

さきがけ「革新光」

2021年6月25日

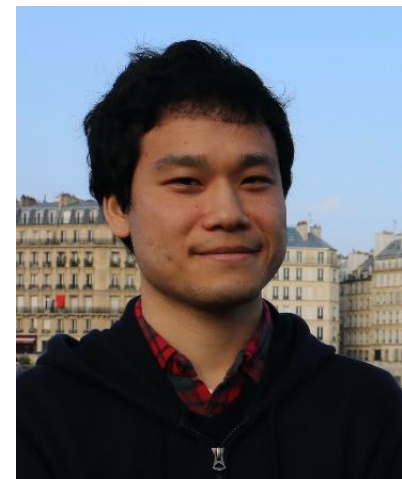
2021年度第1回領域会議 @ オンライン

超精密偏光計測が可能にする 新しいダークマター探索

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



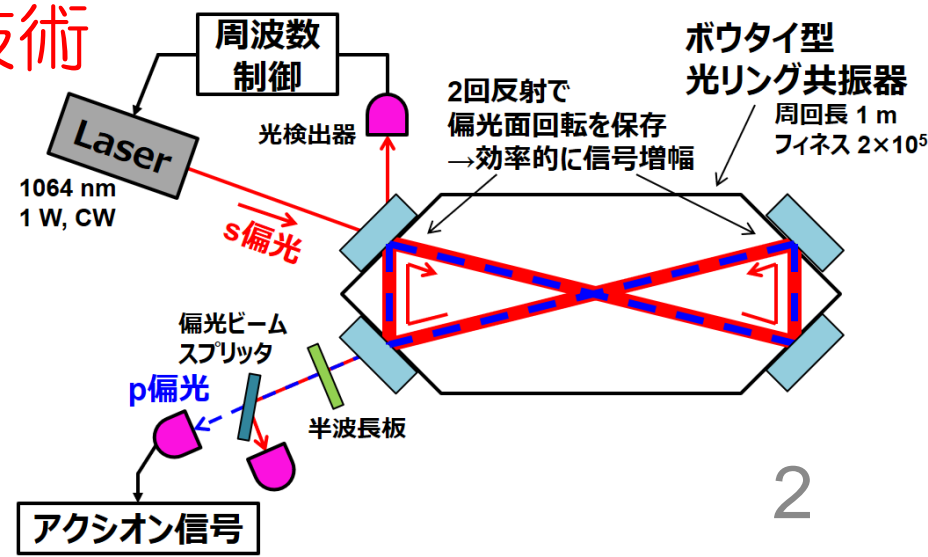
さきがけ研究の概要

- レーザー干渉計の偏光計測により、
超軽量ダークマターを初探索
 - ダークマター有力候補であるアクシオンに着目
 - 独自の新手法 [PRL 121, 161301 \(2018\)](#)
強磁場不要
ボウタイ共振器で偏光信号を効率的に増幅
 - 達成目標: 世界最高精度での探索

- 発展させる革新的な光技術

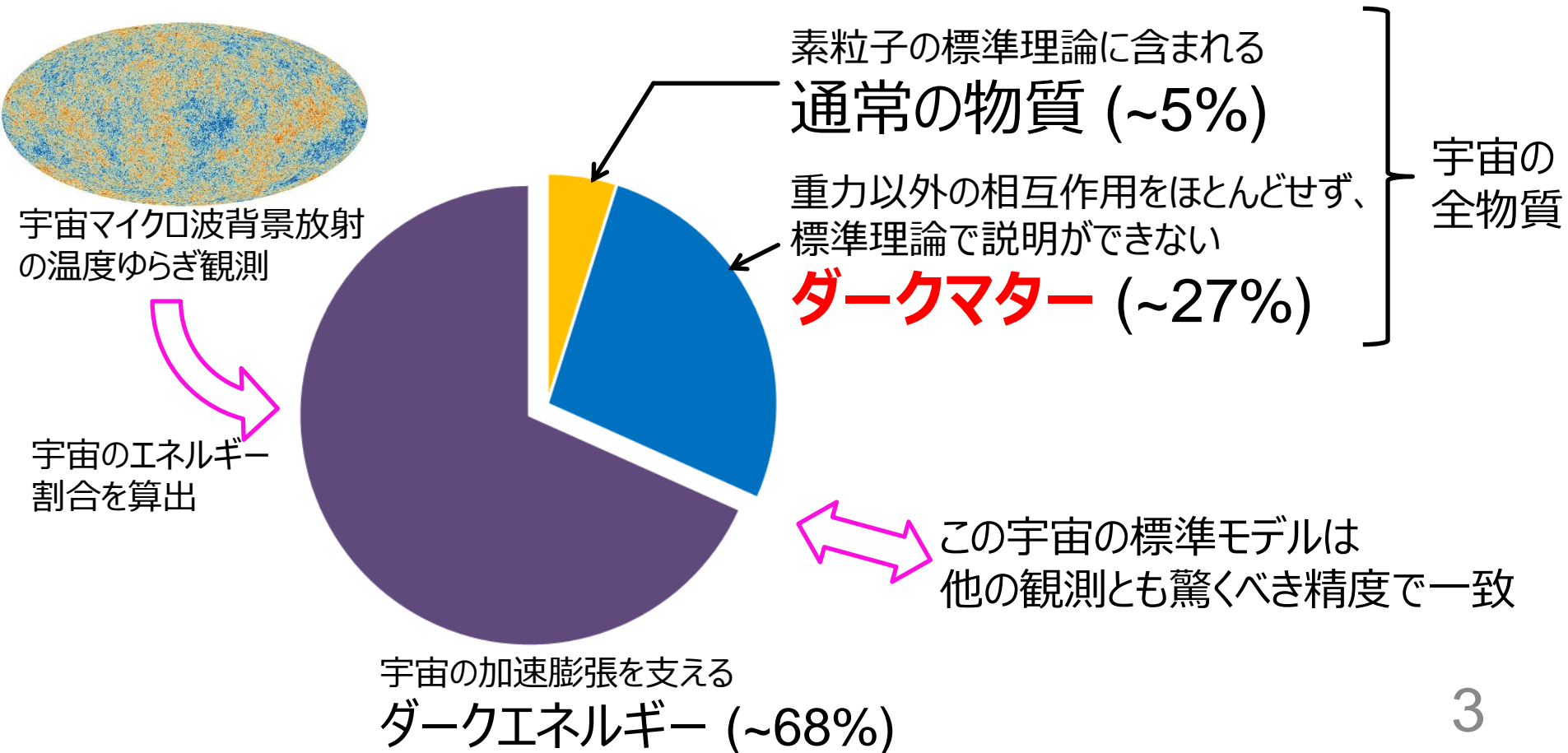
- 超精密偏光計測
- 超低振動光共振器

- ダークマター探索の
新局面を開拓



背景: 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

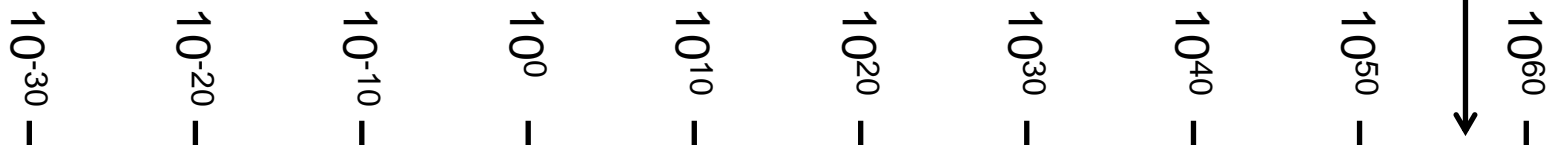


背景: ダークマター探索

- 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

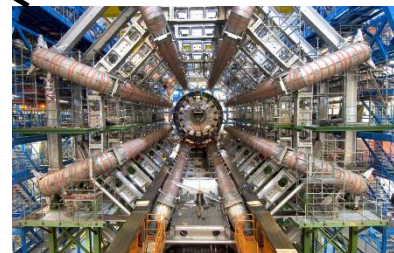
重力マイクロレンズやCMB観測から排除



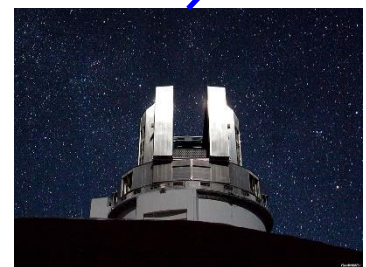
本研究で
レーザー干渉計
による初探索



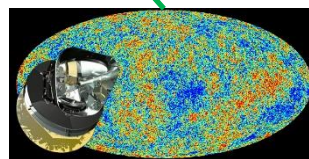
XENON1Tなど
地下実験



LHC
巨大ハドロン加速器



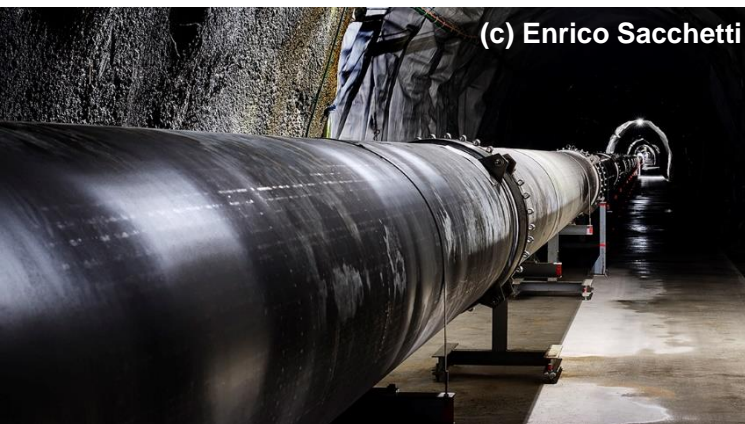
すばる望遠鏡など



宇宙マイクロ波
背景放射観測

レーザー干渉計による新しい探索

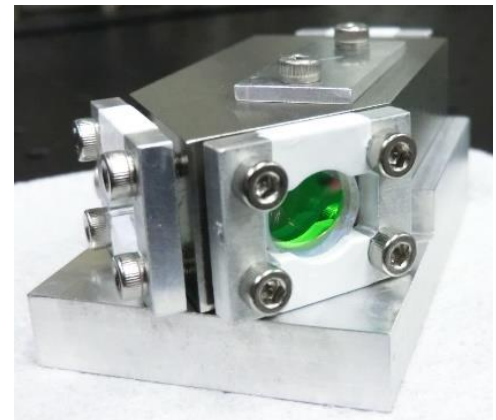
- 特に、未発見粒子の**アクシオン**に着目
 - 光子とわずかに相互作用
 - 超ひも理論などもアクシオンの存在を予言
 - 近年高い注目を浴びている
 - ※ XENON1Tの2020年6月の発表もアクシオン検出の可能性を示唆
- アクシオンが引き起こす**光の偏光状態の変化**を精密に計測することで、**かつてない精度で探索**
 - 信号が初検出される可能性を秘めた研究
 - 重力波検出やローレンツ不変性検証実験の経験を応用



(c) Enrico Sacchetti

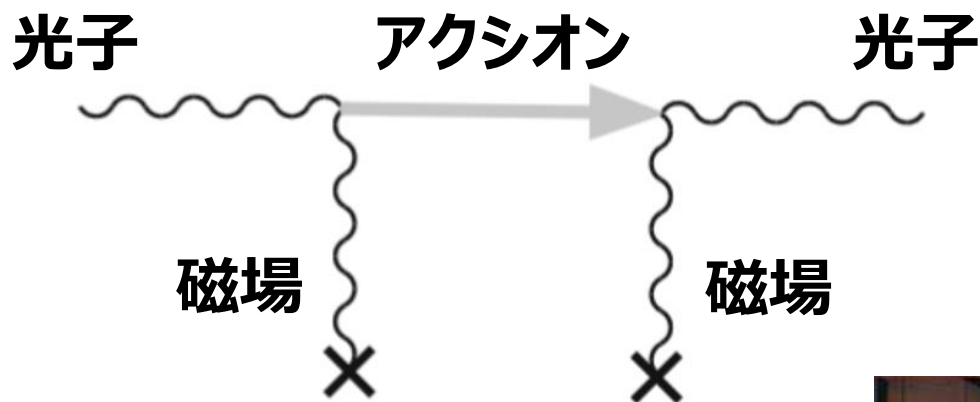
KAGRA

YM+,
[PRL 110, 200401 \(2013\)](#)



これまでのアクシオン探索

- 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



プリマコフ効果

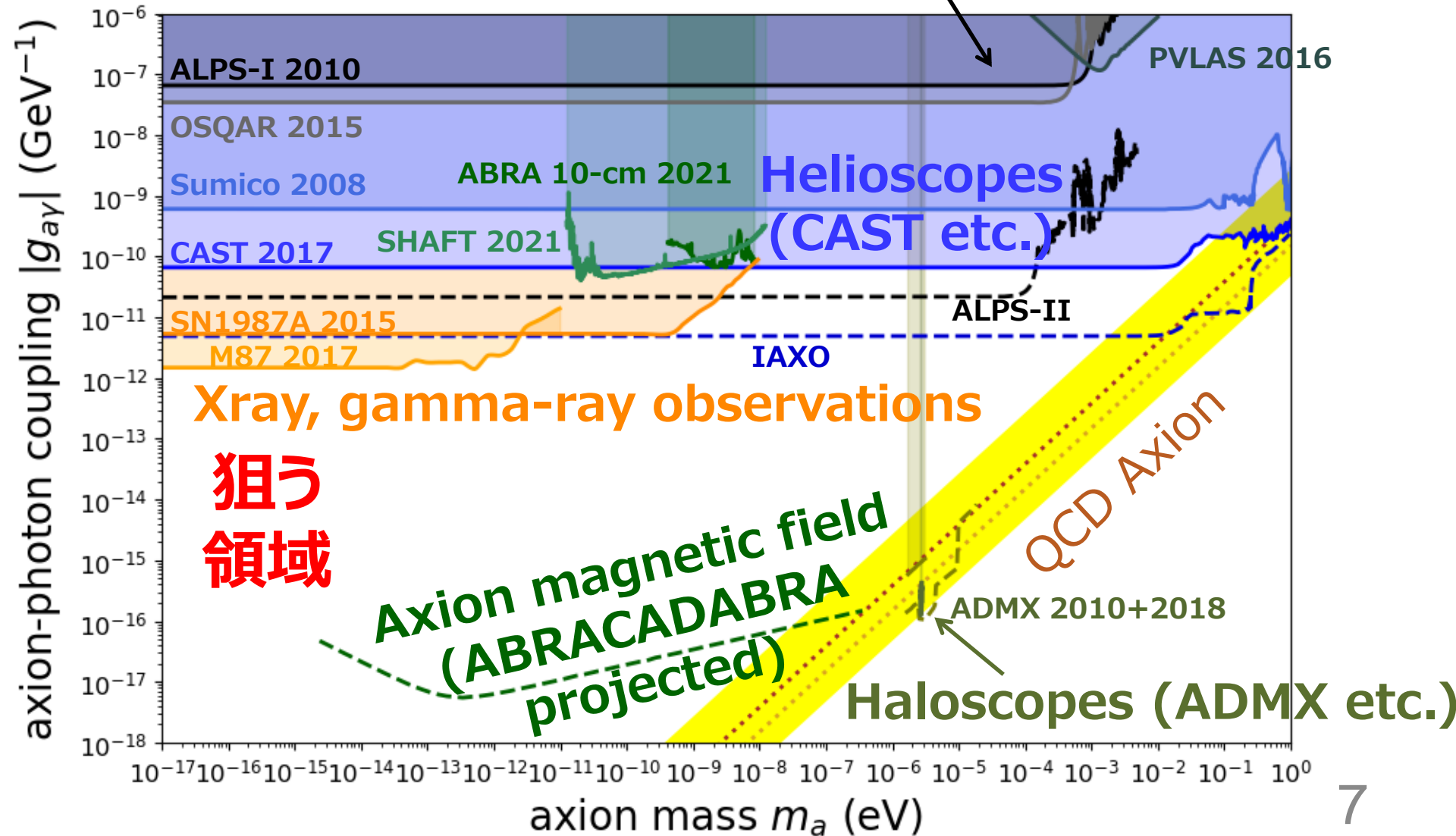
- 磁場による振動やさらなる強磁場化や大型化に課題

欧州原子核研究機構(CERN)
CAST



現在の上限値

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速度差

$$c_{L/R} = c_0 \sqrt{1 \pm \frac{g_{a\gamma} a_0 m_a}{k} \sin(\omega_a t + \delta_\tau)}$$

相互作用係数

光の波数

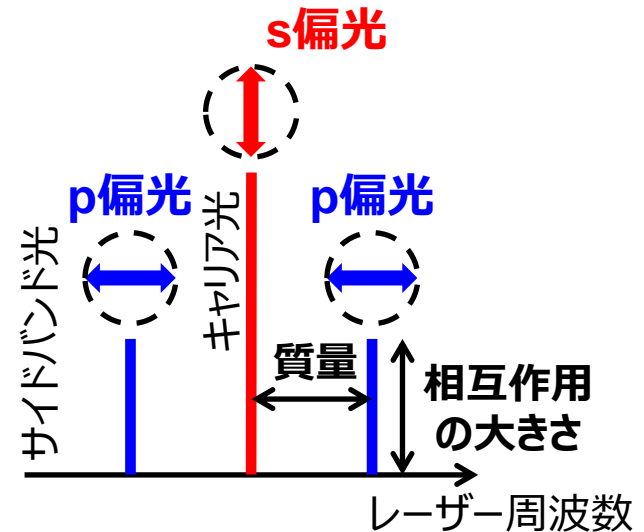
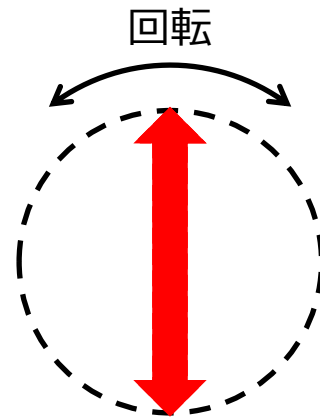
光の振幅
アクシオン場

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



- 回転の周期からアクシオンの質量
振幅から相互作用の大きさ

がわかる

光共振器を用いた信号増幅

- 短い距離では偏光の回転角が小さい

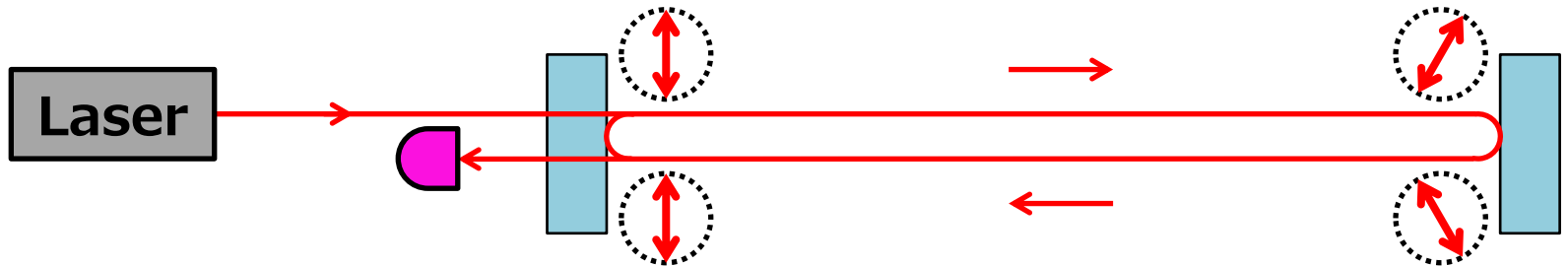


光共振器を用いた信号増幅

- 短い距離では偏光の回転角が小さい



- 光共振器で距離を増幅することはできるが、鏡の反射で偏光が反転してしまう

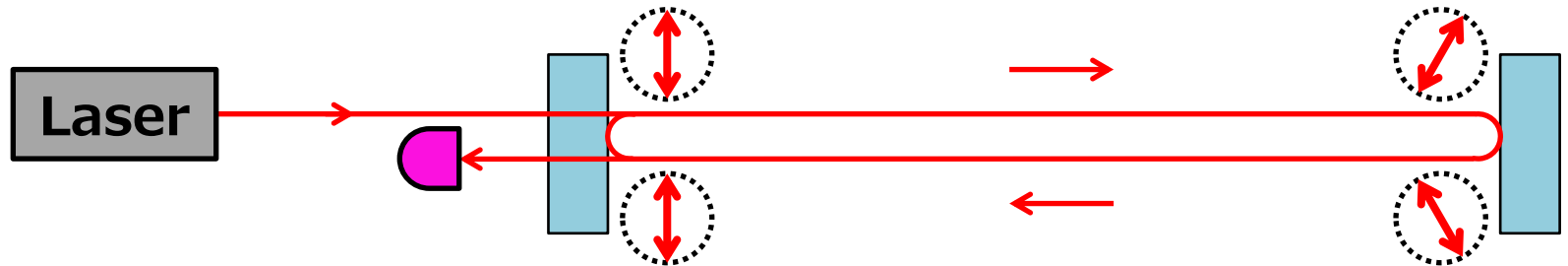


光共振器を用いた信号増幅

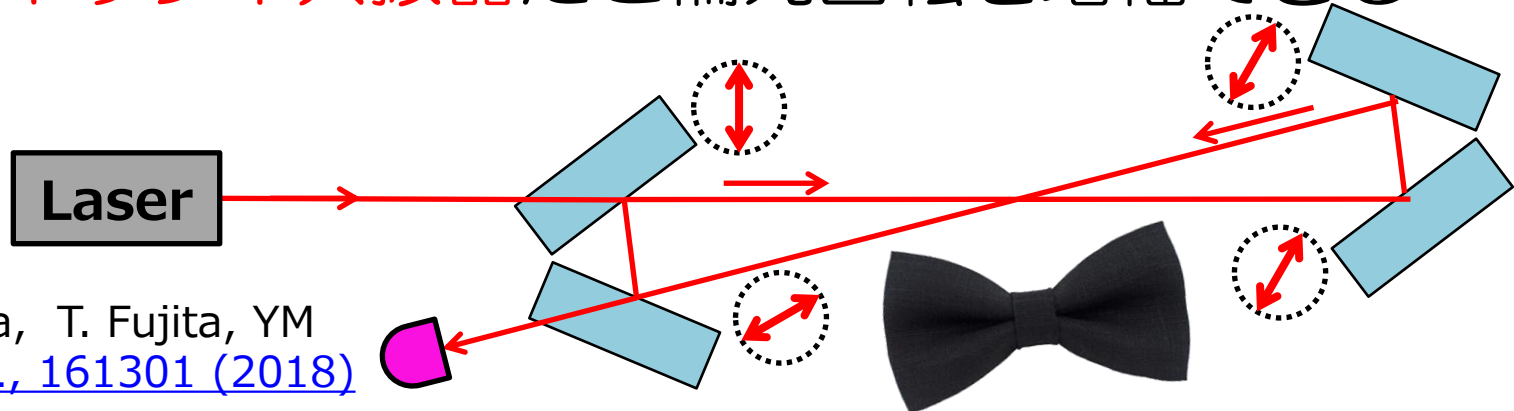
- 短い距離では偏光の回転角が小さい



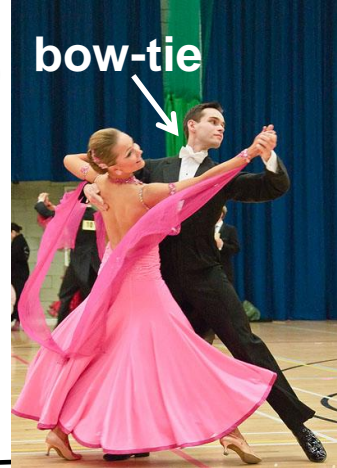
- 光共振器で距離を増幅することはできるが、鏡の反射で偏光が**反転**してしまう



- **ボウタイ共振器**だと偏光回転を増幅できる

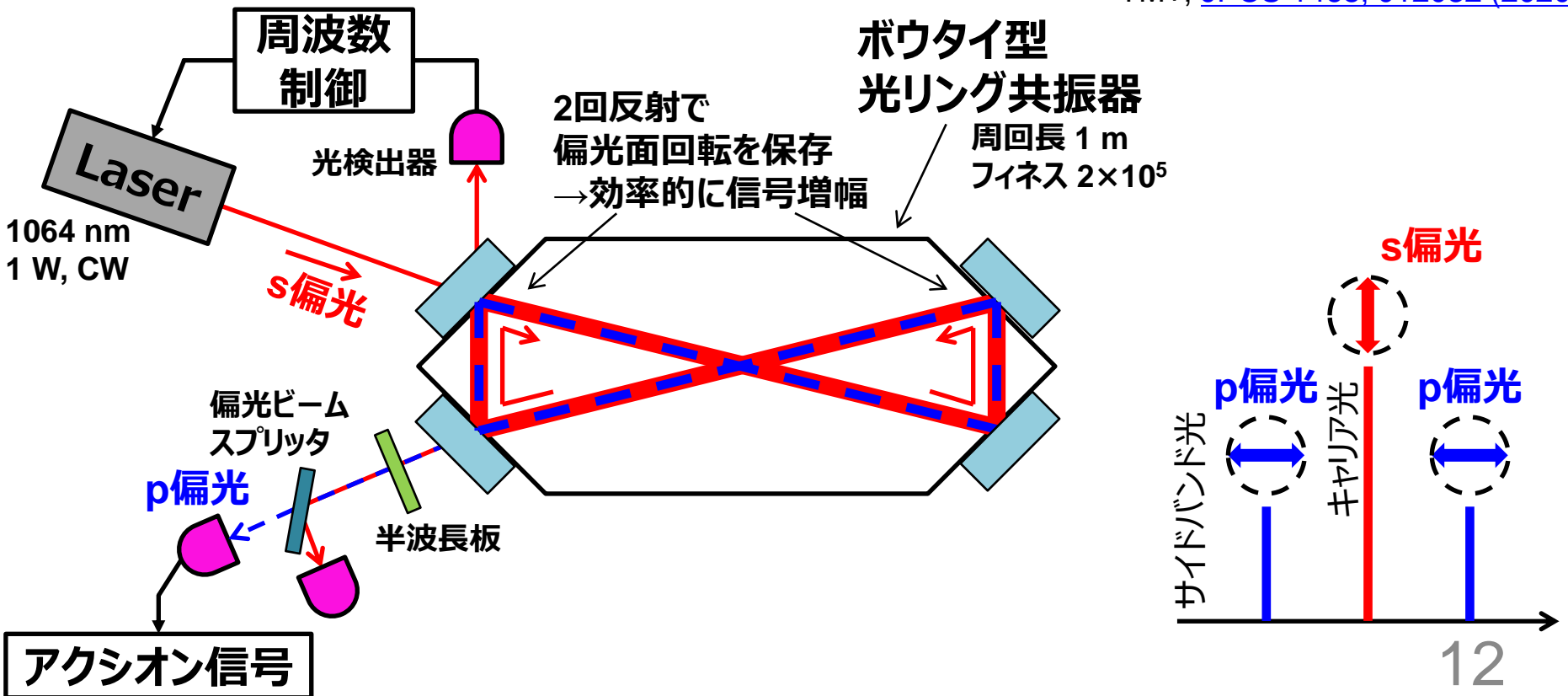


DANCEのセットアップ



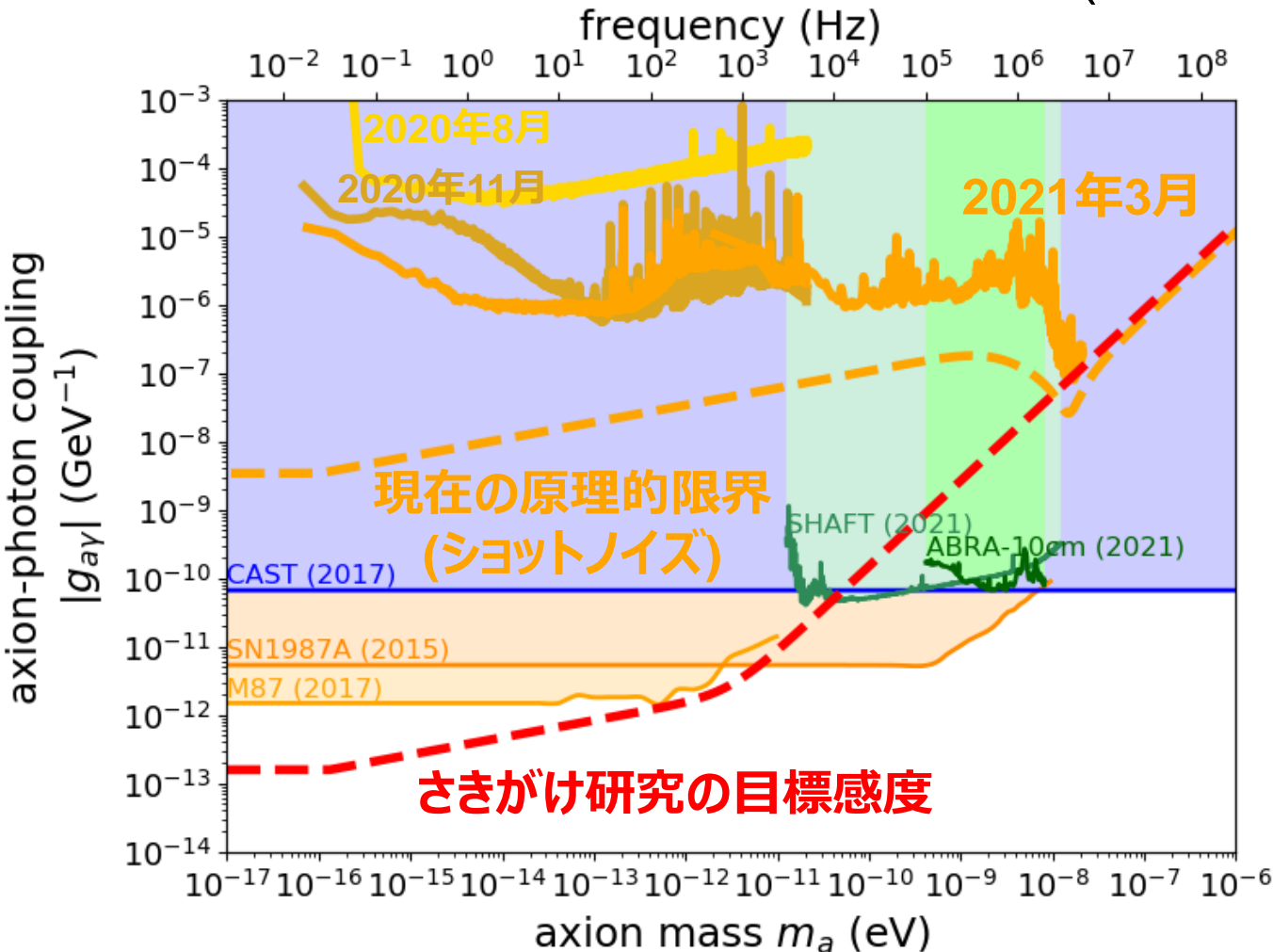
- Dark matter Axion search
with riNg Cavity Experiment
- さきがけで世界最高精度での探索を目指す

YM+, [JPCS 1468, 012032 \(2020\)](https://doi.org/10.1063/1.513032)



現在の推定感度(1年観測を仮定)

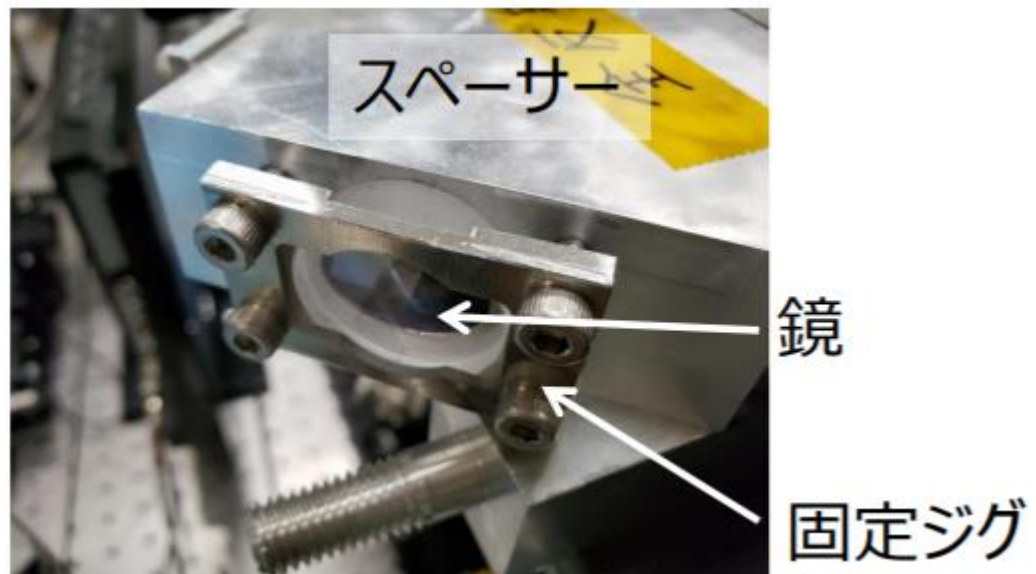
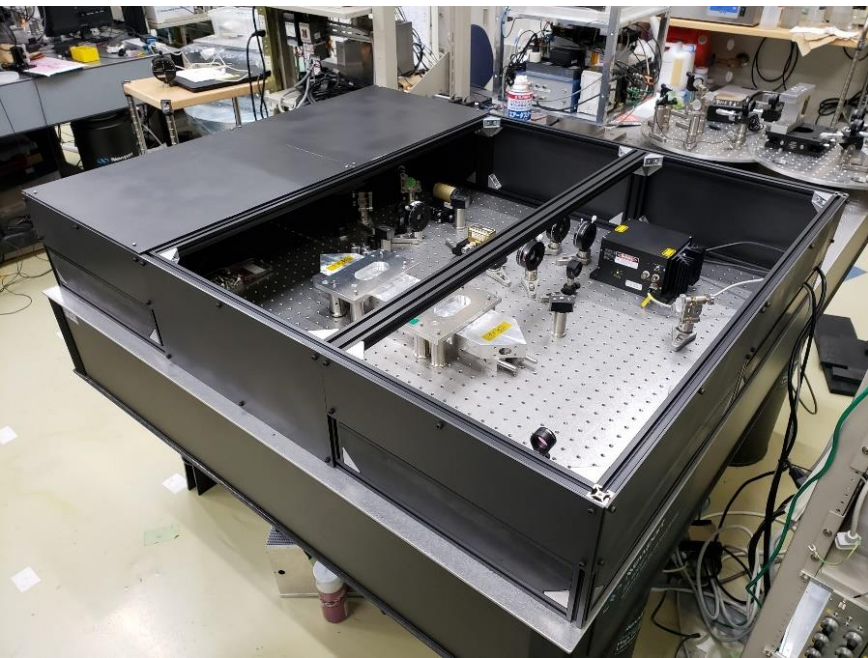
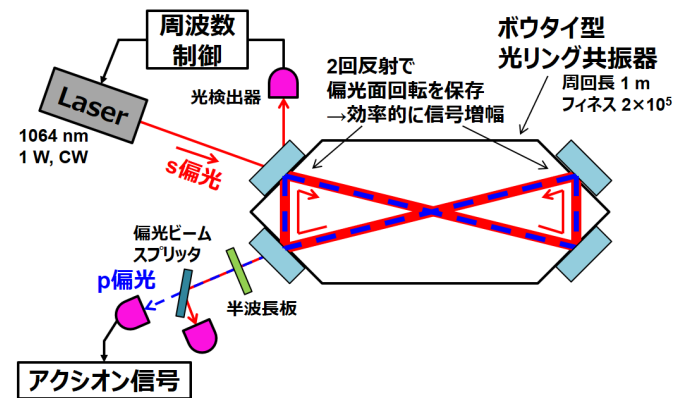
- 順調に感度を向上
- 2021年5月に最初の試験運転(12日間)を実施



Y. Oshima+,
[arXiv:2105.06252](https://arxiv.org/abs/2105.06252)

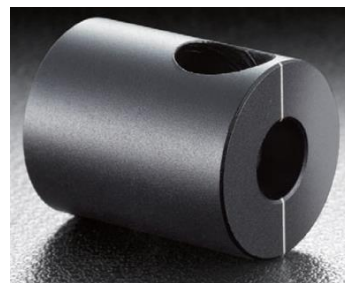
何をやったか

- ➡ 偏光信号取得系の改善
- ➡ カバーによる制御安定度の向上
- ➡ 鏡の固定ジグの改良
- ➡ 入射光強度とフィネスの向上
- ➡ 長期観測に向けた自動制御システムの導入

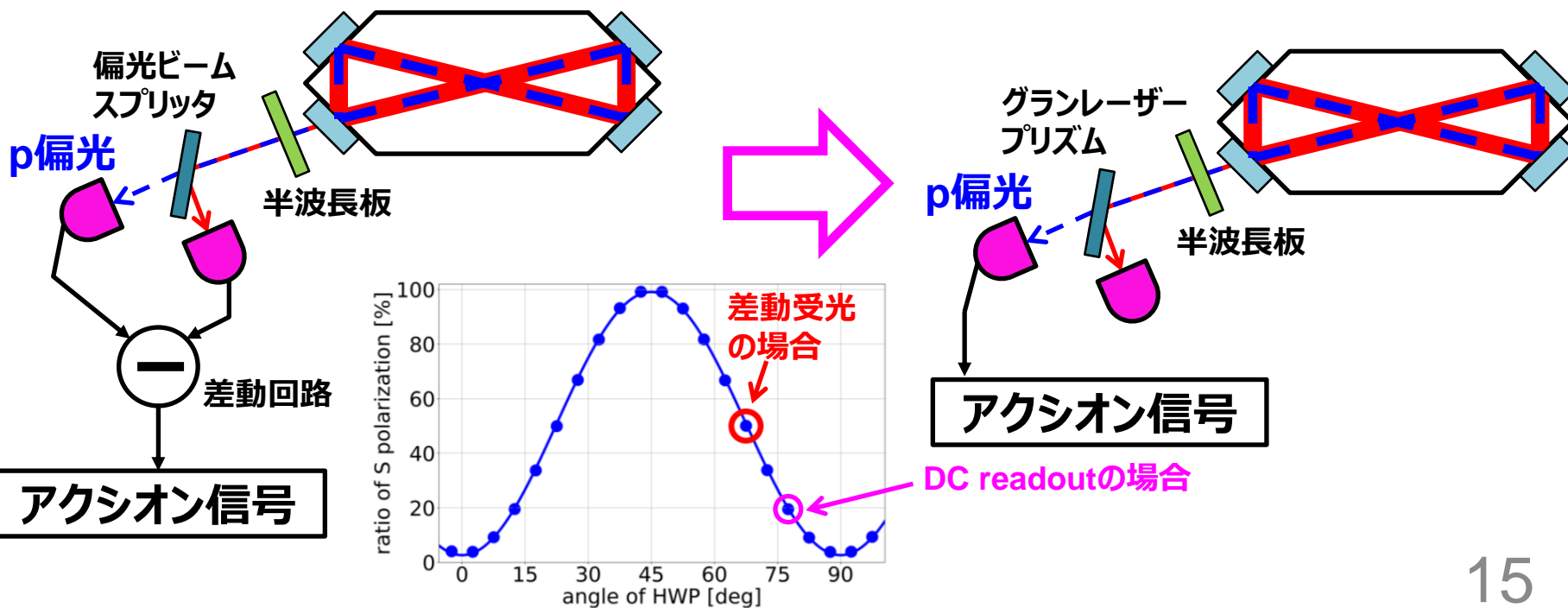


偏光信号取得系の改善

- 差動受光から **DC readout** への変更
 - 光強度の増加への対応(レンジの確保)
 - ショットノイズの改善
- **گرانレーザープリズム**の利用
 - 高い消光比(10^{-6} 以下)

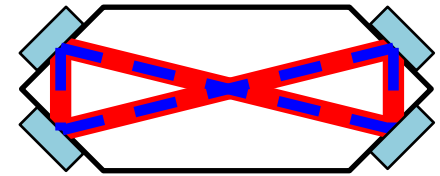


シグマ光機社製



光共振器パラメータの改善

- 入射光強度の増加
- フィネスの増加

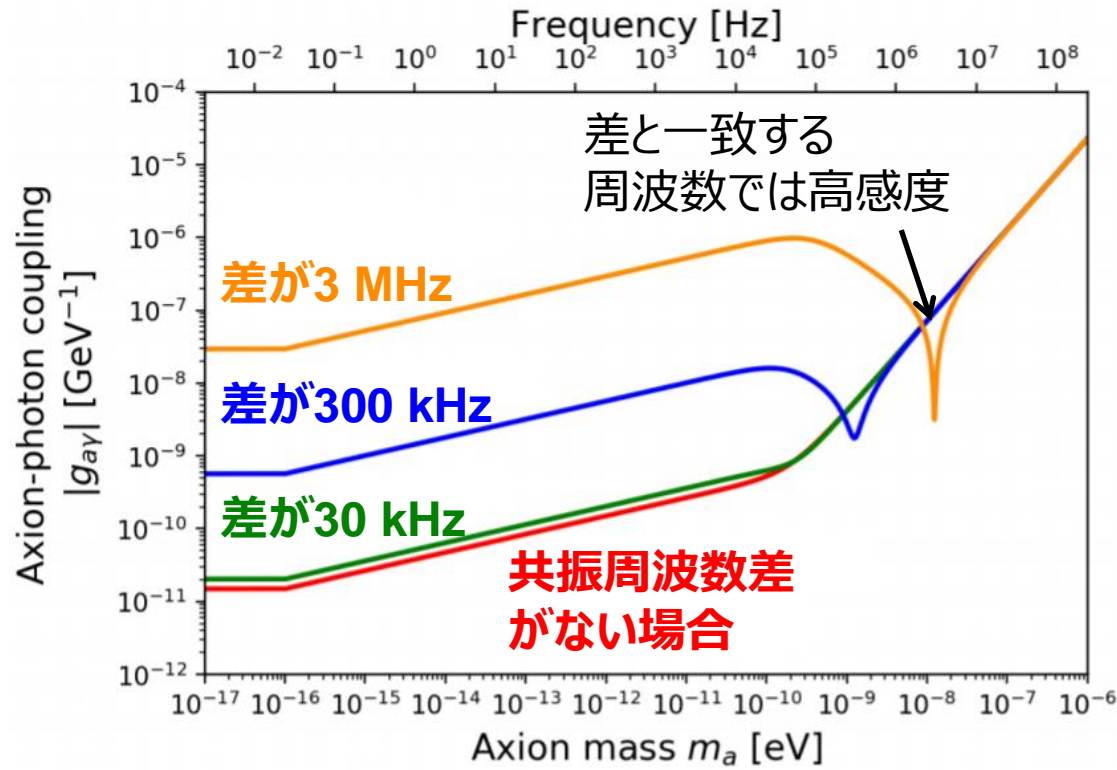
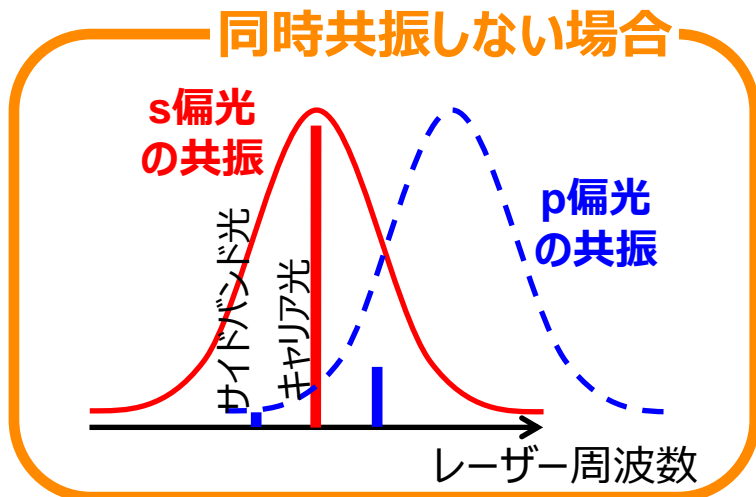
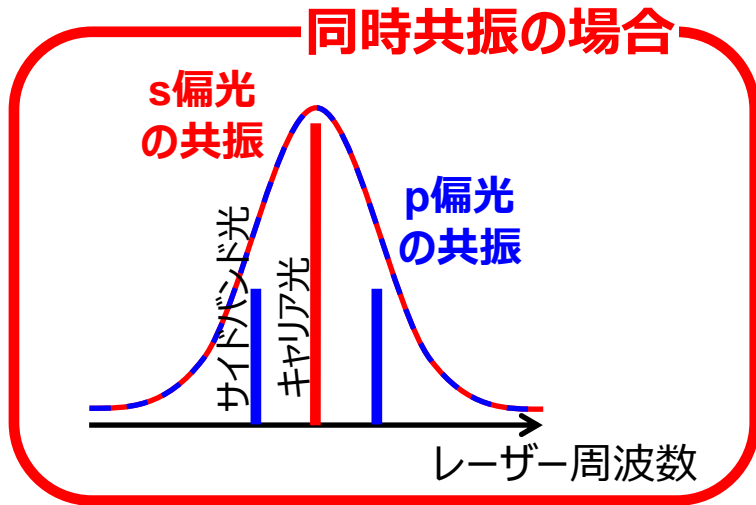


- 共振器鏡を高品質のものへ交換 & アライメントの改善
- s偏光とp偏光の共振周波数差が大きいことが発覚
共振器鏡での反射位相がわずかに異なるため

	2020年11月	現状(2021年5月)	さきがけの目標
共振器の周回長	1 m	1 m	1 m
入射光強度	40 mW	242(12) mW	1 W
フィネス (キャリア)	525(19) p偏光	$2.85(5) \times 10^3$ s偏光	2×10^5
フィネス (サイドバンド)	~300 s偏光	195(3) p偏光	2×10^5
s偏光とp偏光の 共振周波数差	~28 MHz	2.52(2) MHz	0 Hz

なぜ両偏光の同時共振が重要か

- 高感度実現のためには光共振器でキャリア偏光と信号サイドバンド偏光を**ともに増幅する必要**

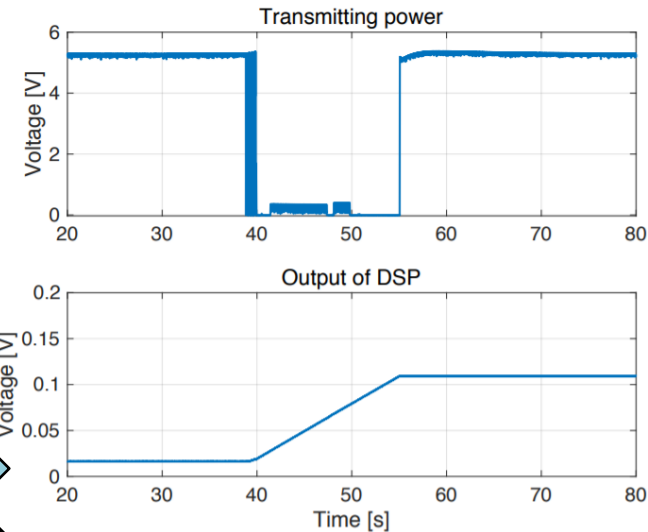
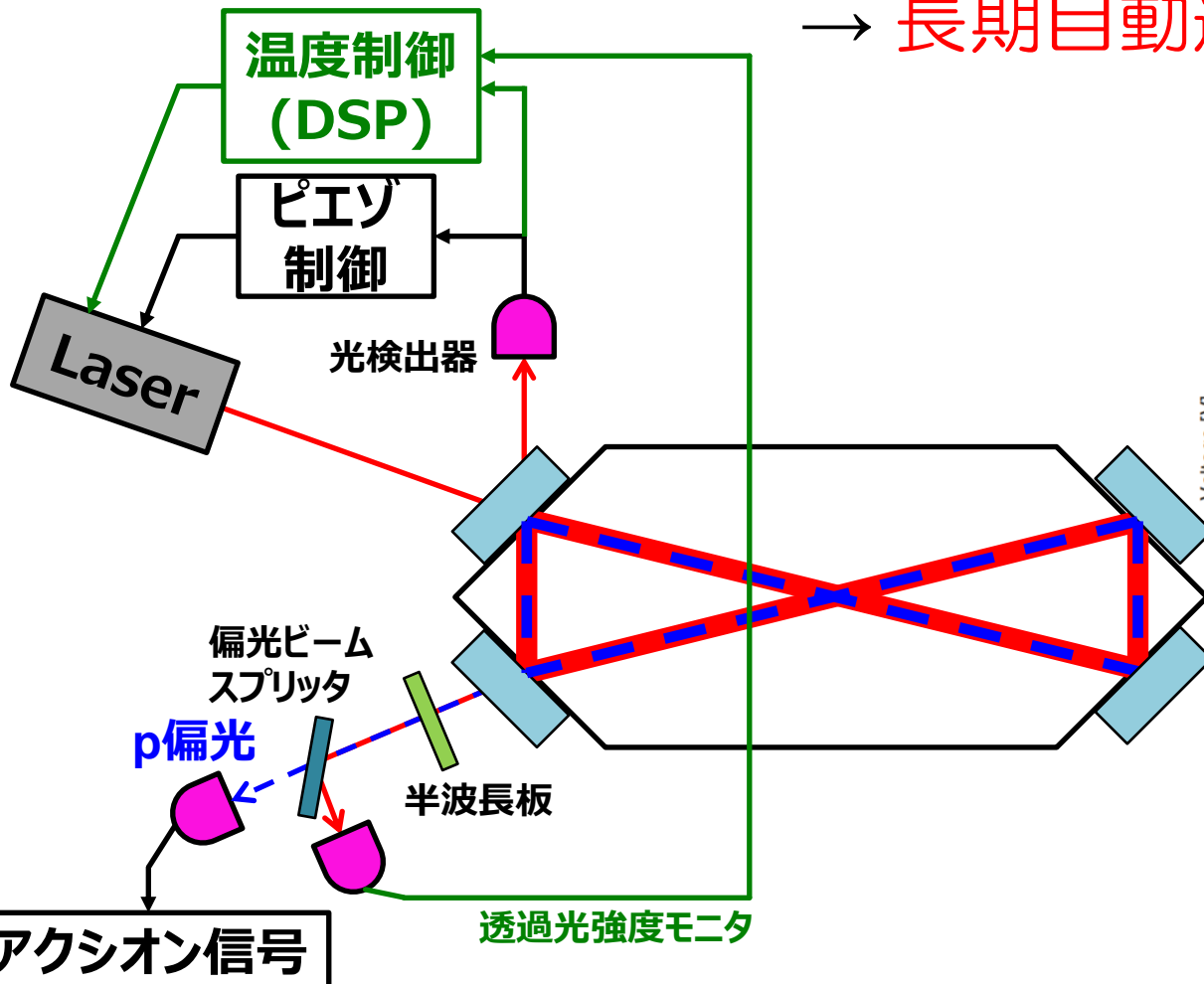


Plot by Y. Oshima & H. Fujimoto

自動制御システムの導入

- デジタルシグナルプロセッサ(DSP)を利用してロック状態を判定し、自動でロック回復

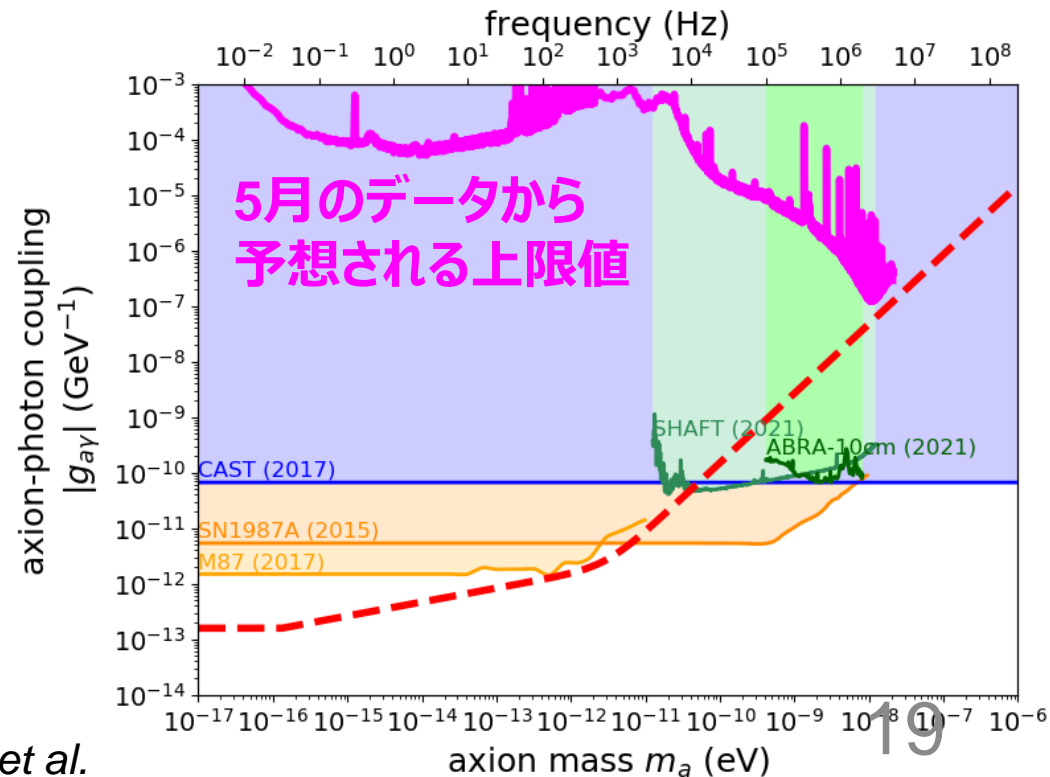
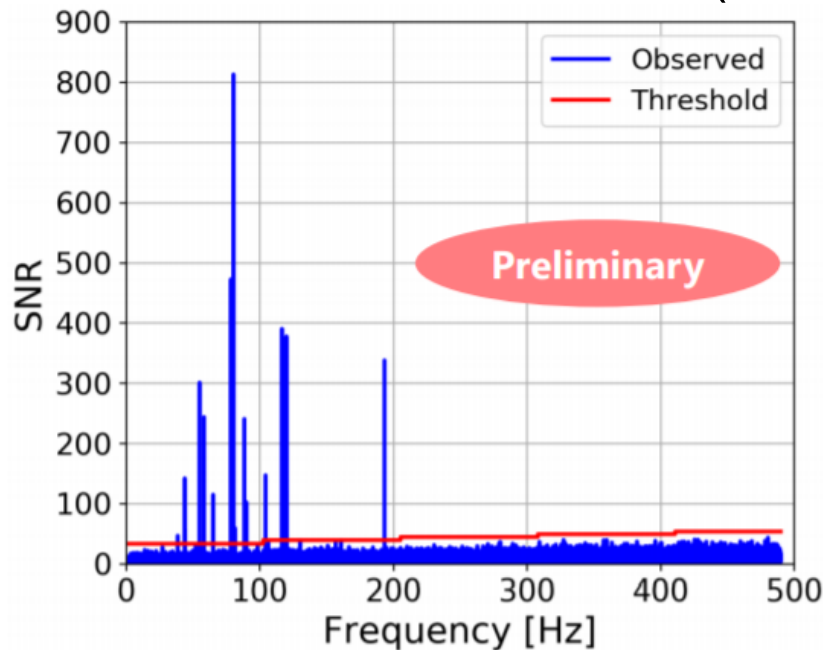
→ 長期自動運転が可能に



H. Fujimoto+,
[arXiv:2105.08347](https://arxiv.org/abs/2105.08347)

試験運転とデータ解析

- 2021年5月18日から30日に試験運転を実施(12日間)
低周波側は1 kHzサンプリング
高周波側は10 MHzサンプリングで短時間
- 開発したてのデータ解析パイプラインを適用
82個の信号候補(ピークの幅などでveto予定)

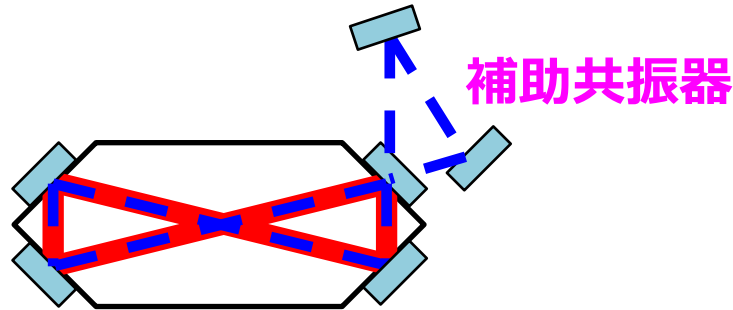


Analysis by Y. Oshima

Pipeline developed by J. Kume, S. Morisaki *et al.*

現在の課題と今後の計画

- s偏光/p偏光の**同時共振実現**
 - **補助共振器**を用いた反射位相の調整



Martynov & Miao
[PRD 101, 095034 \(2020\)](#)

- フィネスの向上
 - より高反射率/高品質な共振器鏡
- 入射光強度の向上
 - 2Wレーザーを調達済
- 散乱光雑音、振動感度の低減
 - 黒色処理した新型スパーサーを調達済



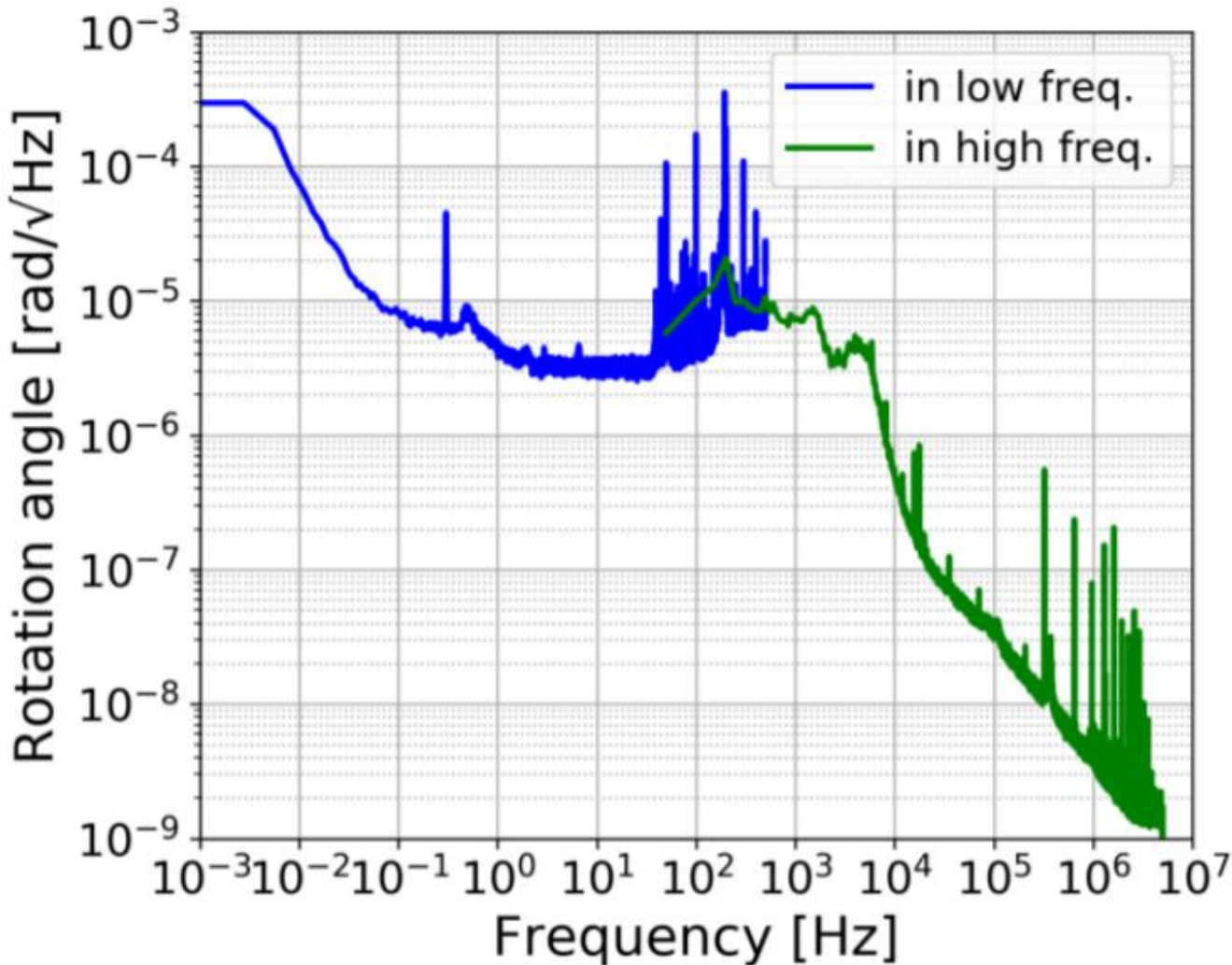
まとめ

- 感度と安定度は順調に向上
 - 偏光信号取得系の改善
 - 入射光強度とフィネスの向上
 - 長期観測に向けた自動制御システムの導入
- s偏光とp偏光の共振周波数差が大きいことが発覚
 - 補助共振器の導入で対処予定
- 2021年5月に12日間の試験運転を実施
 - 感度評価とデータ解析まで含めた統合試験
- さらなる感度向上に向けて準備中

補足スライド

2021年5月の偏光回転角感度

- ショットノイズまで4桁程度








Plot by Y. Oshima

国内外の動向

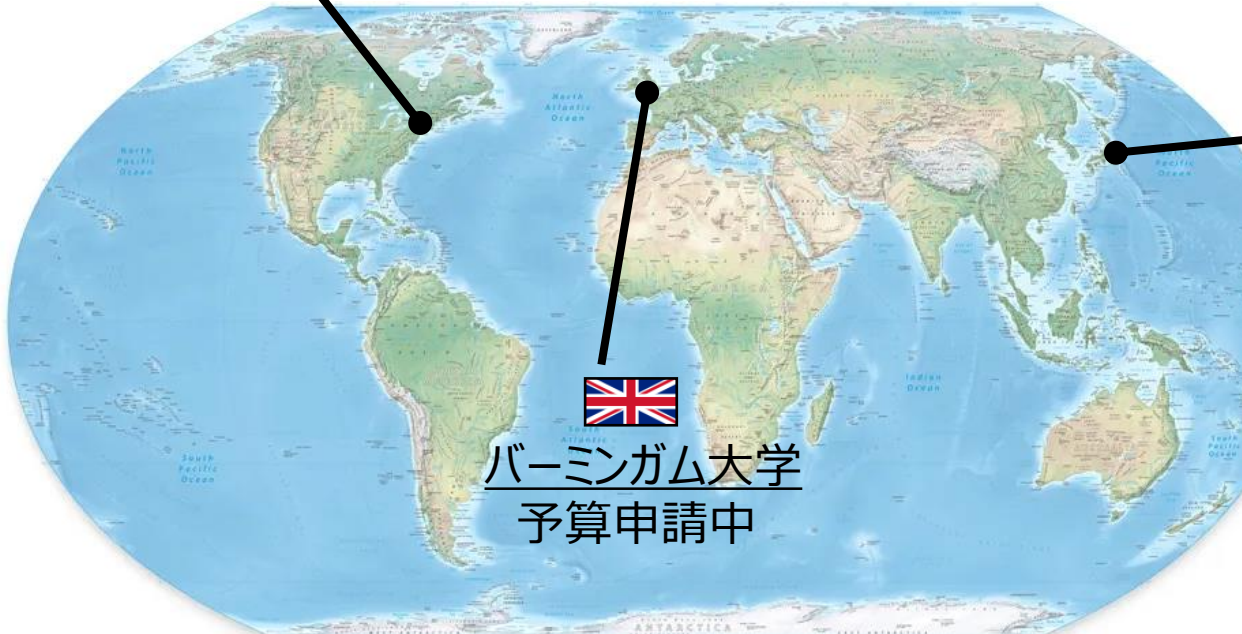
- 米英と初探索を目指す国際競争が始まろうとしている状況


ここ数年で立て続けに提案論文

-  DeRocco & Hook, [PRD 98, 035021 \(2018\)](#)
-  Obata, Fujita, YM, [PRL 121, 161301 \(2018\)](#)
-  Liu, Elwood, Evans, Thaler, [PRD 100, 023548 \(2019\)](#)
-  Nagano, Fujita, YM, Obata, [PRL 123, 111301 \(2019\)](#)
-  Martynov & Miao, [PRD 101, 095034 \(2020\)](#)



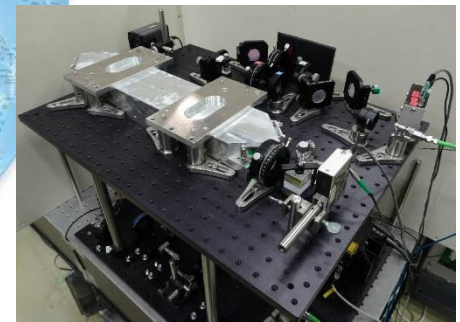
マサチューセッツ工科大学
プロトタイプ実験に着手




バーミンガム大学
予算申請中

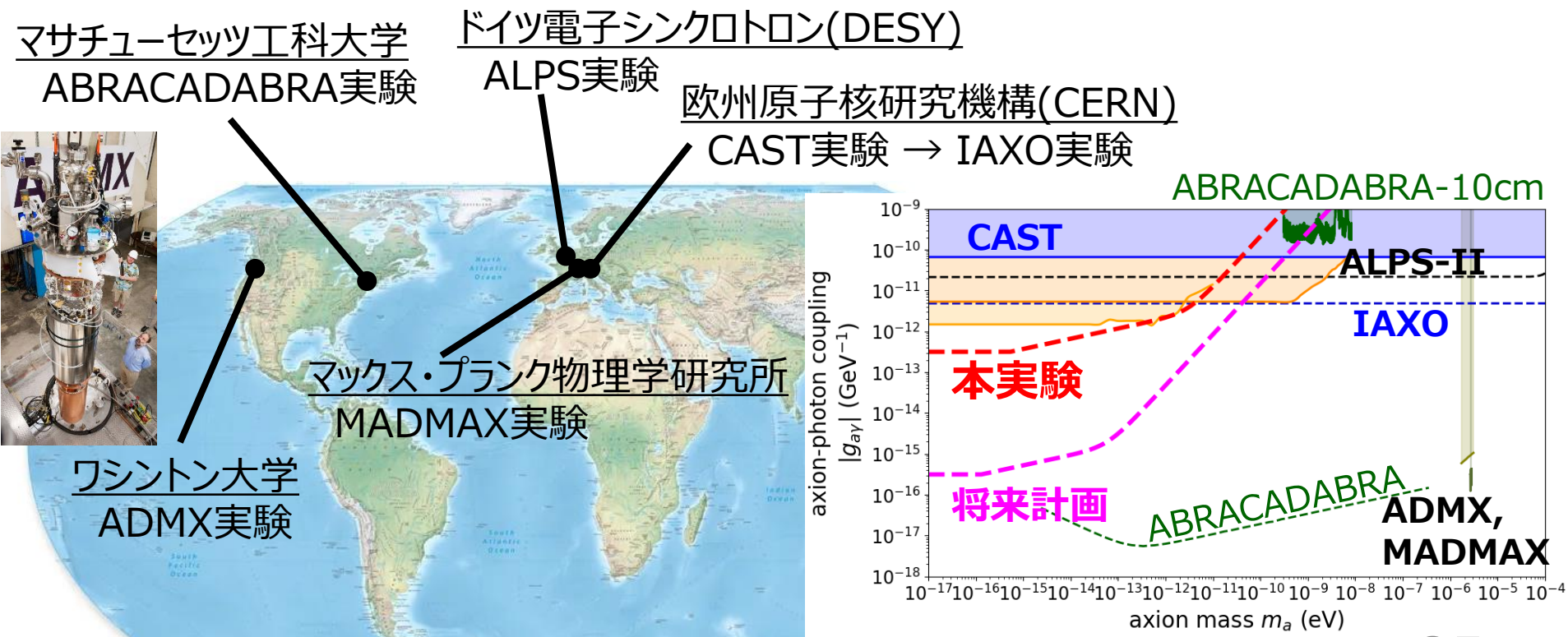


ボウタイ共振器を
用いる**独自のアイデア**
プロトタイプ実験で原理検証
KAGRAの経験で優位性



本研究の独創性

- 強磁場を用いた実験は盛んに行われているが、高感度化にはさらなる強磁場化、大型化が必要
磁場実験は相互作用係数の2乗に感度、本実験は1乗に感度
- 本実験は**磁場が不要**、将来的な高感度化も可能



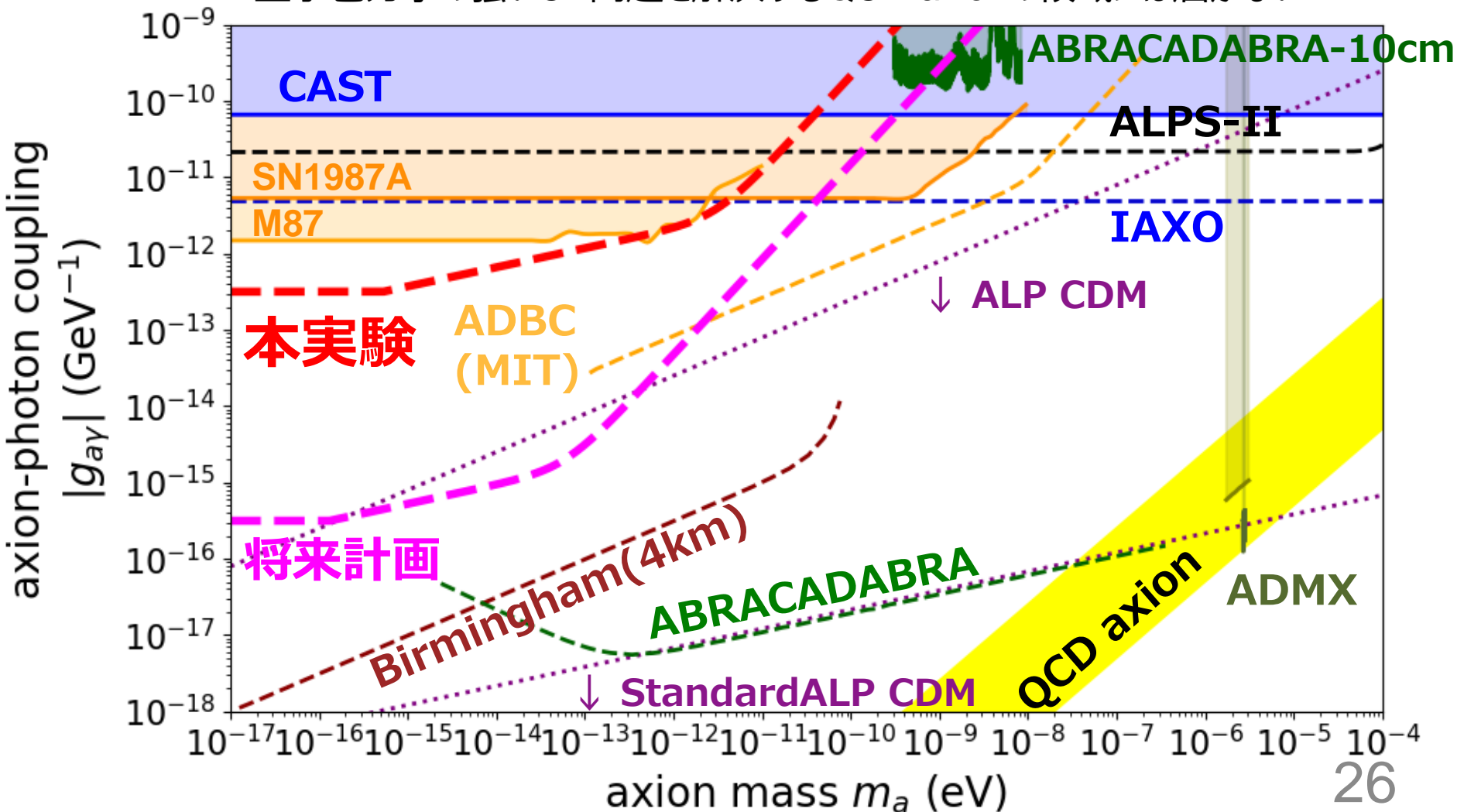
※ これらは全て磁場を用いる実験

他の実験提案・理論予想との比較

※ 結合定数の理論的予想は困難であり、網羅的な探索が重要

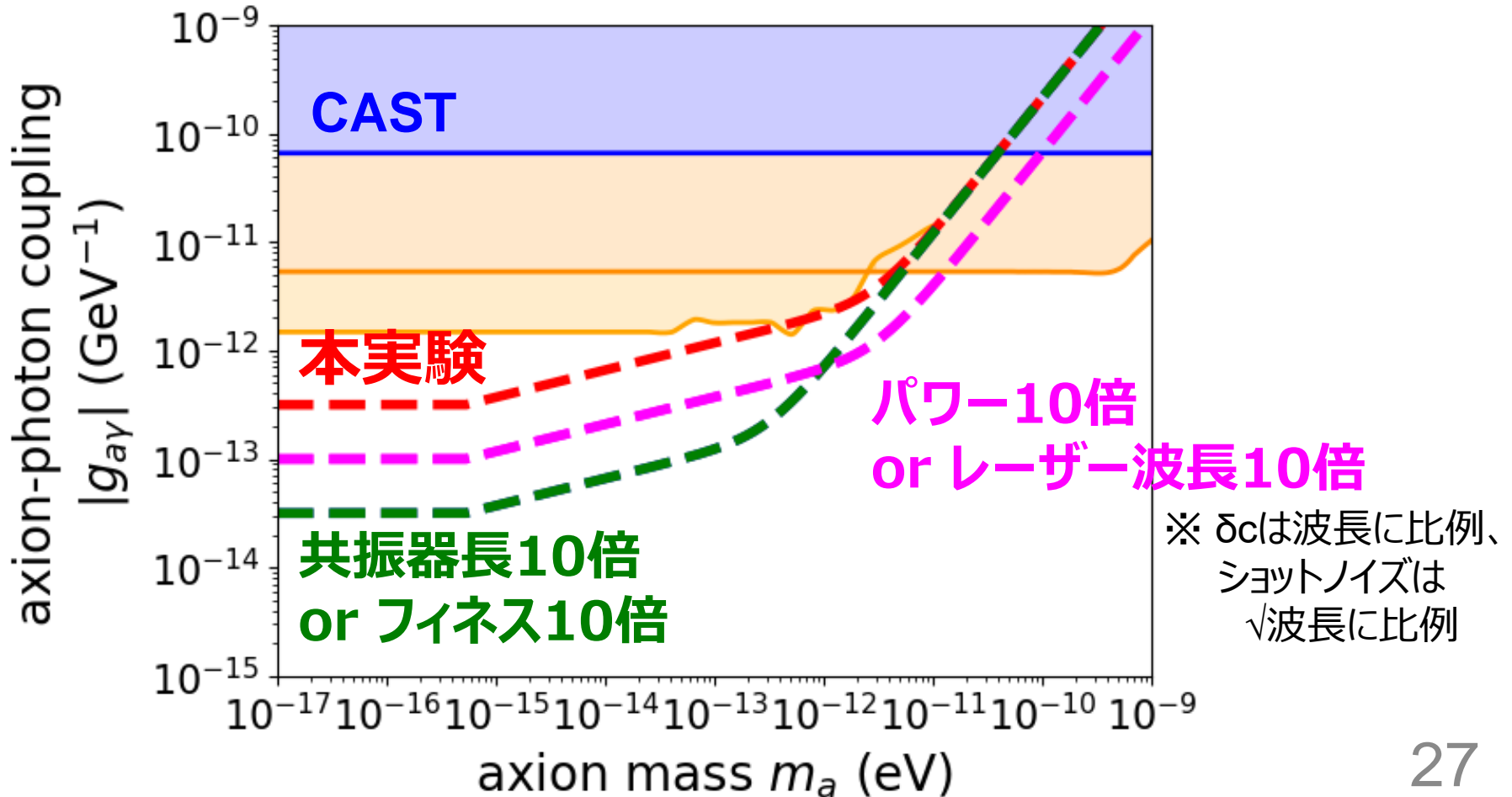
紫点線はP. Arias+ JCAP 06, 013 (2012)からの一例

量子色力学の強いCP問題を解決するQCD axionの領域には届かない



感度設計

- 最も良い感度は[共振器長]×[フィネス]で決まる(高感度にすると帯域は狭くなる)
- $\sqrt{[入射パワー]}$ 、 $\sqrt{[レーザー波長]}$ で全体の感度が決まる



要求値など

- 右円偏光と左円偏光の光速の差

$$\delta c = 9 \times 10^{-23} \left(\frac{\lambda}{1064 \text{ nm}} \right) \left(\frac{g_{a\gamma}}{10^{-10} \text{ GeV}^{-1}} \right)$$

- 偏光の回転角 ↙ 共振器で増幅

$$\delta \phi = 5 \times 10^{-16} \left(\frac{L}{1 \text{ m}} \right) \left(\frac{\lambda}{1064 \text{ nm}} \right) \left(\frac{g_{a\gamma}}{10^{-10} \text{ GeV}^{-1}} \right)$$

- ショットノイズ $\delta c_{\text{shot}} = 8 \times 10^{-22} / \sqrt{\text{Hz}}$
- 共振器鏡のsとpの位相差 $2\pi/\mathcal{F} = 3 \times 10^{-5} \text{ rad}$ 以下
- 偏光計測系でのsとpの光路差 5 nm RMS以下
光学素子の研磨、軸合わせ、熱処理などで実現
- 光学素子間の相対変動 (PD入射1 mW, PD効率の非一様性が10 /m程度と仮定)
 $6 \times 10^{-8} \text{ m} / \sqrt{\text{Hz}}$ 以下 (同相雑音除去比 1/100のモノリシック
光学系で実現可能)
- 相対強度安定度 $\delta P/P < 6 \times 10^{-7} / \sqrt{\text{Hz}}$ (1 uWのショットノイズ相当)
- 周波数 2.4 Hz が アクシオン質量 $1\text{e-}14 \text{ eV}$ に対応