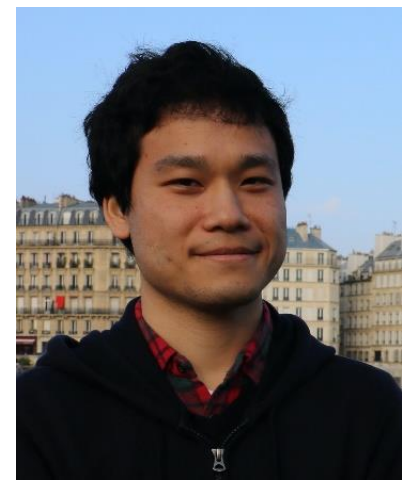


# 重力波検出器による ダークマター探索

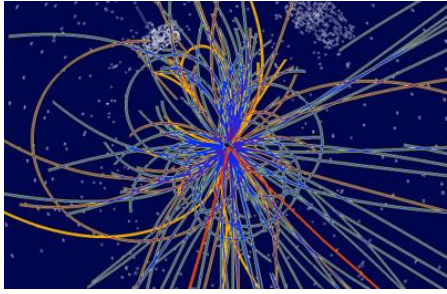
道村唯太

東京大学 大学院理学系研究科 物理学専攻

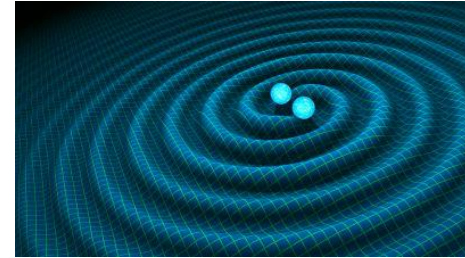
[michimura@phys.s.u-tokyo.ac.jp](mailto:michimura@phys.s.u-tokyo.ac.jp)



# 今回のお話



## 「素粒子と重力波」



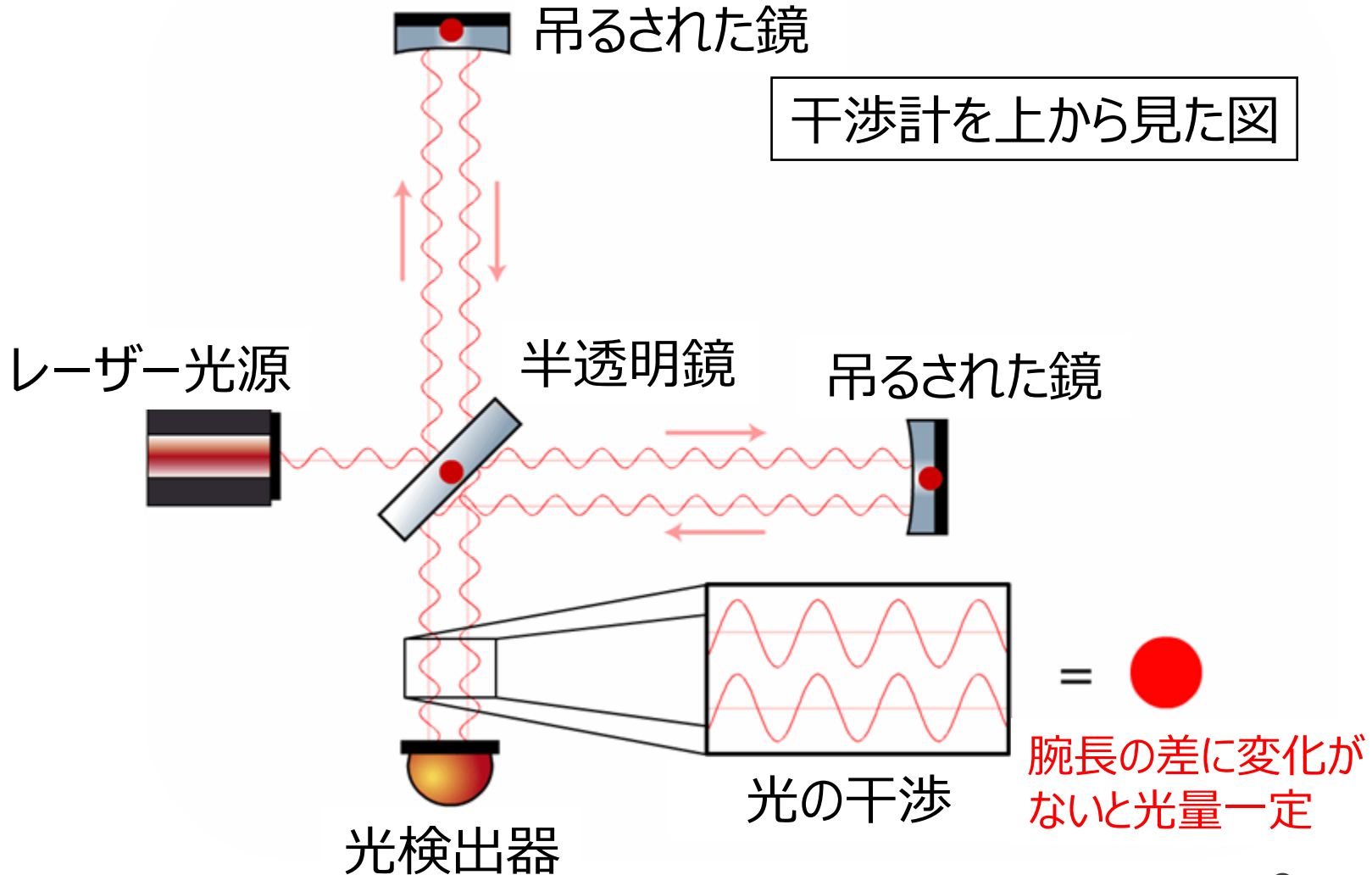
素粒子実験 を

レーザー干渉計型  
重力波検出器  
でやる！

ダークマター探索  
(特にアクシオンとゲージボゾン)

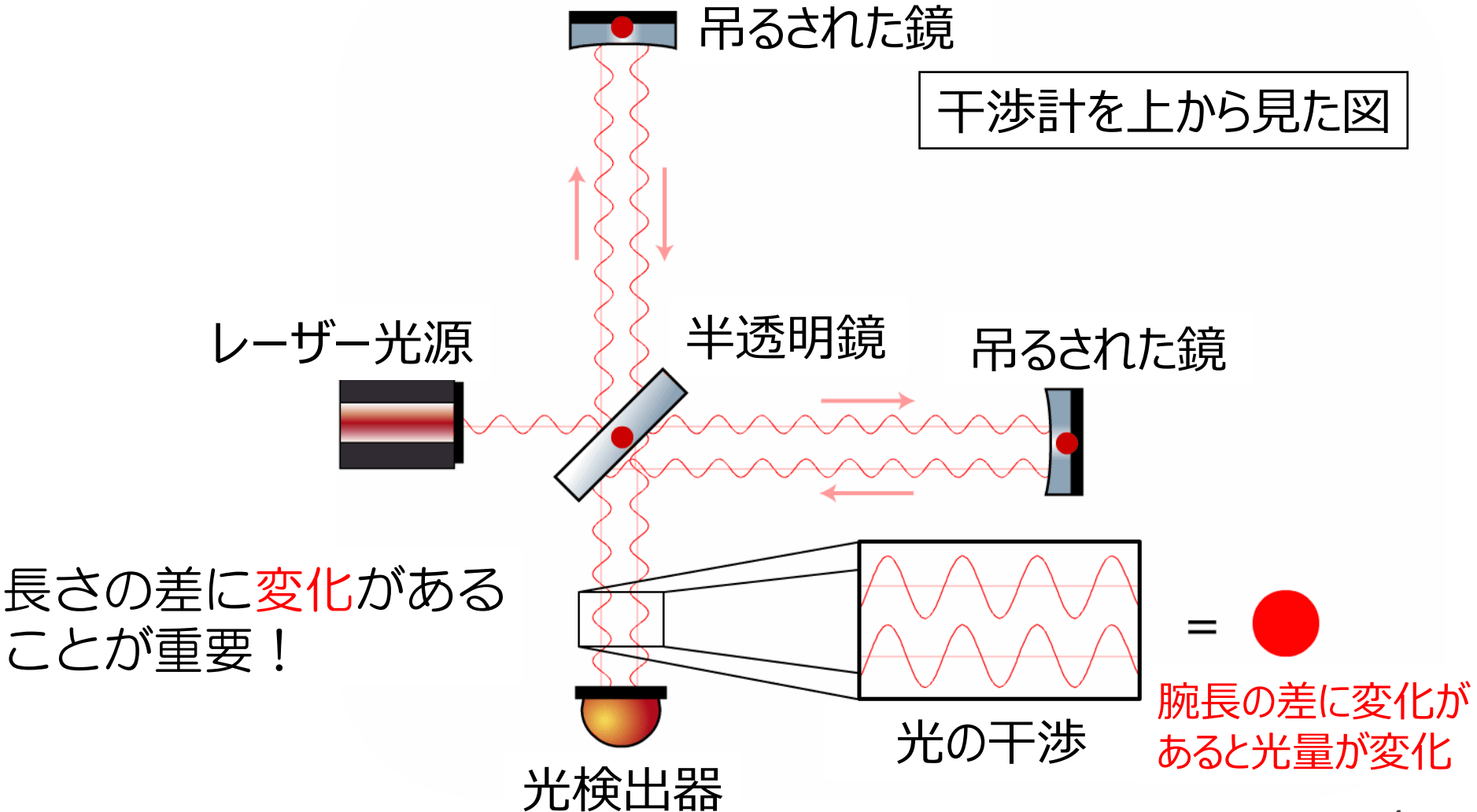
# レーザー干渉計の原理

- 両腕の長さの差を干渉縞の変化として測定

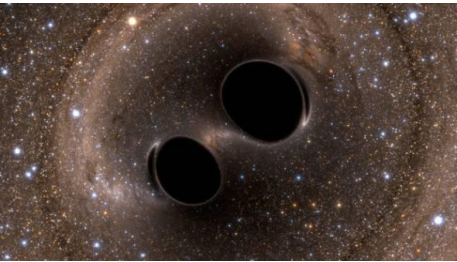


# レーザー干渉計の原理

- 両腕の長さの差を干渉縞の変化として測定



# 長さの差の変化を引き起こすものはなんでも検出可能



吊るされた鏡

**重力波**

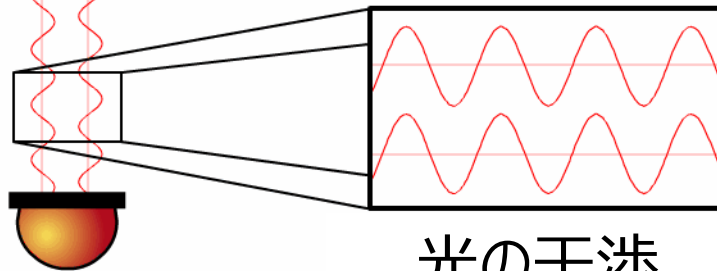
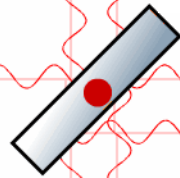
(PBHダークマター、ブラックホール周りのボゾン雲からの重力波も)

L. Tsukada+, [PRD 103, 083005 \(2021\)](#) など

レーザー光源

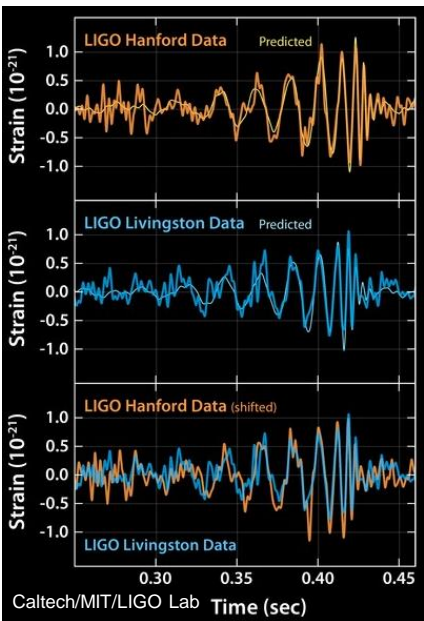
半透明鏡

吊るされた鏡

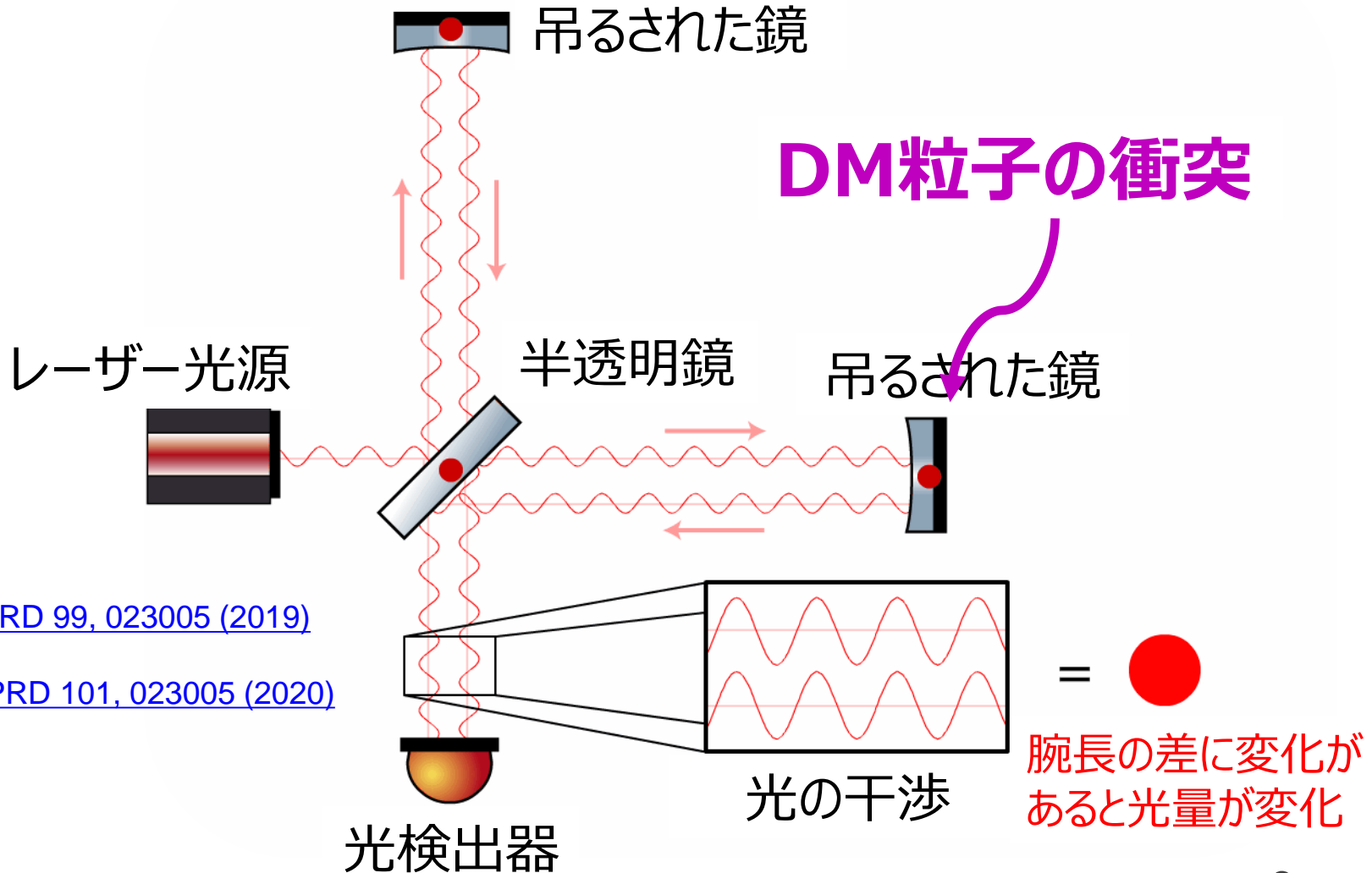


光の干渉

= ●  
腕長の差に変化があると光量が変化

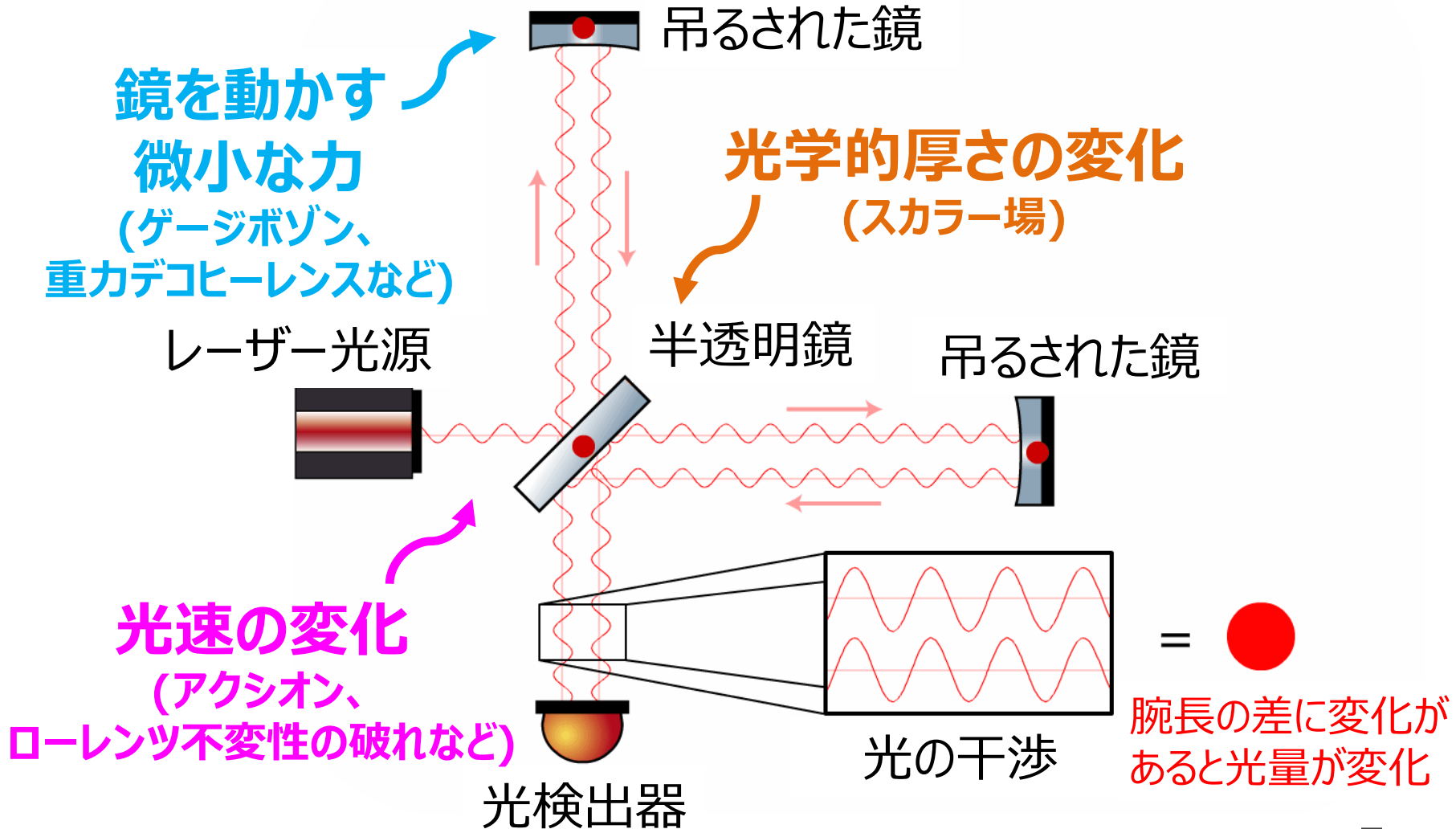


# 長さの差の変化を引き起こすものはなんでも検出可能

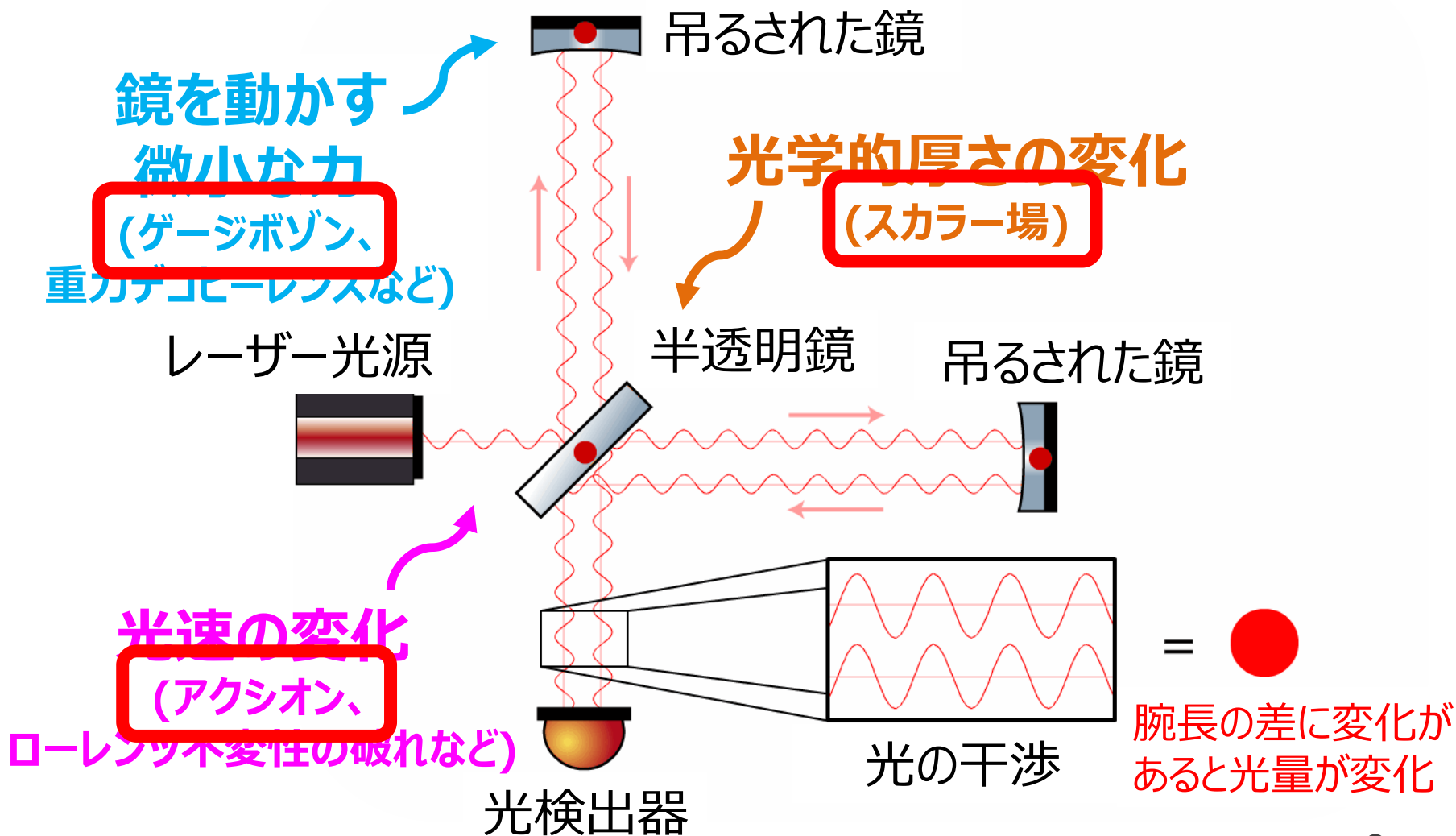


A. Kawasaki, [PRD 99, 023005 \(2019\)](#)  
kg-scale DM  
S. Tsuchida+, [PRD 101, 023005 \(2020\)](#)  
WIMP

# 長さの差の変化を引き起こすものはなんでも検出可能



# 特に超軽量ダークマター探索が 注目を集めている





# 近年のレーザー干渉計の提案/探索

## • $U(1)_B$ or $U(1)_{B-L}$ ゲージボゾン(ベクトル場)

- P. W. Graham+, [PRD 93, 075029 \(2016\)](#)
- A. Pierce+, [PRL 121, 061102 \(2018\)](#)
- H-K Guo+, [Commun. Phys. 2, 155 \(2019\)](#) LIGOの実データ解析
- Y. Michimura, T. Fujita, S. Morisaki, H. Nakatsuka, I. Obata, [PRD 102, 102001 \(2020\)](#)
- D. Carmey+, [New J. Phys. 23, 023041 \(2021\)](#)
- J. Manley+, [PRL 126, 061301 \(2021\)](#)
- S. Morisaki, T. Fujita, Y. Michimura, H. Nakatsuka, I. Obata, [PRD 103, L051702 \(2021\)](#)
- LIGO-Virgo-KAGRA Collaboration, [arXiv:2105.13085](#) LIGO/Virgoの実データ解析

## • スカラー場

- 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 \(2019\)](#)
- C. Kennedy+, [PRL 125, 201302 \(2020\)](#)
- E. Savalle+, [PRL 126, 051301 \(2021\)](#)
- S. M. Vermeulen+, [Nature 600, 424 \(2021\)](#) GEO600の実データ解析

近年盛んに実験提案  
ゲージボゾン、スカラー場に関しては  
重力波望遠鏡の実データを用いた  
探索も既になされている

## • アクシオン、Axion-like particles (ALPs)

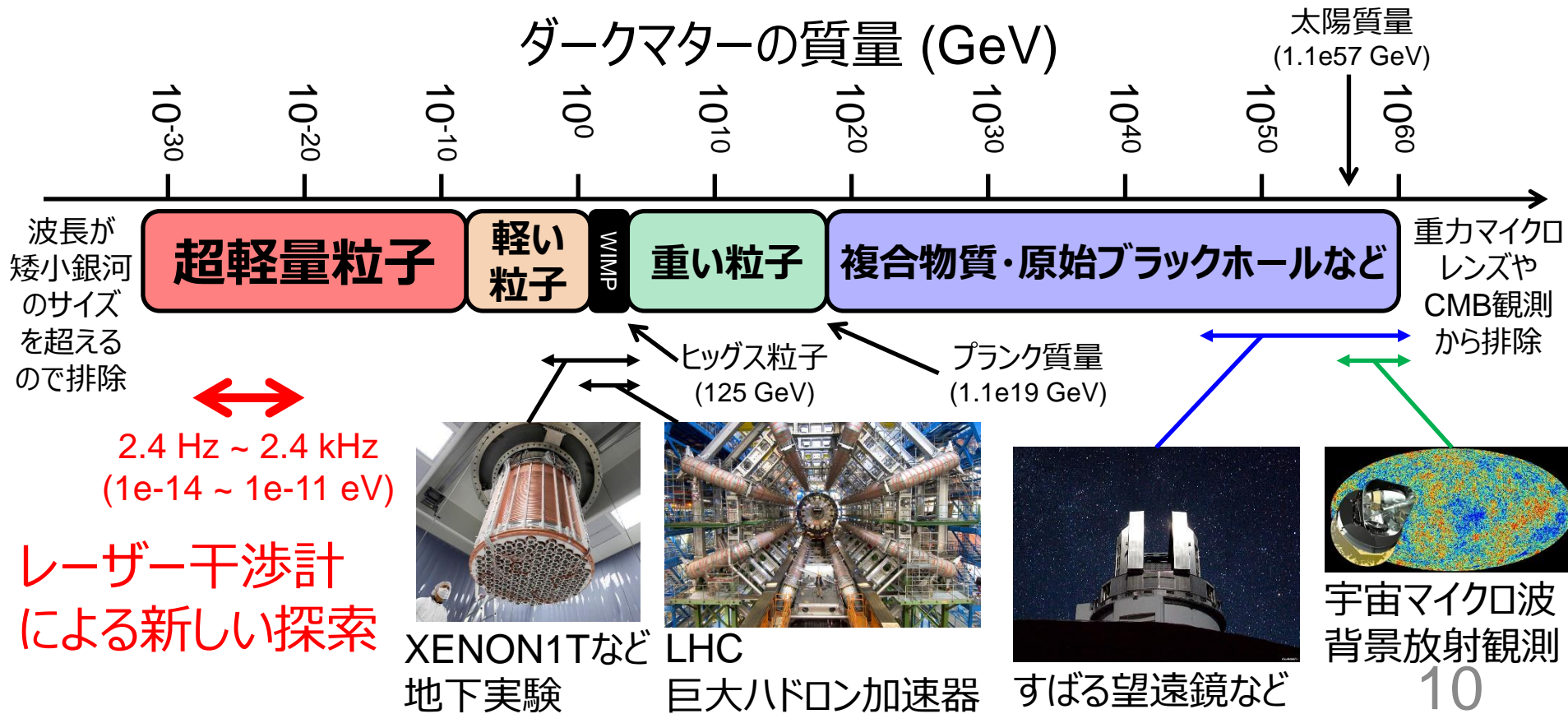
- W. DeRocco & A. Hook, [PRD 98, 035021 \(2018\)](#)
- I. Obata, T. Fujita, Y. Michimura, [PRL 121, 161301 \(2018\)](#)
- H. Liu+, [PRD 100, 023548 \(2019\)](#)
- K. Nagano, T. Fujita, Y. Michimura, I. Obata, [PRL 123, 111301 \(2019\)](#)
- D. Martynov & H. Miao, [PRD 101, 095034 \(2020\)](#)
- K. Nagano, H. Nakatsuka, S. Morisaki, T. Fujita, Y. Michimura, I. Obata, [PRD 104, 062008 \(2021\)](#)

Not exhaustive.

The ones which require magnetic fields are not listed.

# なぜ注目されているか？

- 長年の間**WIMP**にDM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
- **新発想**による**他の候補の探索**が求められている



# 超軽量ダークマター

- 超軽量ボゾン場(<~1 eV)が特に宇宙論から高い注目
- 古典的な波としてふるまう

$$f = 242 \text{ Hz} \left( \frac{m_{\text{DM}}}{10^{-12} \text{ eV}} \right)$$

- レーザー干渉計はこのような周期的な変化に高い感度を持つ
  - 突発的なイベントに比べて、バックグラウンドと区別しやすい
  - 長時間測定によりSNRを向上できる

# 近年のレーザー干渉計の提案/探索

## • $U(1)_B$ or $U(1)_{B-L}$ ゲージボゾン(ベクトル場)

- P. W. Graham+, [PRD 93, 075029 \(2016\)](#)
- A. Pierce+, [PRL 121, 061102 \(2018\)](#)
- H-K Guo+, [Commun. Phys. 2, 155 \(2019\)](#) LIGOの実データ解析
- Y. Michimura, T. Fujita, S. Morisaki, H. Nakatsuka, I. Obata, [PRD 102, 102001 \(2020\)](#)
- D. Carmey+, [New J. Phys. 23, 023041 \(2021\)](#)
- J. Manley+, [PRL 126, 061301 \(2021\)](#)
- S. Morisaki, T. Fujita, Y. Michimura, H. Nakatsuka, I. Obata, [PRD 103, L051702 \(2021\)](#)
- LIGO-Virgo-KAGRA Collaboration, [arXiv:2105.13085](#) LIGO/Virgoの実データ解析

今回のお話  
パート1

## • スカラー場

- 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 \(2019\)](#)
- C. Kennedy+, [PRL 125, 201302 \(2020\)](#)
- E. Savalle+, [PRL 126, 051301 \(2021\)](#)
- S. M. Vermeulen+, [Nature 600, 424 \(2021\)](#) GEO600の実データ解析

近年盛んに実験提案  
ゲージボゾン、スカラー場に関しては  
重力波望遠鏡の実データを用いた  
探索も既になされている

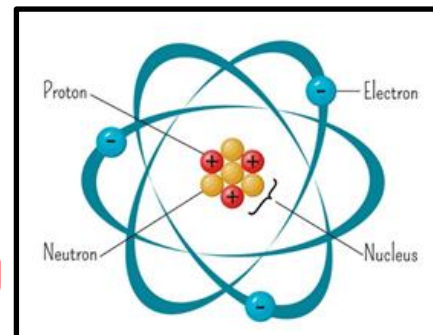
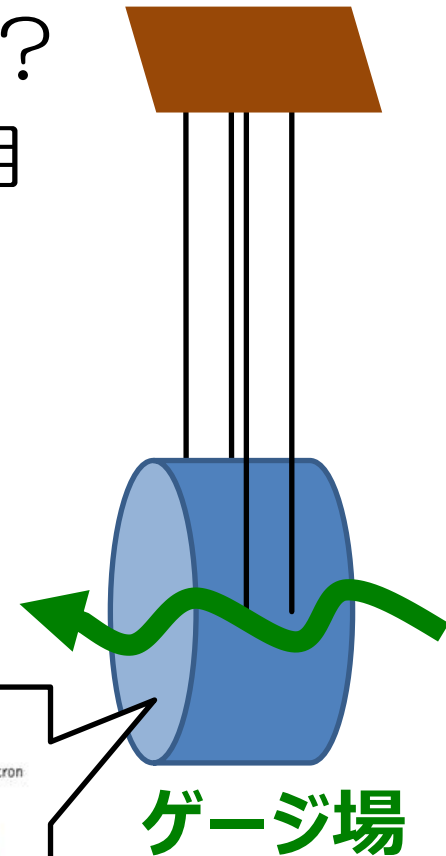
## • アクシオン、Axion-like particles (ALPs)

- W. DeRocco & A. Hook, [PRD 98, 035021 \(2018\)](#)
- I. Obata, T. Fujita, Y. Michimura, [PRL 121, 161301 \(2018\)](#)
- H. Liu+, [PRD 100, 023548 \(2019\)](#)
- K. Nagano, T. Fujita, Y. Michimura, I. Obata, [PRL 123, 111301 \(2019\)](#)
- D. Martynov & H. Miao, [PRD 101, 095034 \(2020\)](#)
- K. Nagano, H. Nakatsuka, S. Morisaki, T. Fujita, Y. Michimura, I. Obata, [PRD 104, 062008 \(2021\)](#)

今回のお話  
パート2

# ゲージボゾンダークマター

- ダークマターは標準理論を超える**新物理**を示唆  
新しいゲージ対称性とゲージボゾンかも？
- このゲージボゾンがダークマターかも？
- 特に、**B-L数**に結合するゲージ場に注目
  - バリオン数-レプトン数
  - 標準理論では保存量
    - 新しいゲージ対称性かも
  - 大体、中性子数に一致
  - 中性子比は材質によって異なる
    - 石英: 0.501
    - サファイア: 0.510
- **材質に依存した周期的な力**



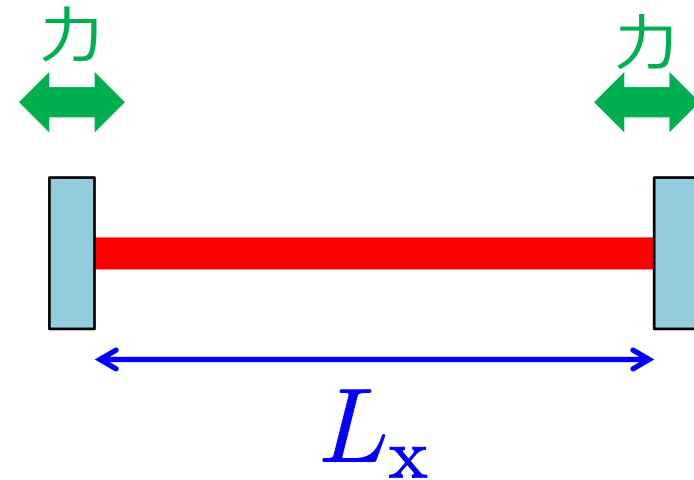
# ゲージ場からの周期的な力

- 鏡に生じる加速度 (電場中の荷電粒子と同様)

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

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)

# LIGO/Virgoを使った探索

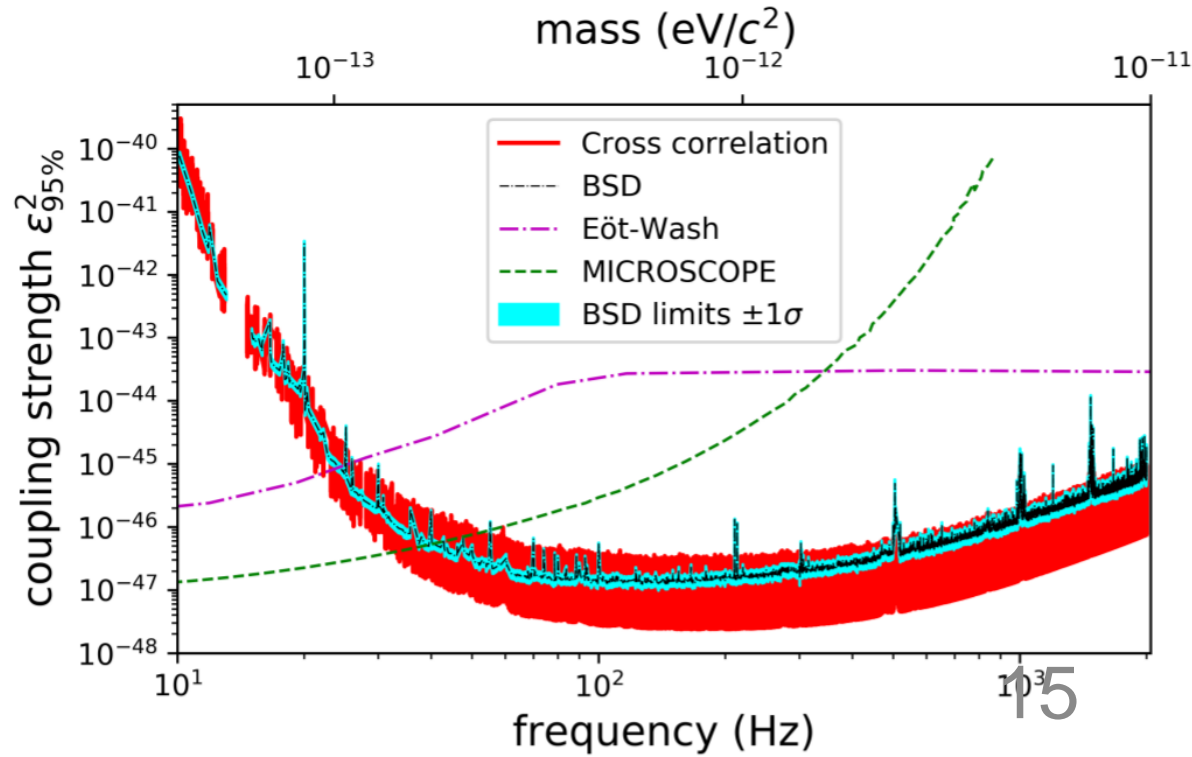
- 重力波望遠鏡LIGOとVirgoの長基線長を活かし、**O3データ**を利用した解析がすでに行われた

H-K Guo+, [Communications Physics 2, 155 \(2019\)](#)

LIGO, Virgo, KAGRA Collaboration, [arXiv:2105.13085](#)

- 等価原理検証実験を**更新する上限値**  
(バリオン数に結合するゲージボゾンに対して)

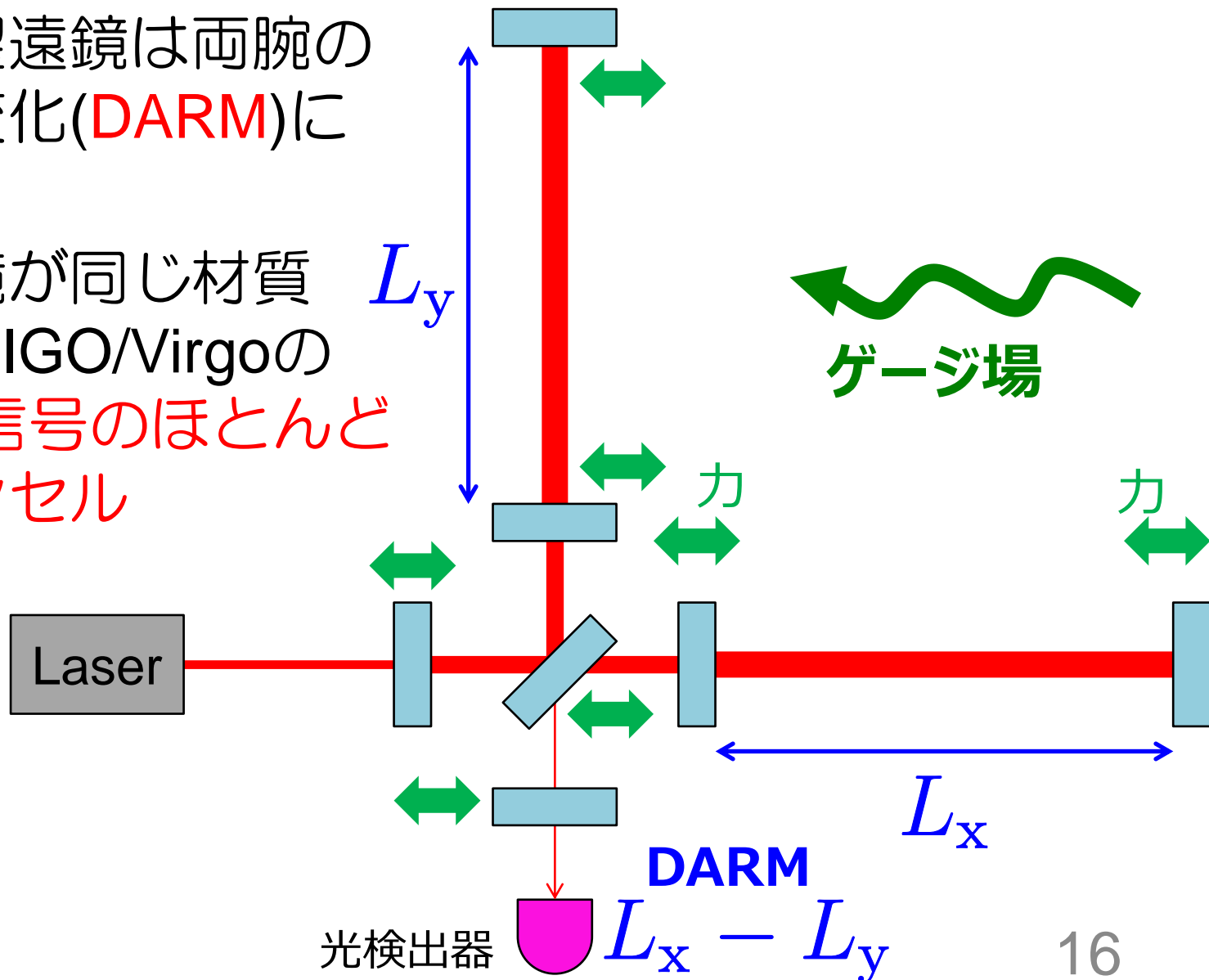
- KAGRAを  
利用すると  
LIGO/Virgo  
とは異なる  
新しい探索が  
可能！





# 重力波望遠鏡による探索

- 重力波望遠鏡は両腕の差動長変化(DARM)に高感度
- 全ての鏡が同じ材質の場合(LIGO/Virgoの場合)は信号のほとんどがキャンセル

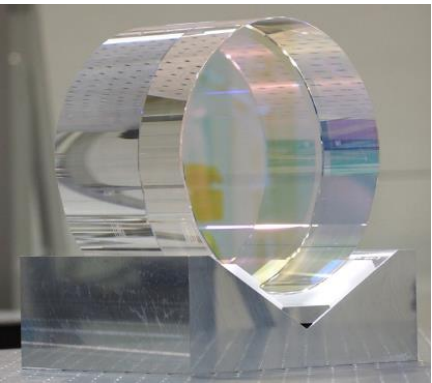
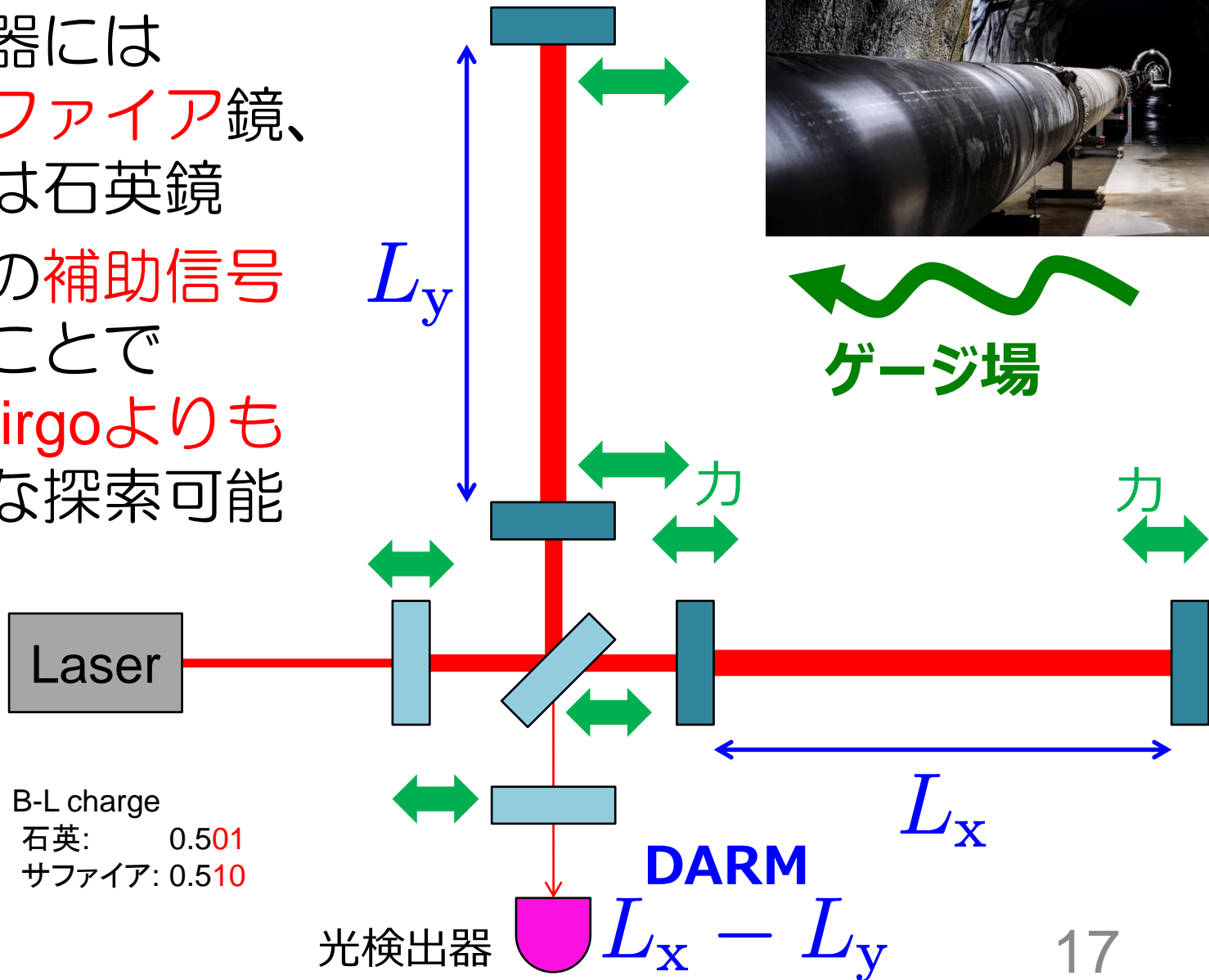




# KAGRAによる探索



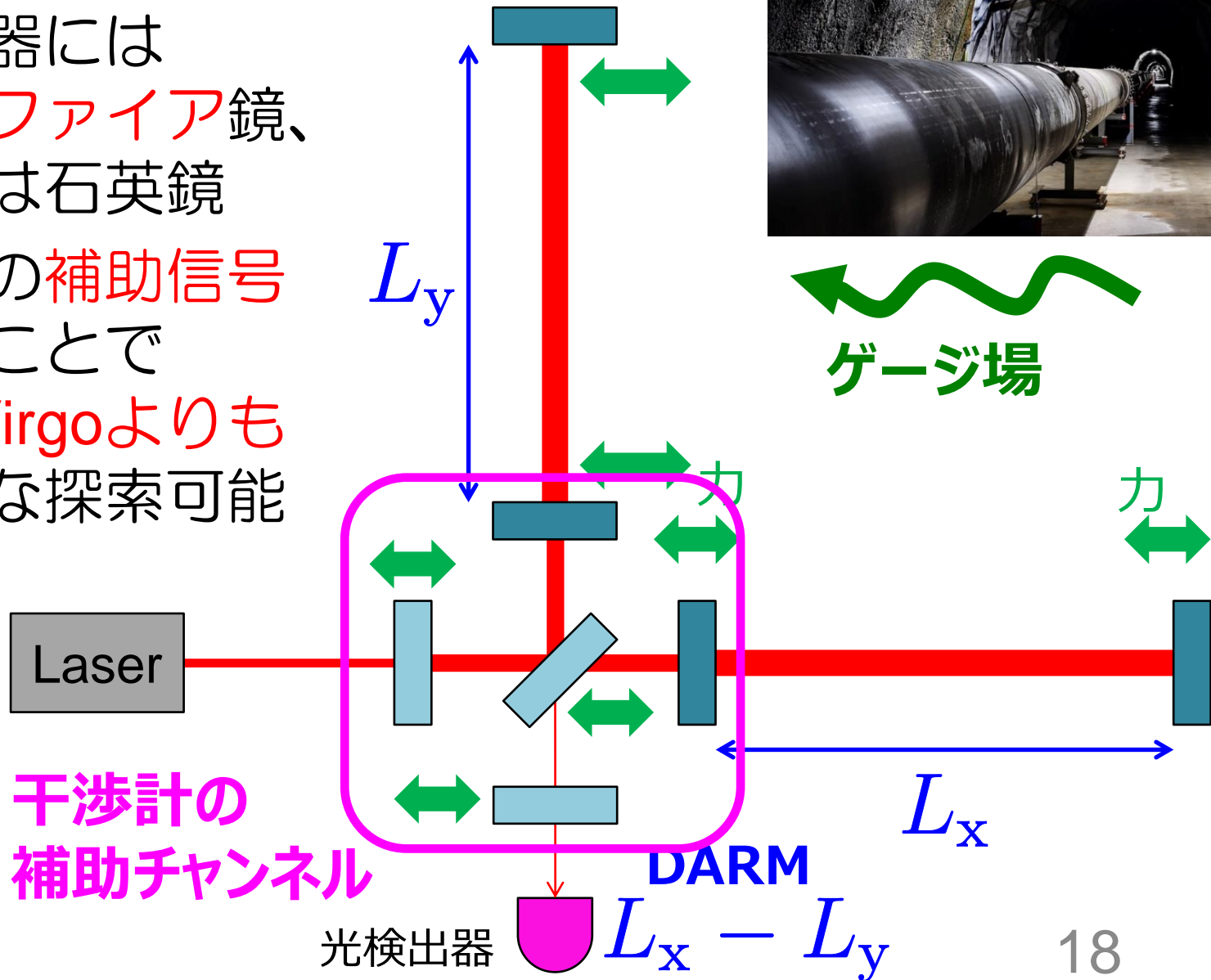
- 腕共振器には低温サファイア鏡、その他は石英鏡
- 干渉計の補助信号を使うことでLIGO/Virgoよりも高感度な探索可能



# KAGRAによる探索

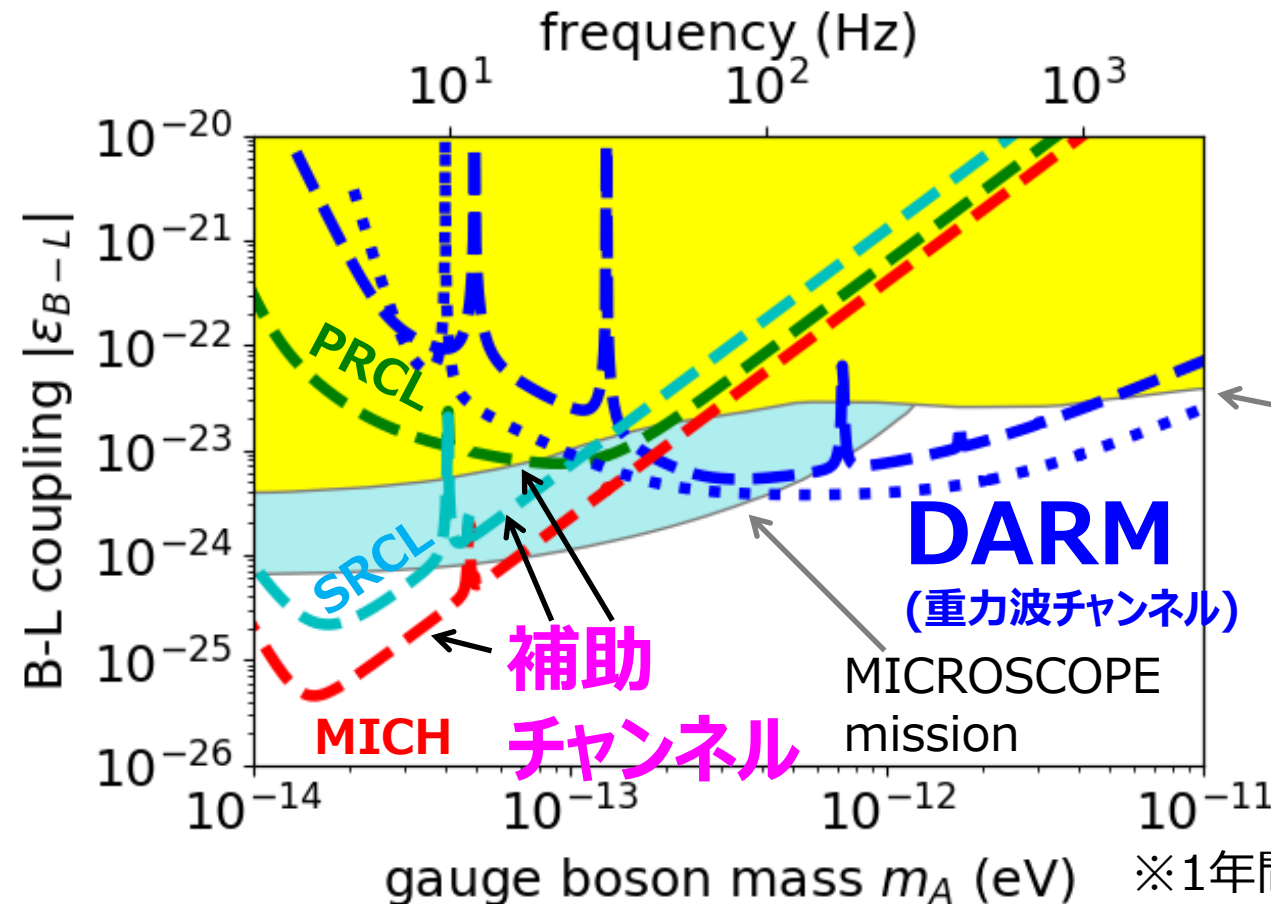


- 腕共振器には低温サファイア鏡、その他は石英鏡
- 干渉計の補助信号を使うことでLIGO/Virgoよりも高感度な探索可能



# KAGRAのゲージボゾン感度

- 低質量側でDARMより補助チャンネルの方が高感度
- 設計感度では等価原理検証実験やLIGOより高感度



YM, T. Fujita, S. Morisaki,  
H. Nakatsuka, I. Obata,  
[PRD 102, 102001 \(2020\)](#)

S. Morisaki, T. Fujita, YM,  
H. Nakatsuka, I. Obata,  
[PRD 103, L051702 \(2021\)](#)

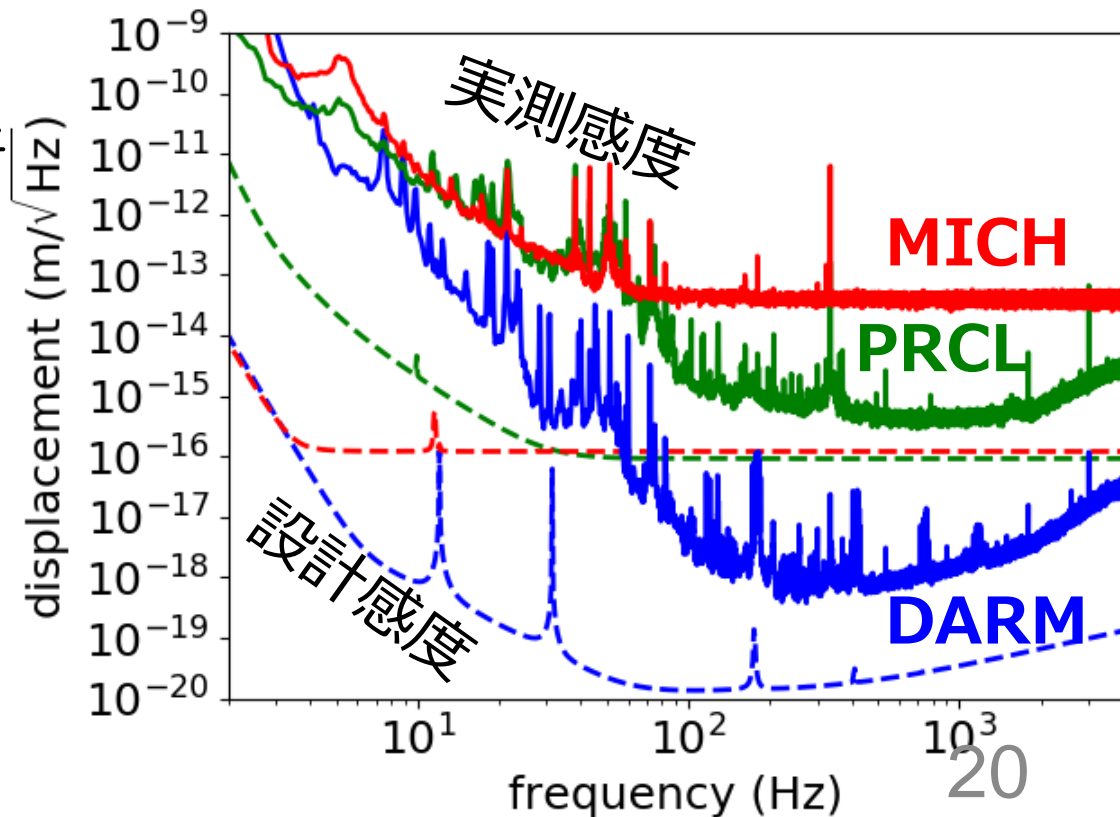
Eöt-Wash  
torsion pendulum



※1年間観測した場合

# KAGRAの2020年観測データ

- 2020年4月にKAGRAは初観測を実施(O3GK)
- 変位感度はまだ設計感度よりかなり悪い  
10 Hzで約6桁悪い
- データ解析パイプラインを開発
- 複数チャンネル  
を使った初の解析



# データ解析の流れ

E. Savalle+,  
[PRL 126, 051301 \(2021\)](https://arxiv.org/abs/2105.01301)

- 信号は**ほぼ単一周波数**

$$\omega_i = m_A \left( 1 + \frac{v_i^2}{2} \right)$$

- この周波数範囲内のSNRを積分

$$\rho = \sum \frac{4|\tilde{d}(f_k)|^2}{T_{\text{obs}} S_n(f_k)}$$

観測データ

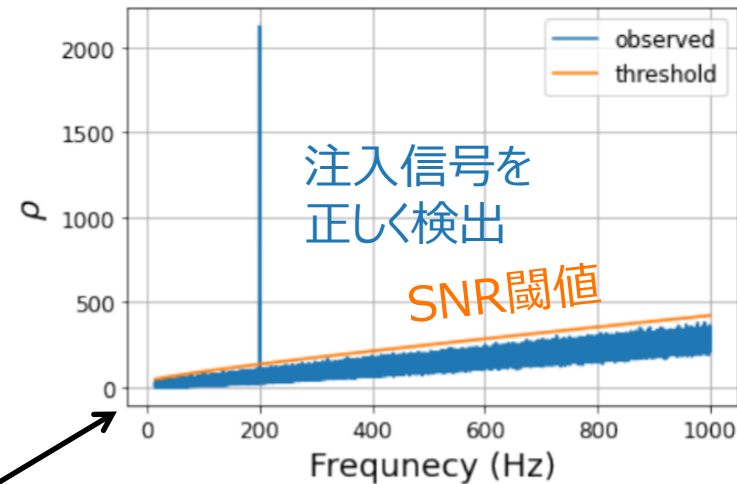
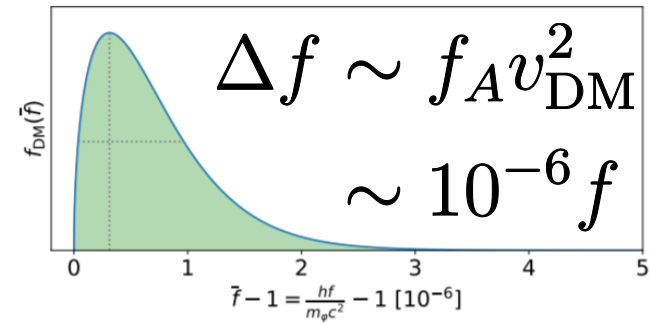
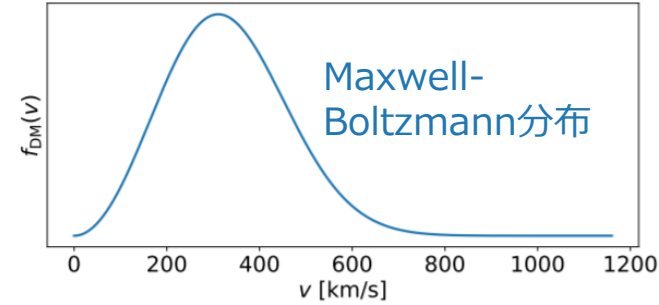
推定感度

$$m_A \leq 2\pi f_k \leq m_A(1 + \kappa v_{\text{DM}}^2)$$

観測時間

- $\rho$  が  $\chi^2$  分布に従うと仮定 (ガウシアンノイズを仮定) し、SNRの閾値を決定
- $\rho$  から**95%上限値**  $\epsilon_D^{95\%}$  を算出

$$\int_{\rho_{\text{obs}}}^{\infty} p(\rho | \epsilon_D^{95\%}) d\rho = 0.95$$



モックデータでもパイプラインの動作を確認

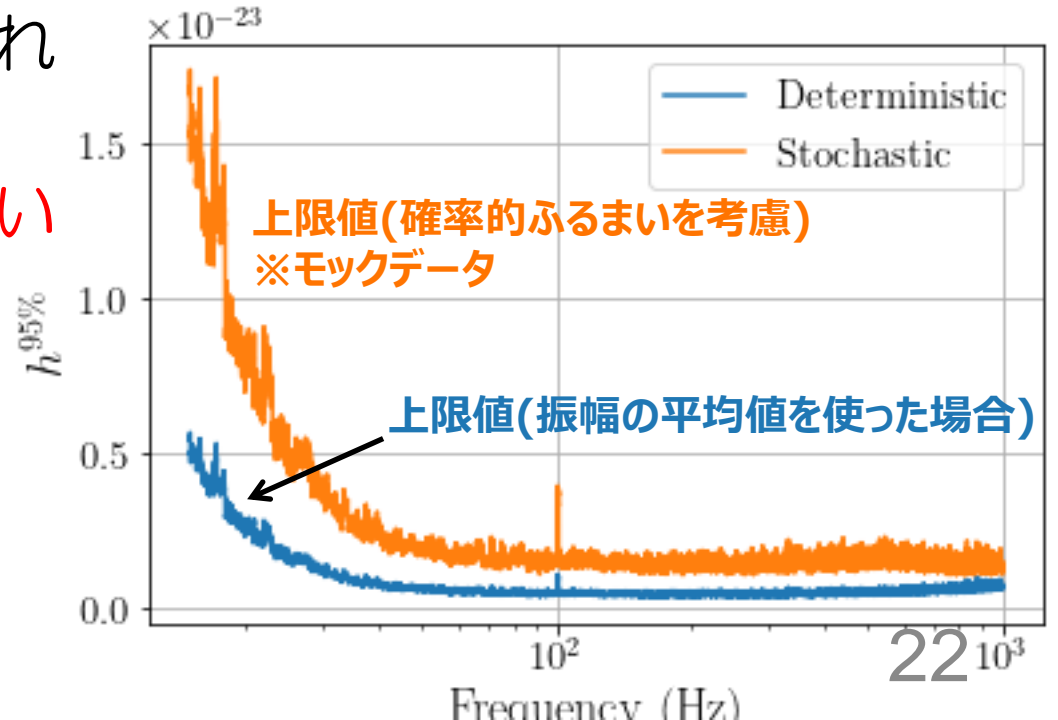
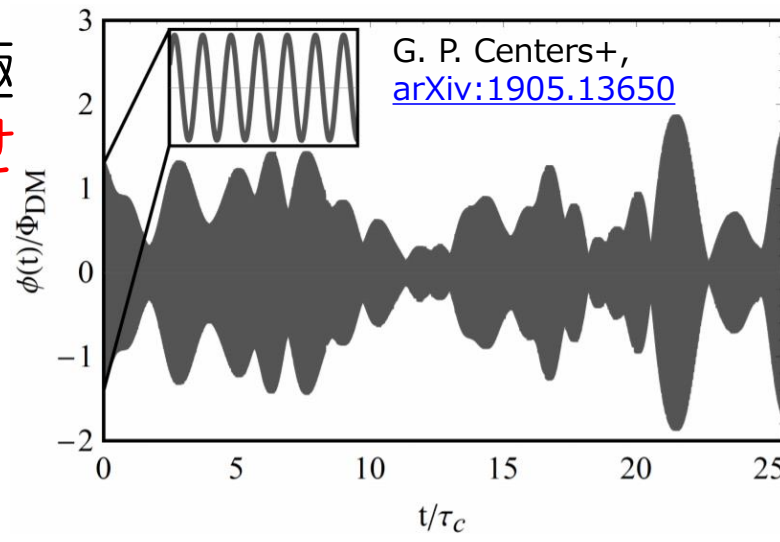
# ダークマター信号の確率的ふるまい

- 信号は様々な運動量、位相、偏極を持つたくさんの波の重ね合わせ
- コヒーレンスタイム程度で振幅が揺らぐ

$$\tau = 2\pi / (m_A v_{DM}^2)$$

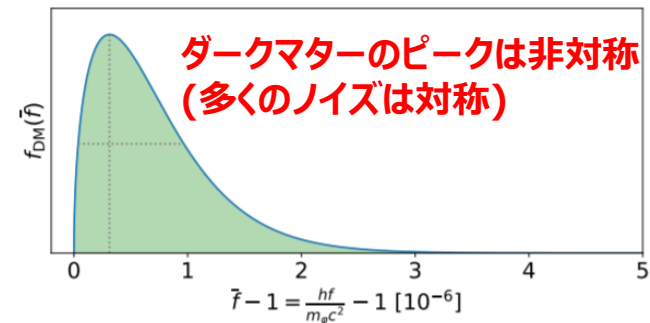
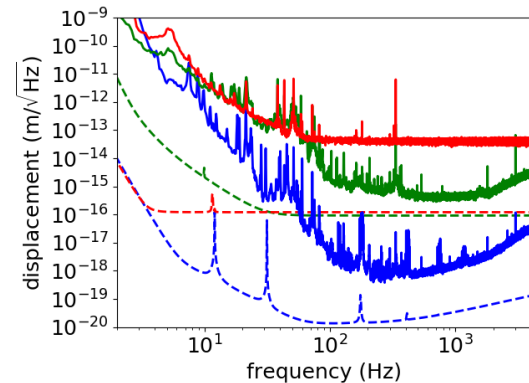
- 低質量帯では、たまたま振幅が小さくて検出されない可能性がある
- こうした確率的ふるまいを考慮に入れた上限値計算手法を確立

H. Nakatsuka+, *in preparation*



# O3GK観測データの解析

- 2セットの $10^4$  秒セグメントの解析を実施中
- 2つのveto
  - ピークの鋭さ(ダークマターなら $\Delta f/f \sim 10^{-6}$ )
  - 2つのセグメント両方で信号が出ているか
- 複数のダークマター信号候補を検出(ほとんどはノイズに埋もれた周波数帯)
- さらなるveto手法を開発中
  - ピークの形の非対称性
  - 既知の雑音ピークとの周波数比較
  - 複数チャンネルで一貫性のある信号になっているか
- 解析結果はLIGO-Virgo-KAGRA  
コラボレーションでレビュー・出版予定





# アクシオンとALPs

- 強いCP問題を解決するために導入された未発見粒子(QCDアクシオン)
- 超ひも理論なども様々なアクシオンに似た粒子 (Axion-like particles; ALPs)を予言
- 光子-アクシオン相互作用を利用する手法が主流
- 特に、強磁場を使って光子とアクシオンを変換させる実験が盛んに行われている



- 磁場による振動やさらなる強磁場化や大型化に課題

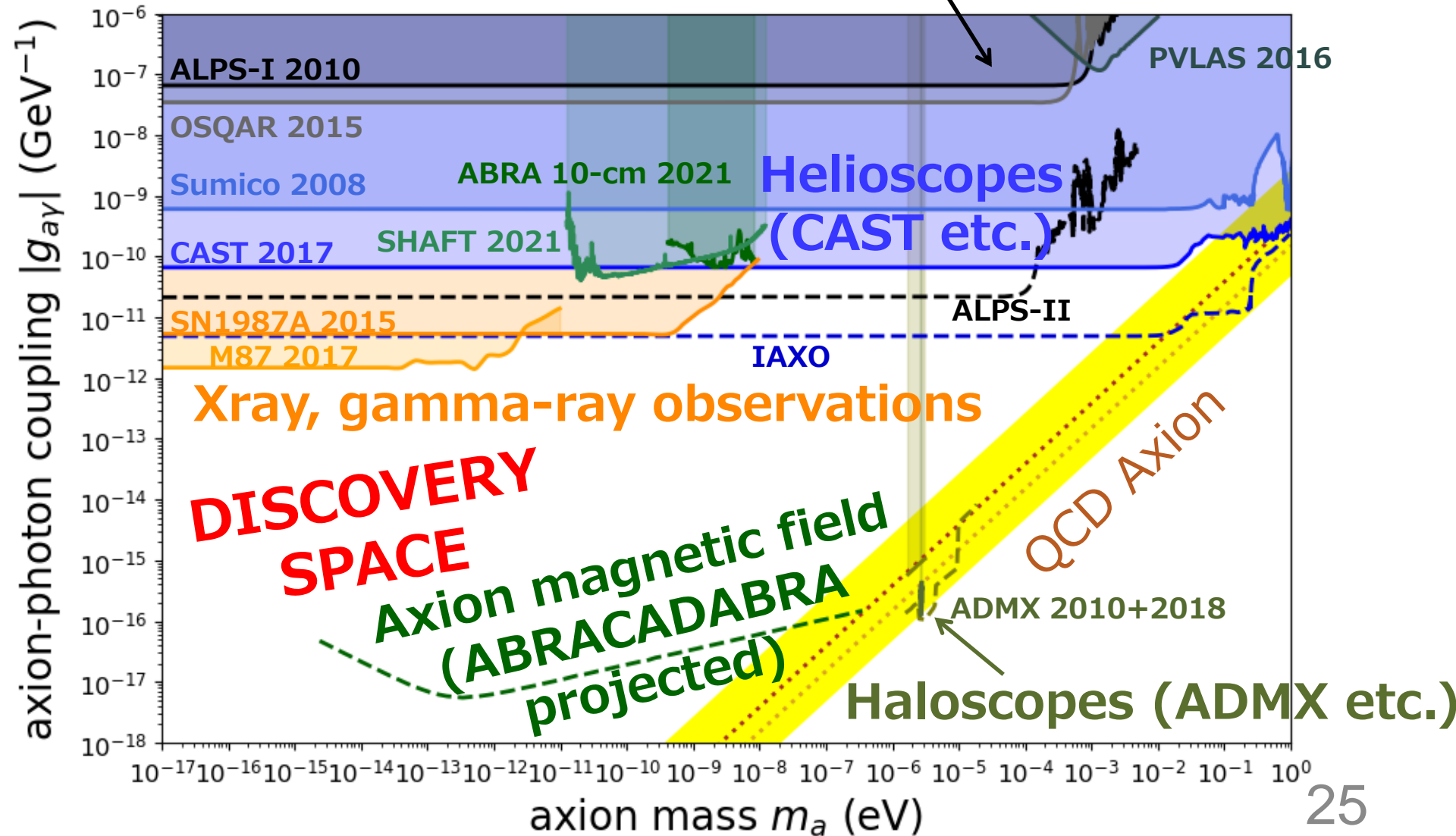
欧州原子核研究機構(CERN)  
CAST





# これまでの上限値

## Light Shining through Wall (ALPS etc.)



# アクシオンと光子の相互作用

- 相互作用により右円偏光と左円偏光に**位相速度差**

$$c_{L/R} = \sqrt{1 \pm \frac{g_{a\gamma} a_0 m_a}{k} \sin(m_a t + \delta_\tau)}$$

相互作用係数

光の波数

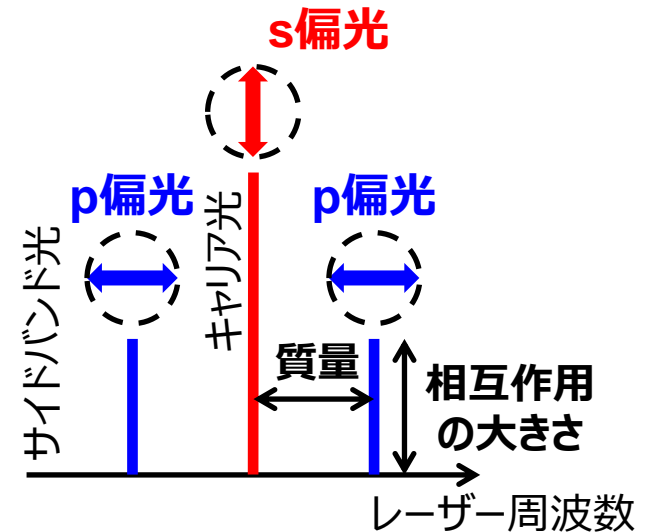
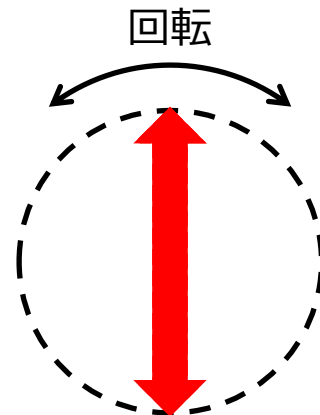
光の振幅  
アクシオン場

質量  
アクシオン

質量に  
対応した周波数  
アクシオン

- 直線偏光の偏光面が**周期的に回転**

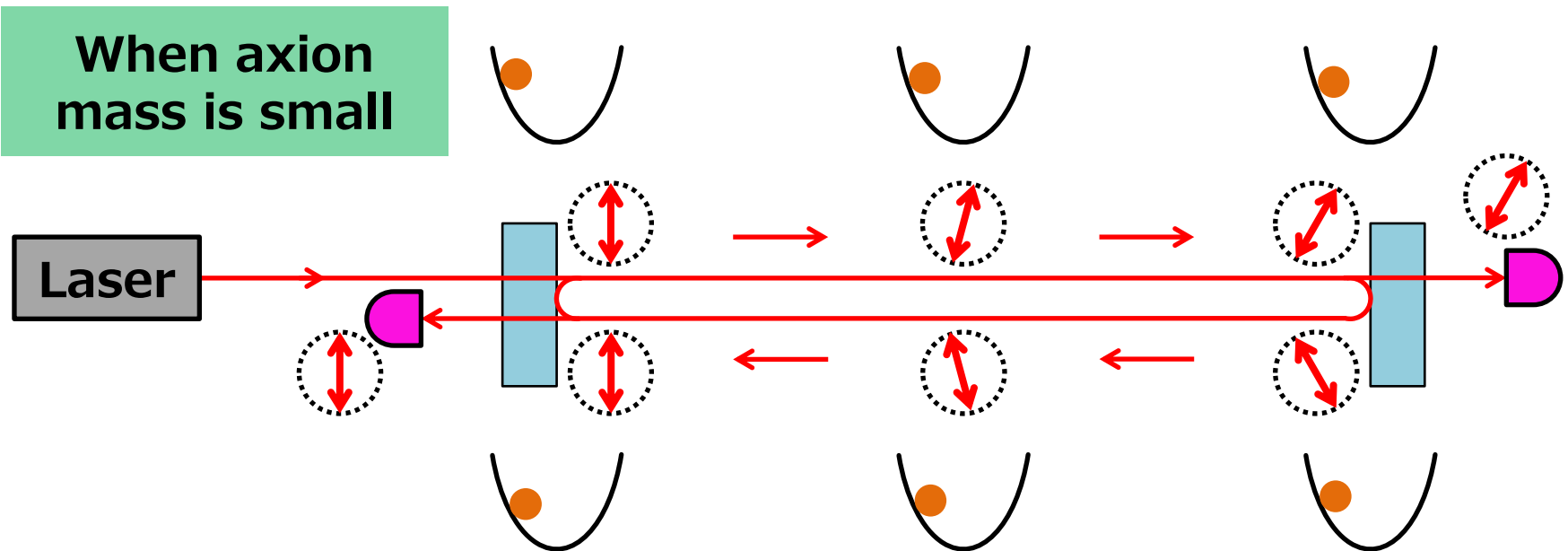
s偏光の場合、  
p偏光成分が  
生じる



- 偏光を利用することで、**磁場を用いない**でアクシオン探索が可能

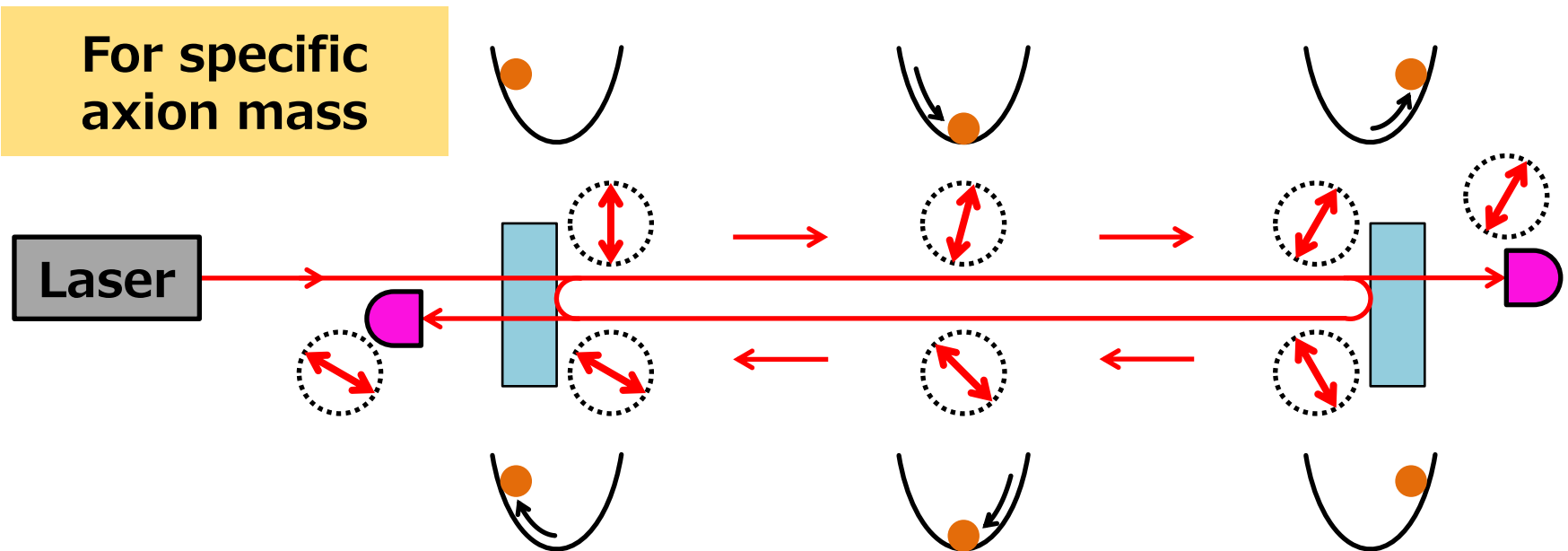
# 線形光共振器による探索

- 鏡での反射により偏光が反転してしまうため、アキシオンの振動周期が光の往復時間より長い場合は反射光での探索は困難
- 長基線長であれば透過光での探索は可能



# 線形光共振器による探索

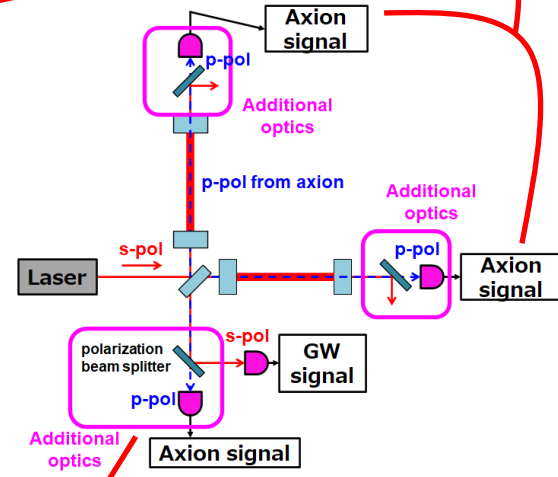
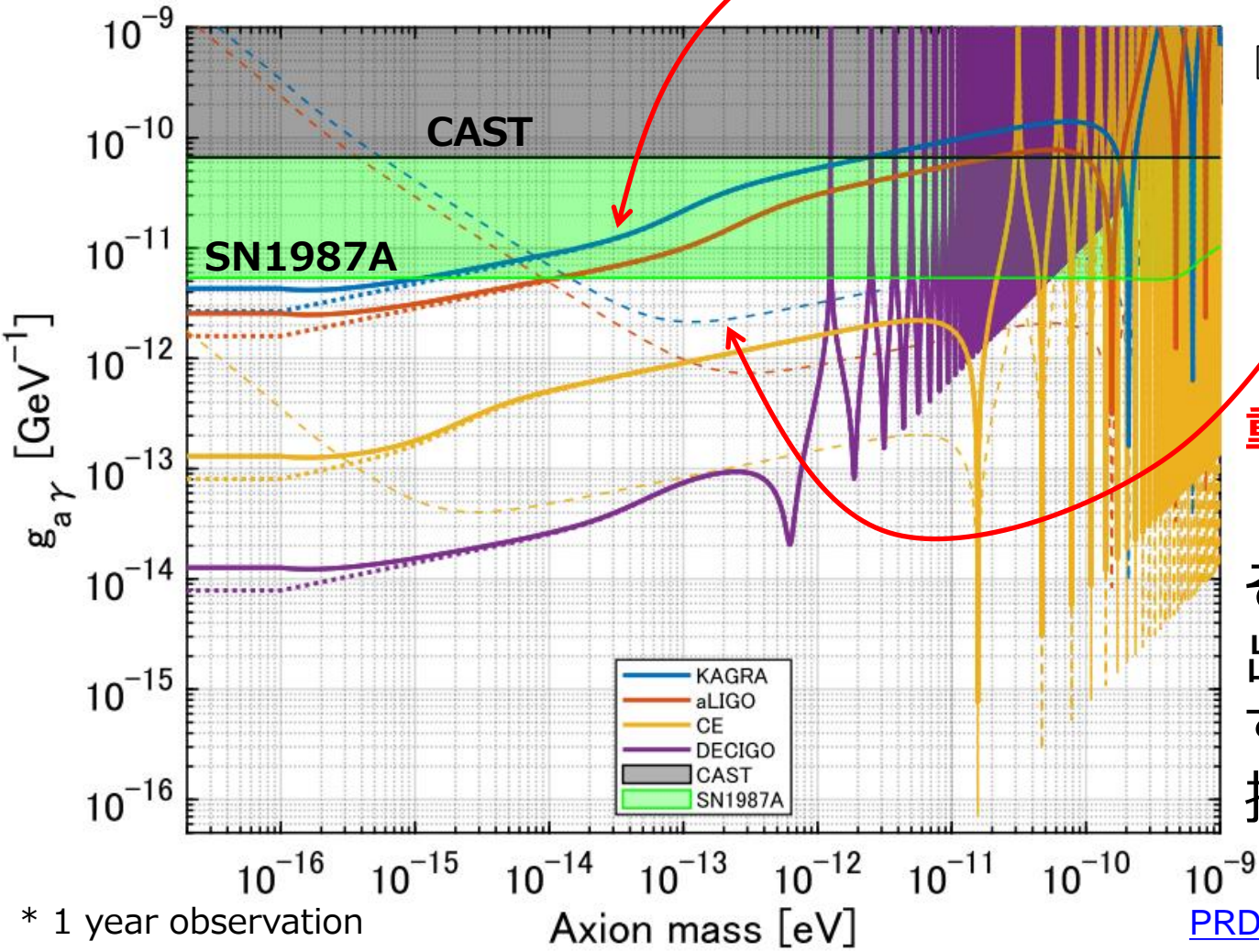
- 光の往復時間がアキシオン振動周期の奇数倍のときは、鏡による偏光の反転を利用し、反射光での信号増幅が可能





# KAGRAのアクシオン感度

腕共振器の  
透過光ポート



重力波検出ポート

それぞれの干渉計  
出力ポートを利用  
することで相補的な  
探索が可能

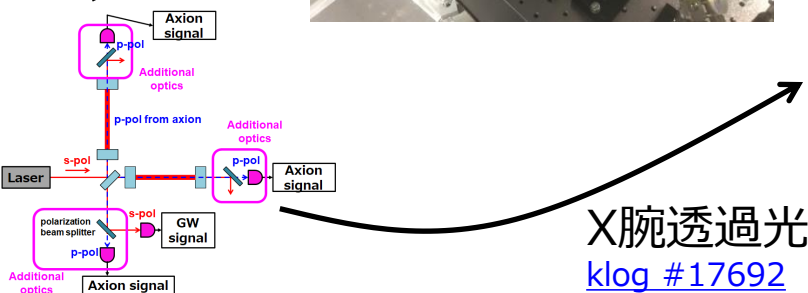
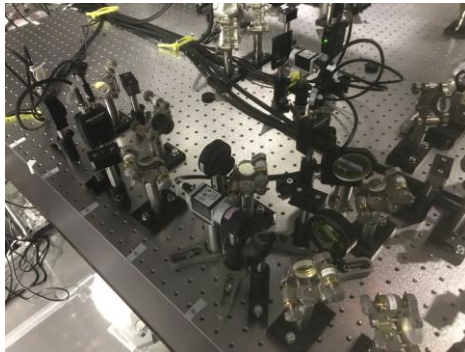
\* 1 year observation



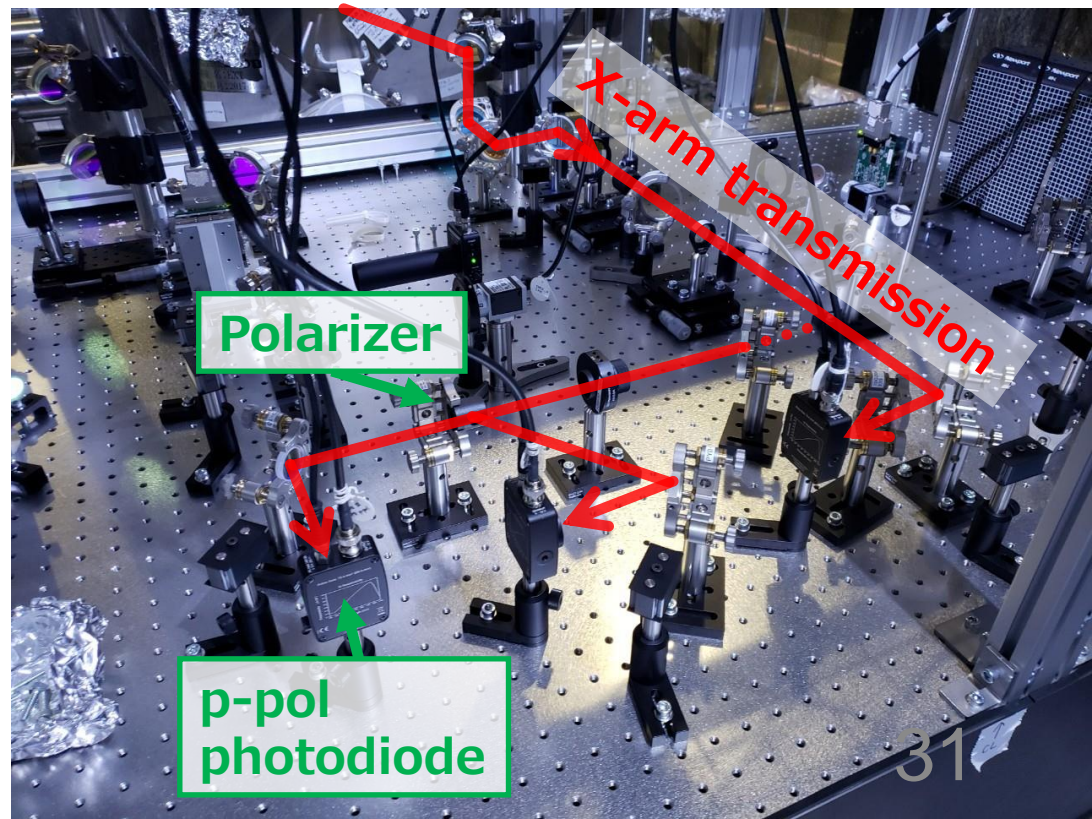
# アクシオン光学系を導入

- 2021年7月にX腕透過ポート、  
12月にY腕透過ポートに偏光光学系を導入
- データ取得系に接続済み
- 次期観測運転O4(2022年12月中旬開始予定)で  
初のアクシオン  
データ取得を狙う

Y腕透過光  
[klog #19227](#)



X腕透過光  
[klog #17692](#)



# まとめ

- レーザー干渉計はダークマター探索の**新しい扉**
- 特に**超軽量ダークマター**は周期的な信号を生み、レーザー干渉計で検出しやすく、理論的にも高い注目
- **KAGRA**を用いた超軽量ダークマター探索が進行中
  - **ゲージボゾンダークマター**  
2020年O3GKデータを用いた**初解析**が進行中
  - **アクシオンダークマター**  
偏光光学系**導入済み**  
次期観測運転O4で探索予定
- どちらも**重力波探索と同時に可能**

ダークマターの正体は何か？