

# KAGRAデータを用いた ゲージボゾンダークマター探索

道村唯太

東京大学 大学院理学系研究科 物理学専攻

# アジェンダ

- やりたいダークマター解析の概要
- キャリブレーションの現状確認
- データ解析コード開発状況の確認
- 今後の進め方の相談



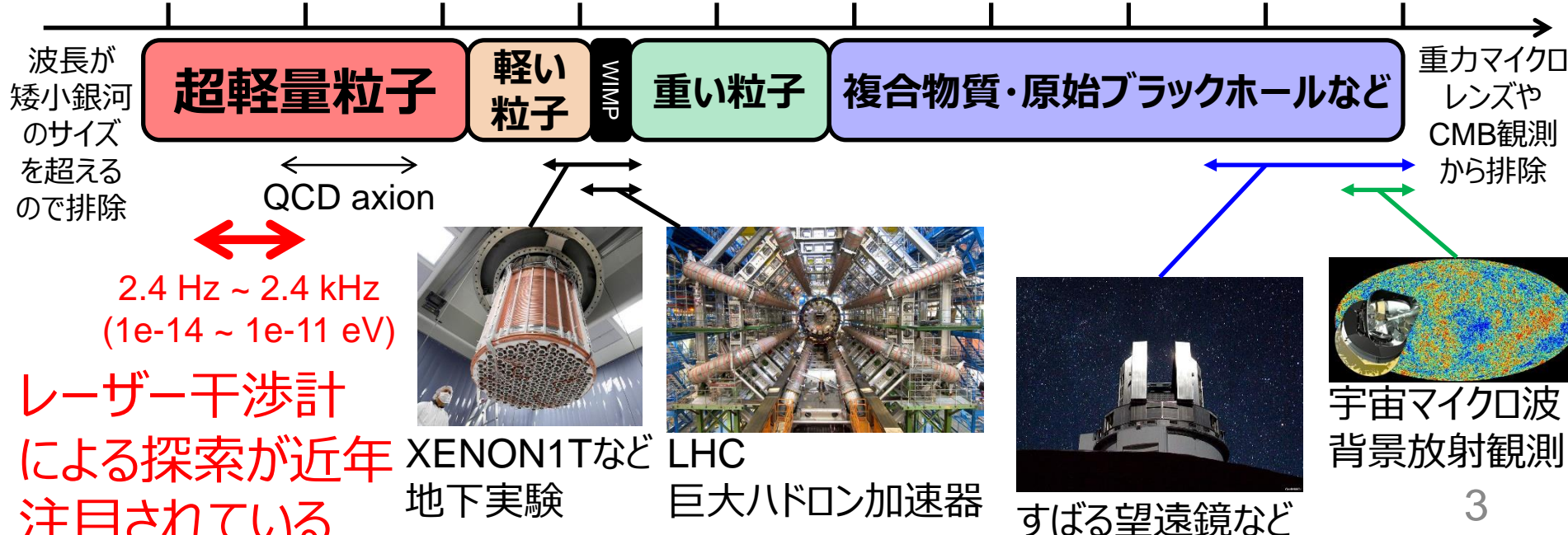
# これまでのダークマター探索

- 長年の間**WIMP**に探索が集中するも**未発見**  
 近い将来、太陽・大気ニュートリノのバックグラウンドで検出限界に
- より網羅的な、**新発想の探索**が求められている
- **超軽量**粒子: 波としてふるまい、宇宙論から注目

ダークマターの質量 (GeV)

※1 GeV ~ 中性子質量

10<sup>-30</sup> 10<sup>-20</sup> 10<sup>-10</sup> 10<sup>0</sup> 10<sup>10</sup> 10<sup>20</sup> 10<sup>30</sup> 10<sup>40</sup> 10<sup>50</sup> 10<sup>60</sup>



# これまでのレーザー干渉計利用提案

- **アクシオン (axion-like particles)**

レーザー光の偏光状態の周期的な変化を利用

- W. DeRocco & A. Hook, [PRD 98, 035021 \(2018\)](#)

- I. Obata, T. Fujita, YM, [PRL 121, 161301 \(2018\)](#) → このデータ解析もゆくゆくはやりたい

- H. Liu+, [PRD 100, 023548 \(2019\)](#)

- K. Nagano, T. Fujita, YM, I. Obata, [PRL 123, 111301 \(2019\)](#)

- D. Martynov & H. Miao, [PRD 101, 095034 \(2020\)](#)

- **スカラー粒子 (e.g. ディラトン)**

微細構造定数や素粒子質量の周期的な変化を利用

- Y. V. Stadnik & V. V. Flambaum, [PRL 114, 161301 \(2015\)](#)

- Y. V. Stadnik & V. V. Flambaum, [PRA 93, 063630 \(2016\)](#)

- A. A. Geraci+, [PRL 123, 031304 \(2019\)](#)

- H. Grote & Y. V. Stadnik, [PRR 1, 033187 \(2019\)](#)

- S. Morisaki & T. Suyama, [PRD 100, 123512 \(2019\)](#)

- **ゲージボゾン (e.g. ダークフォトン)** ← 今回のお話

鏡に周期的に働く非標準的な力を探索

- P. W. Graham+, [PRD 93, 075029 \(2016\)](#)

- A. Pierce+, [PRL 121, 061102 \(2018\)](#)

- D. Carney+, [arXiv:1908.04797](#)

- J. Manley+, [arXiv:2007.04899](#)

他にもいろいろ.....

特にレーザー干渉計型重力波検出器  
を利用する提案が多い (緑字の提案)

# ゲージ場のふるまい

- ゲージボソンの質量に対応する周波数で振動

$$\vec{A}(t, \vec{x}) = \frac{\sqrt{2\rho_{DM}}}{m_A} \vec{e}_A \cos(m_A t - \vec{k} \cdot \vec{x} + \delta_\tau(t))$$

ダークマター密度  $\rho_{DM}$       ゲージボソンの質量  $m_A$   
 ゲージボソンの偏極  $\vec{e}_A$       位置によって位相が異なる  $\vec{k} \cdot \vec{x}$       位相因子  $\delta_\tau(t)$

- コヒーレント時間

$$\tau = 2\pi / (m_A v^2)$$

のスケールで  
 振幅、偏極、位相が  
 ランダムに変動

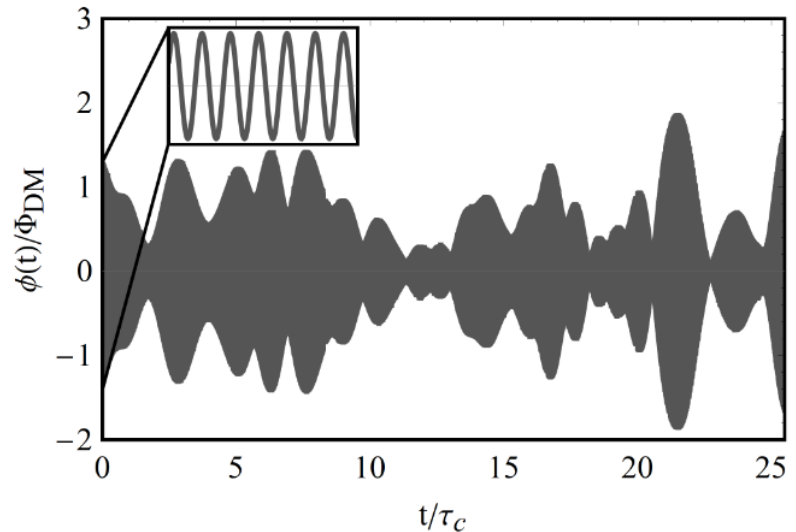


FIG. 1. Simulated VULF based on the approach in Ref. [40] with field value  $\phi(t)$  and time normalized by  $\Phi_{DM}$  and coherence time  $\tau_c$  respectively. The inset plot displays the high-resolution coherent oscillation starting at  $t = 0$ .

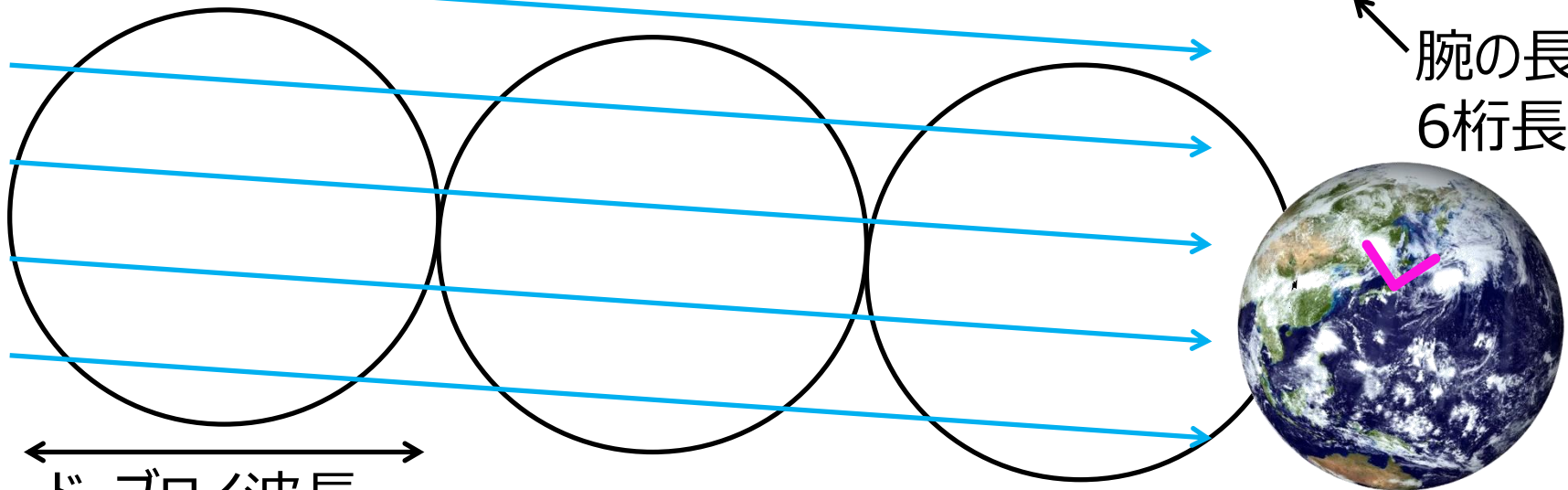
# ゲージ場のふるまい

- ド・ブロイ波長の範囲では  
コヒーレントなイメージ

地上重力波望遠鏡の  
感度が最も良い100 Hzは  
下記に対応

$$m_A = 4 \times 10^{-13} \text{ eV}$$
$$\lambda = 3 \times 10^9 \text{ m}$$

ダークマターの速度  $v \sim 10^{-3}$



腕の長さより  
6桁長い

ド・ブロイ波長

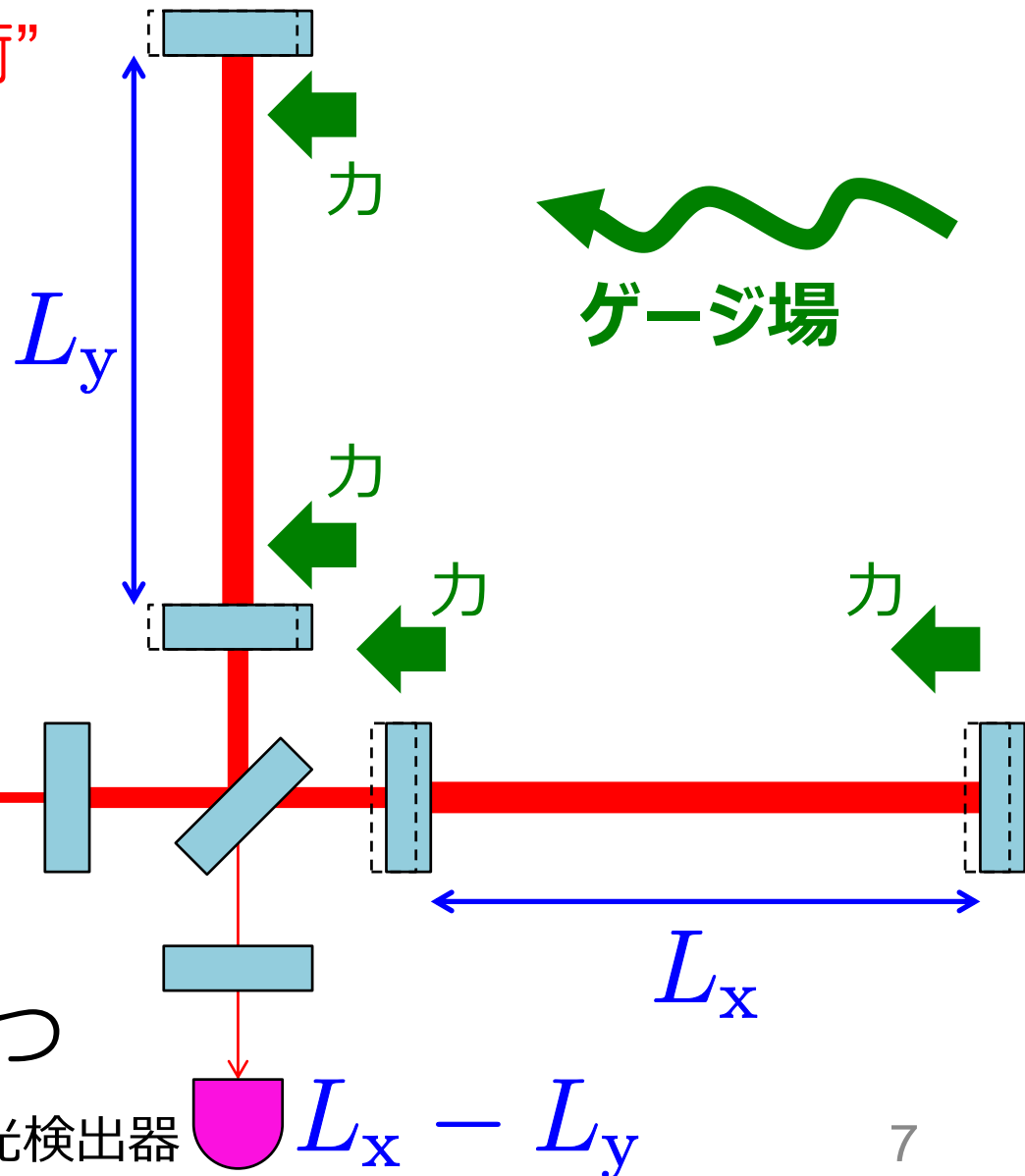
$$\lambda = 2\pi / (m_A v)$$

コヒーレント時間

$$\tau = 2\pi / (m_A v^2)$$

# 重力波検出器でゲージボゾン探索

- 鏡の非標準的な**“電荷”**と結合して、ゲージボゾン質量に応じた**周期的な力**を生じる
- 全ての鏡で力の**振幅と向きが同じ**なので共振器長をほとんど**変化させない**



- 力の**位相**がわずかに異なるため感度を持つ



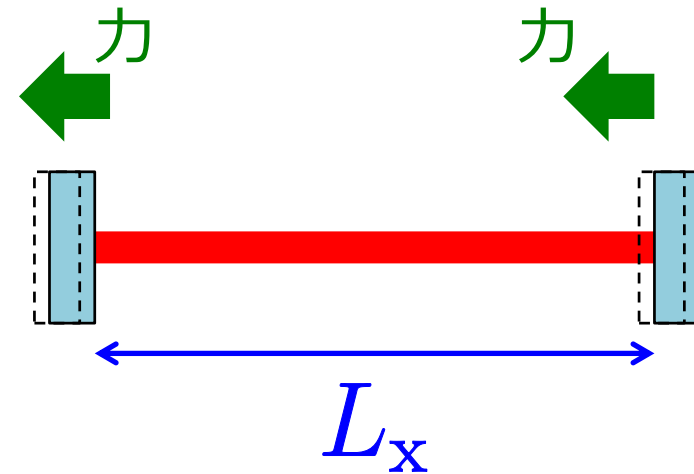
# ゲージ場からの周期的な力

- ゲージ場からの力により、鏡に加速度を生じる

$$\vec{a}(t, \vec{x}) = \epsilon_D e \frac{q_D}{M} \sqrt{2\rho_{DM}} \vec{e}_A \sin(m_A t - \vec{k} \cdot \vec{x})$$

鏡の"電荷"  $q_D$       ゲージボソンの質量  $m_A$   
 結合定数  $\epsilon_D e$       鏡の質量  $M$       ダークマター密度  $\rho_{DM}$       ゲージボソンの偏極  $\vec{e}_A$   
 (電磁気の結合定数eで規格化)      位置によって位相が異なる  $\vec{k} \cdot \vec{x}$

- 周期的な変位を計測  
 振幅から結合定数  
 周期からゲージボソン質量  
 がわかる



- 対称共振器の場合、  
 共振器長が長くないとほとんど信号が出ない  
 (kmの場合、位相差は $10^{-5}$  rad程度 @ 100 Hz)



# 補助チャンネルの利用

- 重力波信号の含まれる  
メインチャンネル

DARM

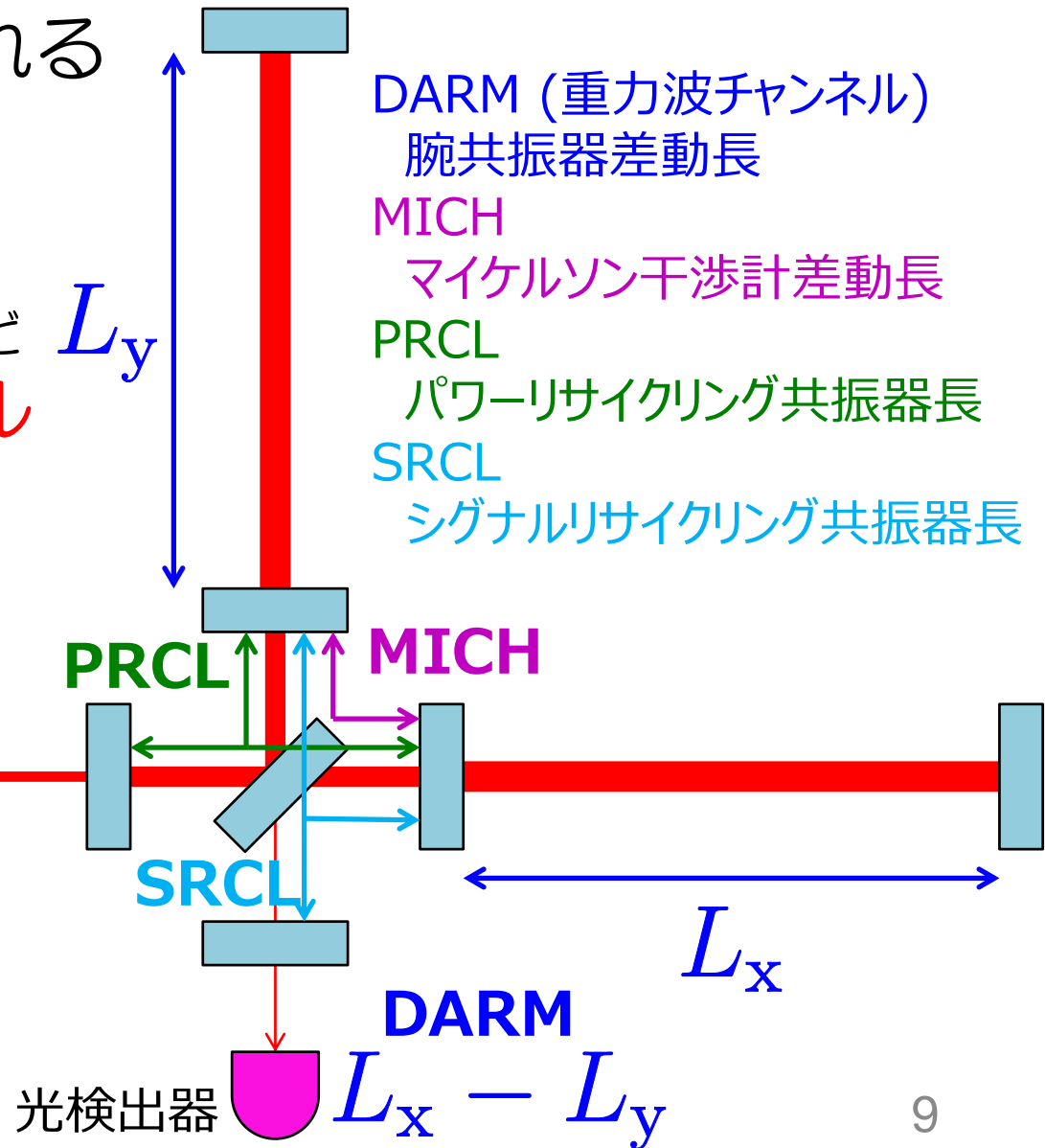
- 重力波信号がほとんど  
ない補助チャンネル

MICH

PRCL

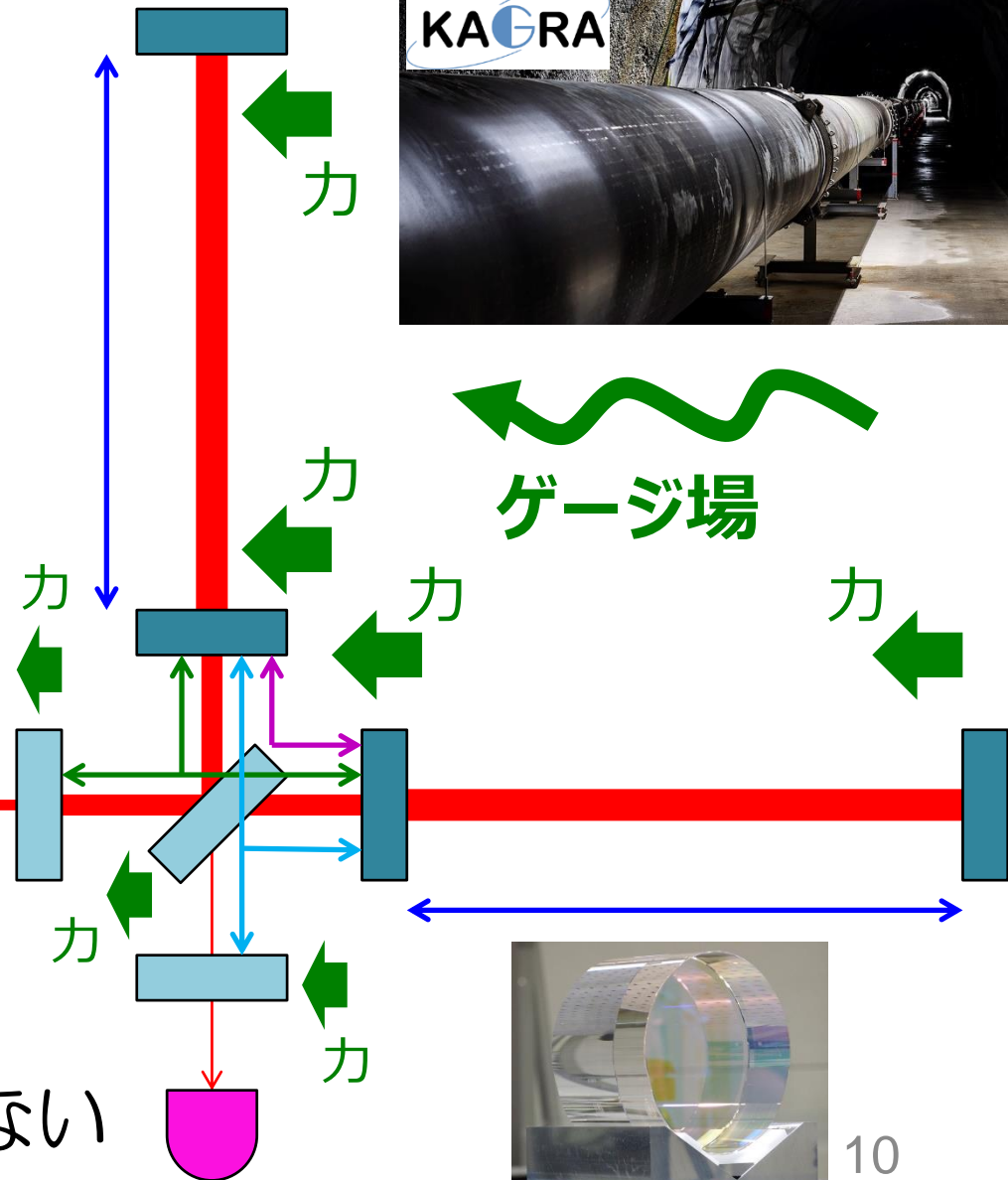
SRCL

- 補助チャンネルは  
より非対称で  
ダークマターには  
高感度になり得る



# 低温重力波検出器KAGRAの場合

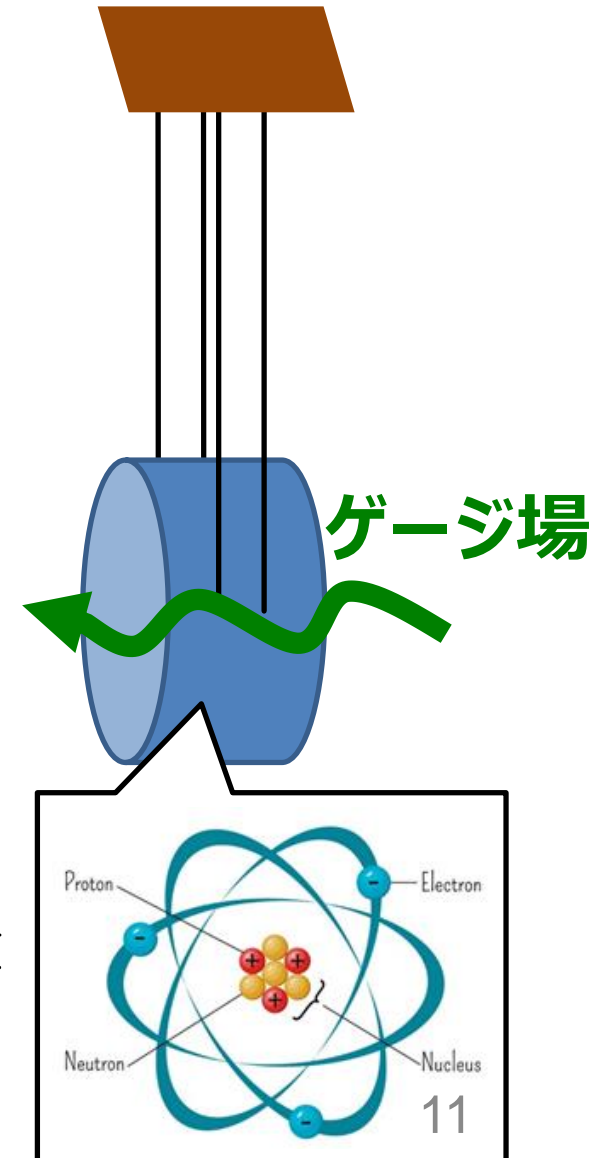
- 低温テストマス鏡は  
    **サファイア製**  
    その他の常温鏡は  
    石英製
- **異なる”電荷”**を持つ  
    鏡には異なる振幅の  
    力が働く
- 補助チャンネルで  
    読み出し可能！
- LIGO/Virgoではできない



ゲージ場

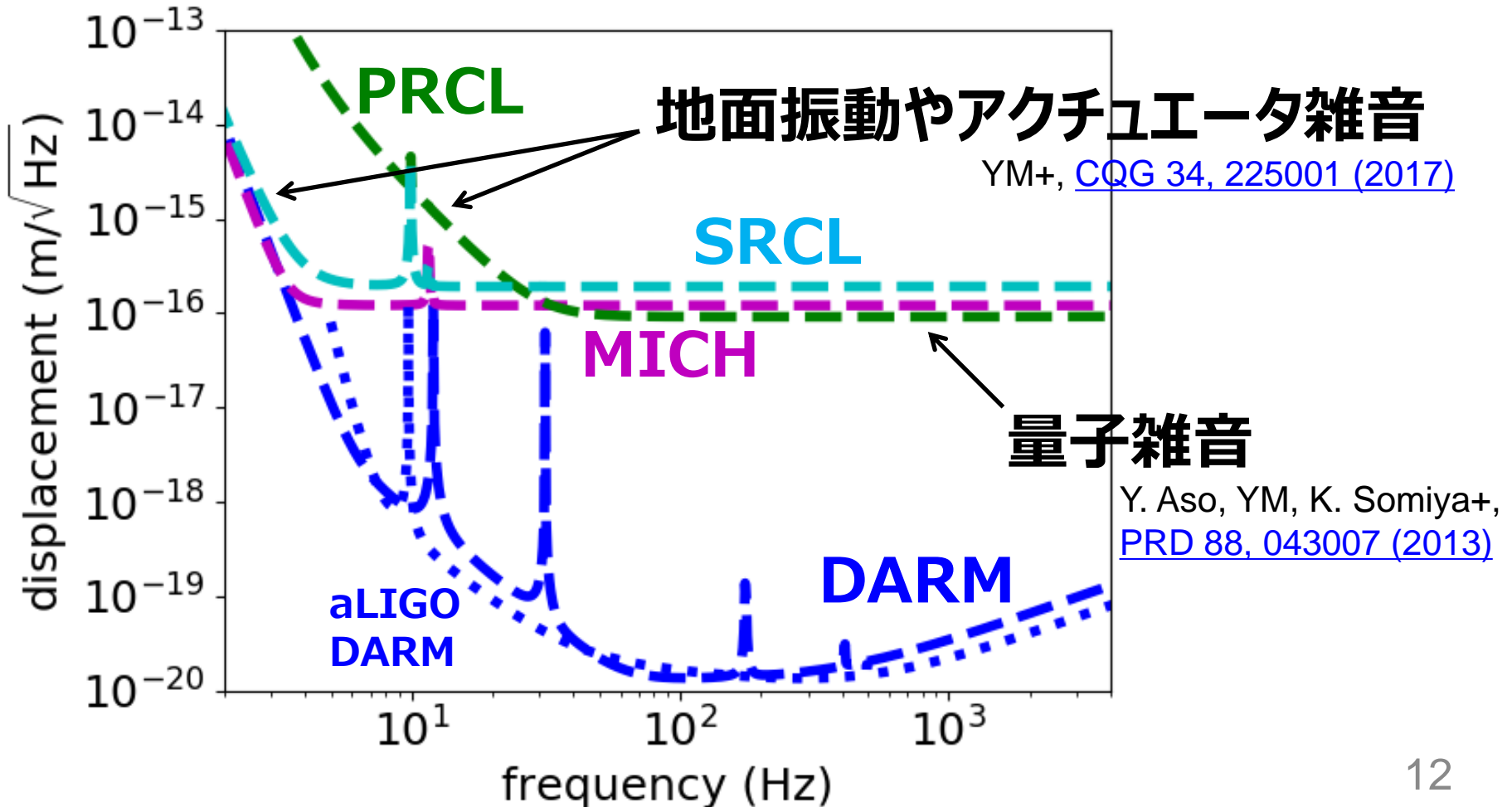
# ゲージボゾン探索で考える”電荷”

- **B** (baryon number)
  - = 陽子数 + 中性子数
  - anomalousだがゲージ化も可能  
(Green-Schwarz mechanismなど)
  - 全ての物質でだいたい 1/中性子質量
  - 石英: 1.00055
  - サファイア: 1.00051
- **B-L** (baryon minus lepton number)
  - = 陽子数 + 中性子数 - 電子数
  - = 中性子数
  - 素粒子の標準理論では完全に保存
  - ゲージ化可能
  - 全ての物質でだいたい 0.5/中性子質量
  - 石英: 0.501
  - サファイア: 0.510



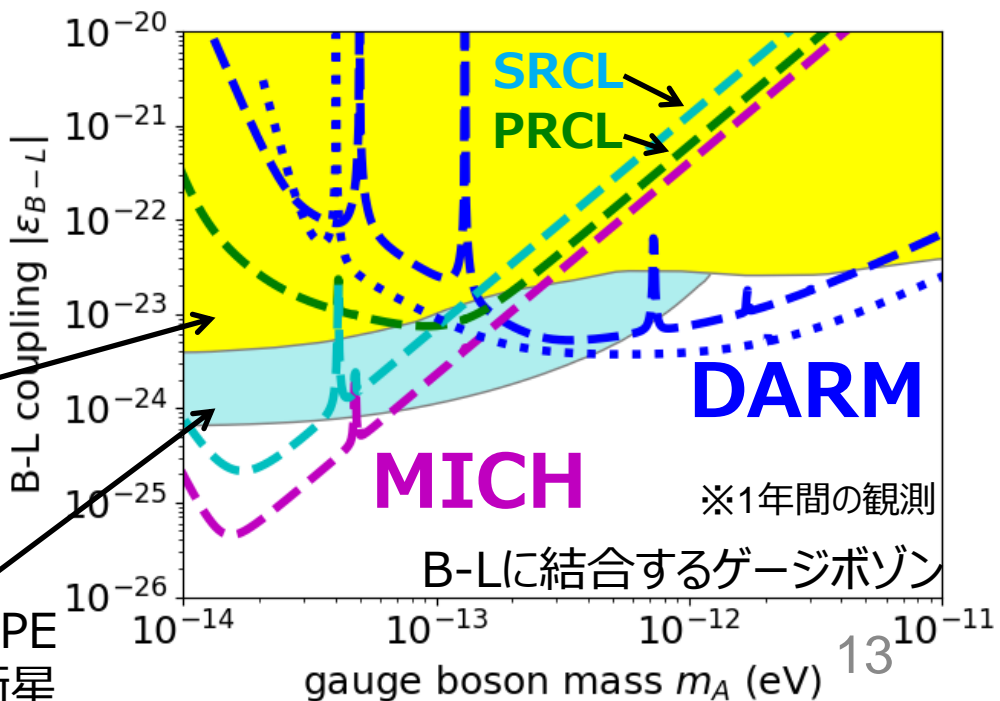
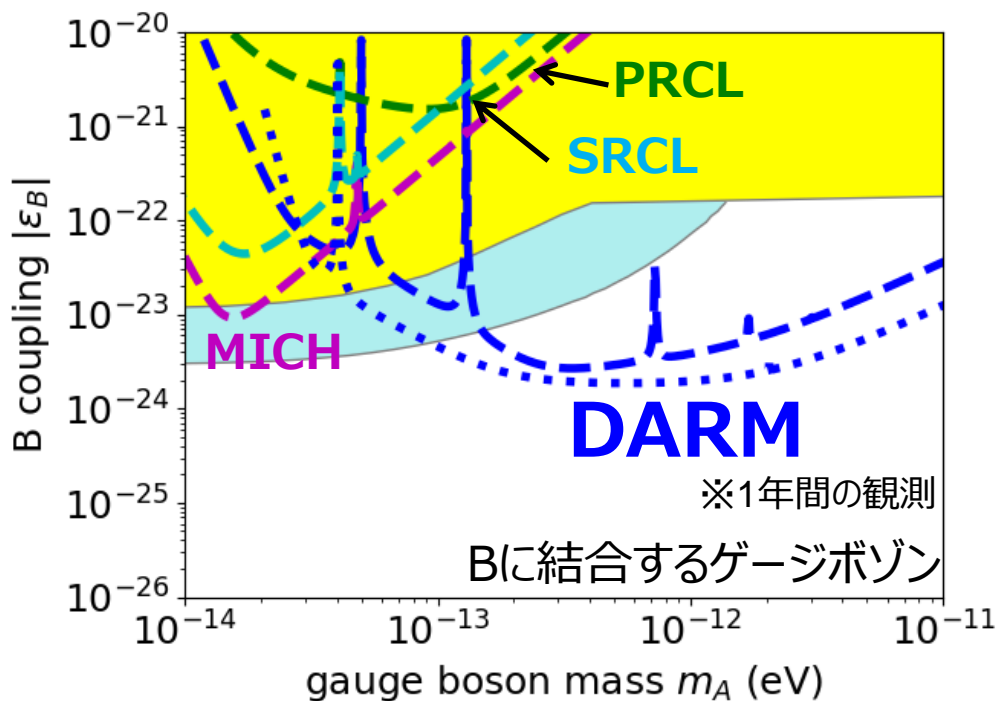
# KAGRA補助チャンネルの変位感度

- 変位に対する設計感度は重力波チャンネルDARMに比べると大きく劣るが、**低周波数帯では同等**



# ゲージボゾン に対する感度

- 低質量帯(低周波数帯)で補助チャンネルはDARMより高感度
- 特にB-Lゲージボゾンに対してはこれまでの等価原理検証実験からの上限値を**1桁以上更新**する感度で探索可能

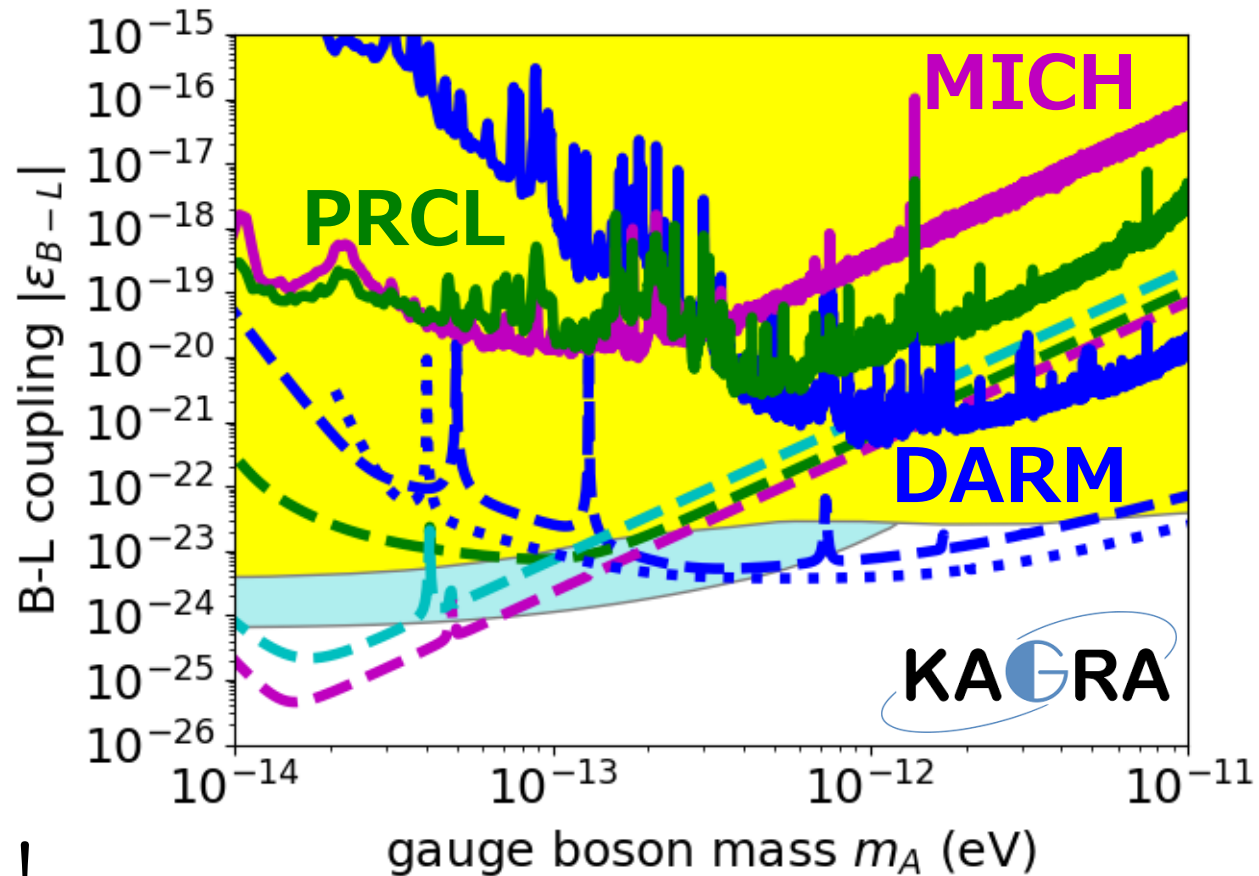


Eöt-Wash  
ねじれ振り子

MICROSCOPE  
衛星

# 2020年観測データでの予想感度

- KAGRAの現状最高感度(2020年3月26日)で300時間観測した場合



- 2020年2-4月  
観測データの  
解析をしたい！

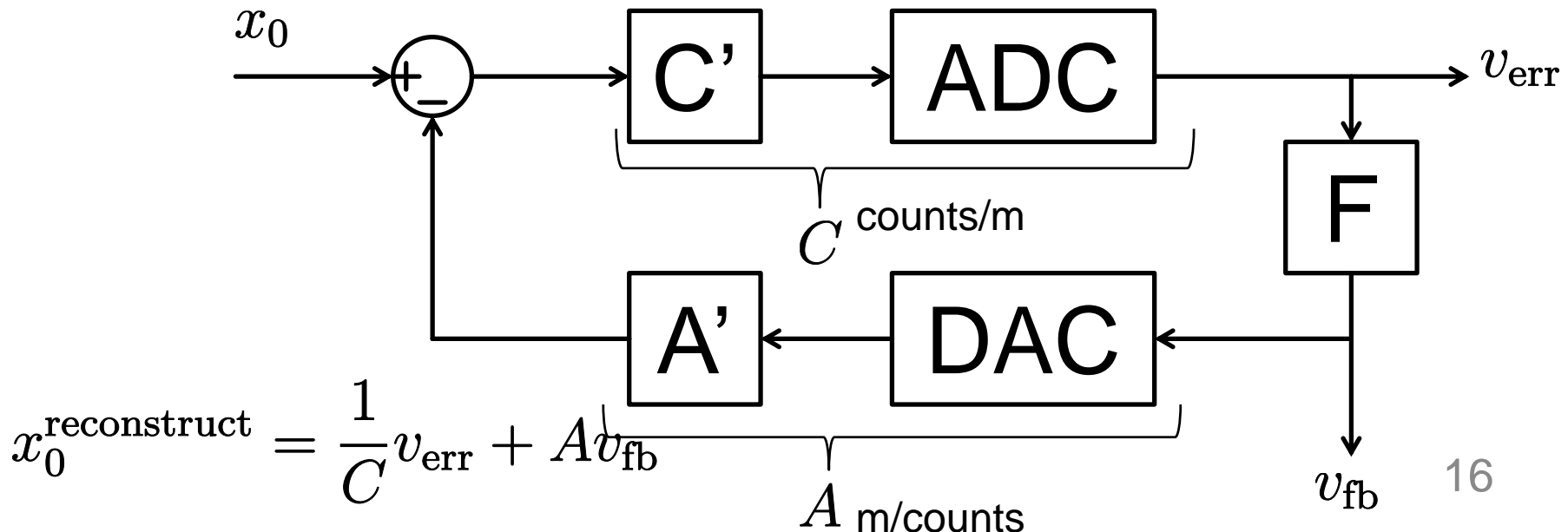
# キャリブレーションの現状

- DARMはオンラインでキャリブレーションされていた(C00)。より詳細なキャリブレーションC20は今月中にリリース予定。
  - 精度はどのくらい？
- PRCLとMICHはオンラインではキャリブレーションされていなかった。オフラインではやった。キャリブレーションラインも一応ある。
  - [klog #1556](#)が最新？
  - アクチュエータ効率の謎は解けた？
  - 精度はどのくらい？



# PRCLとMICHキャリブレーション

- エラー信号は K1:LSC-XXXX\_IN1\_DQ  
フィードバック信号は K1:LSC-XXXX\_OUT\_DQ  
XXXX= PRCL, MICH
- PRCLでは  
 $C = 1.5e11 \text{ ct/m}$  (June 12 measurement [klog #14516](#))  
 $A_{\text{PRM}} = 1e-9/f-2 \text{ m/ct}$  (Feb 18 measurement [klog #13020](#))
- MICHでは  
 $C = 4.48e7 \text{ ct/m}$  (Apr 21 measurement [klog #14557](#))  
 $A_{\text{BS}} = 5.63e-11/f^2 \text{ m/ct}$  (Apr 21 measurement [klog #14557](#))



# データ解析の現状

- 連続波のincoherent searchの解析コードは森崎くんが作った。モックデータを使って試してみた。
- 振幅から結合定数への焼き直しにはコヒーレント時間でのランダム性の統計的取り扱いが必要
- 複数台相関やhidden Markov model [[PRD 100, 122002 \(2019\)](#)]で改善できないも議論してきた
- この論文で結構やられている？  
<https://arxiv.org/abs/2010.01925>