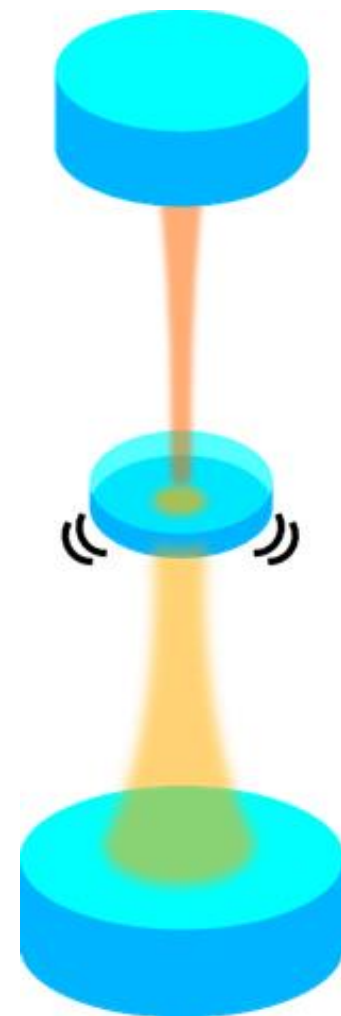


# CREST「量子技術」 宗宮チーム 道村グループ報告

道村唯太

東京大学 大学院理学系研究科 物理学専攻



# 道村(東大)グループの担当と構成員

- 光バネを利用した巨視的量子力学の検証
  - 微小ねじれ振り子によるアプローチ  
小森健太郎(東大→MIT→JAXA 研究員)
  - 光学浮上鏡によるアプローチ  
川崎拓也(東大 D2)  
千代田大樹(東大 M2)  
喜多直紀(東大→参加終了)
- 重力波望遠鏡の高感度化
  - 周波数依存スキューミング  
有富尚紀(東大D3)
  - 高感度化手法の検討  
武田紘樹(東大D3)  
榎本雄太郎(東大→参加終了)  
下田智文(東大→参加終了)



# これまでの主な研究成果

- 微小ねじれ振り子

K. Komori *et al.*, [PRA 101, 011802\(R\) \(2020\)](#)

10 mgねじれ振り子による修正量子力学への制限  
小森健太郎, 東京大学 博士論文 (2019)

- 光学浮上鏡

T. Kawasaki *et al.*, [arXiv:2007.01630](#)

光学浮上の安定性検証

Y. Michimura, K. Komori, [EPJD 74, 126 \(2020\)](#)

ミリグラムスケール光学機械系のレビュー  
川崎拓也, 東京大学 修士論文 (2019)  
喜多直紀, 東京大学 修士論文 (2020)

- 重力波望遠鏡

Y. Zhao, N. Aritomi *et al.*, [PRL 124, 171101 \(2020\)](#)

300mフィルター共振器を用いた周波数依存スキューニングの実証

N. Aritomi *et al.*, [PRD 102, 042003 \(2020\)](#)

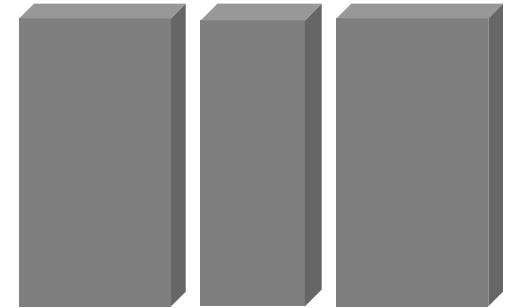
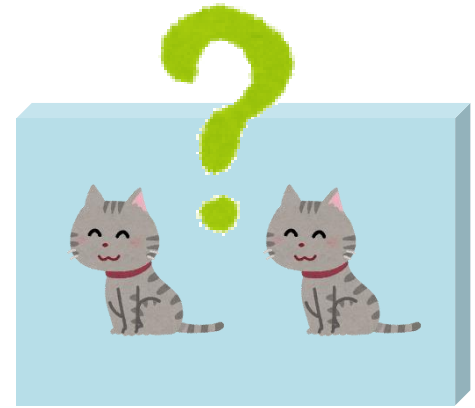
フィルター共振器の新しい制御手法の提案

Y. Michimura *et al.*, [PRD 102, 022008 \(2020\)](#)

重力波望遠鏡KAGRAの高感度化検討

# 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 40 zg (4e-23 kg) 程度) [Fein+ \(2019\)](#)



- 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 .....



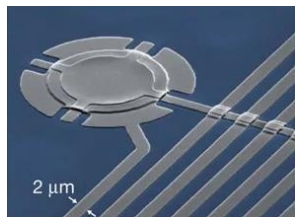
# さまざまなスケールの光学機械系

- メソスコピック領域としてのミリグラムスケール

**二重スリットの実証**

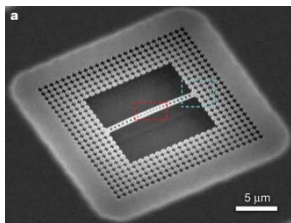
molecules, 40 zg  
[Fein+ \(2019\)](#)

量子基底状態まで冷却



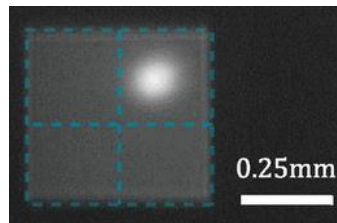
membrane, 48 pg  
[Taufel+ \(2011\)](#)

量子基底状態まで冷却



nanobeam, 331 fg  
[Chan+ \(2011\)](#)

量子基底状態まで冷却



membrane, 7 ng  
[Peterson+ \(2016\)](#)

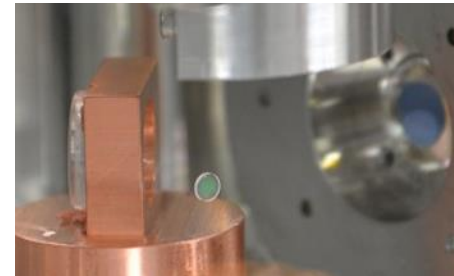
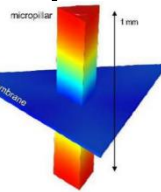
Planck mass (22 ug)

量子反作用の直接測定



cantilever, 50 ng  
[Cripe+ \(2019\)](#)

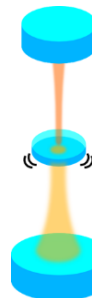
micropillar,  
30 ug



suspended disk, 7 mg  
[Matsumoto+ \(2019\)](#)

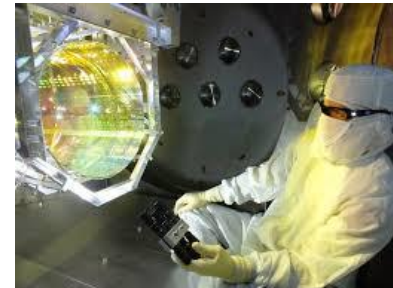


suspended bar, 10 mg  
[Komori+ \(2019\)](#)

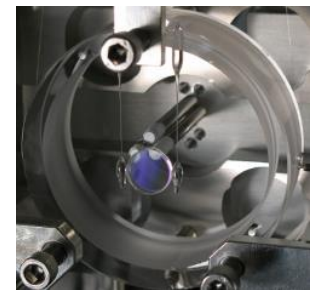


optical levitation,  
~0.2 mg

量子反作用の直接測定



suspended disk, 40 kg  
[LIGO \(2020\)](#)  
[Virgo \(2020\)](#)

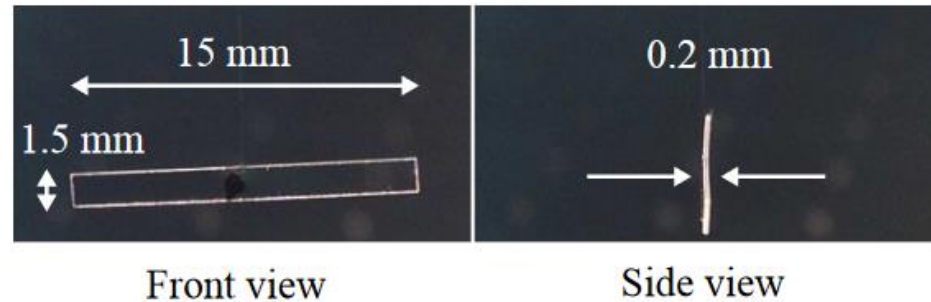


suspended disk, 1 g  
[Neben+ \(2012\)](#)

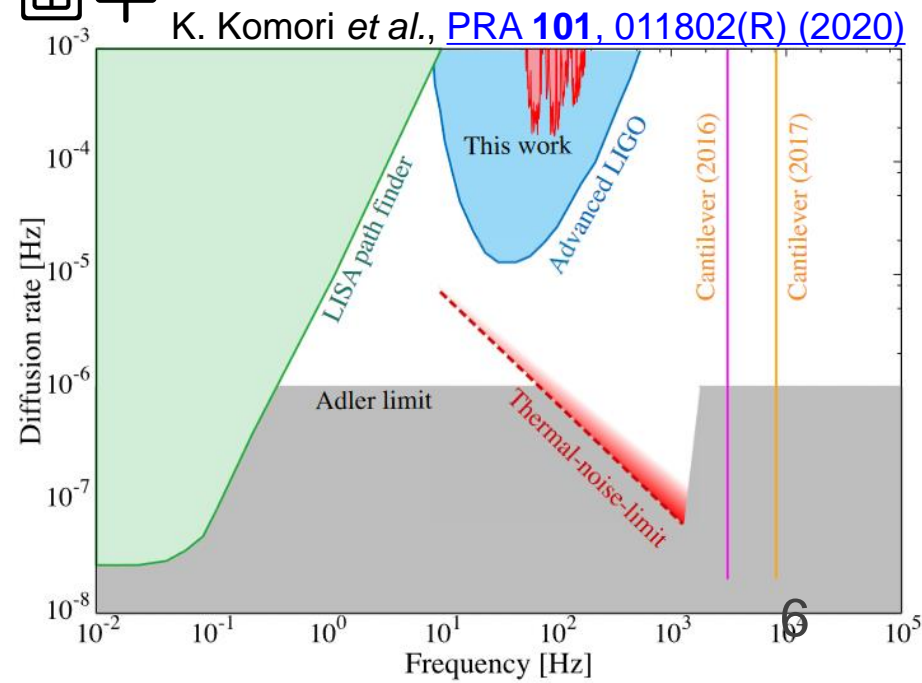
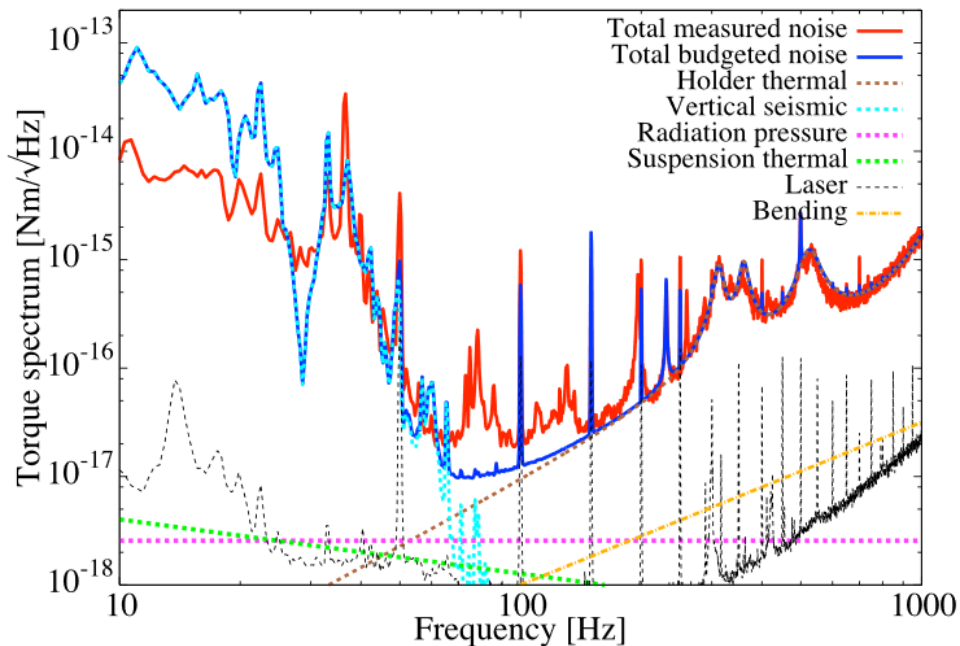
fg      pg      ng      ug      mg      g      kg      5

# 10 mgねじれ振り子

- ねじれ振り子の回転を光共振器で読み出すことでミリグラムスケールとしては**世界最高のトルク感度**を実現



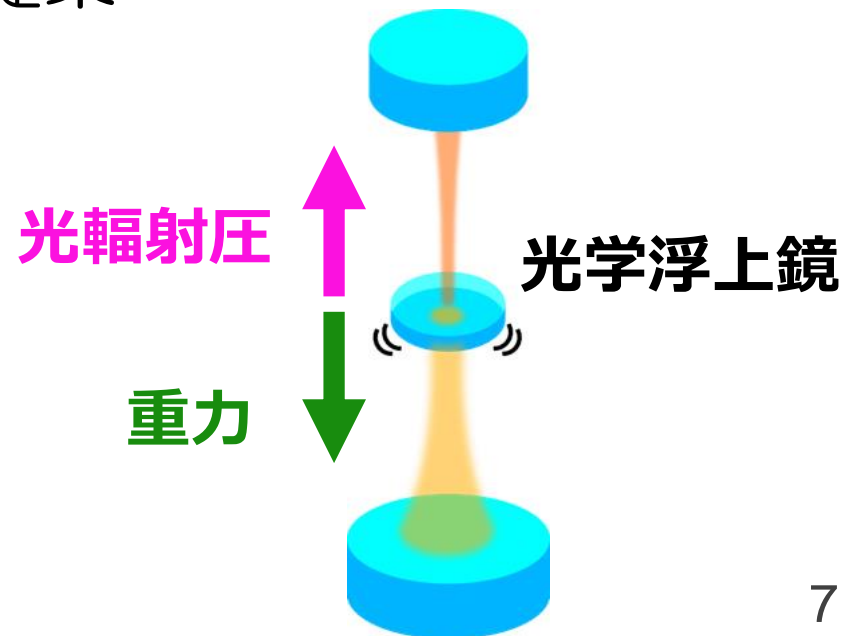
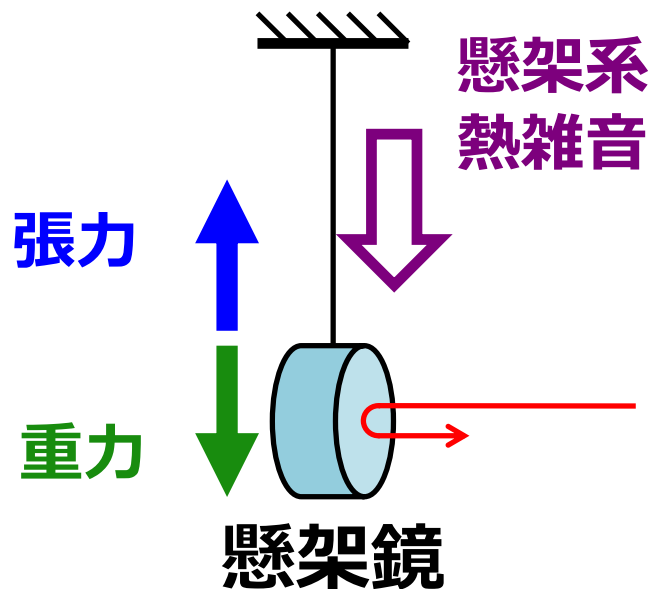
- 修正量子力学(CSLモデル)に制限
- ねじれ振り子の改良を計画中



# 鏡の光学浮上

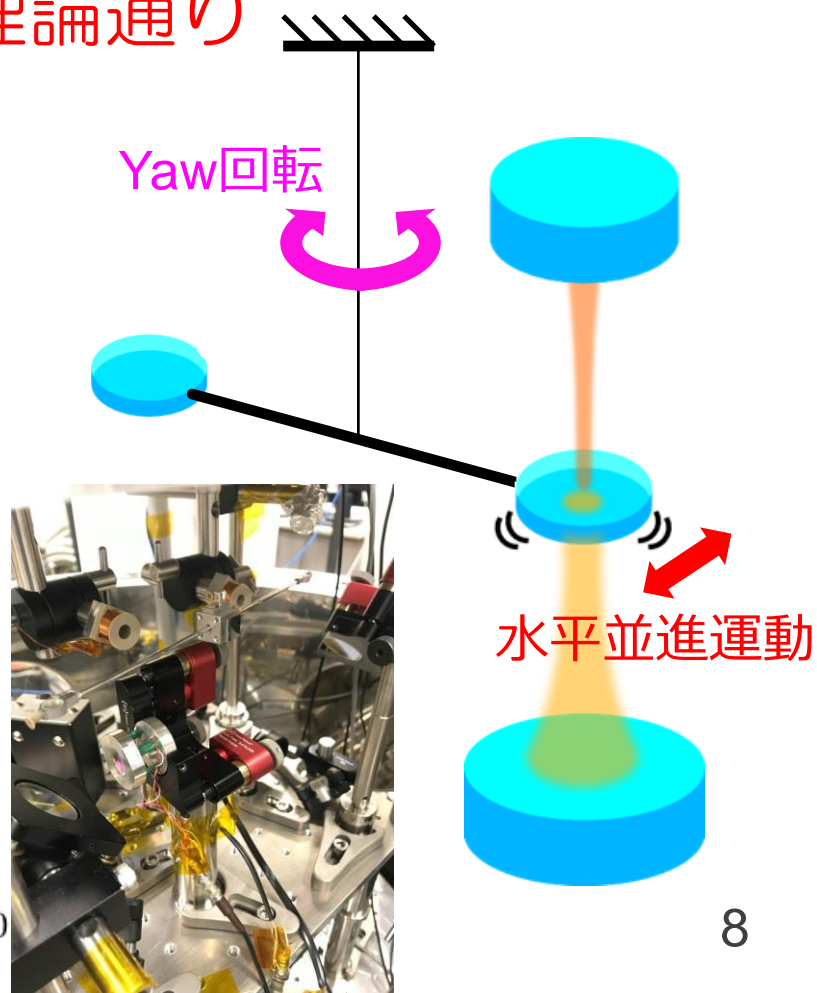
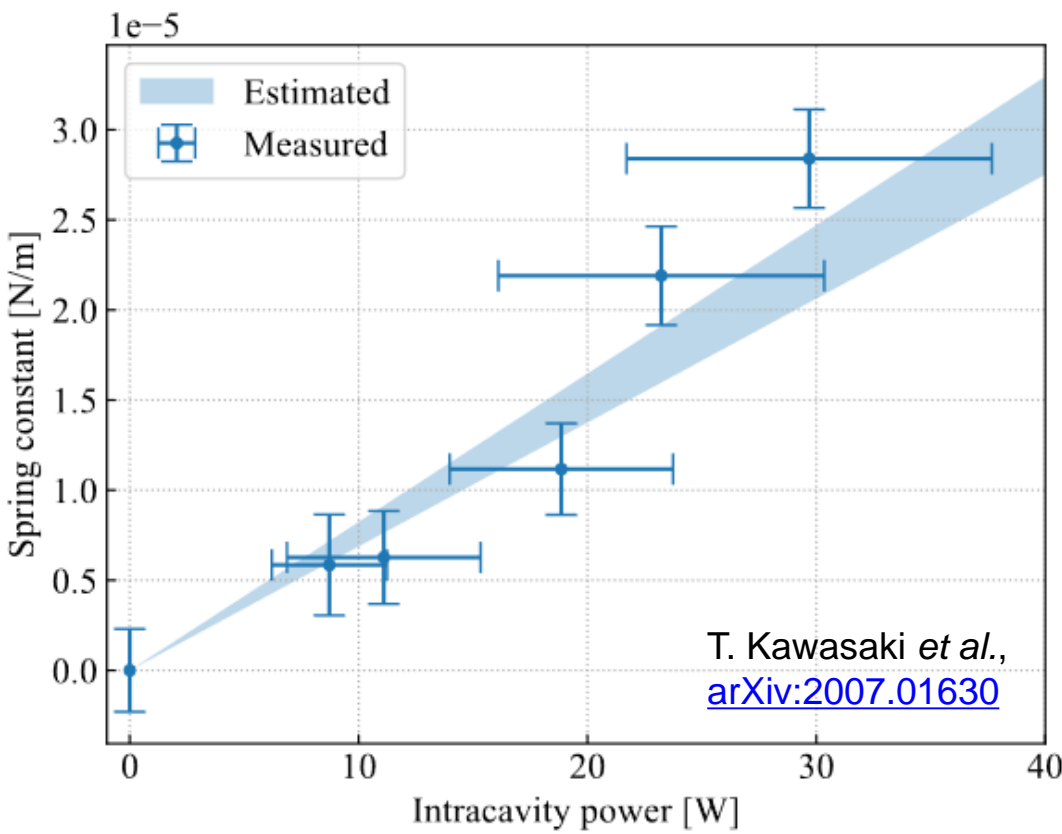
- 機械的散逸のあるワイヤではなく、**光の輻射圧**のみによって鏡をサポート
- 懸架に伴う熱雑音を排除(残留ガス熱雑音と鏡の熱雑音は共通)
- 最もシンプルで**標準量子限界到達可能な独自構成**を提案

Y. Michimura, Y. Kuwahara+,  
[Optics Express 25, 13799 \(2017\)](#)



# 光学浮上構成の安定性検証

- 提案した構成で安定な光学浮上が可能であることをねじれ振り子を用いて検証
- 水平並進方向の復元力が理論通りに働くことの実証に成功





# 光学浮上用の鏡の製作

- 曲率半径付きの数mg程度以下の鏡が必要
- 誘電体多層膜コーティングの**ストレスで破損**

	標準量子限界到達のための鏡	光学浮上の実証のためのプロトタイプ鏡
質量	0.2 mg	~1.6 mg
サイズ (mm)	$\phi$ 0.7 mm t 0.23 mm	$\phi$ 3 mm t 0.1 mm
曲率半径	30 mm convex	30 $\pm$ 10 mm convex (measured: 15.9 $\pm$ 0.5 mm)
強度反射率	97 % (finesse 100)	>99.95 % (measured: >99.5%)
備考	<a href="#">Optics Express 25, 13799 (2017)</a>	8つのうち1つのみが大きな破損なし



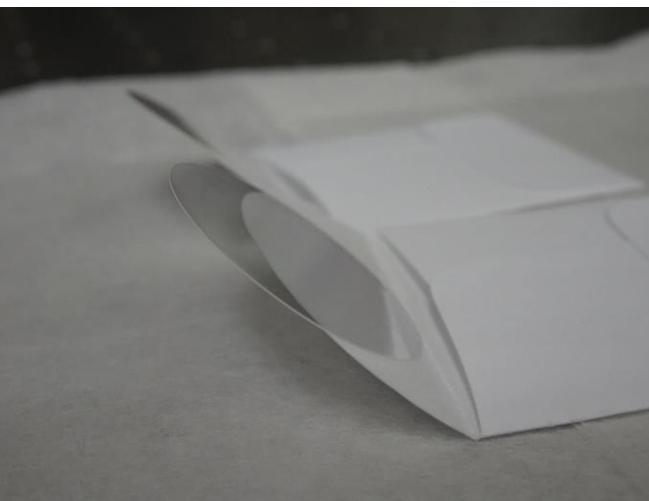
# 2つの新しい鏡の製作アプローチ

- 直径の大きい石英基材にコーティングし、**ストレスにより曲率**を与えてから切り出す

- $\phi 1$  inch x t 0.1 mmの石英基材
- フランスLMAでコーティング(日仏共同)
- $\phi 3$  mm x t 0.1 mmに加工

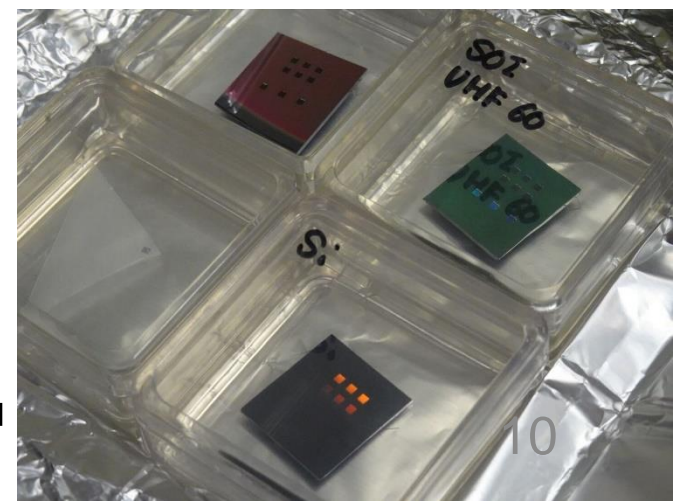


- **フォトリソグラフィ**を用いて高反射率と実効的な曲率を実現
  - 宇佐見グループ、東大生産研 岩本研と共同研究



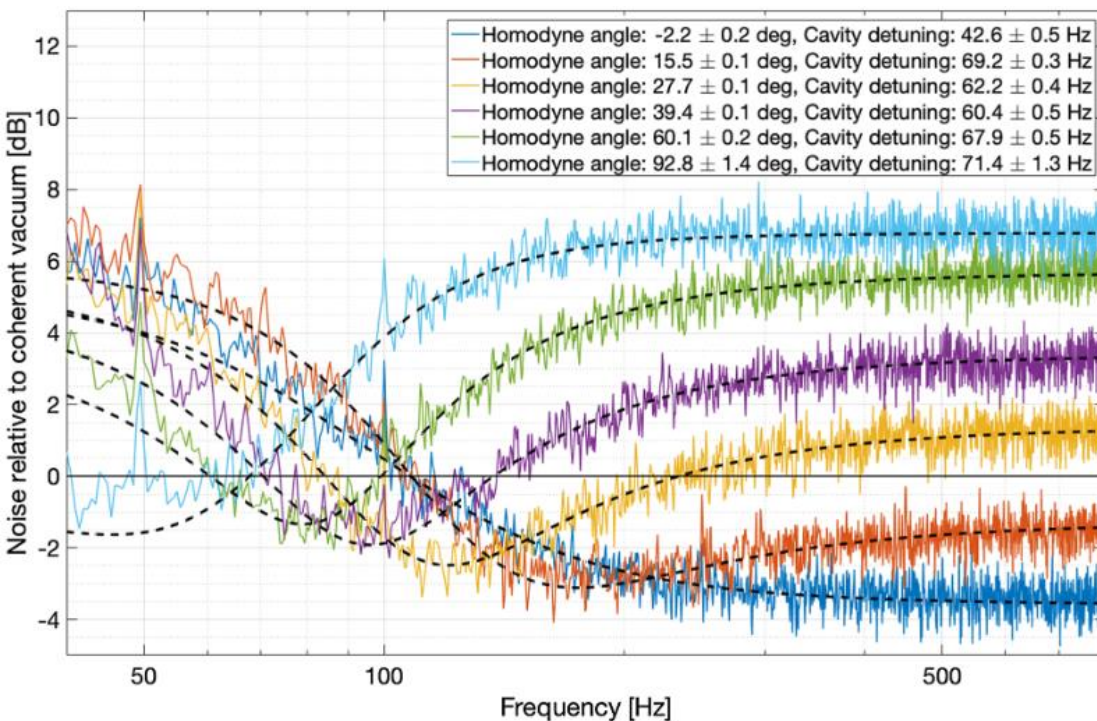
LMAでコーティングした  
1 inchの薄鏡

岩本研に製作して  
いただいた1mm角  
のSiフォトリソグラフィ  
ミラーサンプル



# 周波数依存スクイーミング

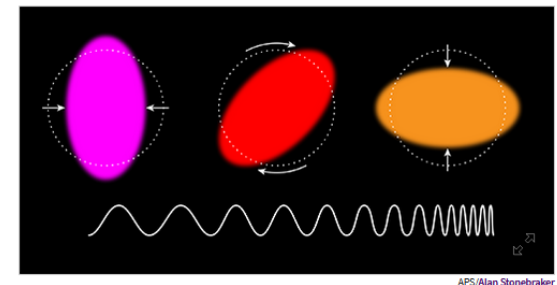
- 重力波望遠鏡の量子雑音を広帯域に低減するためには周波数依存スクイーミングが必要
- 300m共振器を用いてその生成に成功  
100 Hz以下でのスクイーミング角回転を初実証



## Feeling the Squeeze at All Frequencies

April 28, 2020 • Physics 13, s55

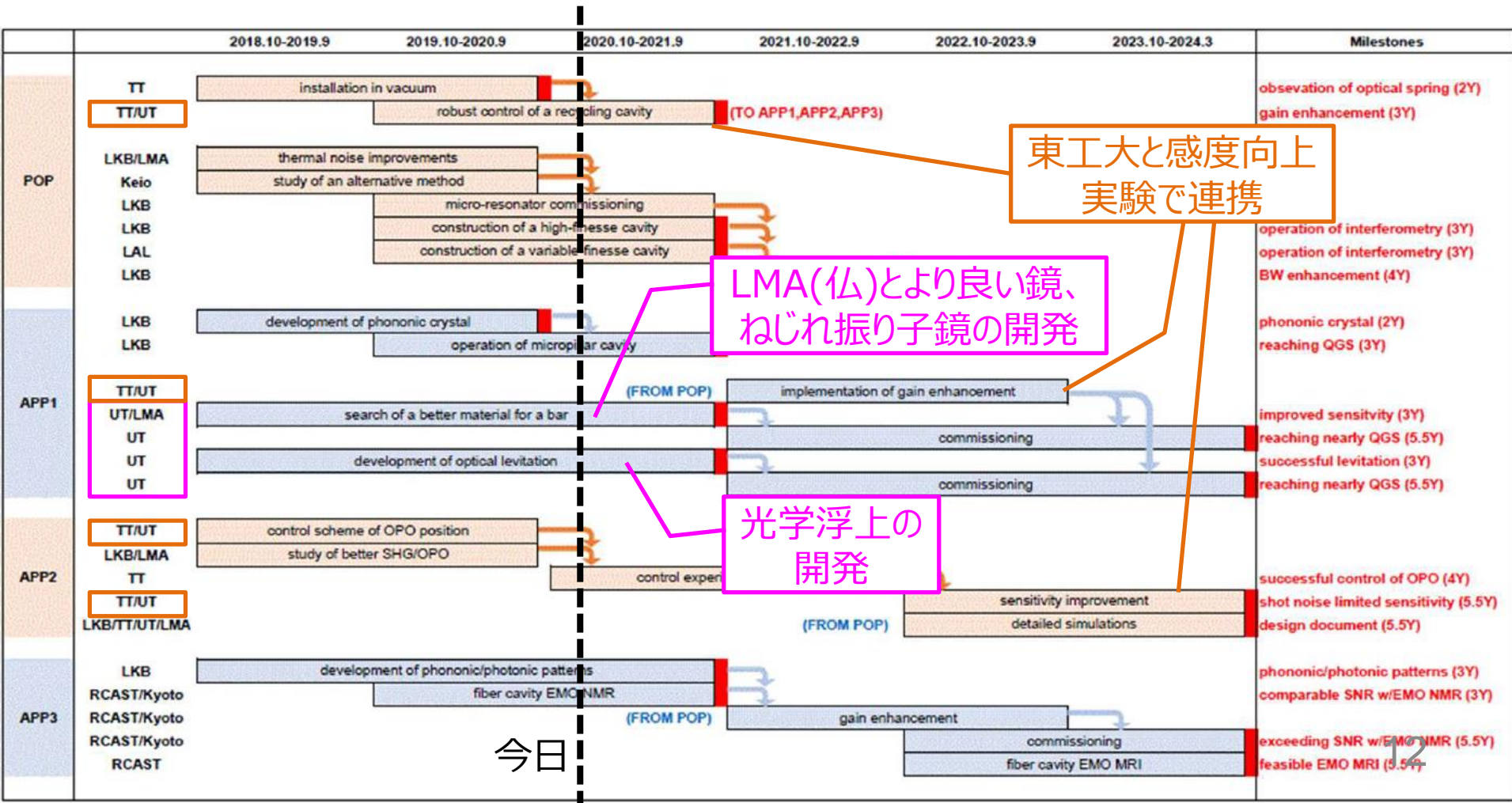
Two teams demonstrate frequency-dependent quantum squeezing, which could double the sensitivity of gravitational-wave detectors.



Y. Zhao, N. Aritomi *et al.*,  
[PRL 124, 171101 \(2020\)](#)

# スケジュール

- ねじれ振り子/光学浮上実験は順調に進展
- 今後は東工大とのより緊密な連携が必要



東工大と感度向上  
実験で連携

LMA(仏)とより良い鏡、  
ねじれ振り子鏡の開発

光学浮上の  
開発

今日

# まとめ

- 微小ねじれ振り子  
ミリグラムスケールでの**世界最高トルク感度**  
修正量子力学に制限  
改良を計画中
- 光学浮上鏡  
提案した独自構成の**安定性検証に成功**  
**浮上用鏡の製作**を2つのアプローチで本格化
  - 薄鏡にコーティングストレスで曲率 (日仏共同)
  - フォトニック結晶
- 重力波望遠鏡  
高感度化に必要な100 Hz以下の  
**周波数依存スキューニングの初実証に成功**