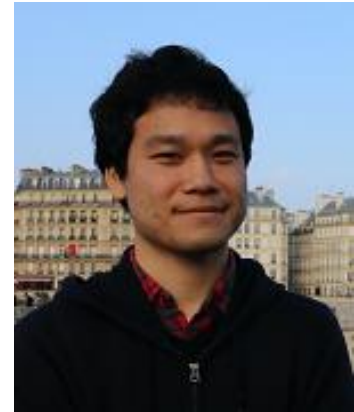


大型低温重力波望遠鏡 KAGRAを用いた 超軽量ゲージボゾン ダークマター探索

道村唯太

東京大学 大学院理学系研究科 物理学専攻

michimura@phys.s.u-tokyo.ac.jp



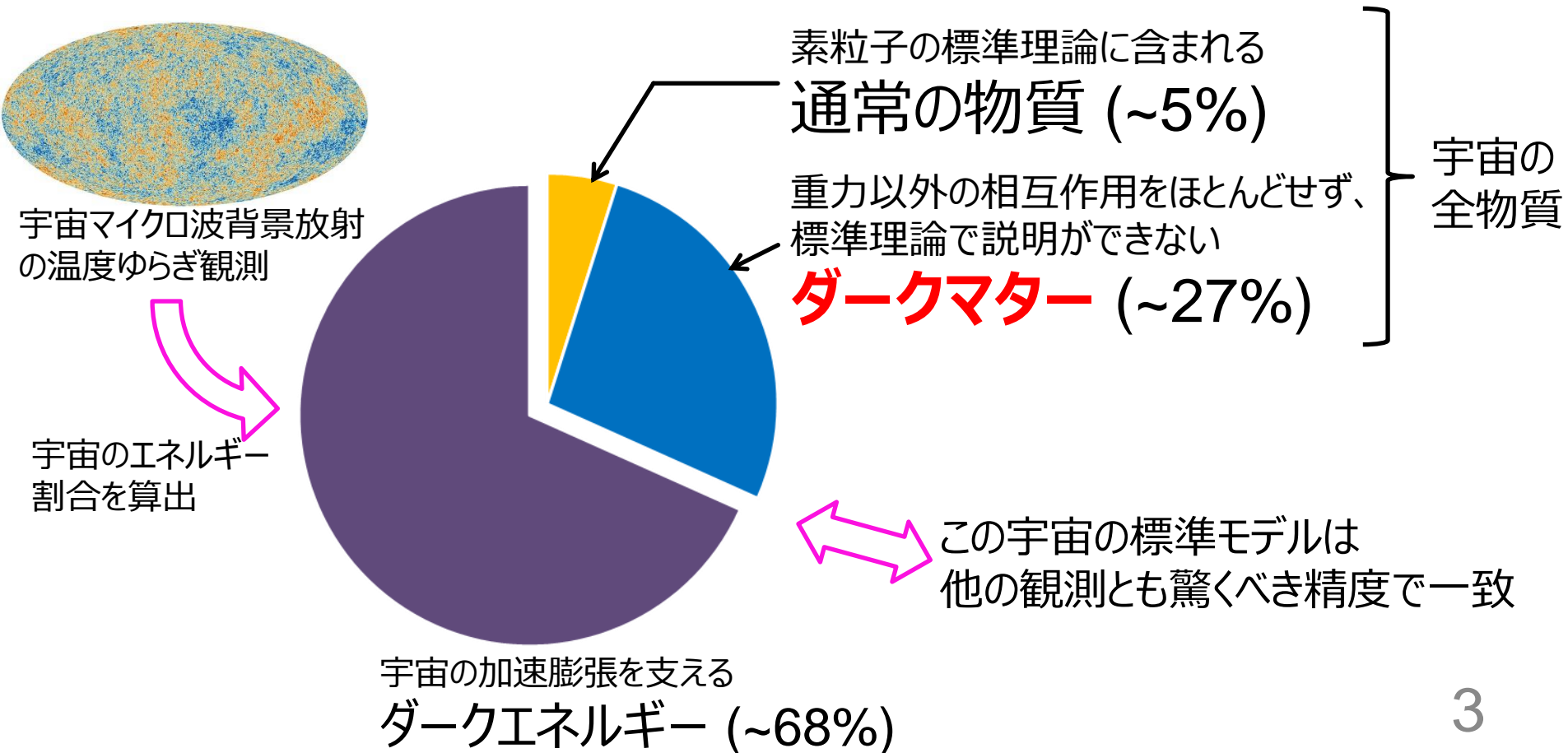
藤田智弘, 桑潤哉, 森崎宗一郎, 中塚洋佑, 西澤篤志, 小幡一平
for the KAGRA Collaboration

概要

- ゲージボゾンダークマターは異なる材質に異なる大きさの非標準的な力を物体に加える
- KAGRAを用いて鏡に働く非標準的な力を探索することにより、これまでの上限値を1桁以上更新する感度で探索可能
- レーザー干渉計型重力波望遠鏡としては唯一、サファイア鏡を使ったKAGRAならではの探索
YM, T. Fujita, S. Morisaki, H. Nakatsuka, I. Obata,
[Phys. Rev. D **102**, 102001 \(2020\)](#)
- KAGRAの2020年の観測データを利用した解析を実施中

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

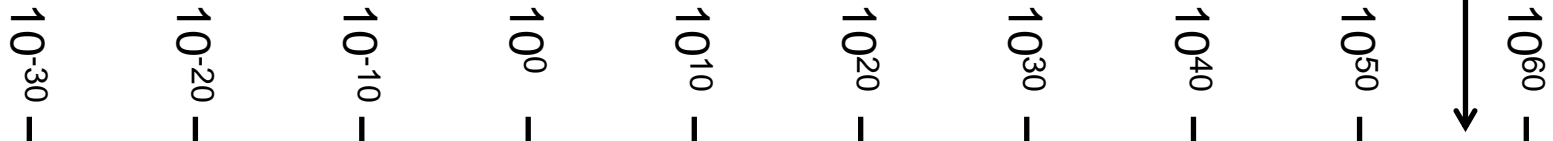


これまでのダークマター探索

- 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

ダークマターの質量 (GeV)

太陽質量
($1.1e57$ GeV)



波長が矮小銀河のサイズを超えるので排除

超軽量粒子

軽い粒子

WIMP

重い粒子

複合物質・原始ブラックホールなど

重カマイクロレンズやCMB観測から排除

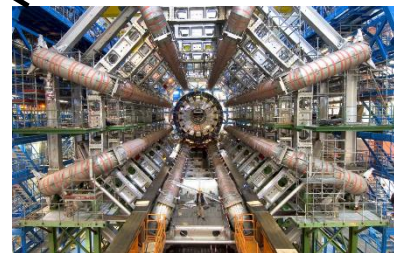


2.4 Hz ~ 2.4 kHz
($1e-14$ ~ $1e-11$ eV)

レーザー干渉計
による探索が近年注目されている



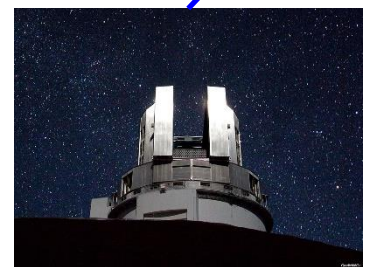
XENON1Tなど
地下実験



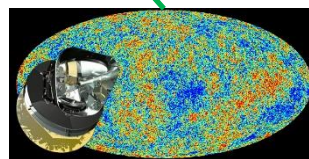
LHC
巨大ハドロン加速器

ヒッグス粒子
(125 GeV)

プランク質量
($1.1e19$ GeV)



すばる望遠鏡など



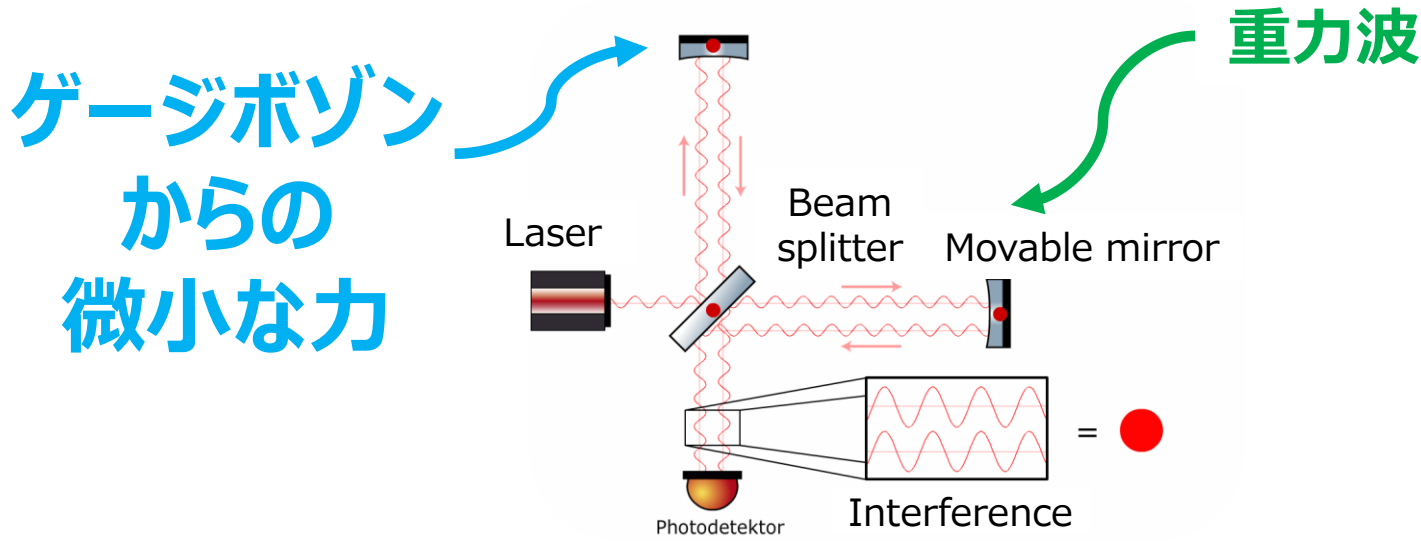
宇宙マイクロ波背景放射観測

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

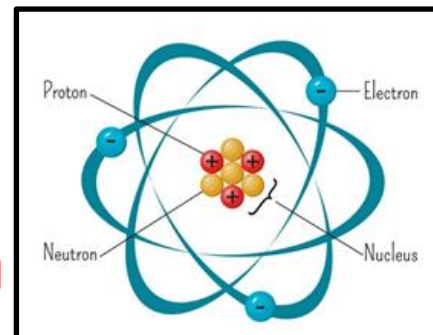
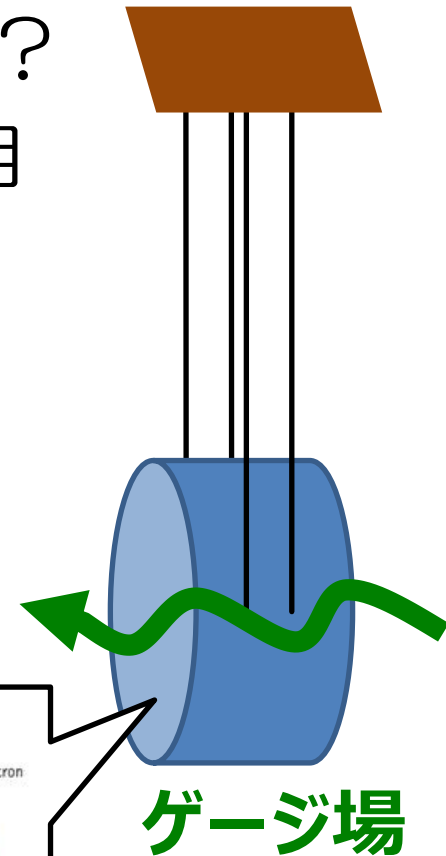
$$f = 242 \text{ Hz} \left(\frac{m_{\text{DM}}}{10^{-12} \text{ eV}} \right)$$

- 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



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**



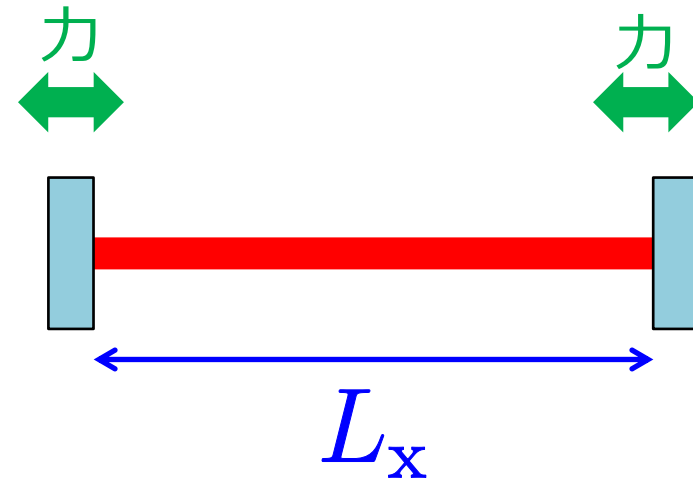
ゲージ場からの周期的な力

- 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 ρ_{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

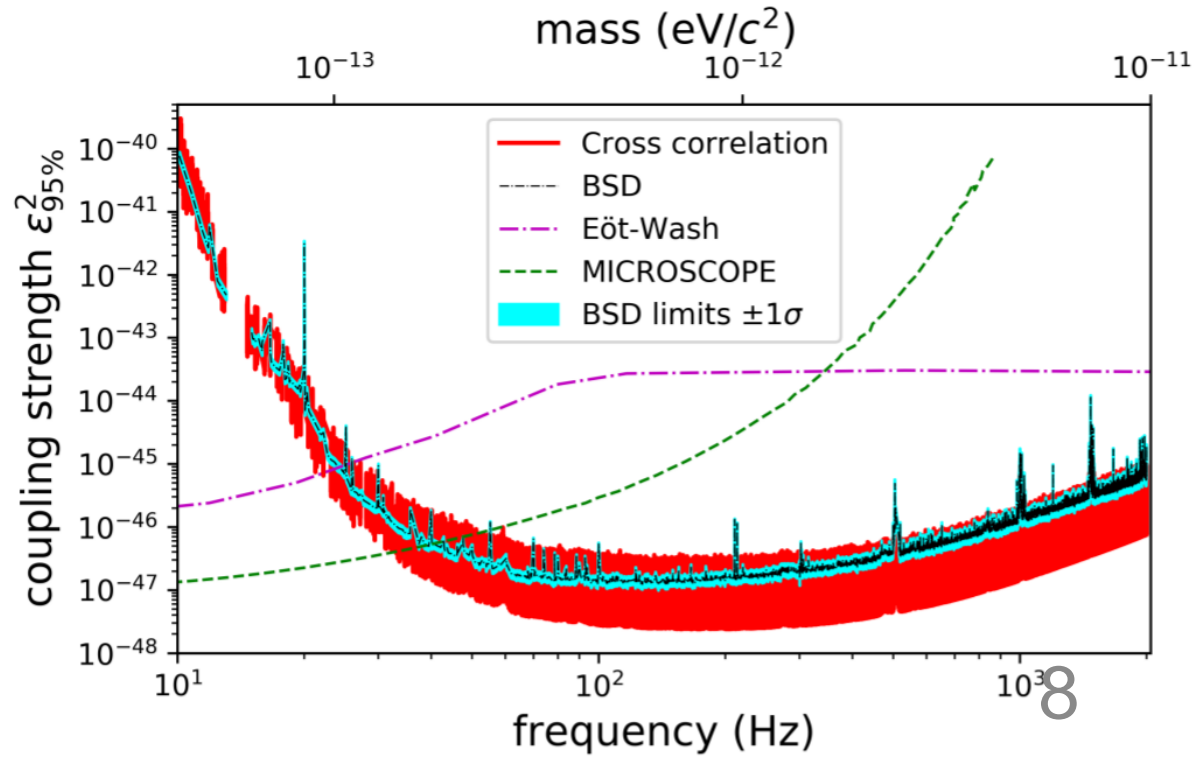
- 重力波望遠鏡LIGOとVirgoの長基線長を活かし、**O3データ**を利用した解析がすでに行われた

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

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

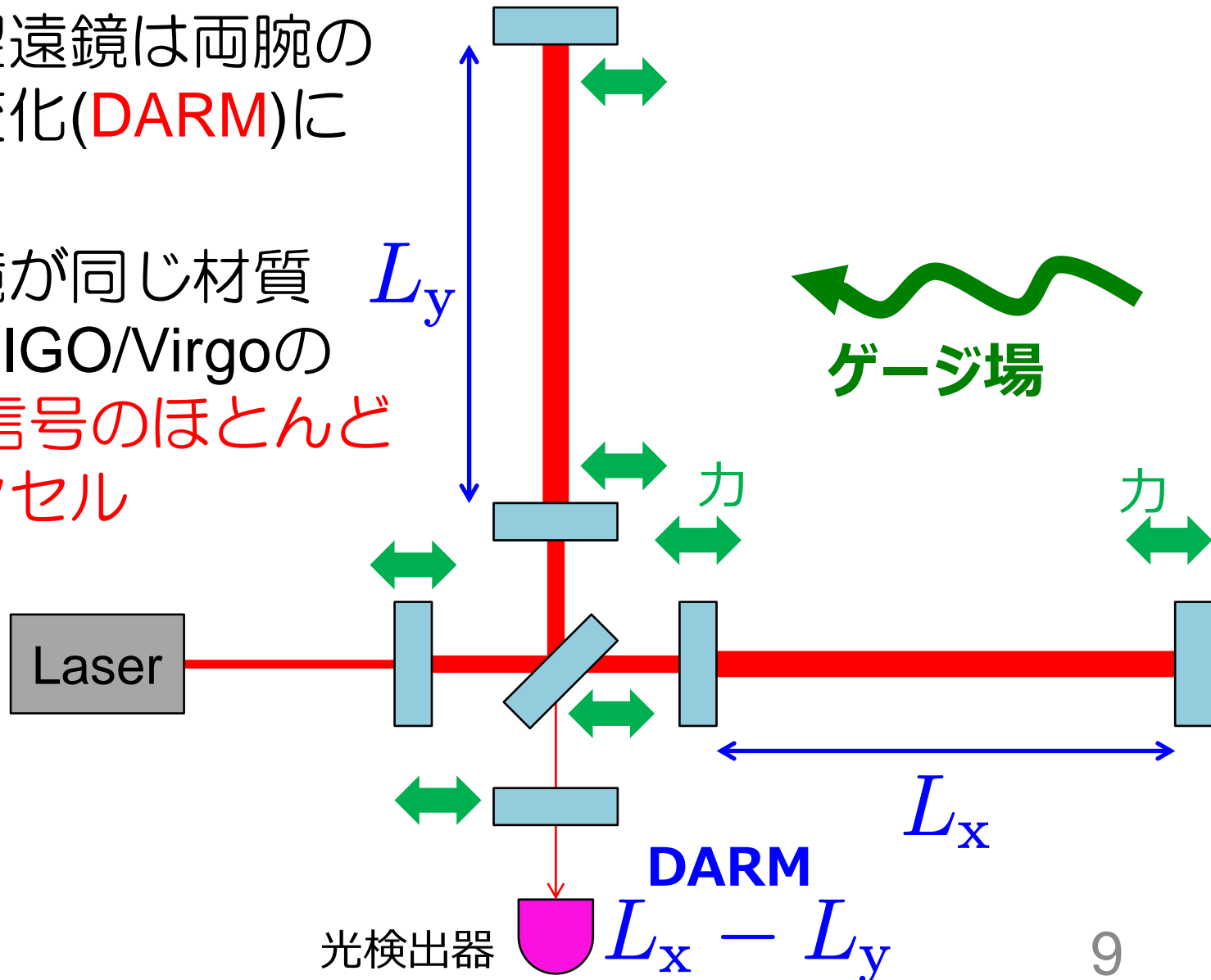
- 等価原理検証実験を**更新する上限値**
(バリオン数に結合するゲージボゾンに対して)

- ではなぜ我々は
KAGRAで
やろうとして
いるのか？



重力波望遠鏡による探索

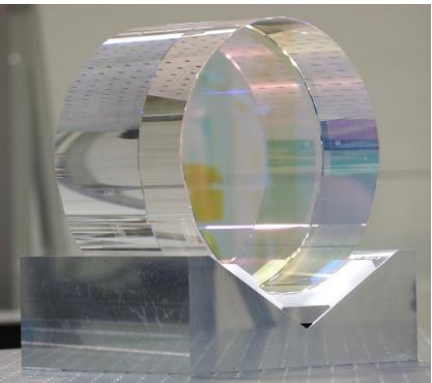
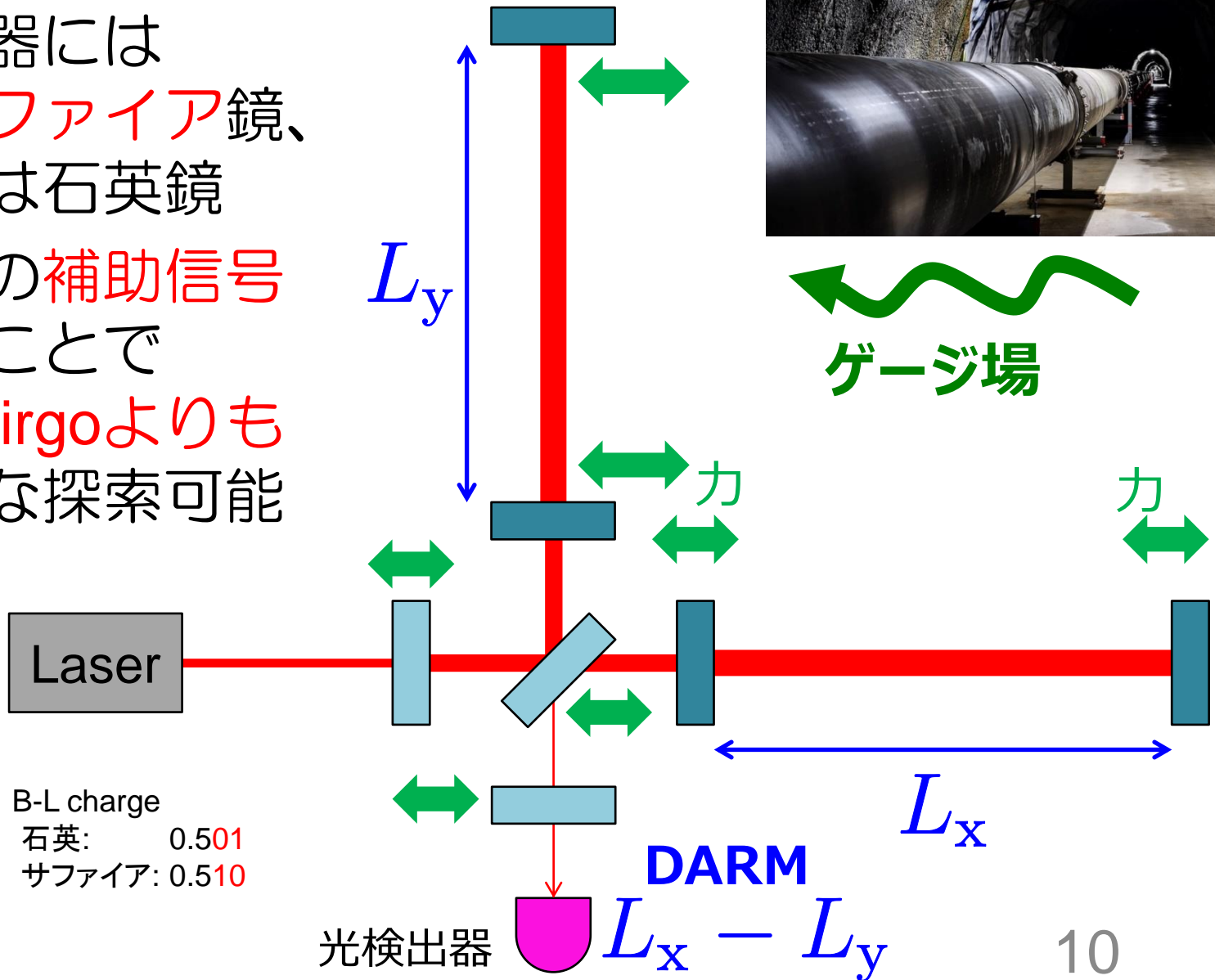
- 重力波望遠鏡は両腕の差動長変化(DARM)に高感度
- 全ての鏡が同じ材質の場合(LIGO/Virgoの場合)は信号のほとんどがキャンセル



KAGRAによる探索



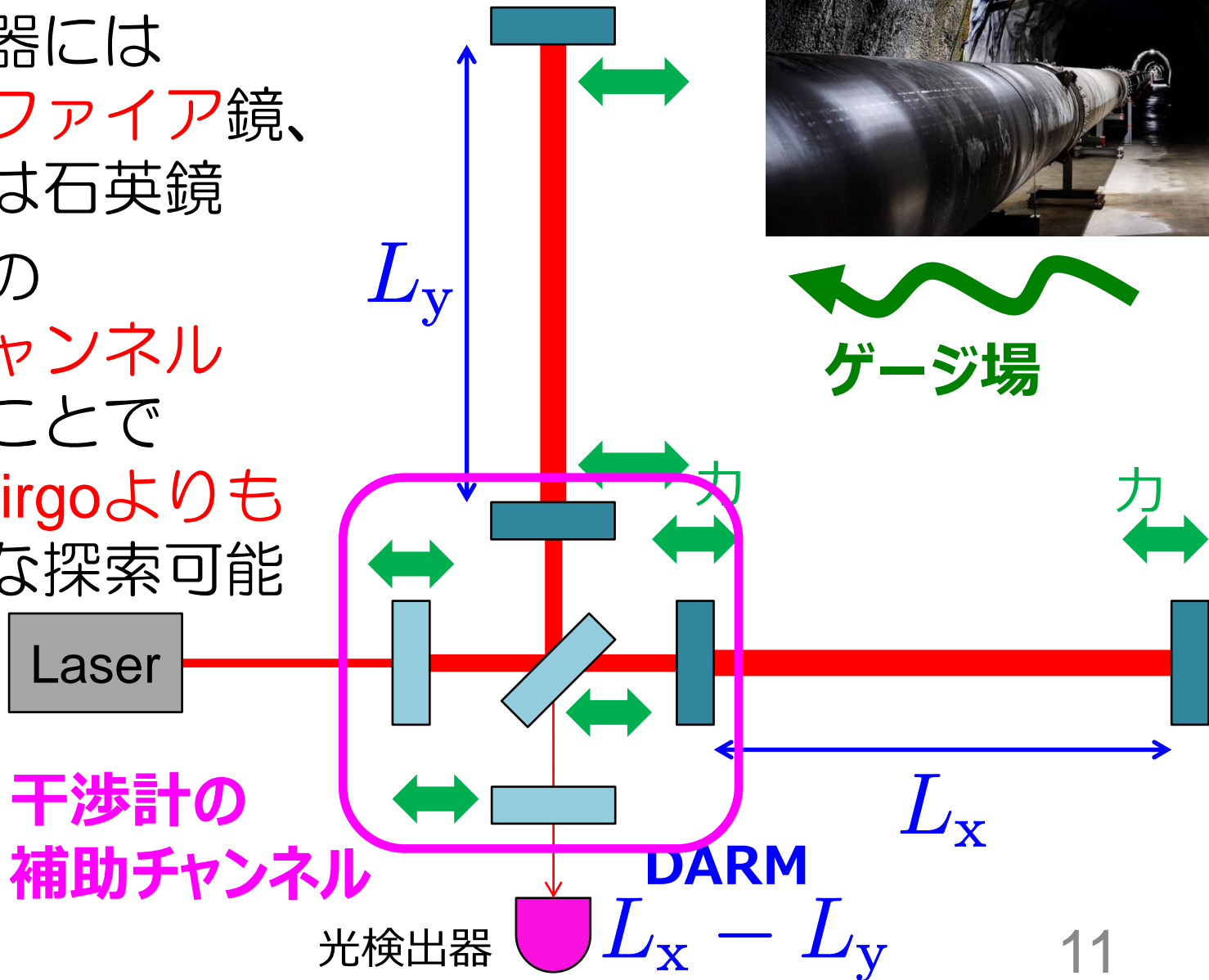
- 腕共振器には低温サファイア鏡、その他は石英鏡
- 干渉計の補助信号を使うことでLIGO/Virgoよりも高感度な探索可能



KAGRAによる探索

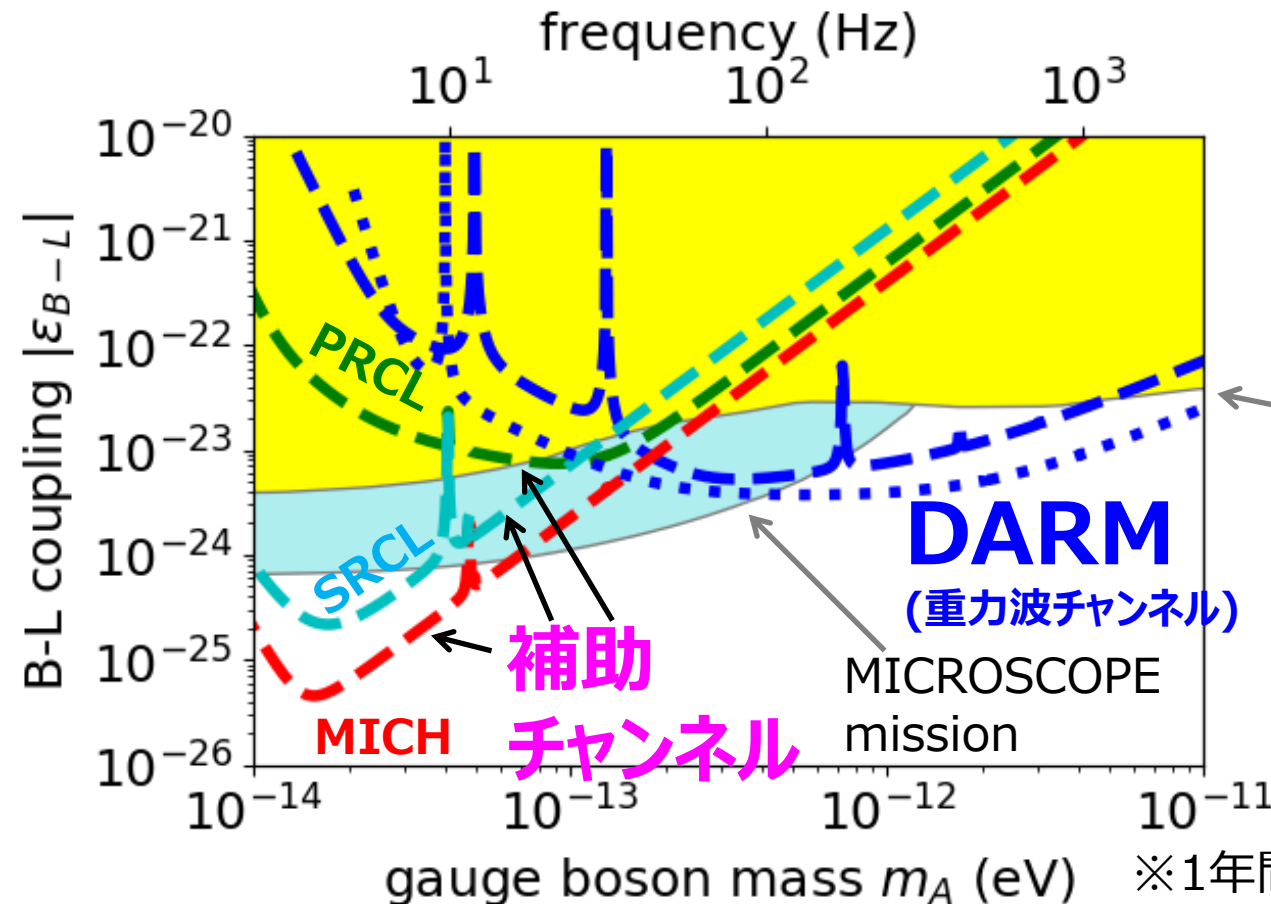


- 腕共振器には低温サファイア鏡、その他は石英鏡
- 干渉計の補助チャンネルを使うことでLIGO/Virgoよりも高感度な探索可能



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 \(2021\)](#)

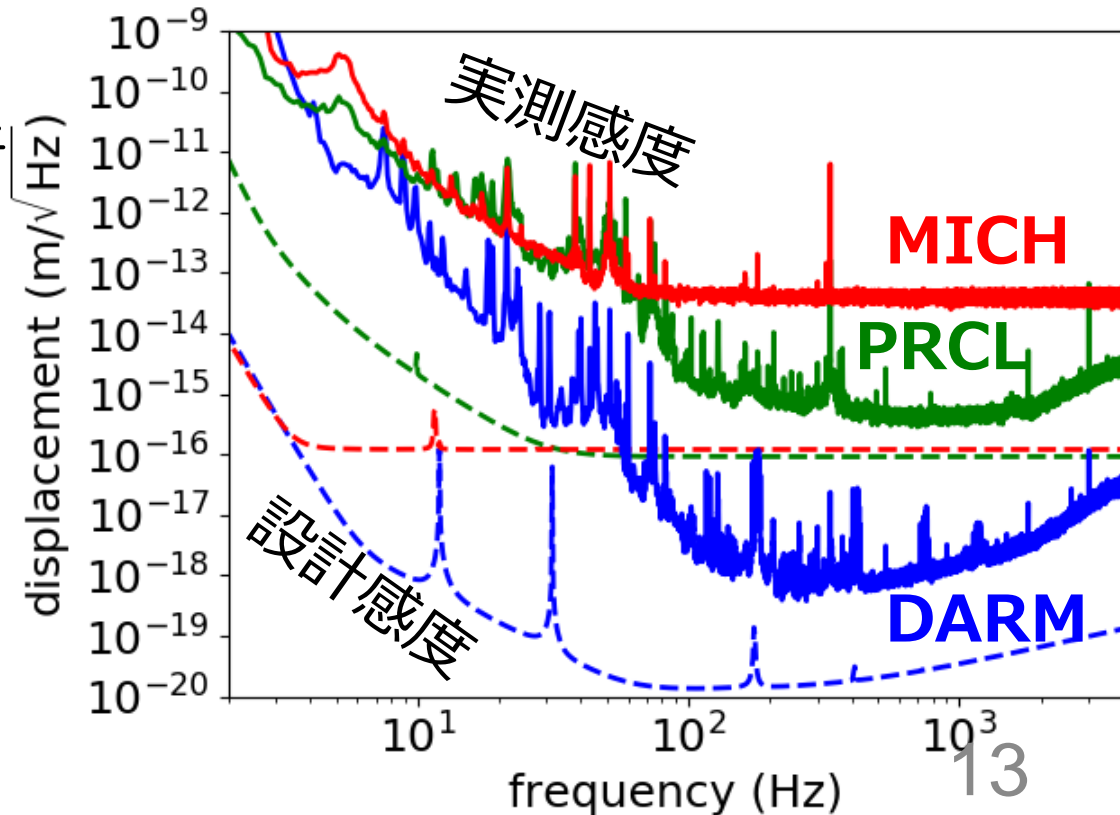
Eöt-Wash
torsion pendulum



※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

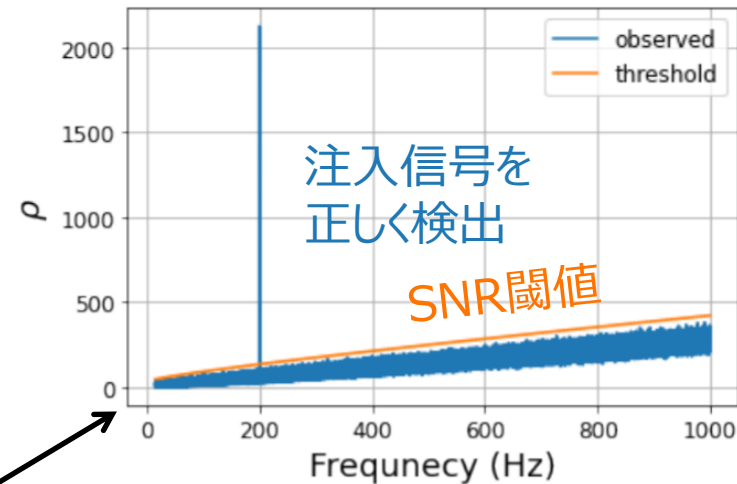
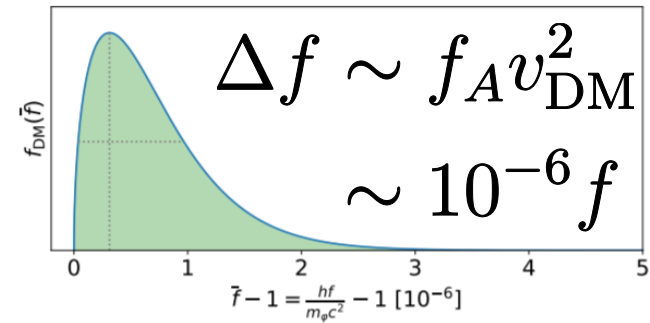
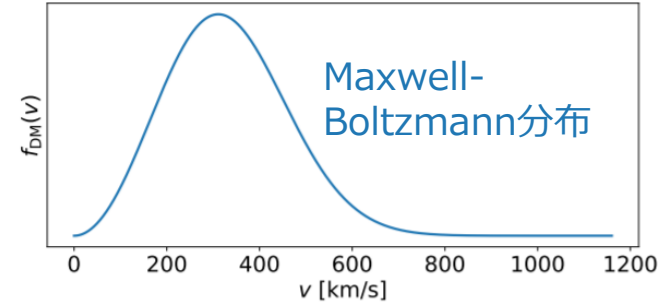
推定感度

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

観測時間

- ρ が χ^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
- ρ 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

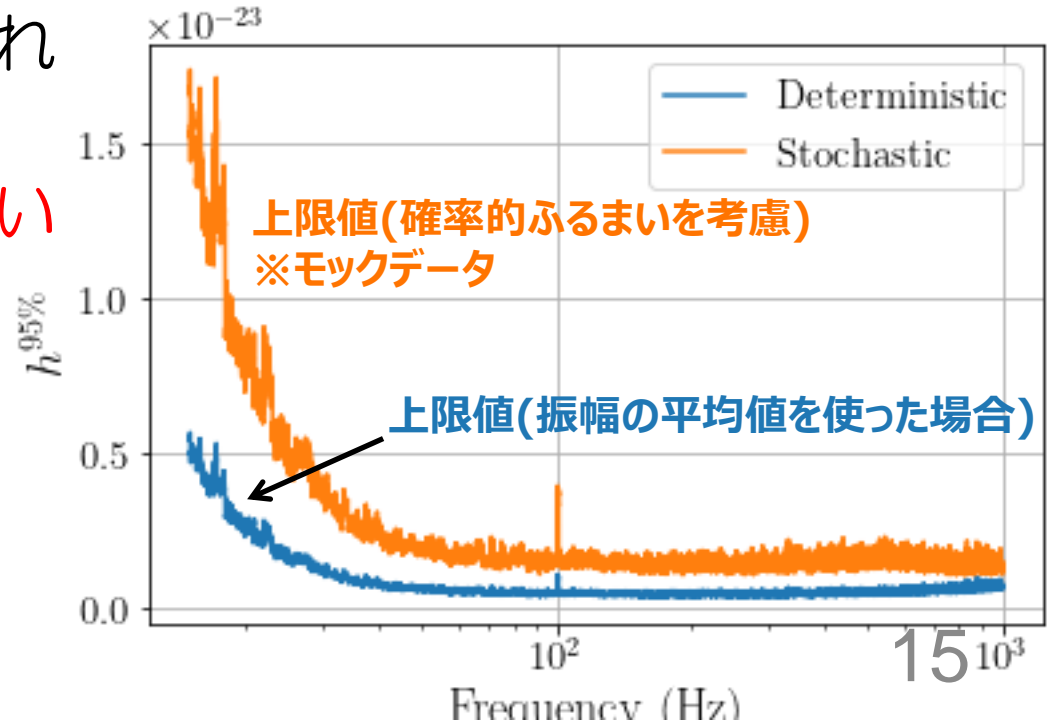
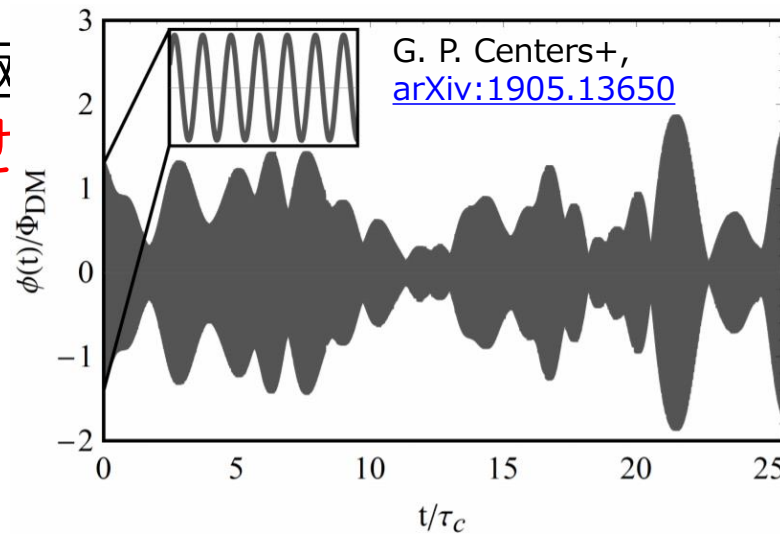
ダークマター信号の確率的ふるまい

- 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

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

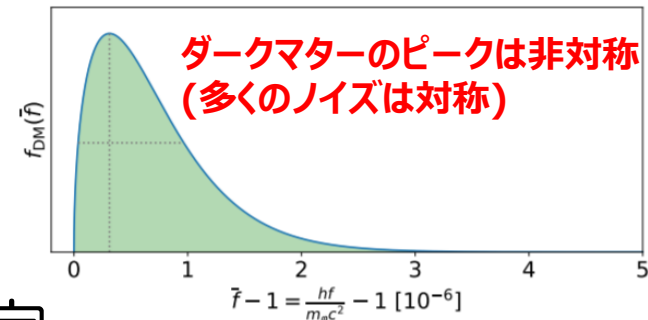
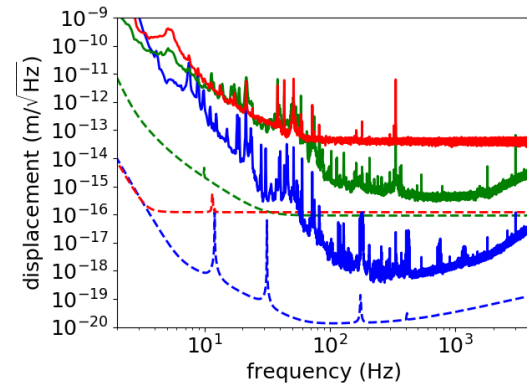
- 低質量帯では、たまたま振幅が小さくて検出されない可能性がある
- こうした確率的ふるまいを考慮に入れた上限値計算手法を確立

H. Nakatsuka+, *in preparation*



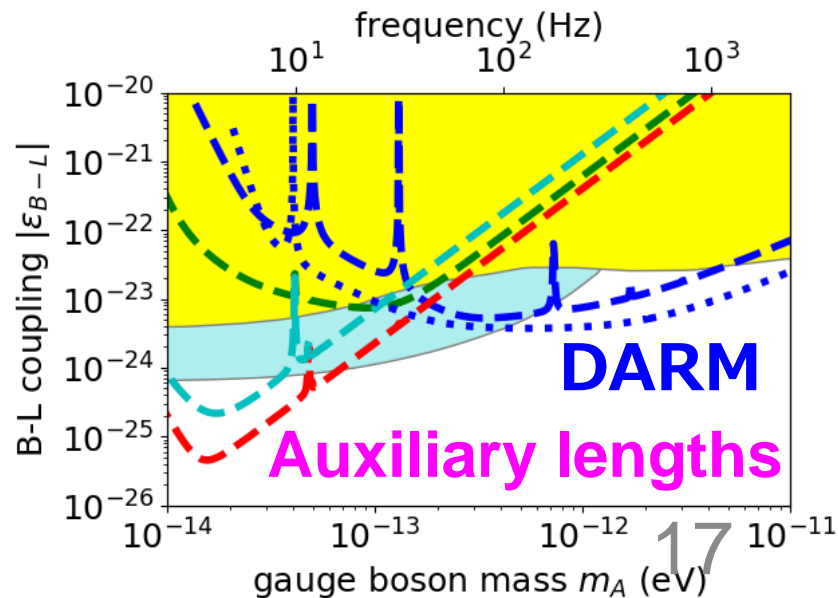
O3GK観測データの解析

- 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予定



まとめと今後の展望

- KAGRAはサファイア鏡と石英鏡を使っているため
独特なゲージボゾンダークマター探索が可能
- データ解析パイプラインを開発
- 2020年に得られたKAGRAの実データに適用し、パイプラインの動作を確認
- さらにvetoを実施中
- 2022年以降、さらなる高感度での観測運転(O4)を予定
- 乞うご期待！



研究会VLDM2021の宣伝

- Workshop on Very Light Dark Matter 2021
<https://indico.ipmu.jp/event/392/>
2021年9月27日から29日
オンライン開催



- 学術変革A ダークマター
A01班(軽いダークマター)と
B01班(レーザー干渉計)の合同研究会
ダークマターの正体は何か？

広大なディスカバリースペースの網羅的研究

What is dark matter? - Comprehensive study of the huge discovery space in dark matter

文部科学省
科学研究費助成事業
学術変革領域研究
(2020-2024)