

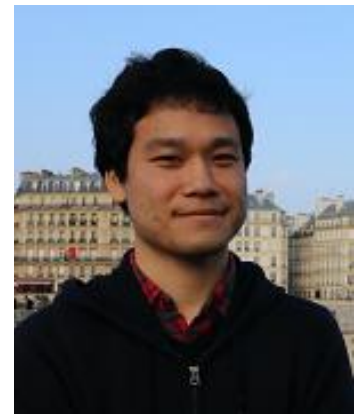
# レーザー干渉計型重力波検出器 による超軽量ダークマター探索

道村唯太

東京大学 大学院理学系研究科 物理学専攻

[michimura@phys.s.u-tokyo.ac.jp](mailto:michimura@phys.s.u-tokyo.ac.jp)

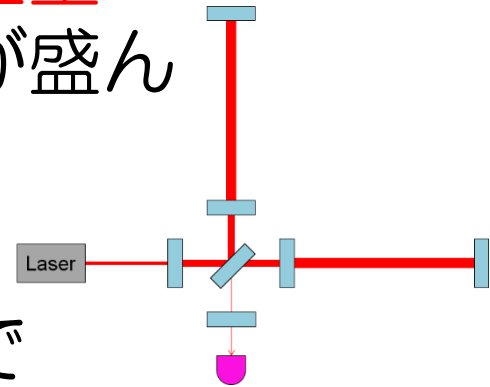
Slides are available at <https://tinyurl.com/YM20200916>



川崎拓也, 長野晃士, 松本伸之, 小幡一平, 藤田智弘,  
[森崎宗一郎](#), [中塚洋佑](#)

# 概要

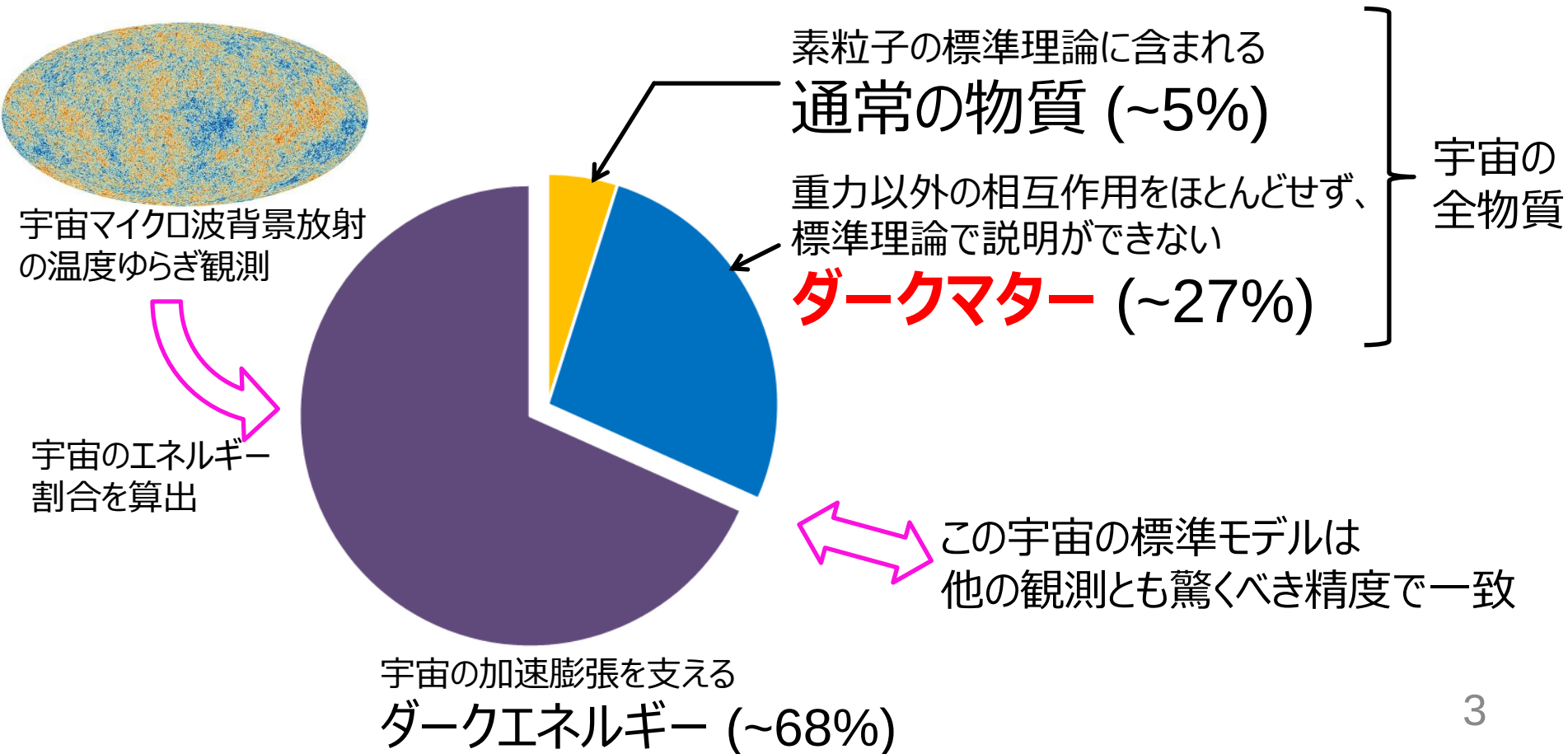
- レーザー干渉計型重力波検出器で超軽量ダークマターを探索する手法の提案が盛ん
- 重力波検出器(のメインチャンネル)は差動長の変化に高感度だが...  
ダークマター信号は同相信号なのでほとんどキャンセルされてしまう
- そこで我々はこれまで解析に用いられて来なかった補助的なチャンネルを用いることを提案
- KAGRAに適用すると、特にB-L数に結合する超軽量ゲージボゾン探索で感度を大幅に高めることができ、これまでの上限値を1桁以上更新可能



YM, T. Fujita, S. Morisaki, H. Nakatsuka, I. Obata,  
[arXiv:2008.02482](https://arxiv.org/abs/2008.02482)

# ダークマターの謎

- 1930年代に銀河の回転速度の観測から存在指摘
- 現代では全物質の約80%を占めることが明らかに
- 依然として正体は不明



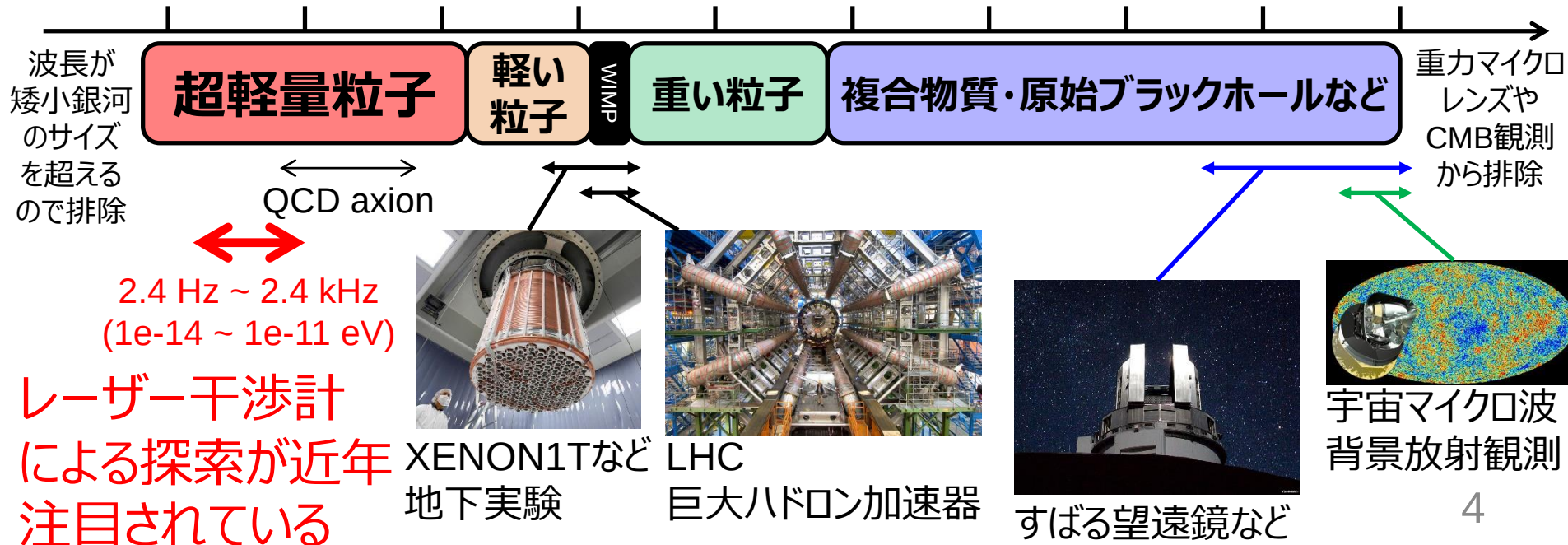
# これまでのダークマター探索

- 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

$10^{-30}$   $10^{-20}$   $10^{-10}$   $10^0$   $10^{10}$   $10^{20}$   $10^{30}$   $10^{40}$   $10^{50}$   $10^{60}$



# 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 \(2018\)](#) ➡ 次の大島さんの講演
- 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

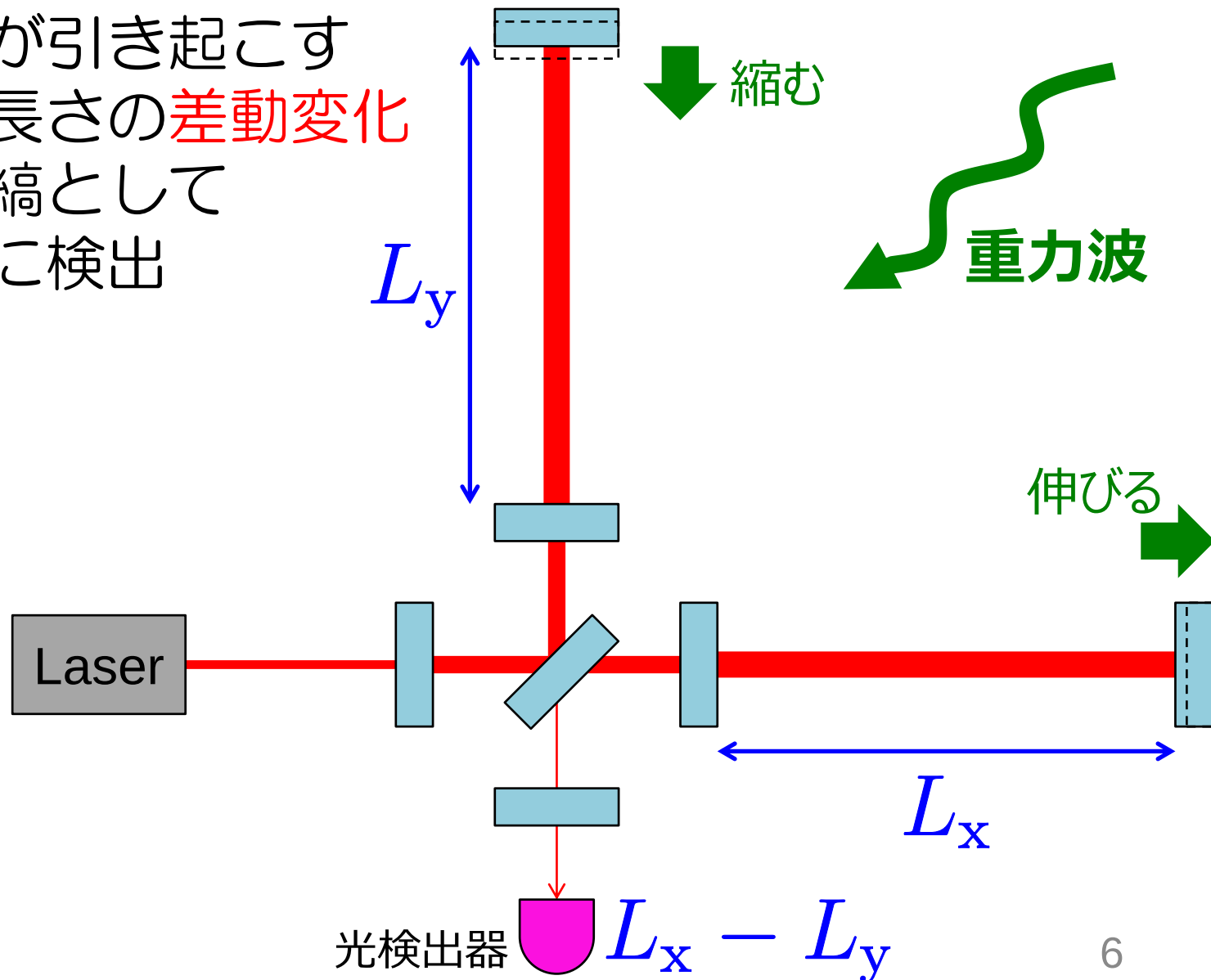
- P. W. Graham+, [PRD 93, 075029 \(2016\)](#)
- A. Pierce+, [PRL 121, 061102 \(2018\)](#)
- D. Carney+, [arXiv:1908.04797](#)
- J. Manley+, [arXiv:2007.04899](#)

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)

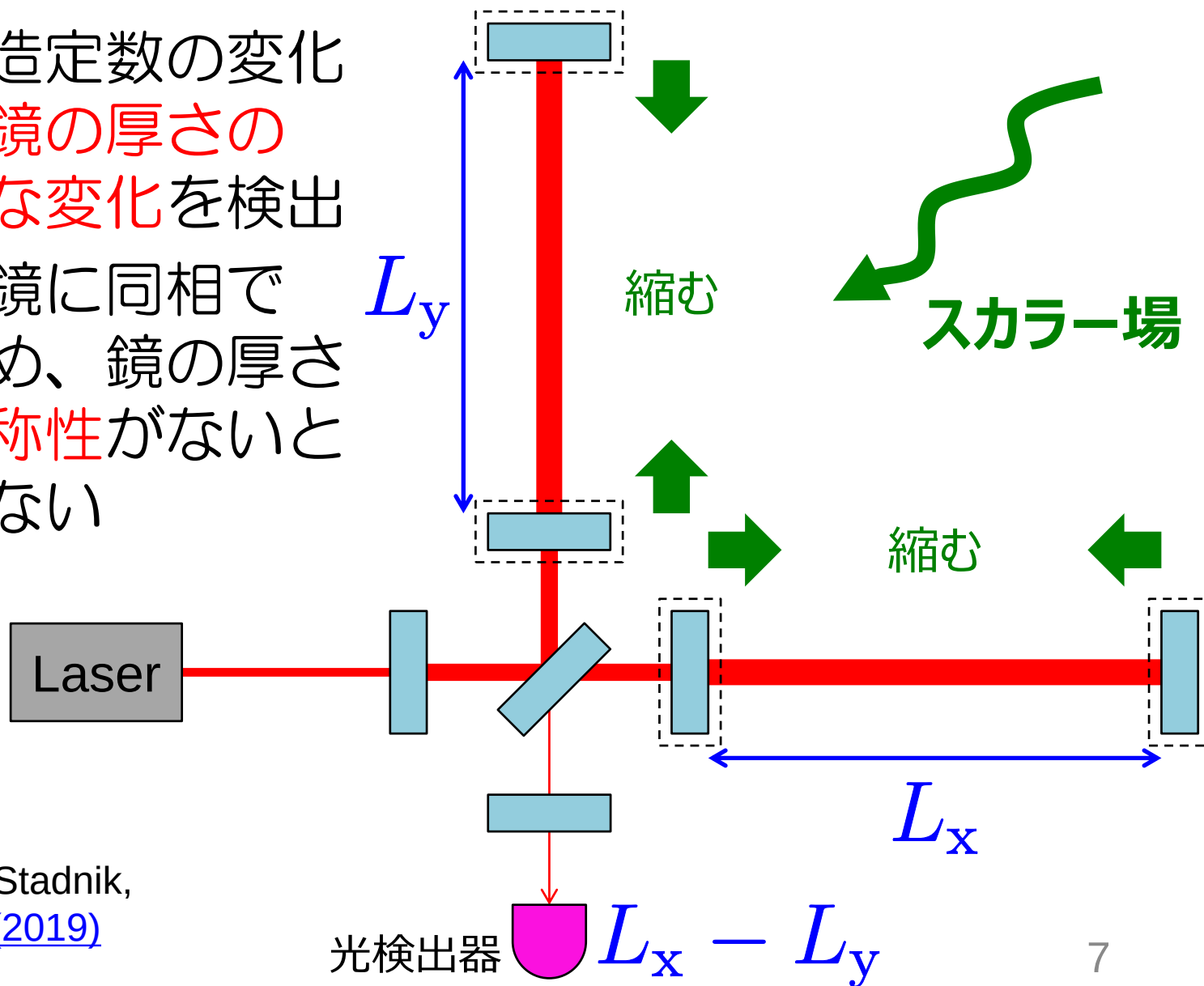
# レーザー干渉計型重力波検出器

- 重力波が引き起こす  
両腕の長さの**差動変化**  
を干渉縞として  
高感度に検出



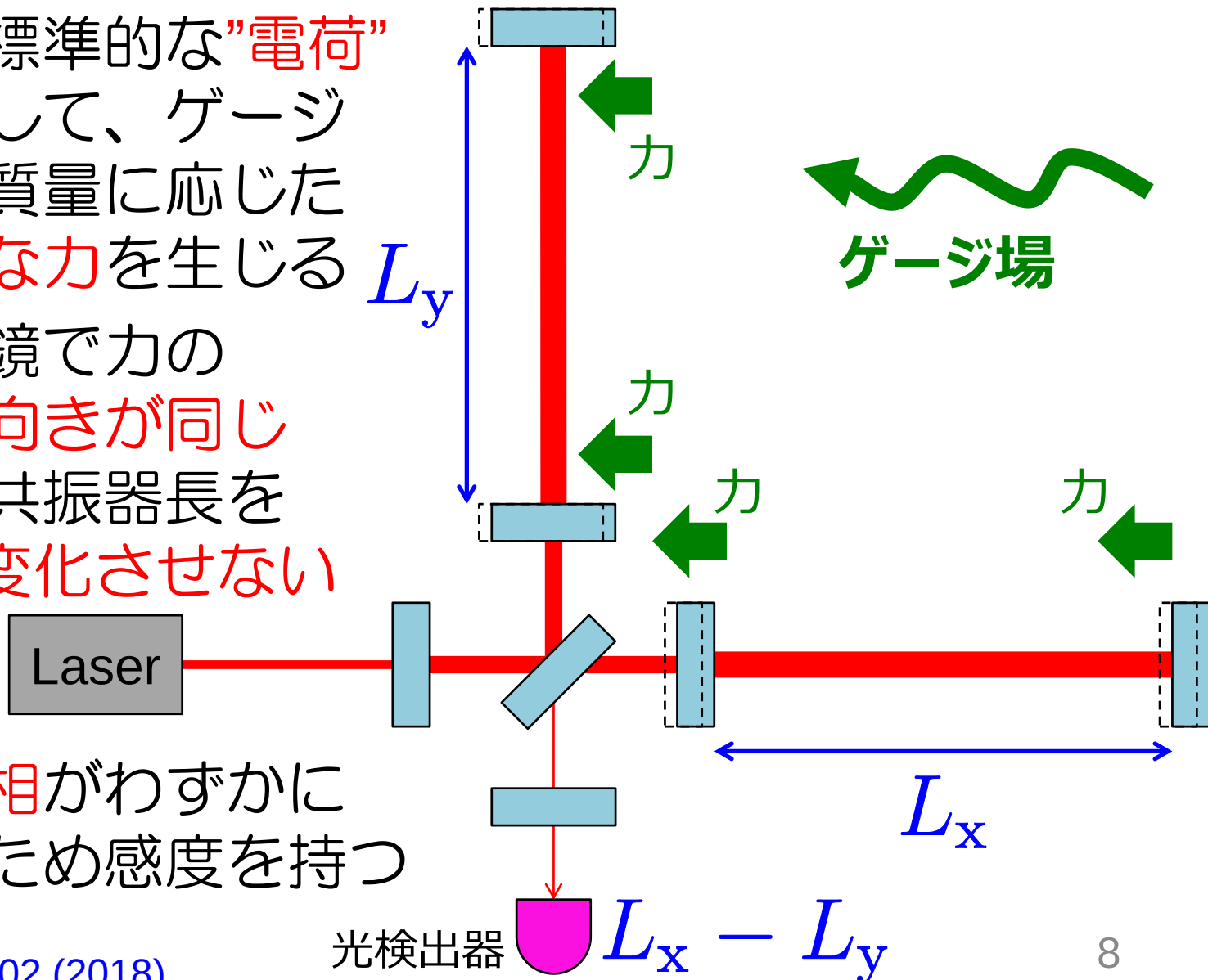
# 重力波検出器でスカラー粒子探索

- 微細構造定数の変化による鏡の厚さの周期的な変化を検出
- 全ての鏡に同相で効くため、鏡の厚さの非対称性がないと感度がない



# 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



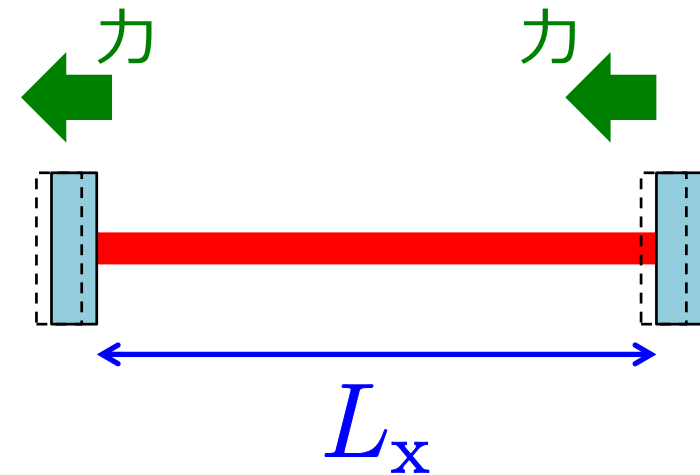
# ゲージ場からの周期的な力

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

- 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

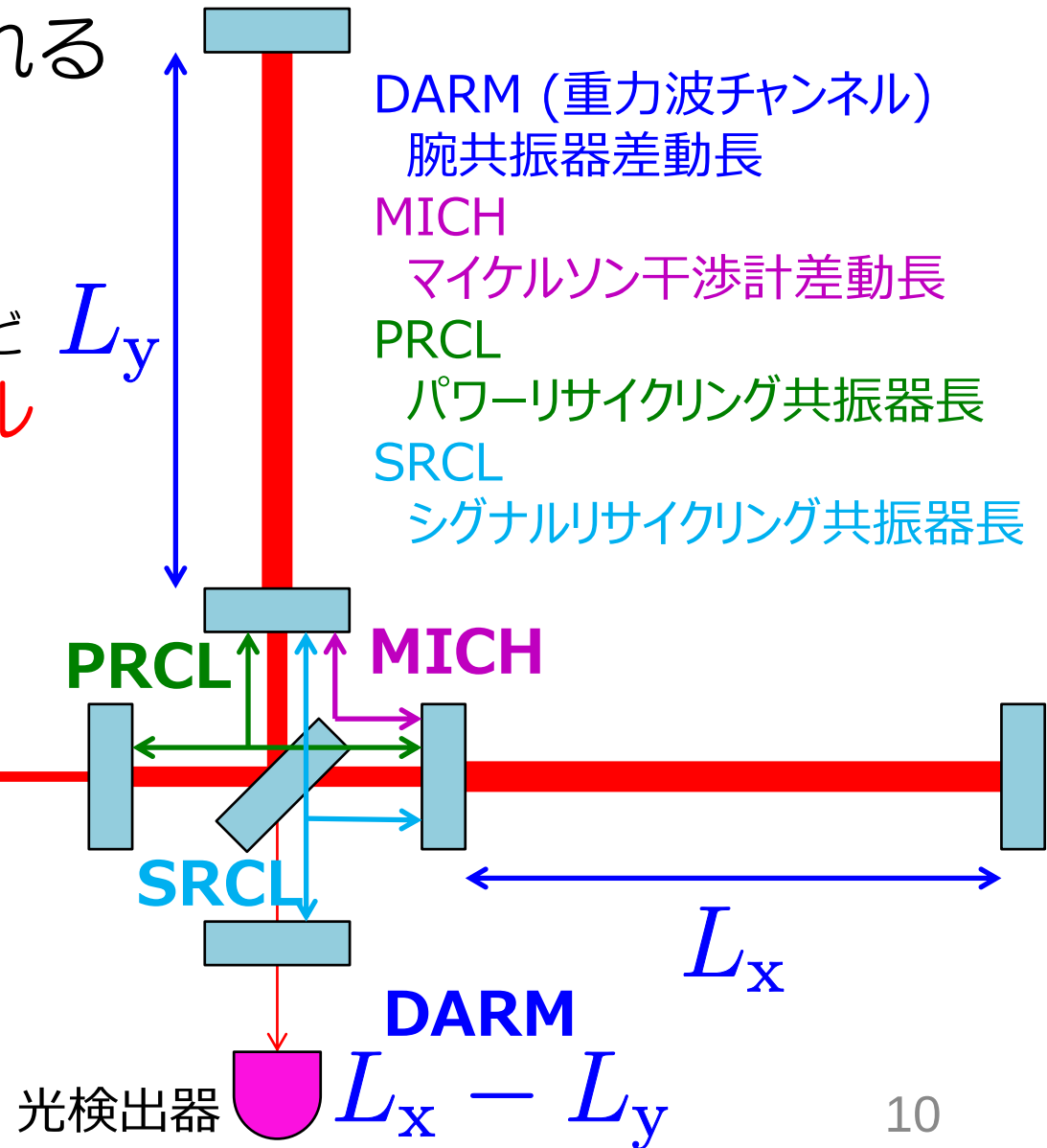
- 重力波信号がほとんど  
ない補助チャンネル

MICH

PRCL

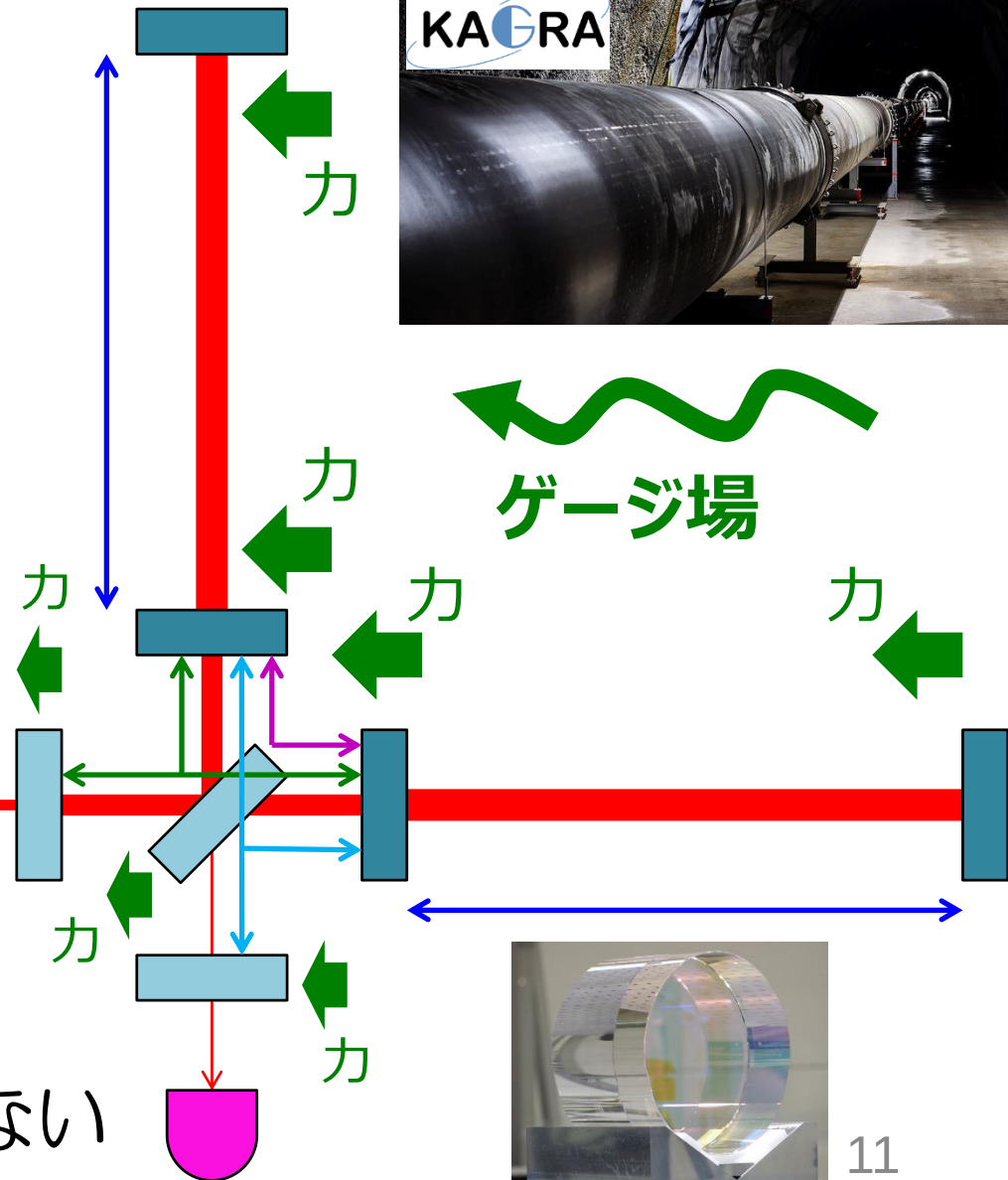
SRCL

- 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



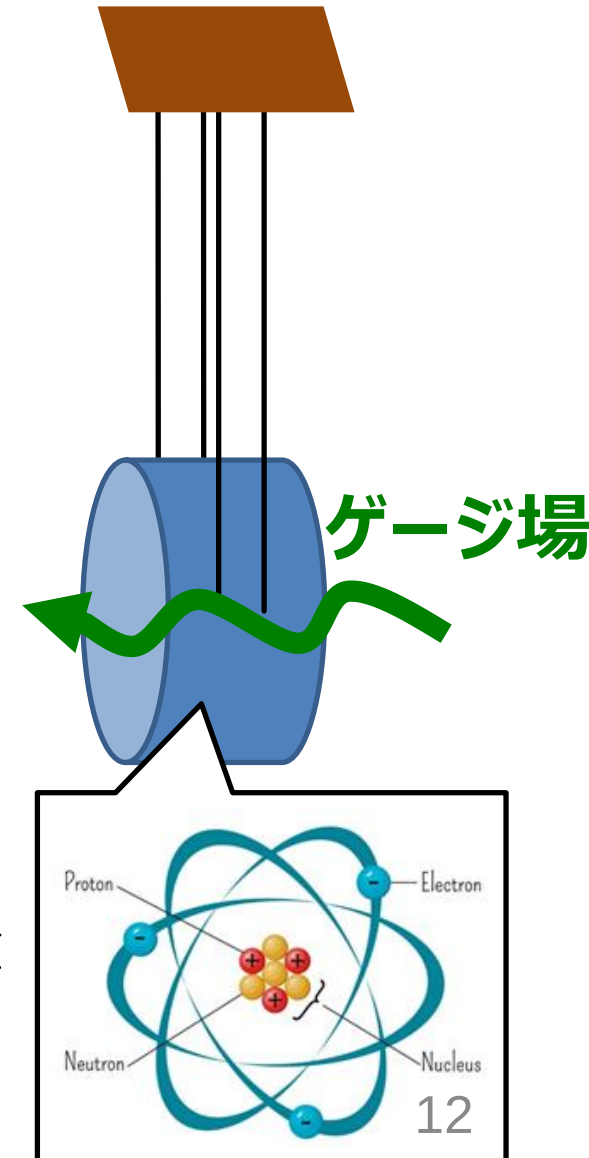
# 低温重力波検出器KAGRAの場合

- 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



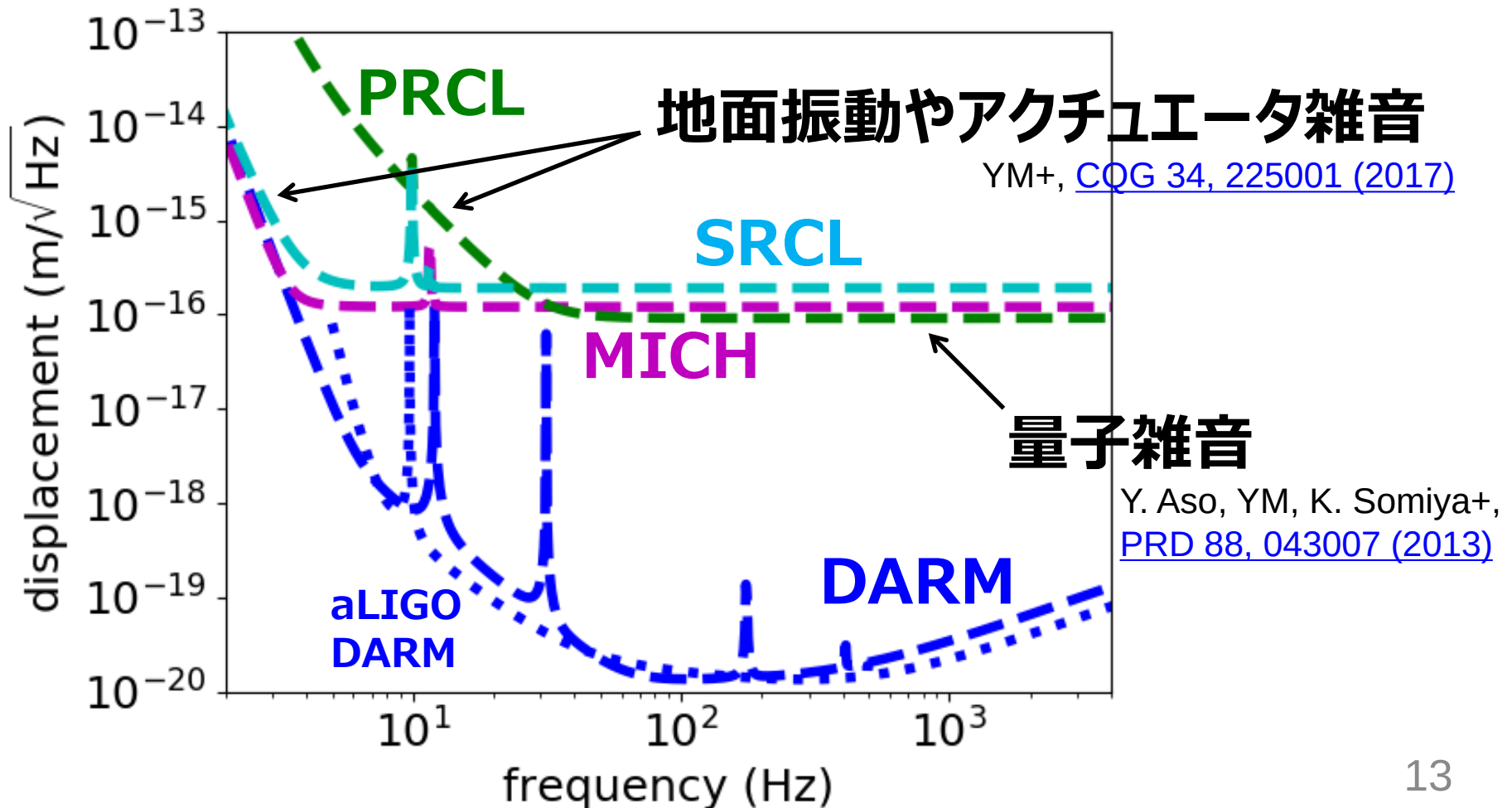
# ゲージボゾン探索で考える”電荷”

- **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: 1.0005**5**  
サファイア: 1.0005**1**
- **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: 0.5**01**  
サファイア: 0.5**10**



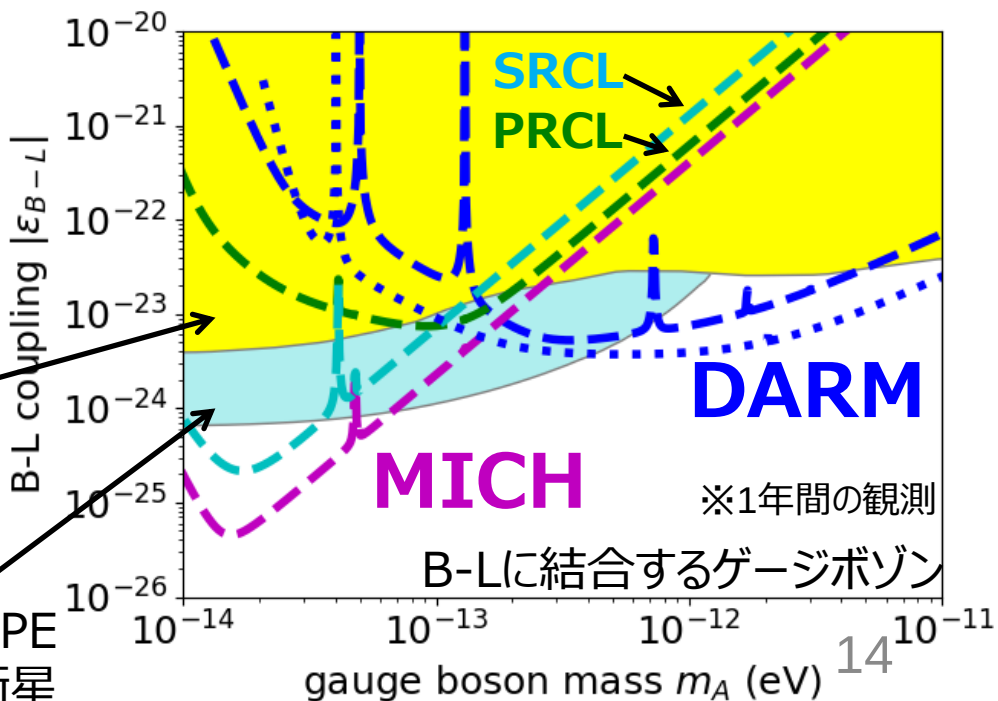
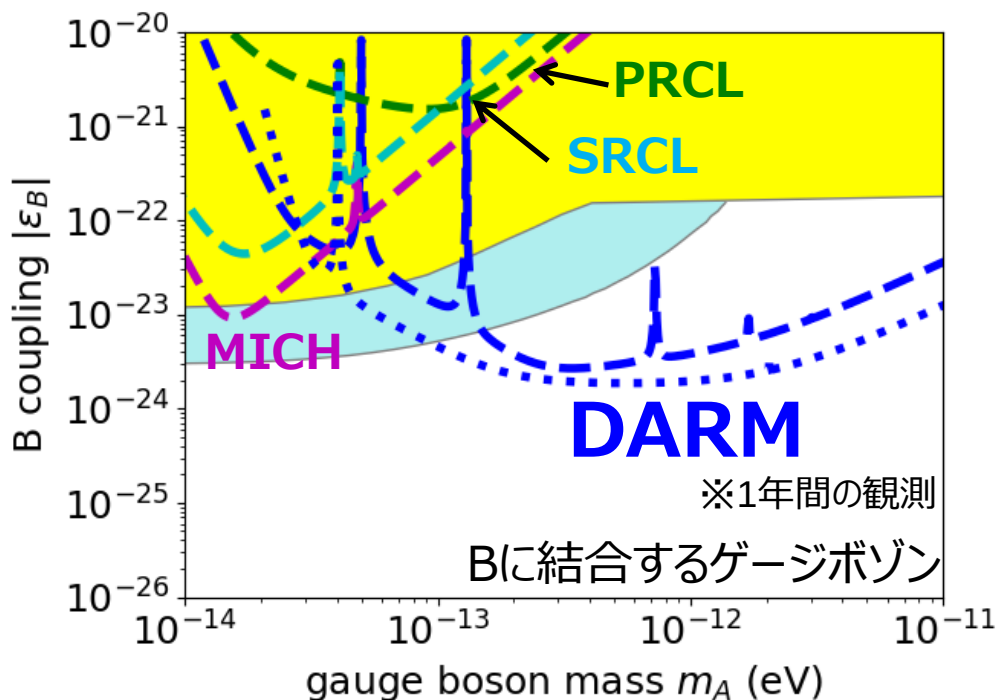
# KAGRA補助チャンネルの変位感度

- 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

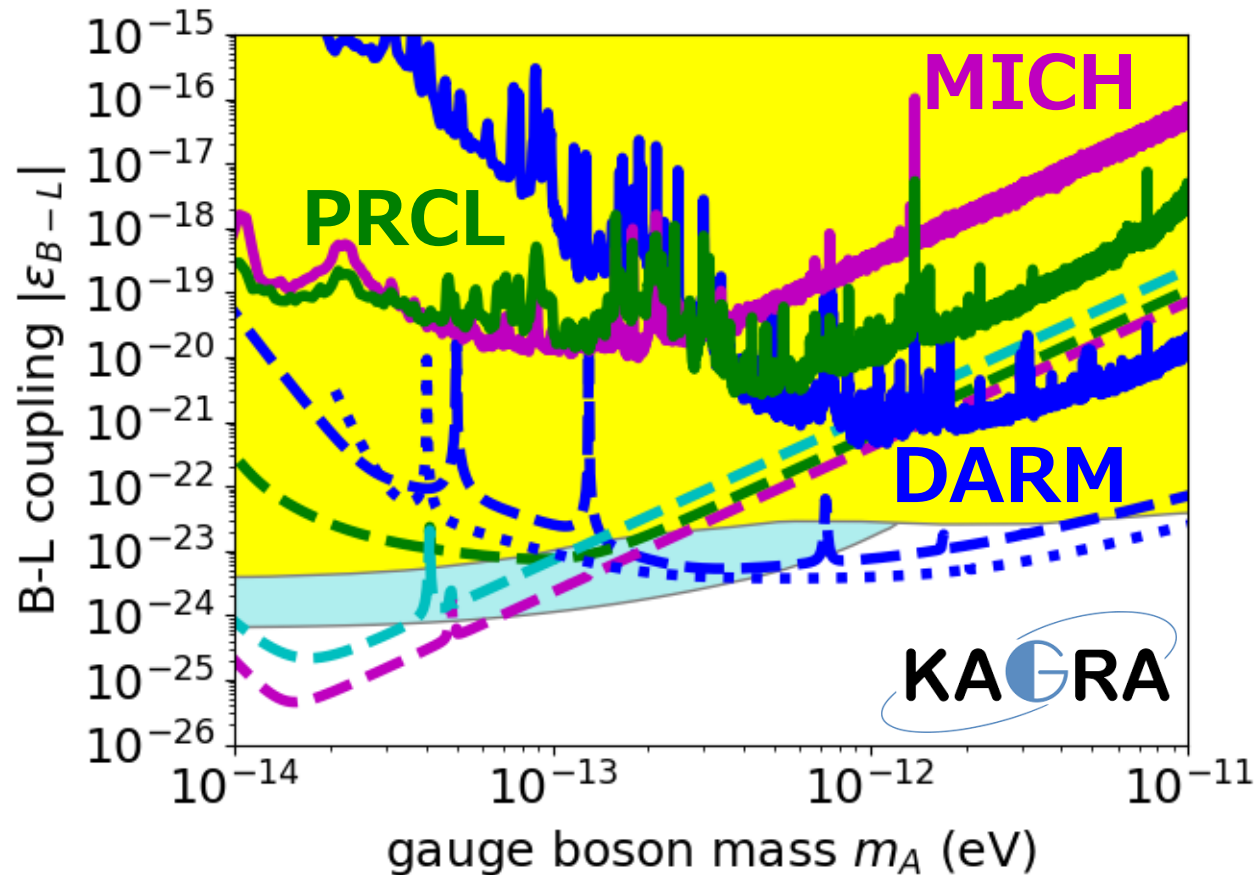


Eöt-Wash  
ねじれ振り子

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準備を進めている



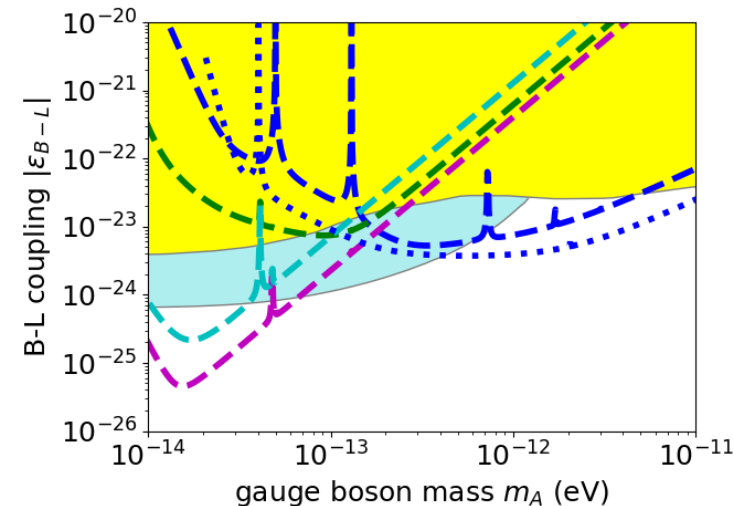
注1: データはKAGRAコラボレーションに帰属しています。

注2: 較正がまだ適当です。



# まとめ

- レーザー干渉計型重力波検出器の補助チャンネルを用いた超軽量ダークマター探索の新手法を提案
- 低温重力波検出器KAGRAに適用すると、特にB-L数に結合するゲージボゾン探索で感度を大幅に高めることができ、これまでの上限値を1桁以上更新可能



- Einstein TelescopeやCosmic Explorerなど次世代の低温重力波検出器でも利用可能な手法
- 重力波検出器を用いたダークマター探索の新たな可能性を開拓