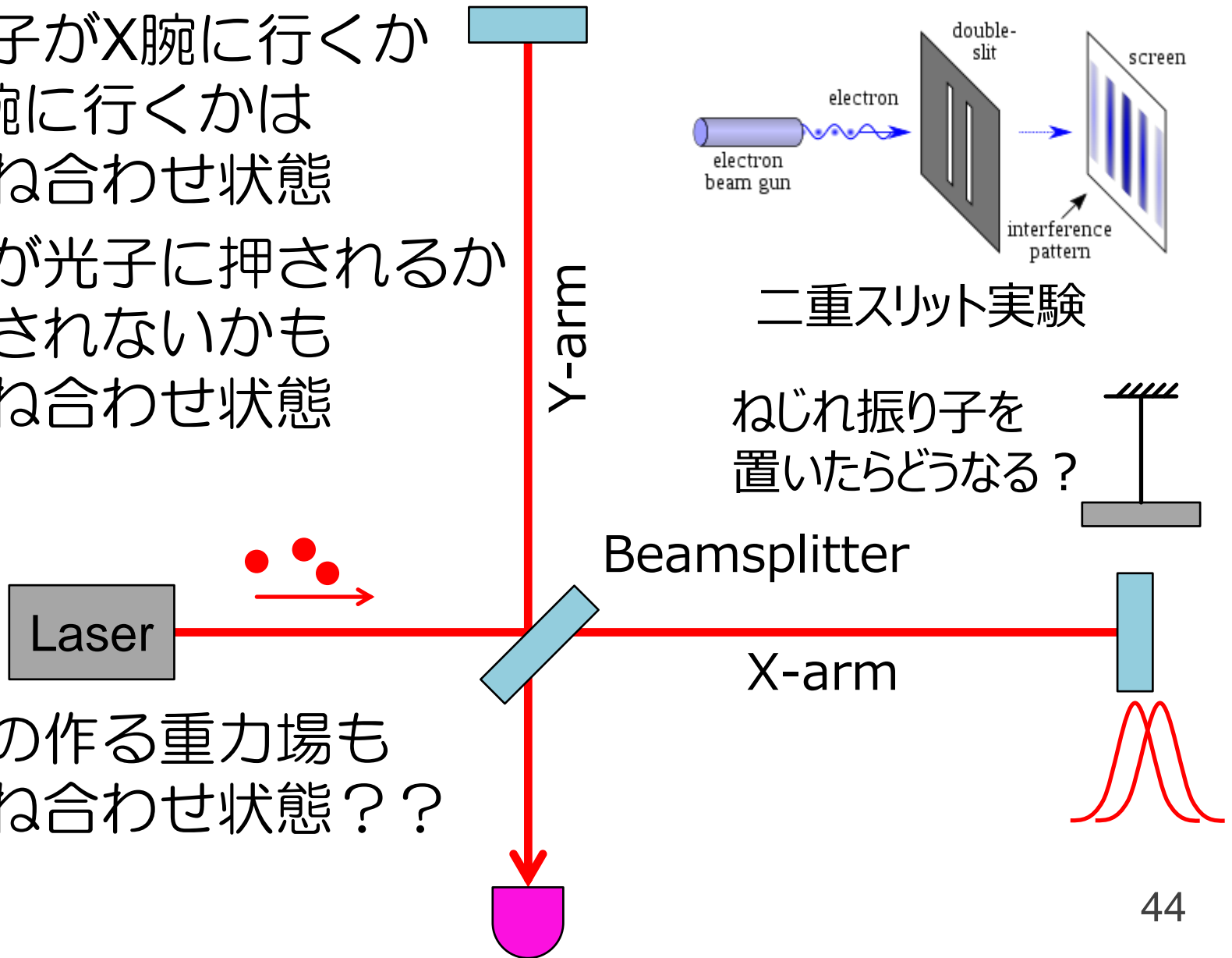
[JGW-G1808966](#)



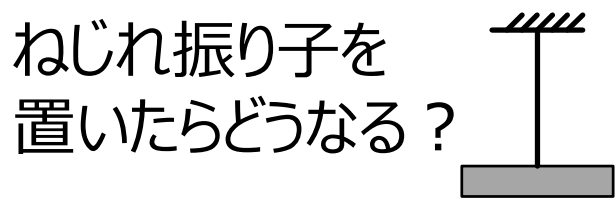
# 巨視的量子力学

# 重力波検出器で量子力学検証

- 光子がX腕に行くか  
Y腕に行くかは  
重ね合わせ状態
- 鏡が光子に押されるか  
押されないかも  
重ね合わせ状態
- 鏡の作る重力場も  
重ね合わせ状態??



二重スリット実験

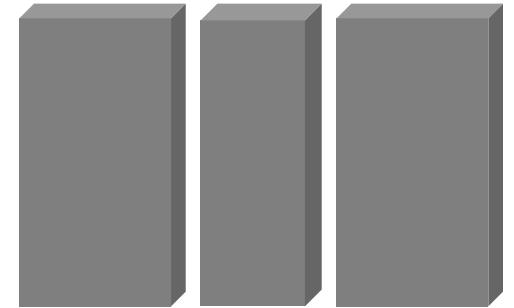
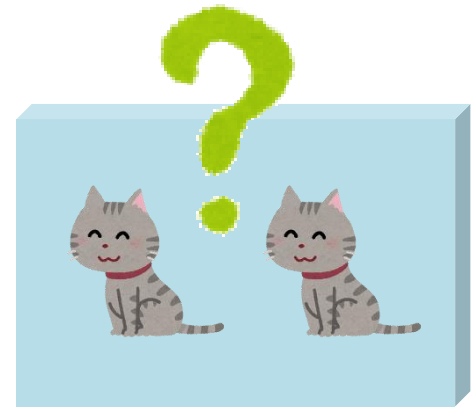


# 巨視的量子力学

- 量子力学はスケールによらない
- にもかかわらず、**巨視的重ね合わせ**は観測されていない  
(二重スリット実験は最大でも 10000 amu ( $2e-23$  kg)程度)

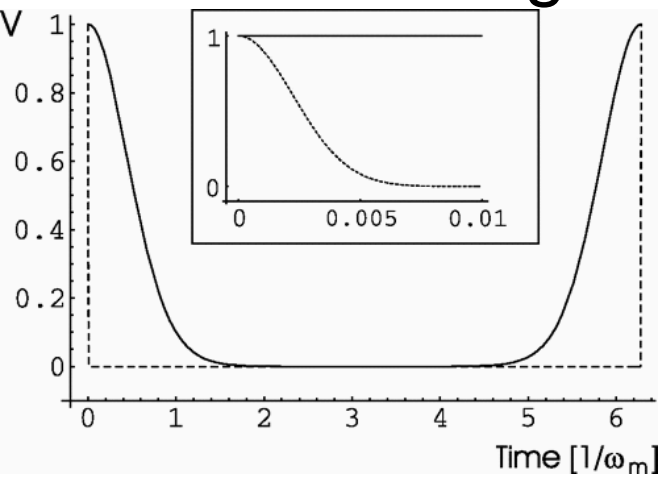
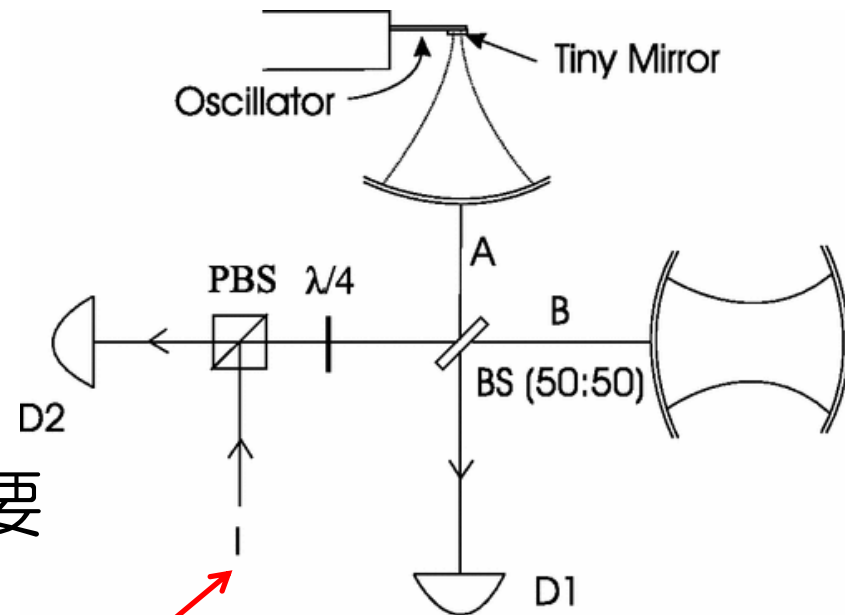
[Phys. Chem. Chem. Phys. 15, 14696 \(2013\)](#)

- 2つの考え方
  - 量子力学は正しいが、巨視的領域では古典的雑音が大きい
  - 巨視的領域では量子力学を修正する必要がある
    - 非線形シュレディンガー方程式
    - 重力デコヒーレンス .....



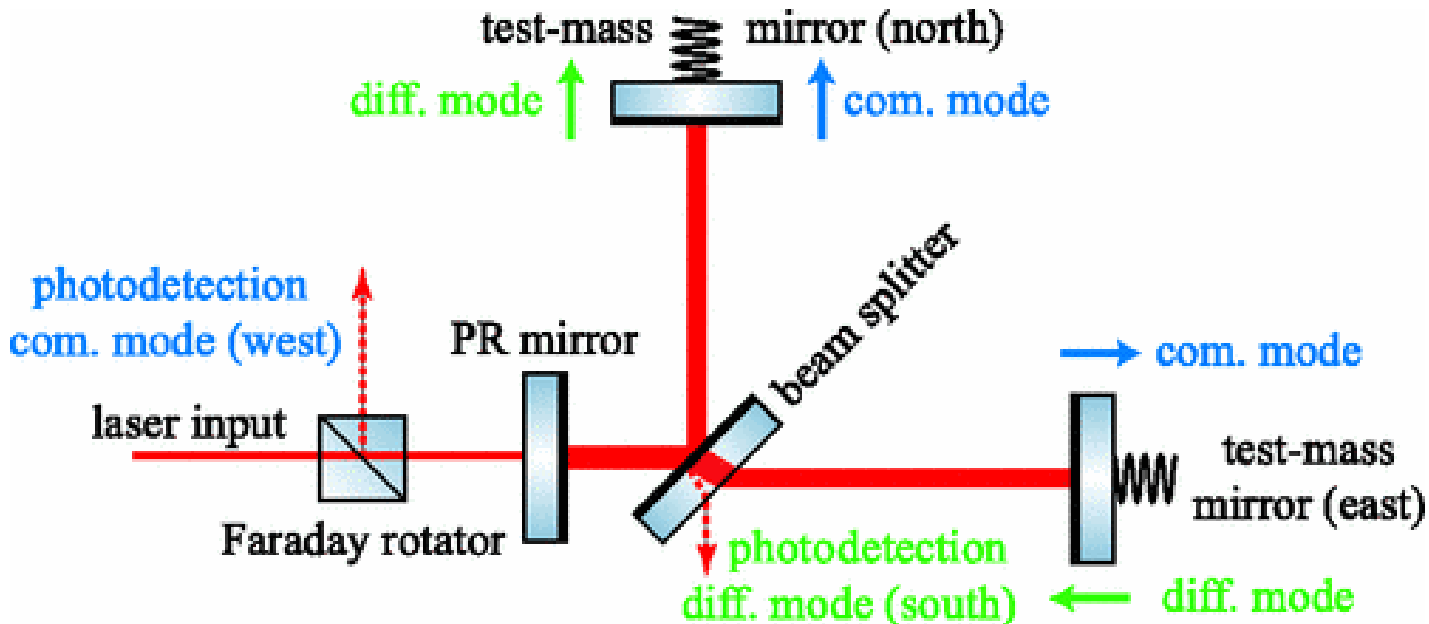
# 提案実験の紹介 その1

- Towards Quantum Superpositions of a Mirror  
Marshall+, [PRL 91, 130401 \(2003\)](#)
- もしデコヒーレンスがなければ干渉縞は振動子の振動周期で復活するはず
- 基底状態(程度)実現と ultra-strong couplingが必要



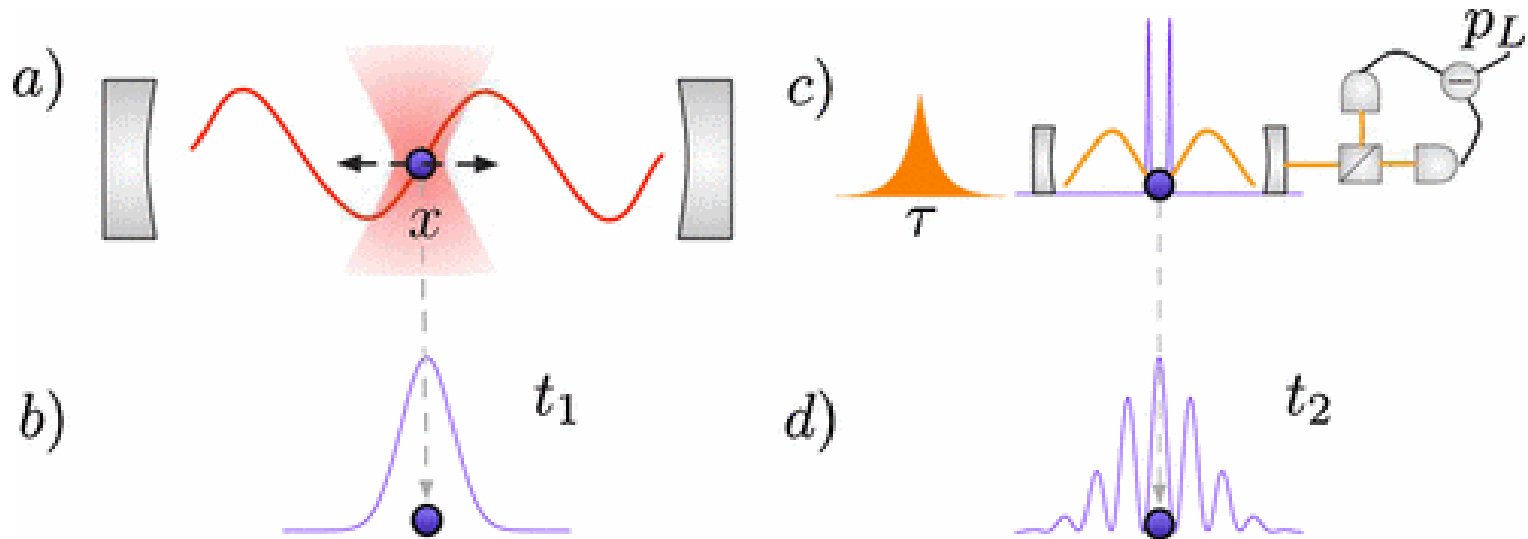
# 提案実験の紹介 その2

- Entanglement of Macroscopic Test Masses and the Standard Quantum Limit in Laser Interferometry  
Muller-Ebhardt+, [PRL 100, 013601 \(2008\)](#)
- 鏡の同相モードと差動モードの量子相関を見る
- 同相、差動の標準量子限界到達が必要



# 提案実験の紹介 その3

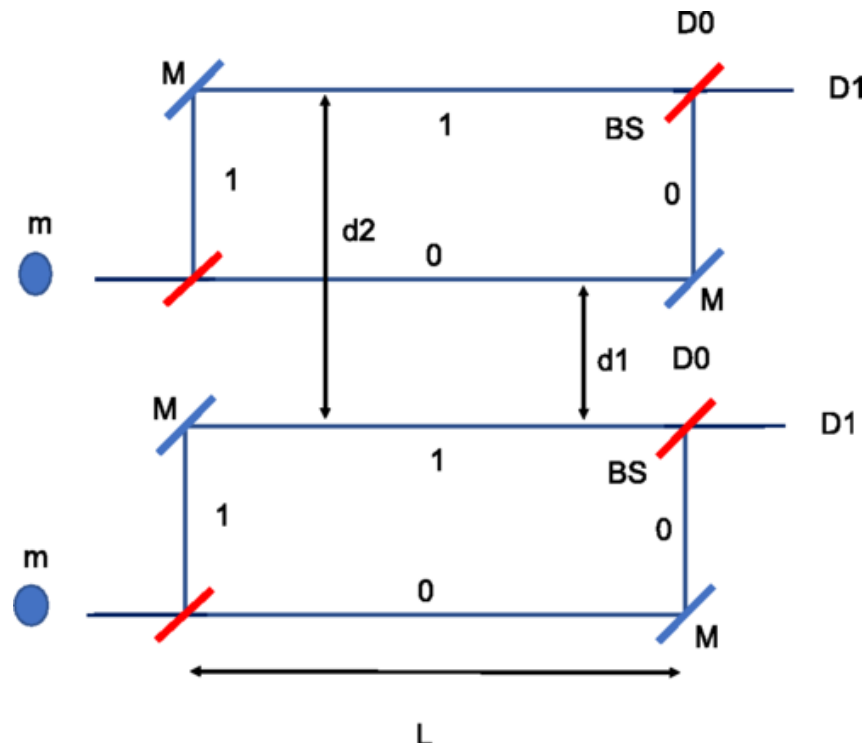
- Large Quantum Superpositions and Interference of Massive Nanometer-Sized Objects  
Romero-Isart+, [PRL 107, 020405 \(2011\)](#)
- 微小球が右にいるか左にいるかの重ね合わせ状態を作り(真ん中にいない状態)、トラップ光を切って落とすと干渉縞が見えるはず





# 提案実験の紹介 その4

- Gravitationally Induced Entanglement between Two Massive Particles is Sufficient Evidence of Quantum Effects in Gravity  
Marletto & Vedral, [PRL 119, 240402 \(2017\)](#)
- 2つの物質波干渉計の間に働く重力相互作用を調べる



# 提案実験の紹介 その5

- Quantum correlation of light mediated by gravity  
Miao+, [arXiv:1901.05827](https://arxiv.org/abs/1901.05827)
- 2つの鏡の間に働く重力相互作用によって、レーザー光に量子相関が生まれるか調べる
- 熱雑音を量子輻射圧雑音よりも十分小さくする必要

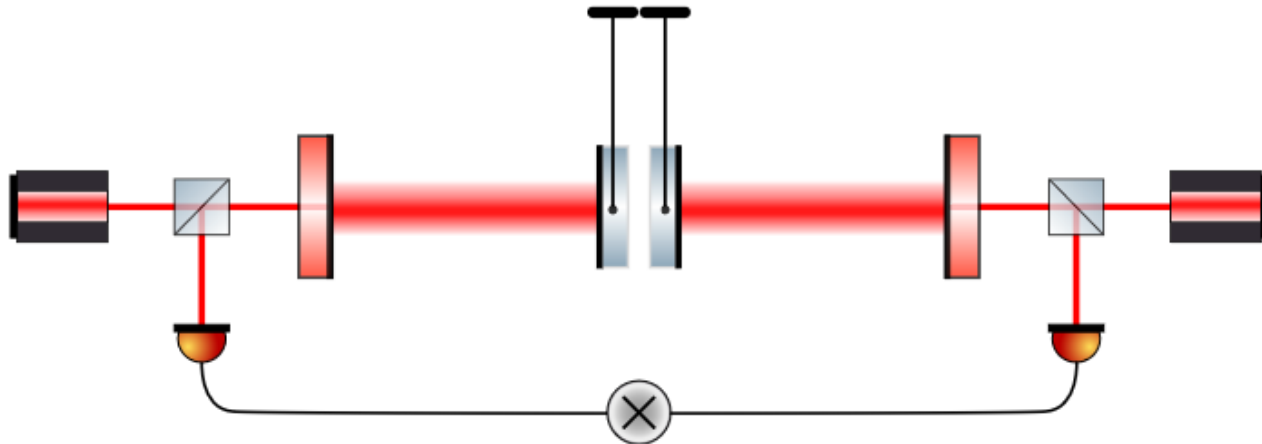
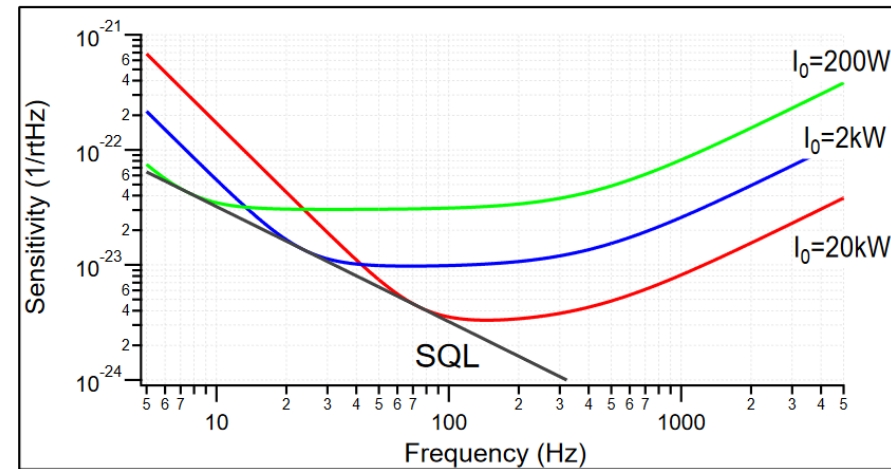


FIG. 1. Schematics showing the setup of two optomechanical cavities with their end mirrors coupled to each other through gravity. The quantum correlation of light is inferred by cross-correlating the readouts of two photodiodes.

# 標準量子限界の到達

- 他にも様々な実験提案があるが、巨視的領域で実現された例はない
- 熱雑音(熱的デコヒーレンス)が大きい

- 熱雑音を小さくし、**標準量子限界**に到達するのが一つのベンチマーク



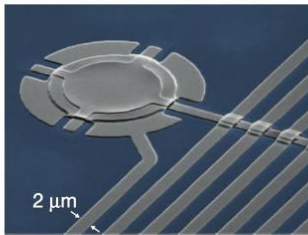
- レーザー光と機械系が結合した機械光学系 (optomechanical system) を用いた実験が盛んに行われている

# 機械光学系の先行研究

- プランク質量を超える領域では標準量子限界に到達した例はない
- 我々はmgスケールに着目した実験を行っている

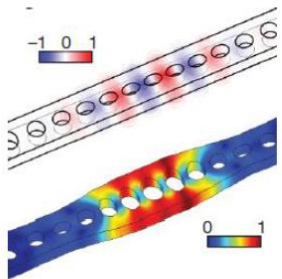
Planck mass (22 ug)

reached SQL



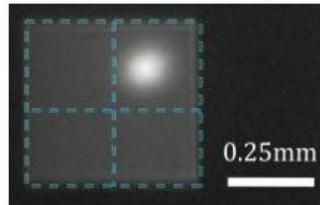
membrane, 48 pg  
Taufel+ (2011)

reached SQL

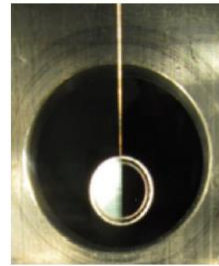


nanobeam, 311 fg  
Chan+ (2011)

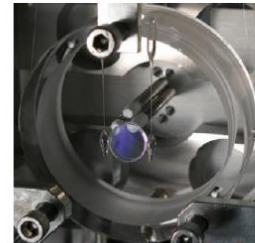
reached SQL



membrane, 7 ng  
Peterson+ (2016)

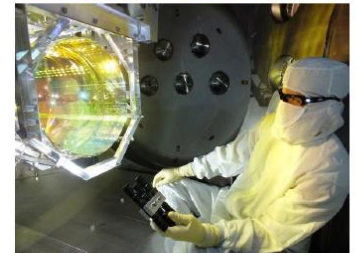


suspended mirror, 5 mg  
Matsumoto+ (2015)



suspended mirror, 1 g  
Neben+ (2012)

SQL soon?

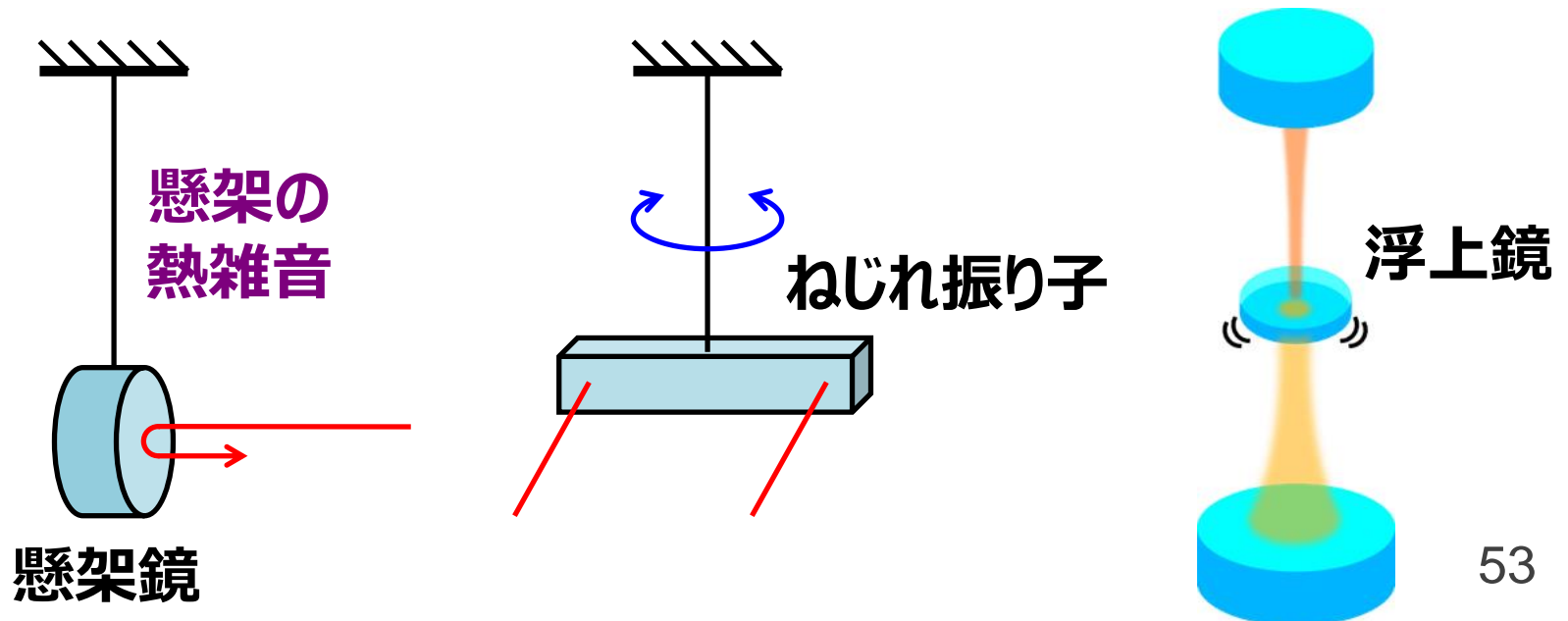


suspended mirror, 40 kg  
aLIGO



# 3つのアプローチ

- **単振り子**型の懸架されたディスク  
細線で懸架することにより熱雑音を抑える
- **ねじれ振り子**型の懸架された棒  
共振周波数を下げることにより熱雑音を抑える
- **光学浮上鏡**  
光輻射圧で支持することにより熱雑音をなくす



# 単振り子型の実験

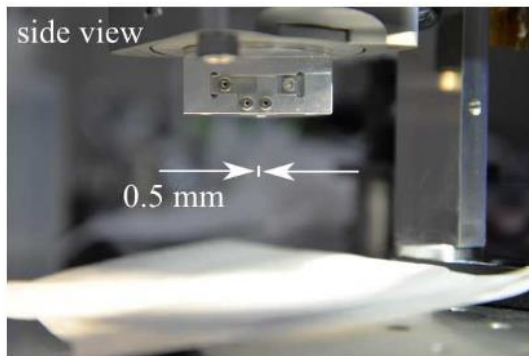


東北大学

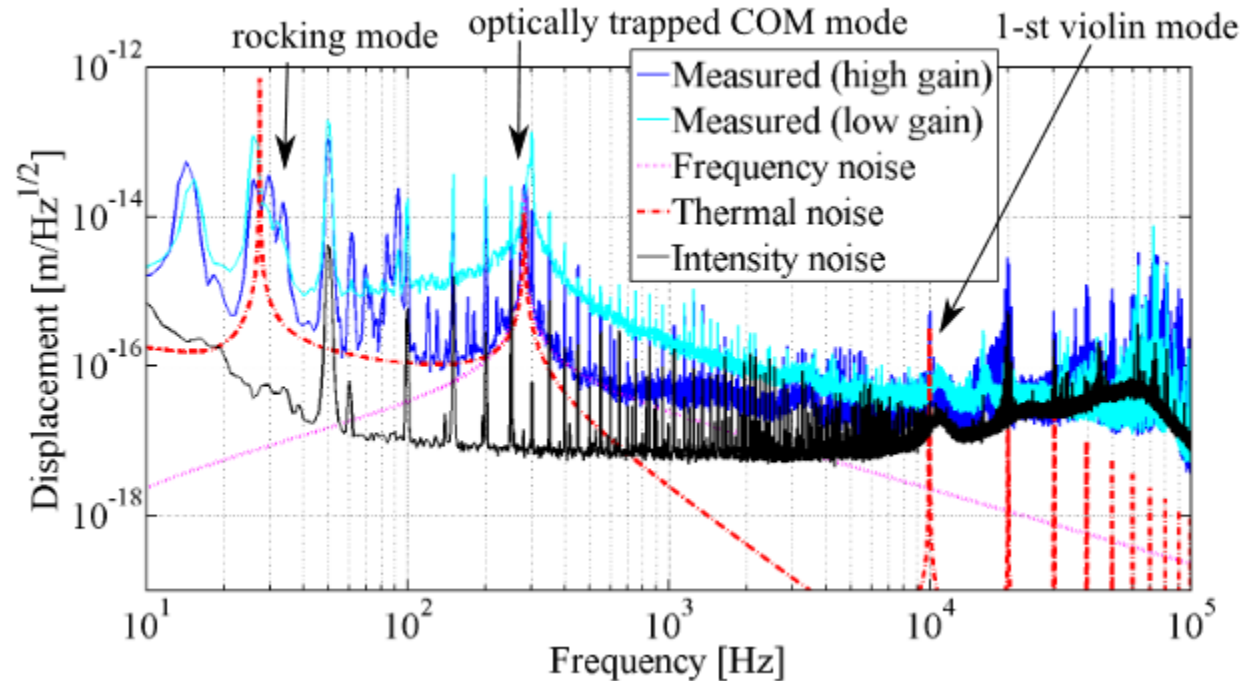
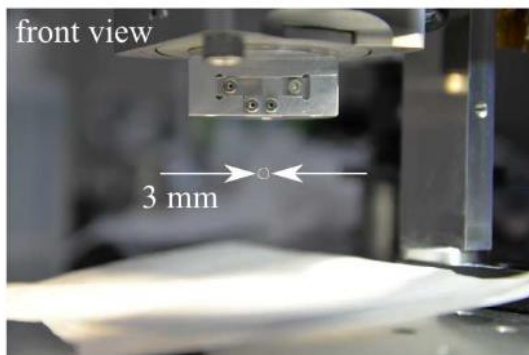


- 東北大学との共同研究
- $3e-14 \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}}$  @  $280 \text{ Hz}$ の変位感度を実現
- $100 \text{ mg}$ の物体の重力を1秒で測定可能な $7 \text{ mg}$ の鏡  
Matsumoto, ..., YM+, [PRL 122, 071101 \(2019\)](#)

(c)



(d)

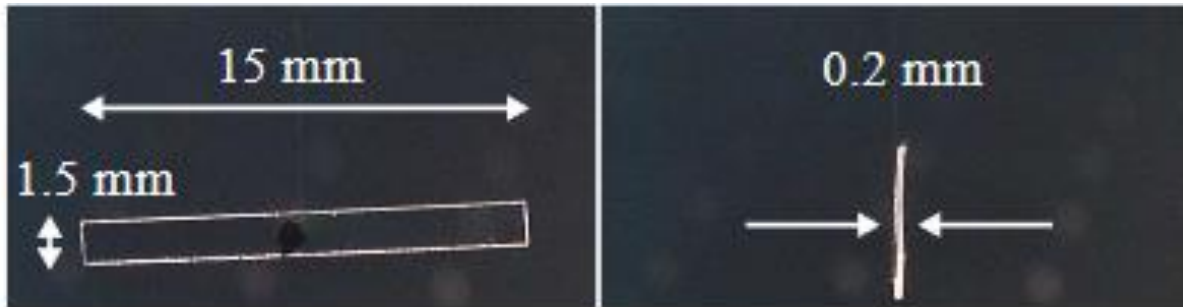
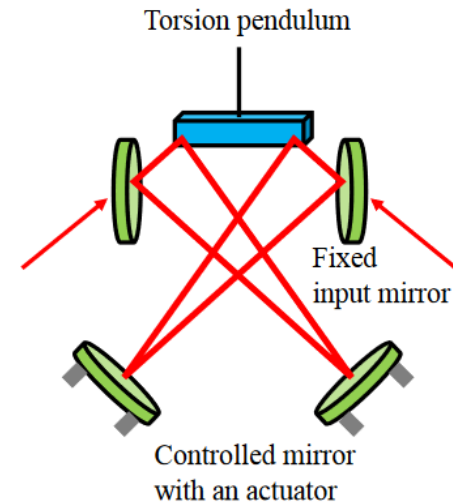
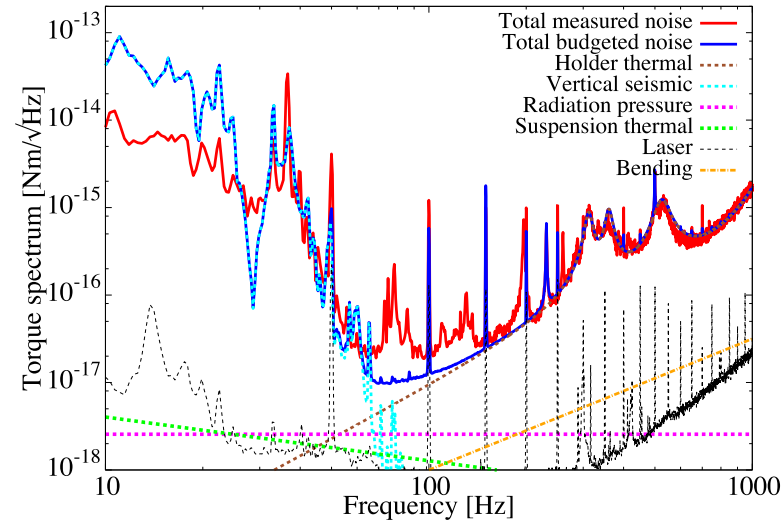


# ねじれ振り子型の実験



- 10 mgのねじれ振り子の回転を2つの光共振器の差動長として読む
- $2e-17 \text{ Nm}/\sqrt{\text{Hz}}$  @ 100 Hzのトルク感度を実現  
(力感度としては $2e-15 \text{ N}/\sqrt{\text{Hz}}$ )
- ミリグラムスケールでは世界最高感度

Komori, ..., YM+, [arXiv:1907.13139](https://arxiv.org/abs/1907.13139)



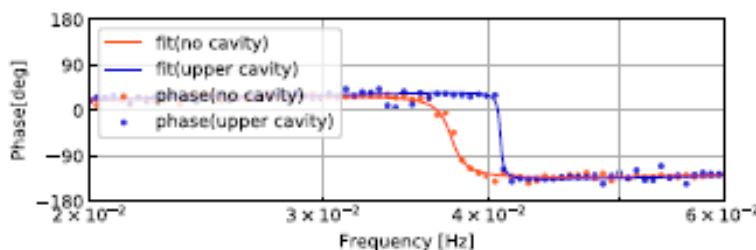
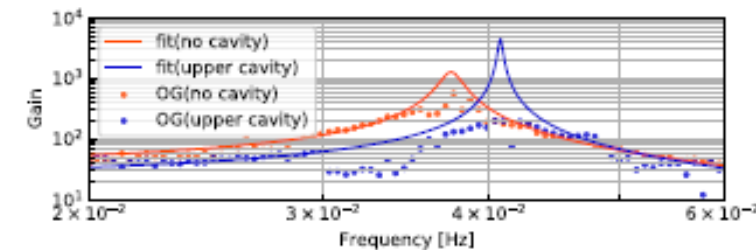
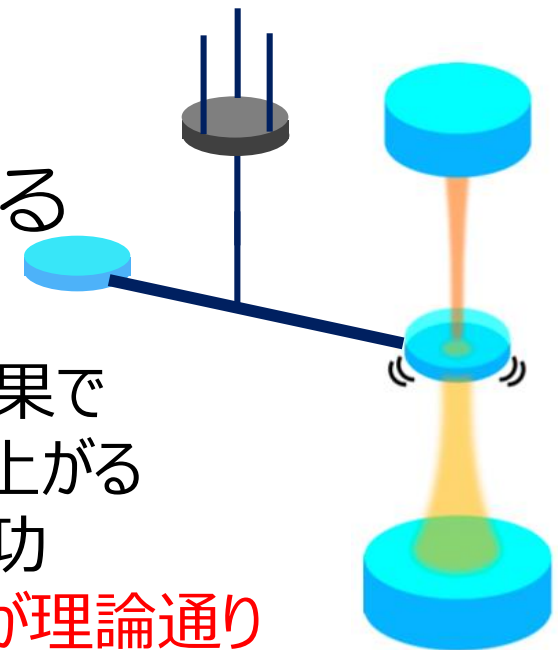
Front view

Side view

# 光学浮上の実験

- サンドイッチ型の光学浮上で0.2 mgの鏡を浮かすことにより差動モードの測定が標準量子限界に到達可能なことを提案
- mgの曲率付き鏡が必要だが、技術的に困難で現在開発中
- 今はねじれ振り子を用いて光学浮上の安定性検証を行っている

YM, Kuwahara+,  
[Optics Express 25, 13799 \(2017\)](#)

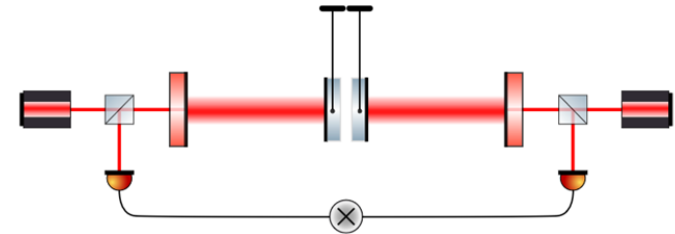


レーザー光の効果で  
共振周波数が上がる  
ことの確認に成功  
→光の復元力が理論通り  
に働くことを確認



# 今後の展望

- 標準量子限界到達、基底状態実現はまだまだ困難
- **単振り子型実験 @ 東北大学 松本伸之氏**  
10<sup>10</sup>の高Q値(低機械損失)の振り子の作成  
まずはミリグラムスケールでの重力測定を行う  
そして量子測定へ
- **ねじれ振り子型実験**  
振り子の形状の改良などによりまずは  
量子輻射圧雑音の測定を目指す
- **光学浮上実験**  
極薄の鏡などを利用し、まずは光学浮上の  
実現を目指す



# 宣伝

- レーザー干渉計は超精密な距離センサ( $\sim 10^{-18}$  m)

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

重力波検出

レーザー周波数安定化

光速度不変の  
原理の検証

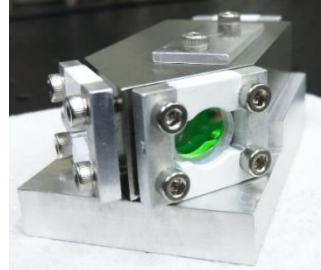
- 懸架された鏡で作った場合は力センサ( $\sim 10^{-15}$  N)でもある

$$\tilde{x} = \frac{\tilde{f}}{m\omega^2}$$

- 精密測定で何か面白いことができそうならご一報ください!

# その他やっていること

- 光リング共振器を用いて光速の等方性を検証することにより、ローレンツ不変性を検証  
YM+, [PRL 110, 200401 \(2013\)](#)
- レーザー干渉計を用いて2つの円偏光の間の光速の差を測定することにより、**アクシオン暗黒物質**を探索  
Obata, Fujita, YM, [PRL 121, 161301 \(2018\)](#)  
Nagano, Fujita, YM, Obata, [PRL 123, 111301 \(2019\)](#)
- レーザー干渉計を構成する鏡に働く力を測定することにより、暗黒物質を探索(やりたい)  
Graham+, [PRD 93, 075029 \(2016\)](#)  
Pierce+, [PRL 121, 061102 \(2018\)](#)  
Morisaki & Suyama, [arXiv:1811.05003](#)  
Carney, [arXiv:1908.04797](#)



## 研究室のメンバー



[日本語](#) / [English](#) / [RSS](#)

- ▶ [研究室紹介](#)
- ▶ [研究内容](#)
- ▶ [メンバー](#)
- ▶ [連絡先・アクセス](#)
- ▶ [年次報告](#)
- ▶ [出版論文](#)
- ▶ [学位論文](#)
- ▶ [セミナー](#)
- ▶ [講義資料](#)
- ▶ [新着情報](#)

サイト内検索

検索

# 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)になる見込み
- KAGRAは不具合があるが、2019年内に観測開始を目指している
- 重力波検出器やそのミニチュア版で巨視的量子力学の検証ができる
- 特にミリグラムスケールに着目して、懸架鏡、ねじれ振り子、光学浮上の3つのアプローチで実験を行っている