

2022年5月28日

さきがけ「革新光」

2022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

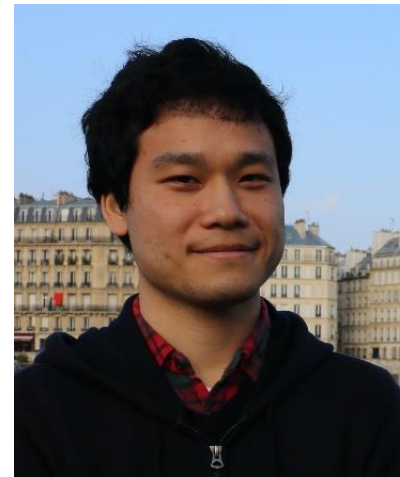
カリフォルニア工科大学 LIGO研究所

yuta@caltech.edu

東京大学 ビッグバン宇宙国際研究センター

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

(※2022年4月に異動しました)



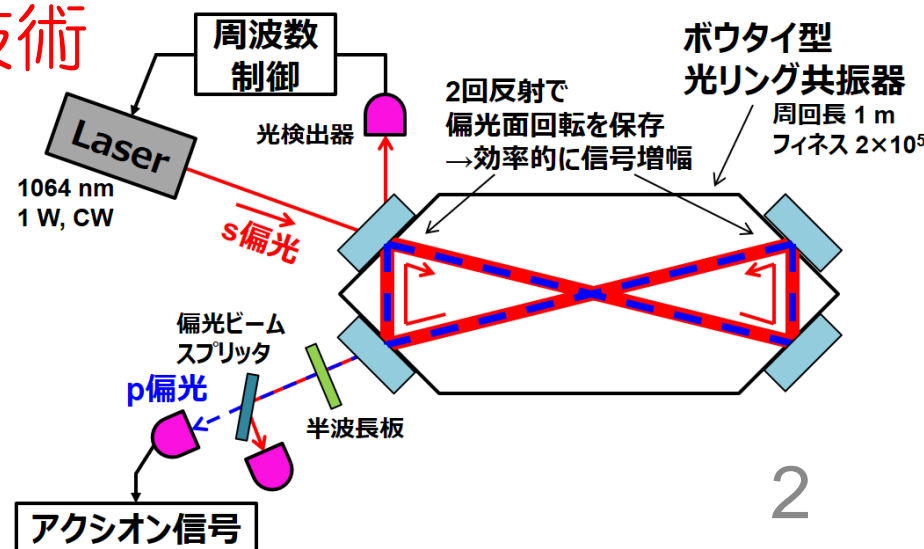
さきがけ研究の概要

- 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

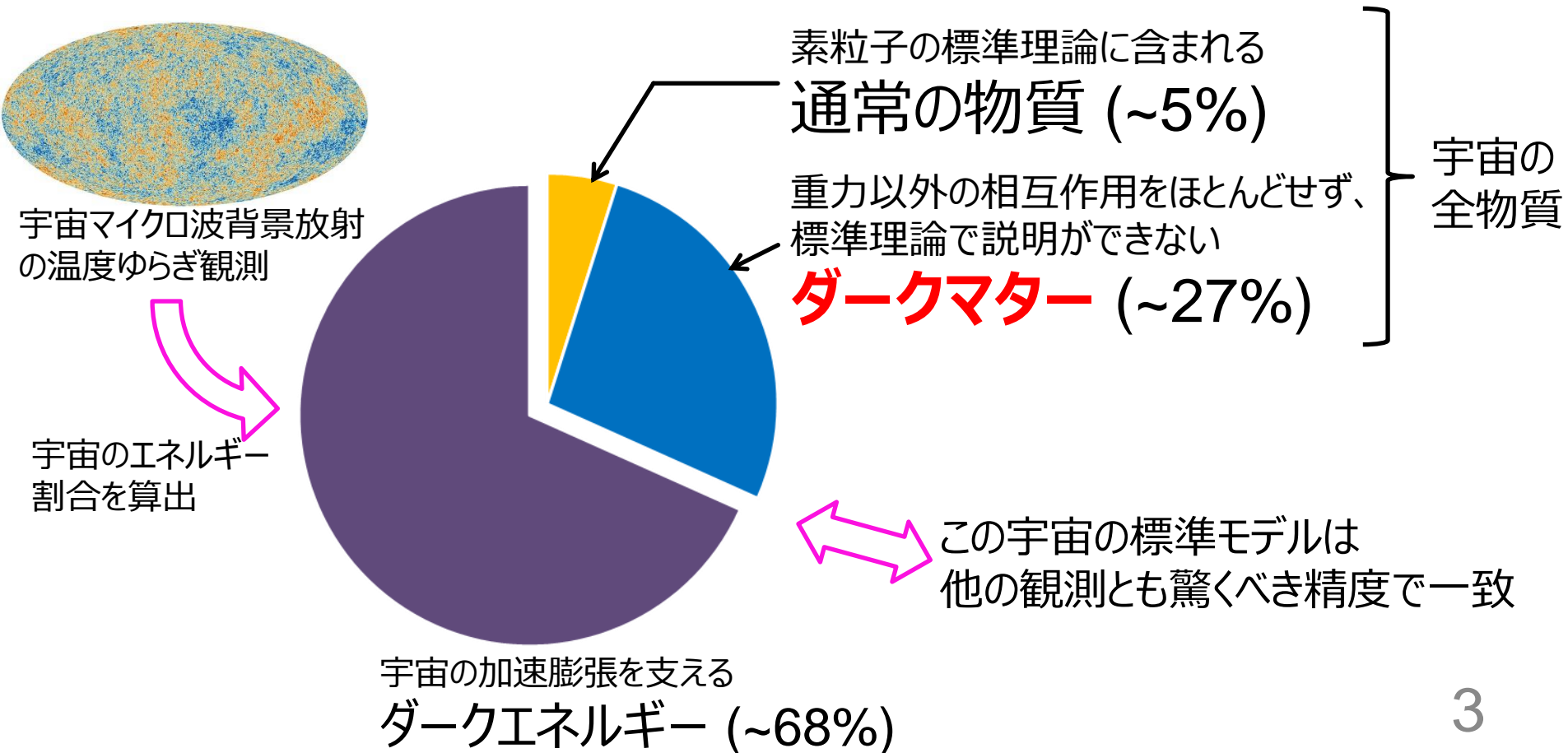
- 超精密偏光計測
- 超低振動光共振器

- 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

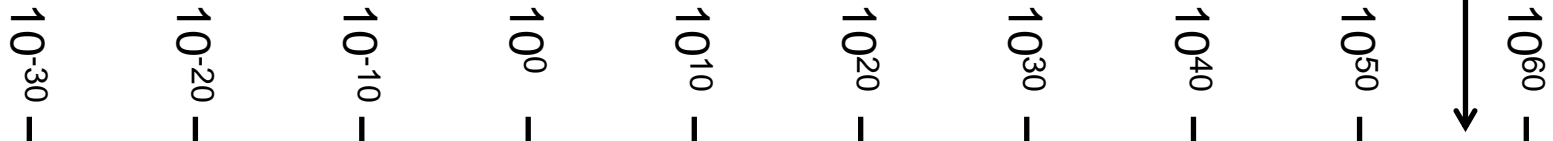


背景: ダークマター探索

- 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

重カマイクロレンズやCMB観測から排除

超軽量粒子

軽い粒子

WIMP

重い粒子

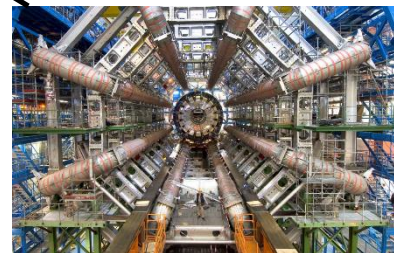
複合物質・原始ブラックホールなど



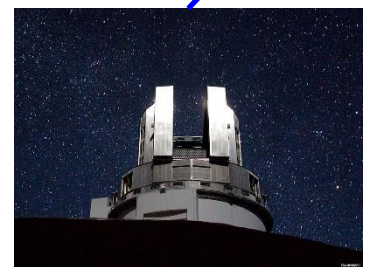
本研究でレーザー干渉計による初探索



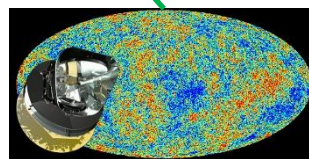
XENON1Tなど地下実験



LHC 巨大ハドロン加速器



すばる望遠鏡など



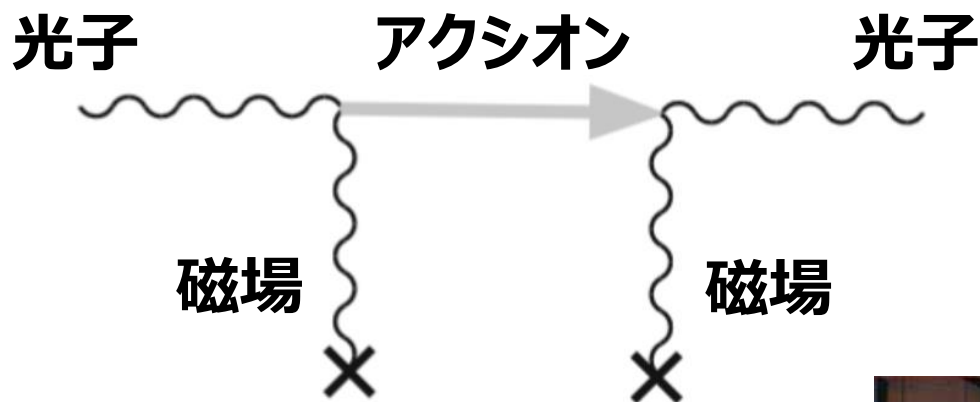
宇宙マイクロ波背景放射観測

ヒッグス粒子 (125 GeV)

プランク質量 (1.1e19 GeV)

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

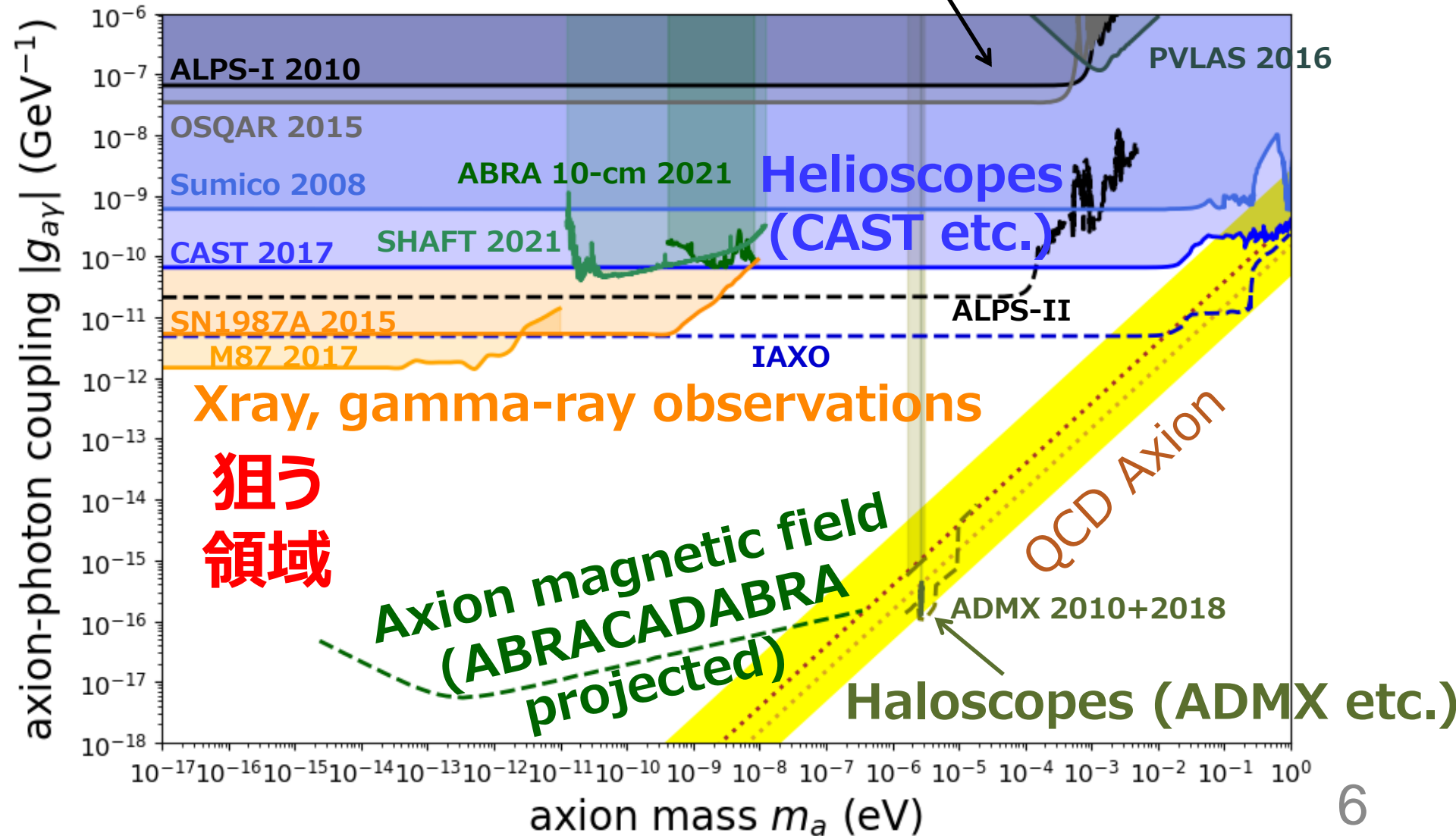
- 磁場による振動やさらなる強磁場化や大型化に課題

欧州原子核研究機構(CERN)
CAST



現在の上限値

Light Shining through Wall (ALPS etc.)



アクシオンによる光の偏光回転

- 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

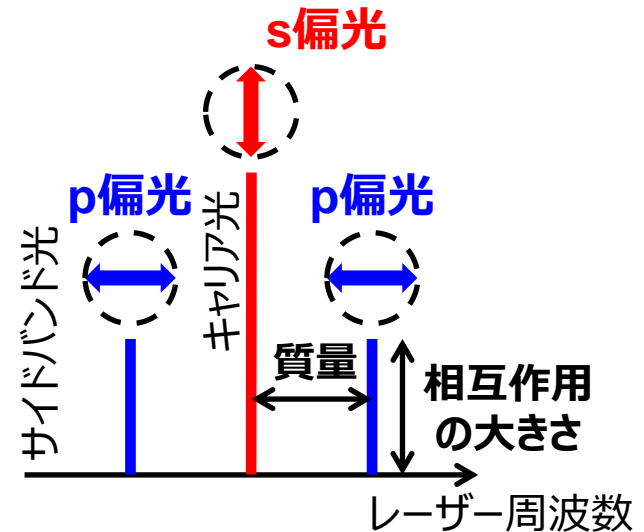
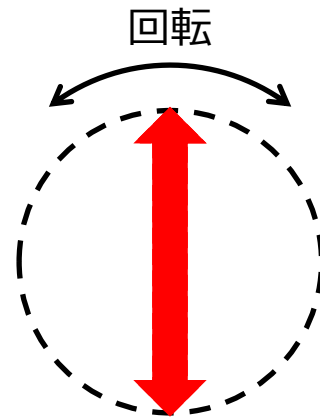
光の波数
 アクション場
 の振幅

アクション
 質量

アクション質量に
 対応した周波数

- 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



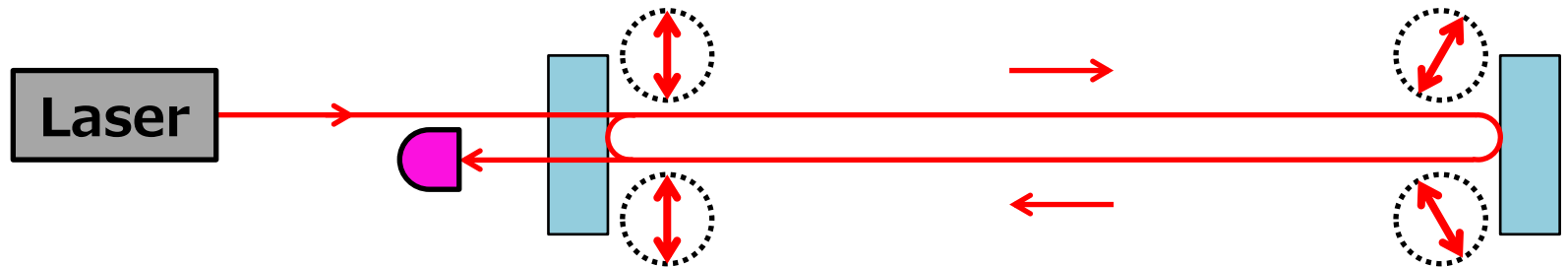
- 回転の周期からアクションの質量
 振幅から相互作用の大きさ がわかる

光共振器を用いた信号増幅

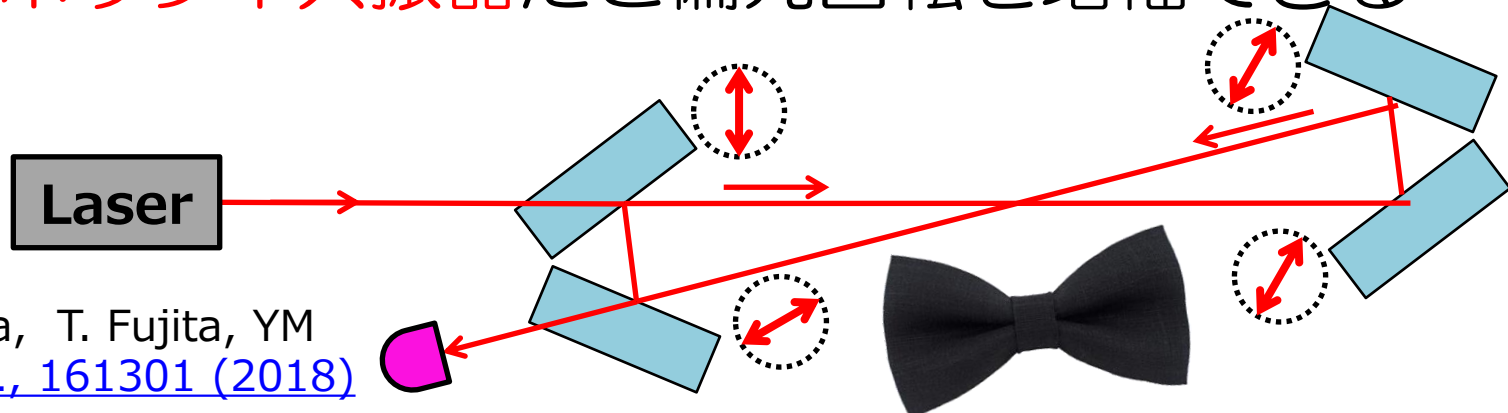
- 短い距離では偏光の回転角が小さい



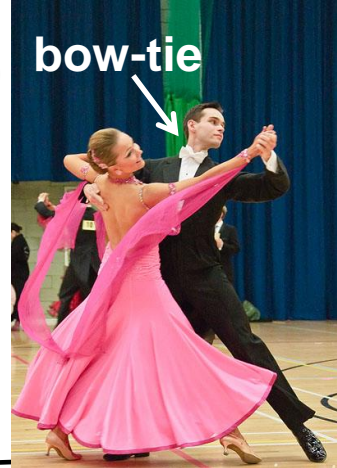
- 光共振器で距離を増幅することはできるが、鏡の反射で偏光が**反転**してしまう



- **ボウタイ共振器**だと偏光回転を増幅できる

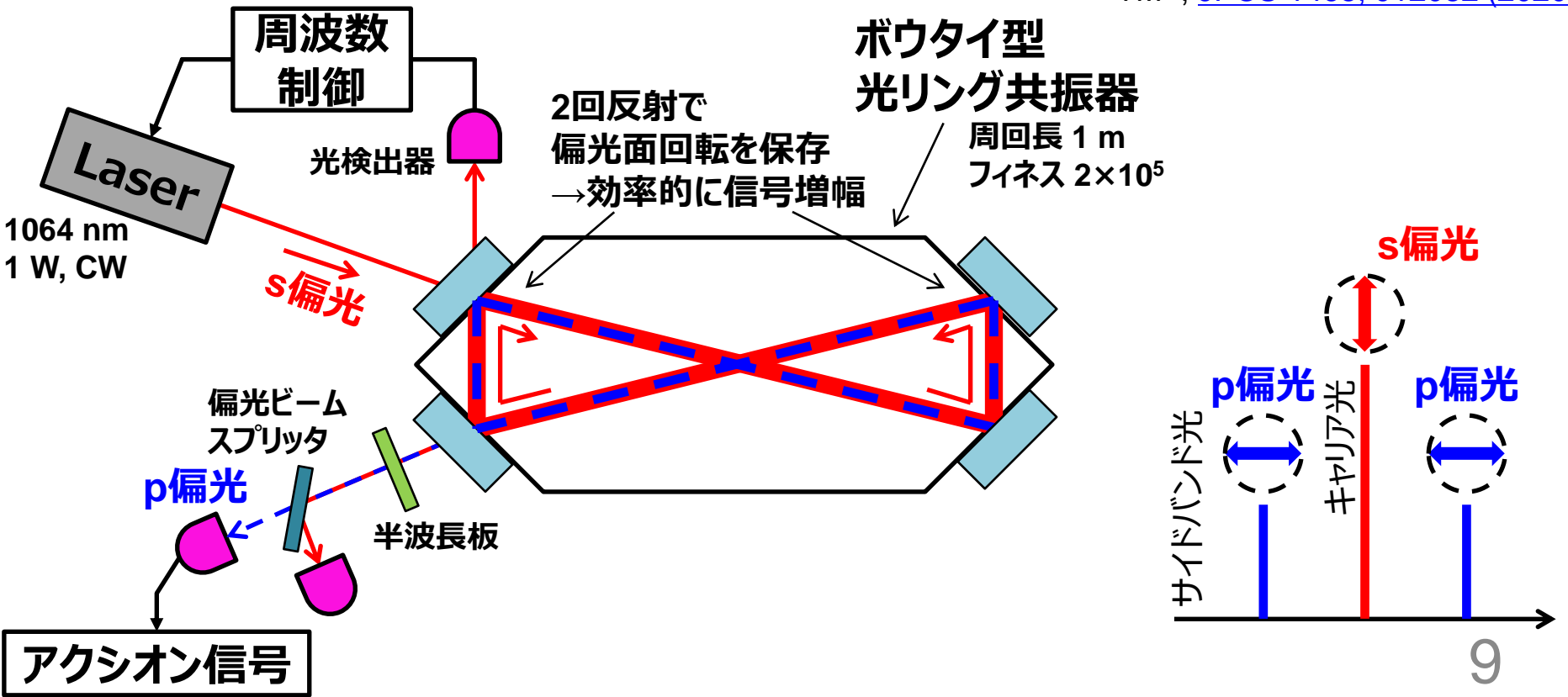


DANCEのセットアップ



- 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

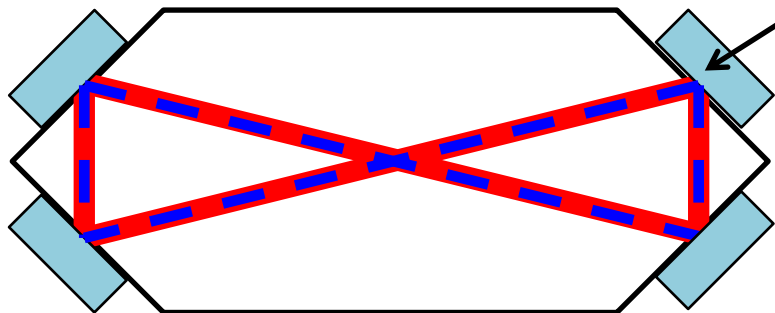
YM+, [JPCS 1468, 012032 \(2020\)](https://doi.org/10.1063/1.513032)



これまでの進捗状況

- 2021年5月 **最初の試験運転**(12日間)を実施
データ解析を実施し、初の上限值
初のEnd-to-end試験に成功
p偏光とs偏光が同時共振しない問題が発覚
- 2021年11月 **同時共振実現**に成功
補助共振器を導入するアイデア
約3桁の感度向上に成功

有限の入射角があるため、鏡の反射時に
s偏光とp偏光に位相差が生じる
→共振周波数差になる



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

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

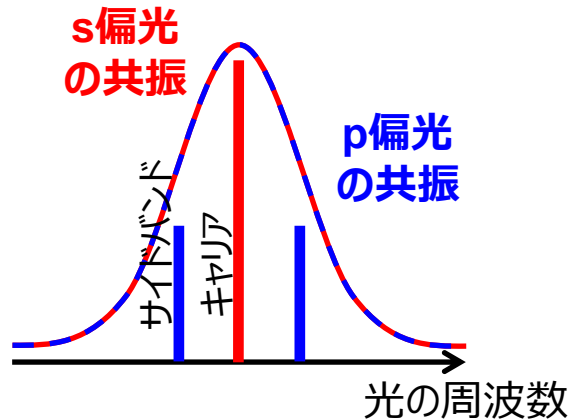
Y. Oshima+, [JPCS 2156, 012042 \(2021\)](https://doi.org/10.1143/JPCS.2156.012042)

H. Fujimoto+, [JPCS 2156, 012182 \(2021\)](https://doi.org/10.1143/JPCS.2156.012182)

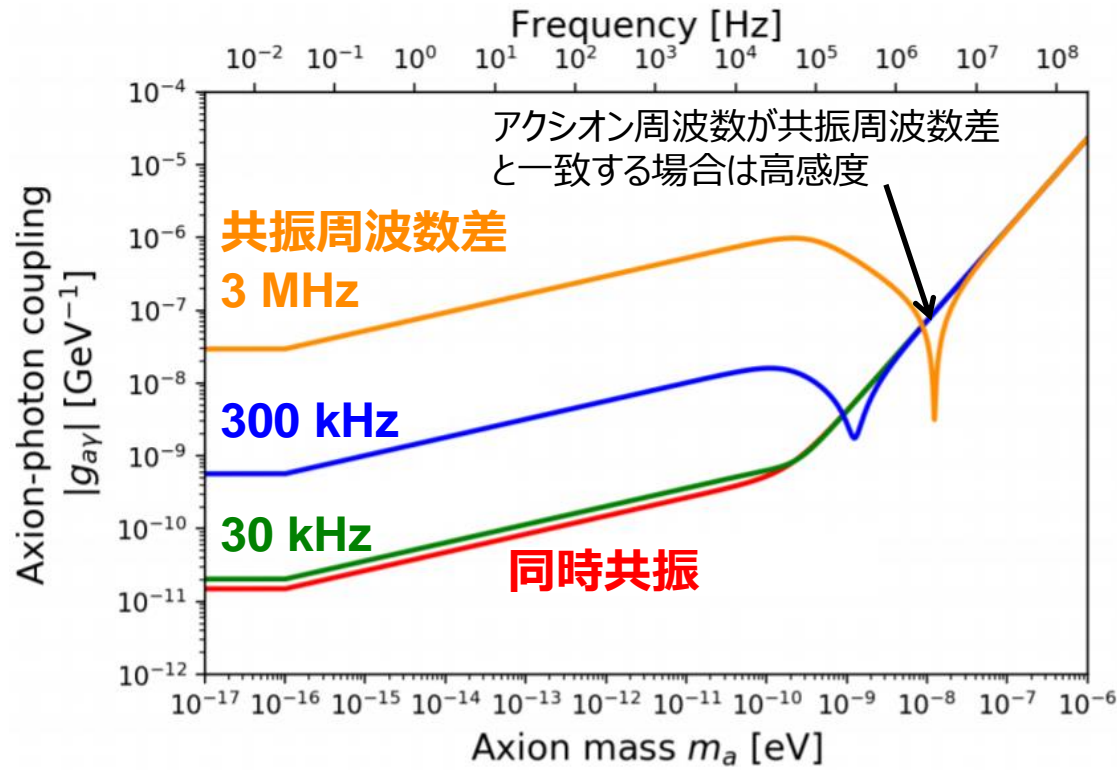
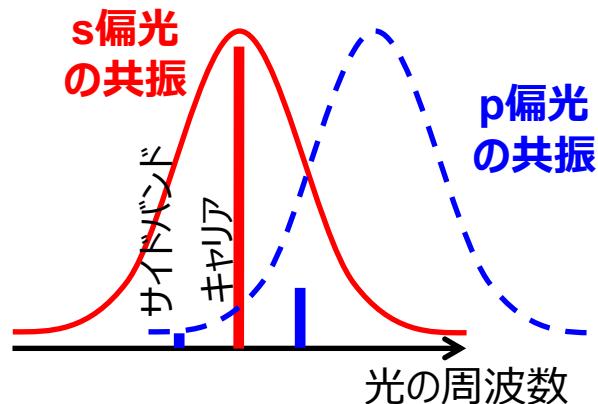
s偏光とp偏光の同時共振

- キャリアの偏光と、アクシオンにより生じるサイドバンドの偏光を同時に増幅する必要がある

同時共振する場合



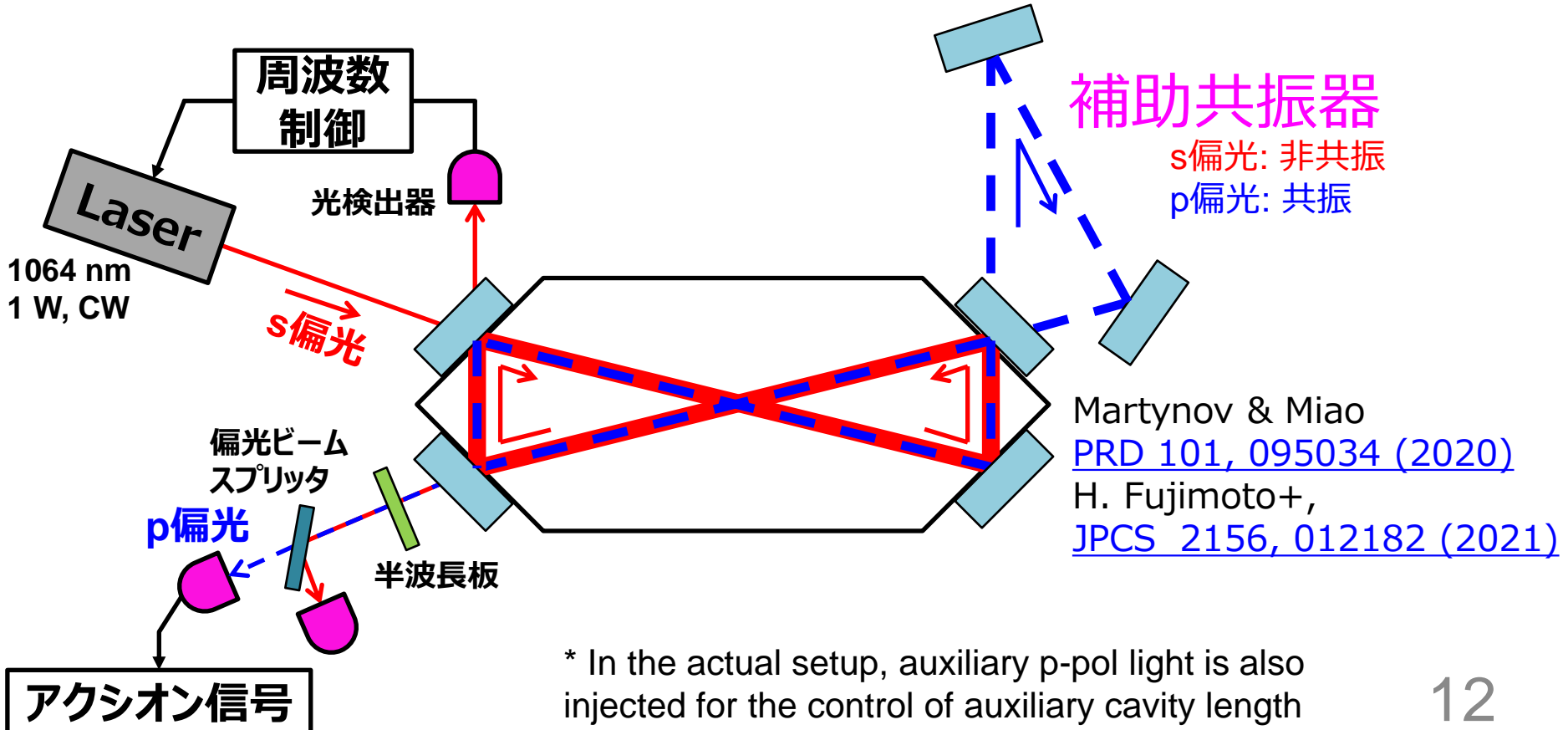
同時共振しない場合



Plot by Y. Oshima & H. Fujimoto

補助共振器の導入による解決

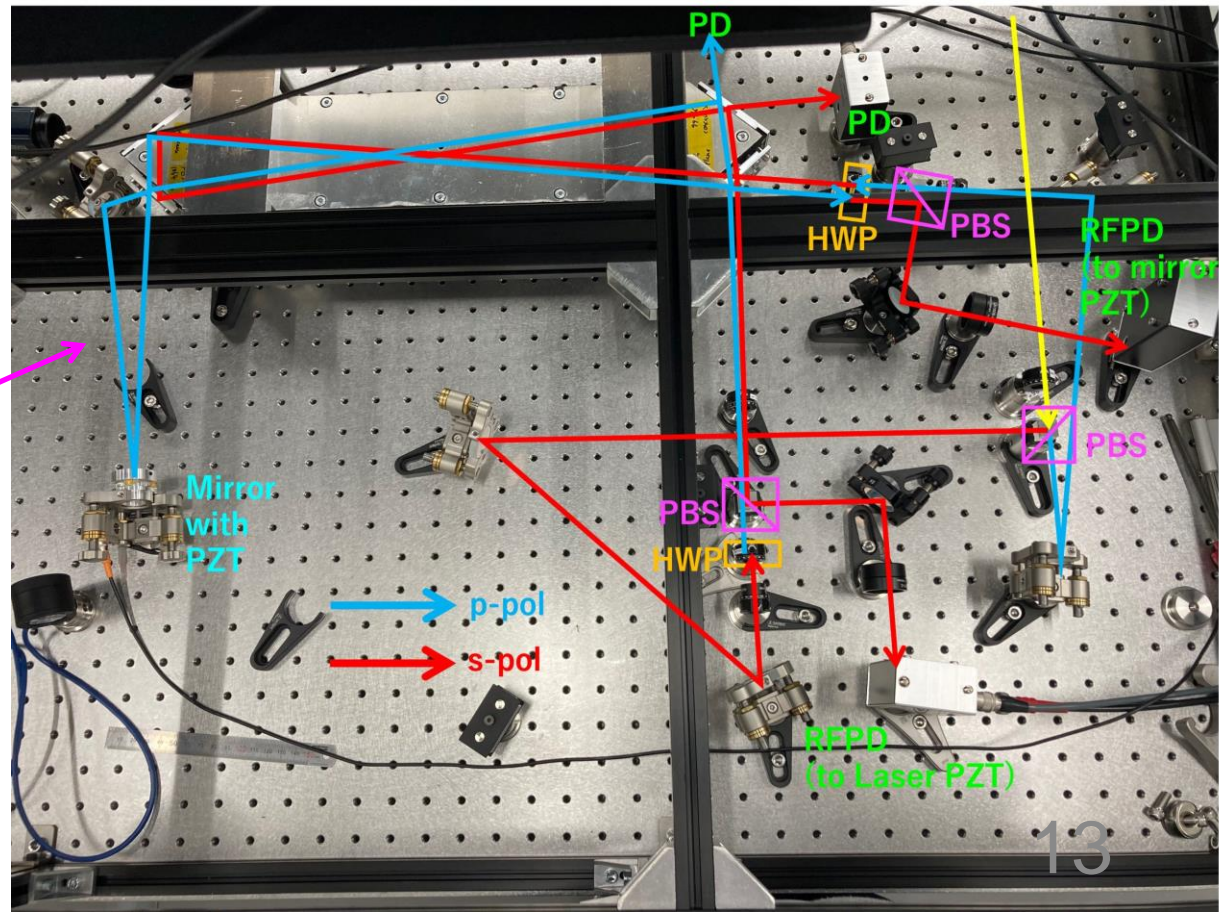
- 補助共振器でのs偏光とp偏光の共振状態に差をつけることで、補助共振器反射時に位相差をつける
- この位相差が、メイン共振器での位相差を補償



新しい装置

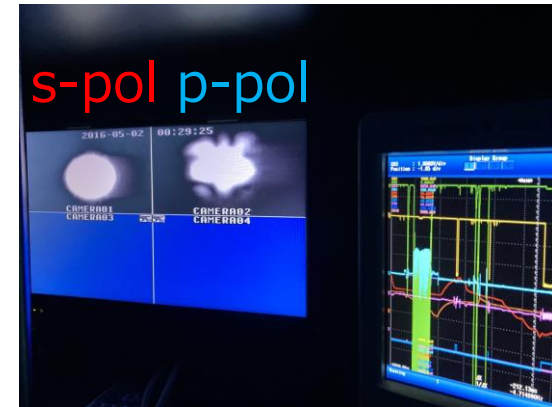
- 2Wレーザー光源の導入(これまでは0.5W)
- 補助共振器を導入

補助共振器



同時共振の実現に成功

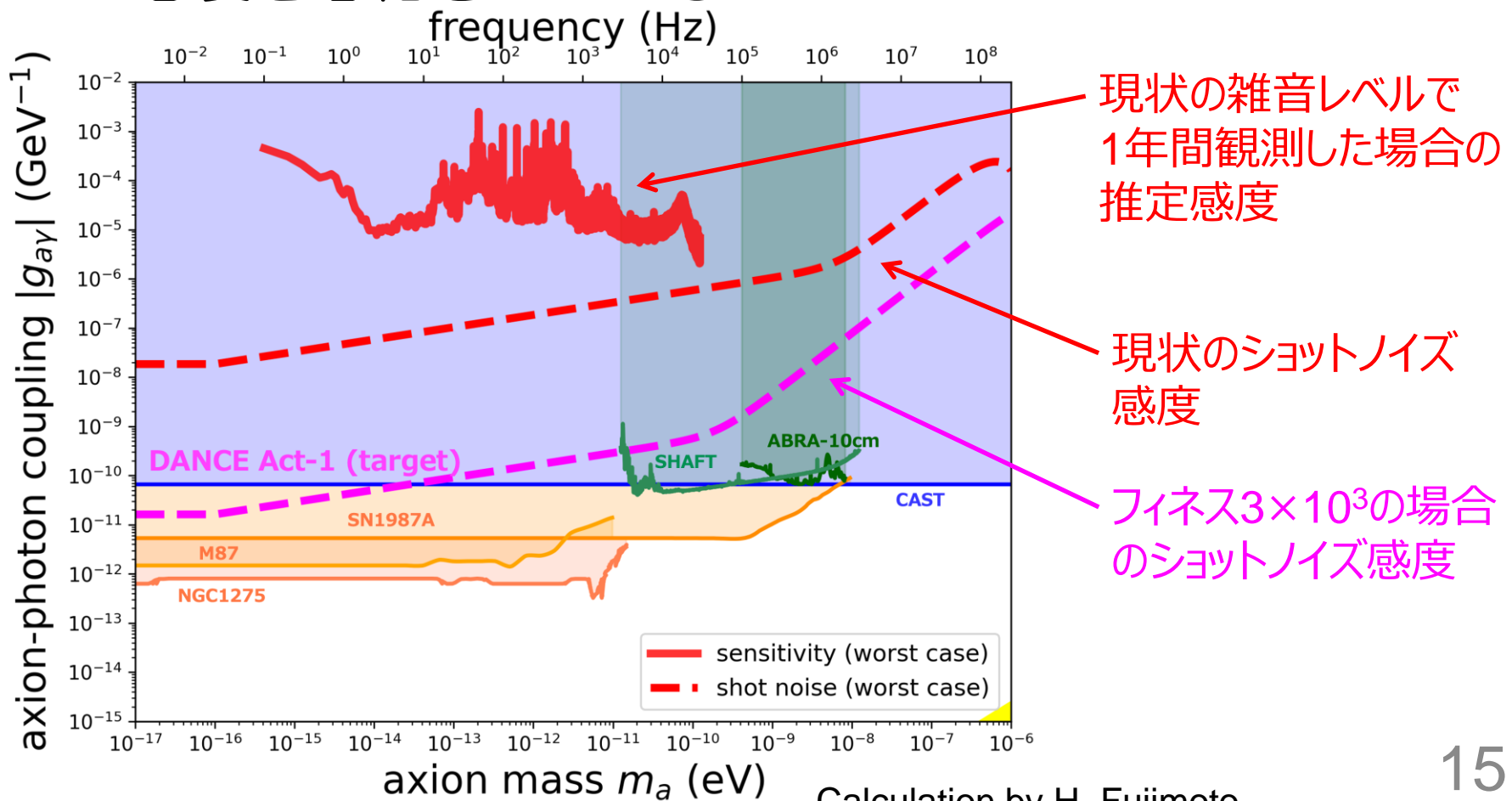
- 2021年11月に同時共振のデモ
(ただしそこらへんにあるPBSを用いた)
- より最適化された鏡を発注



	2021年5月	現状 (2022年1月)	さきがけ目標
共振器の周回長	1 m	1 m (+0.5 m 補助共振器)	1 m
入射光強度	242(12) mW (光源: 0.5 W)	21.4(9) mW (光源: 2 W)	1 W
フィネス (キャリア)	$2.85(5) \times 10^3$ s偏光	1204(12) s偏光、制御時	2×10^5
フィネス (サイドバンド)	195(3) p偏光	91(2) p偏光、制御時	2×10^5
s偏光とp偏光の 共振周波数差	2.52(2) MHz	制御で~0 Hz (もともとは ~92 MHz)	0 Hz 14

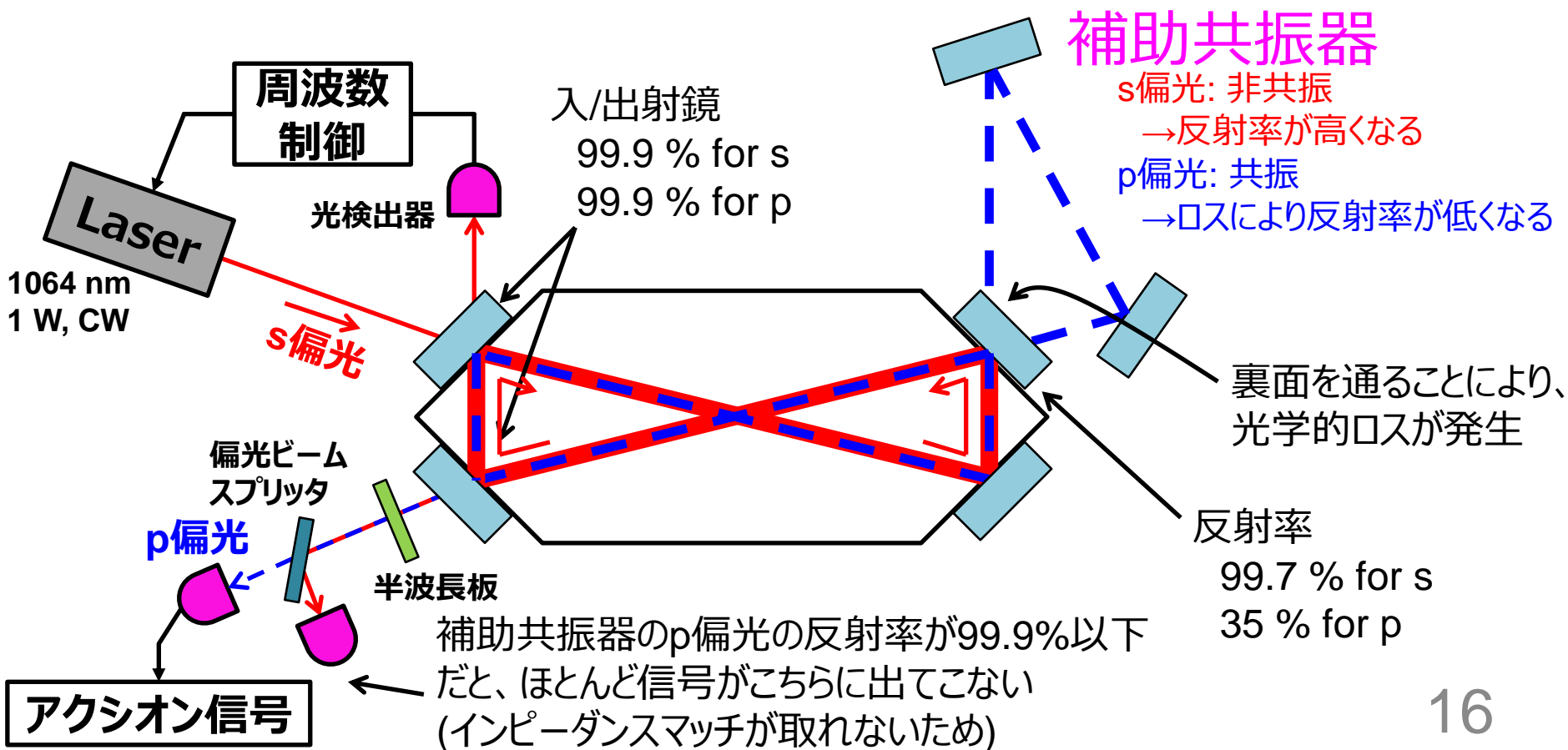
補助共振器をつけたあとの感度

- 広帯域にわたって約3桁の感度向上に成功
- ただし、補助共振器での光学的ロスがショットノイズ感度を悪化させている



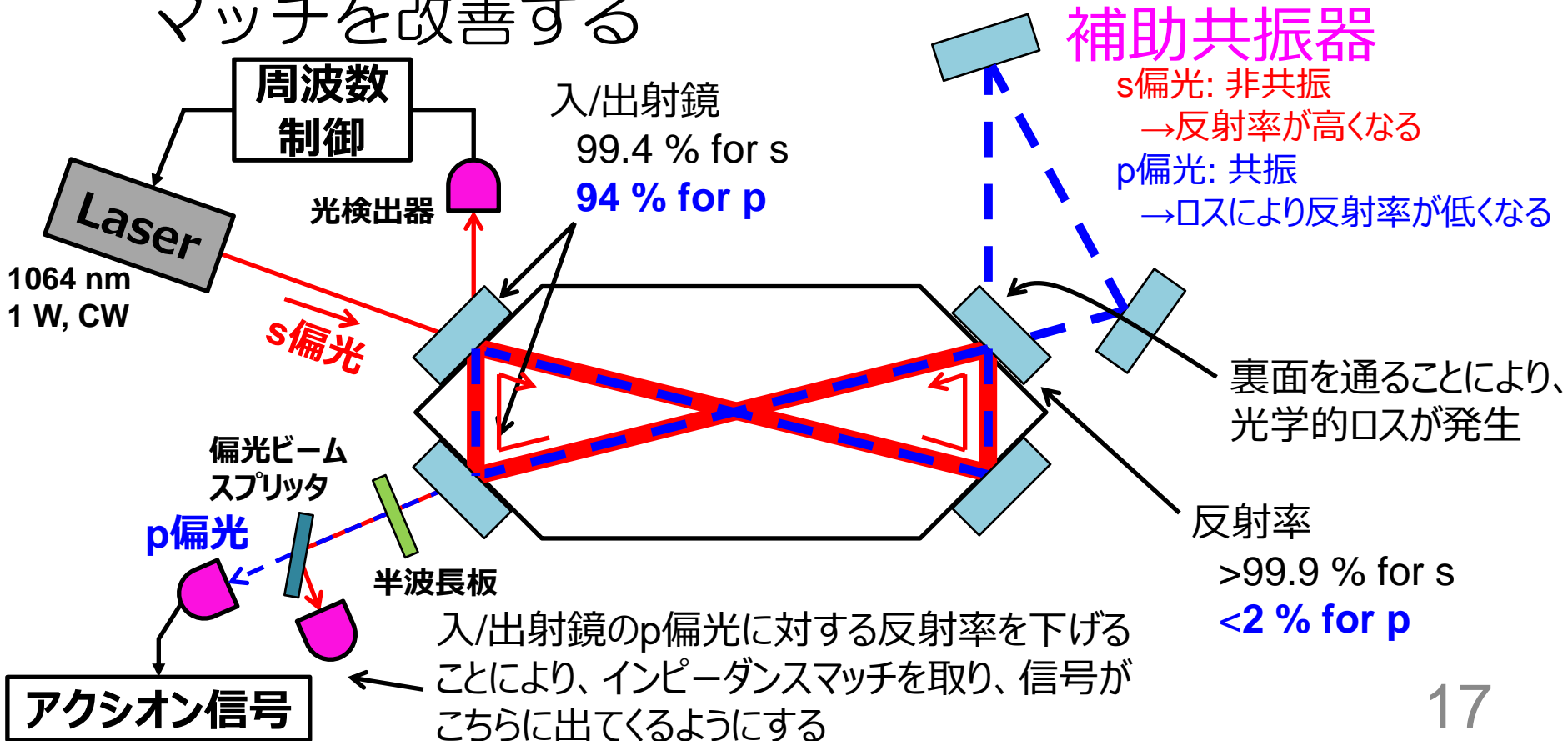
補助共振器での光学的ロス

- p偏光が信号取得ポートに出てくる量は補助共振器での光学的ロスやモードミスマッチに依存
- ほとんどの信号が補助共振器で失われてしまう



信号のロス回避

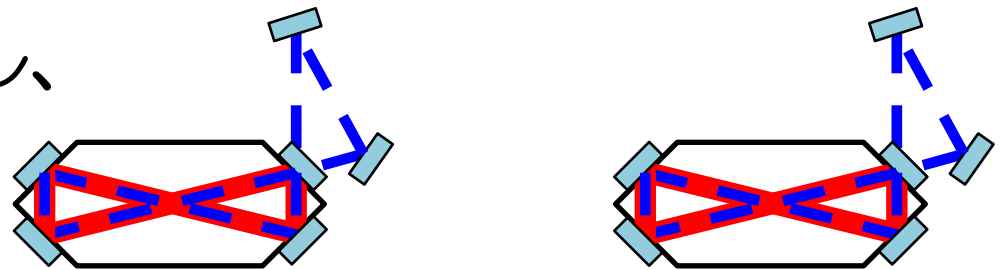
- 補助共振器のp偏光のフィネスを下げ、補助共振器での光学的ロスが増幅されないようにする
- 入/出射鏡のp偏光の反射率を下げ、インピーダンスマッチを改善する



今後の予定

- 反射率などをより最適化した鏡を用いて、さらなる感度向上を目指す
- さまざまな雑音低減に取り組む
 - レーザー光の強度安定化
 - 迷光の低減(補助共振器制御用の光の周波数シフト、入射のp偏光除去など)
 - 共振器長制御の最適化(補助共振器PZTミラーの改善など)
 - 環境雑音のモニタと除去 などなど...

- 2つ目の装置を製作し、
相関解析



- (カリフォルニア工科大学に異動したことにより、
研究中断中... まずは研究の早期再開を目指す)

まとめ

- レーザー干渉計により、全く新しいダークマター探索が可能になる
- 光リング共振器を用いて光の偏光回転を探索することにより、アクシオンダークマターを探索
- 2021年5月に初の試験運転を実施し、データ解析を含めた初のEnd-to-end試験に成功
- p偏光とs偏光が同時共振しない問題を補助共振器により解決
- デモンストレーションが完了、
今後は高感度化を進める