



東京大学
THE UNIVERSITY OF TOKYO

JSR Fellowship

蝶ネクタイ型の光共振器を用いた アクシオン暗黒物質の探索

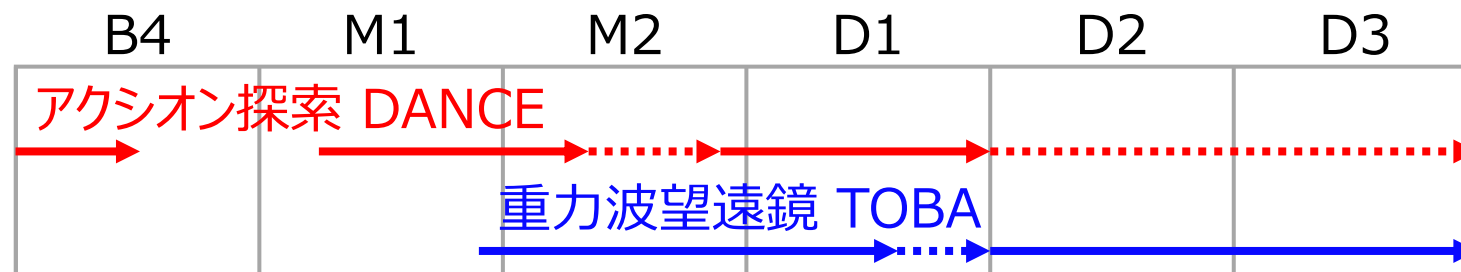
大島 由佳 (安東研究室 博士3年)

はじめに

蝶ネクタイ型の光共振器を用いたアクシオン暗黒物質の探索

DANCE: Dark matter Axion search with riNg Cavity Experiment

- 宇宙物理実験・レーザー干渉計を用いた精密計測という点ではTOBAと共通



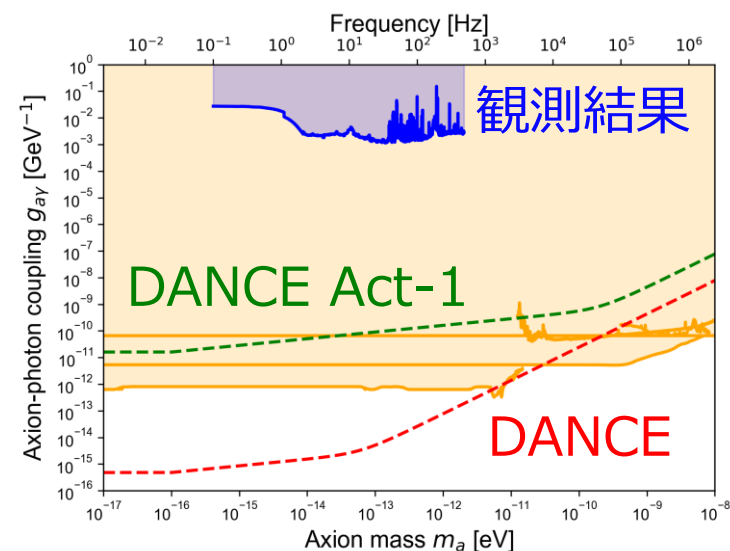
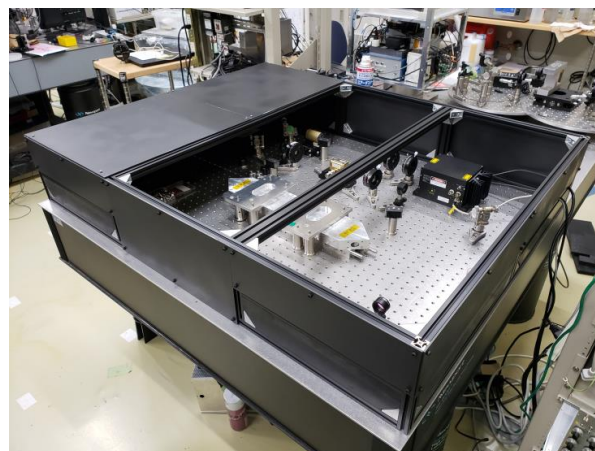
- 初めての観測運転により上限値を得た

→ 昨年末に論文を出版

Y. Oshima+, [Phys. Rev. D 108, 072005 \(2023\)](#)

- いろいろな発展

- 感度向上に向けた実験が進行中
- いくつかの新しい探索手法も派生



目次

- アクション暗黒物質の探索
- DANCEの原理
- DANCEの最初の実験結果
- 感度向上に向けた現在の実験状況
- DANCEから派生したアクション探索実験

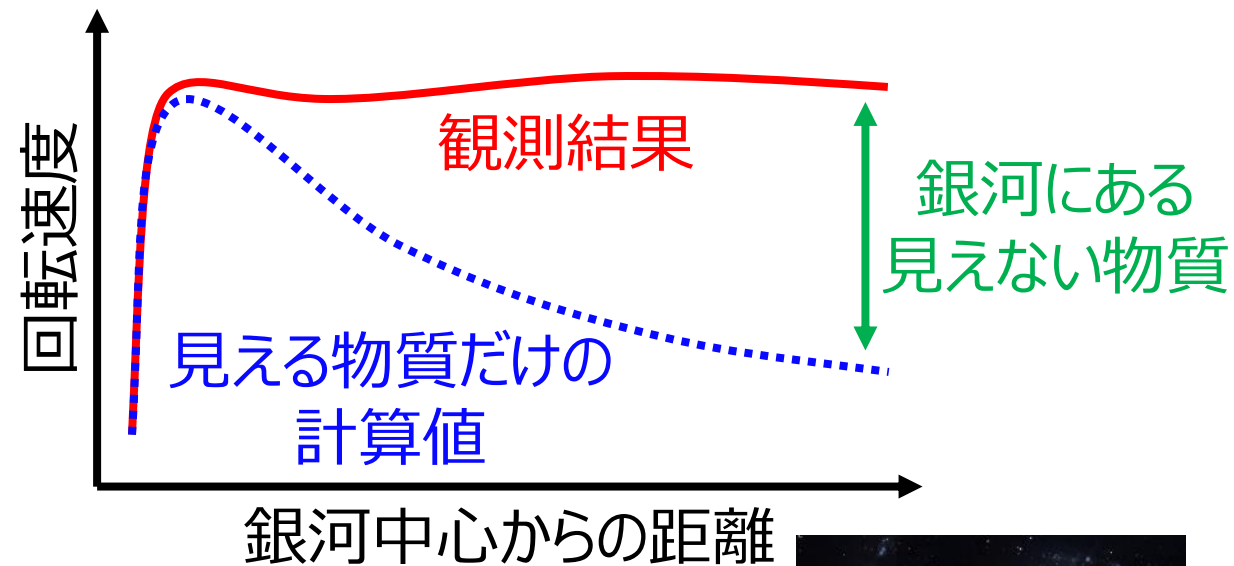
目次

- アクション暗黒物質の探索
- DANCEの原理
- DANCEの最初の実験結果
- 感度向上に向けた現在の実験状況
- DANCEから派生したアクション探索実験

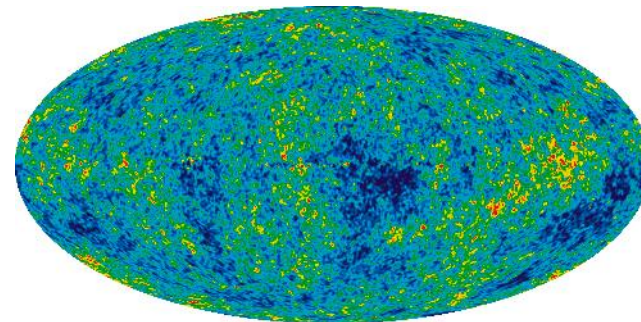
暗黒物質

- 暗黒物質(ダークマター): 宇宙の約3割を占める正体不明の物質

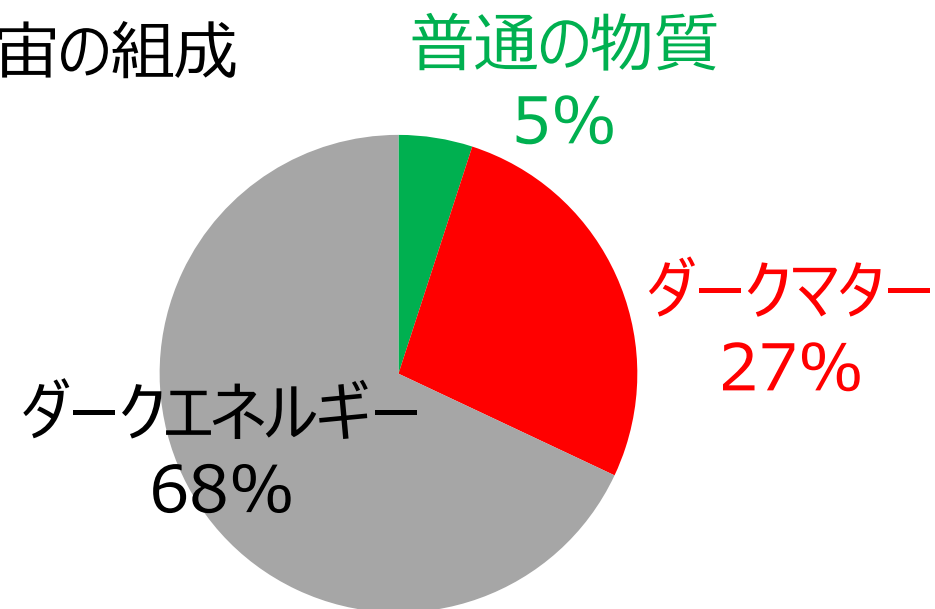
渦巻銀河の回転曲線問題



宇宙マイクロ波背景放射



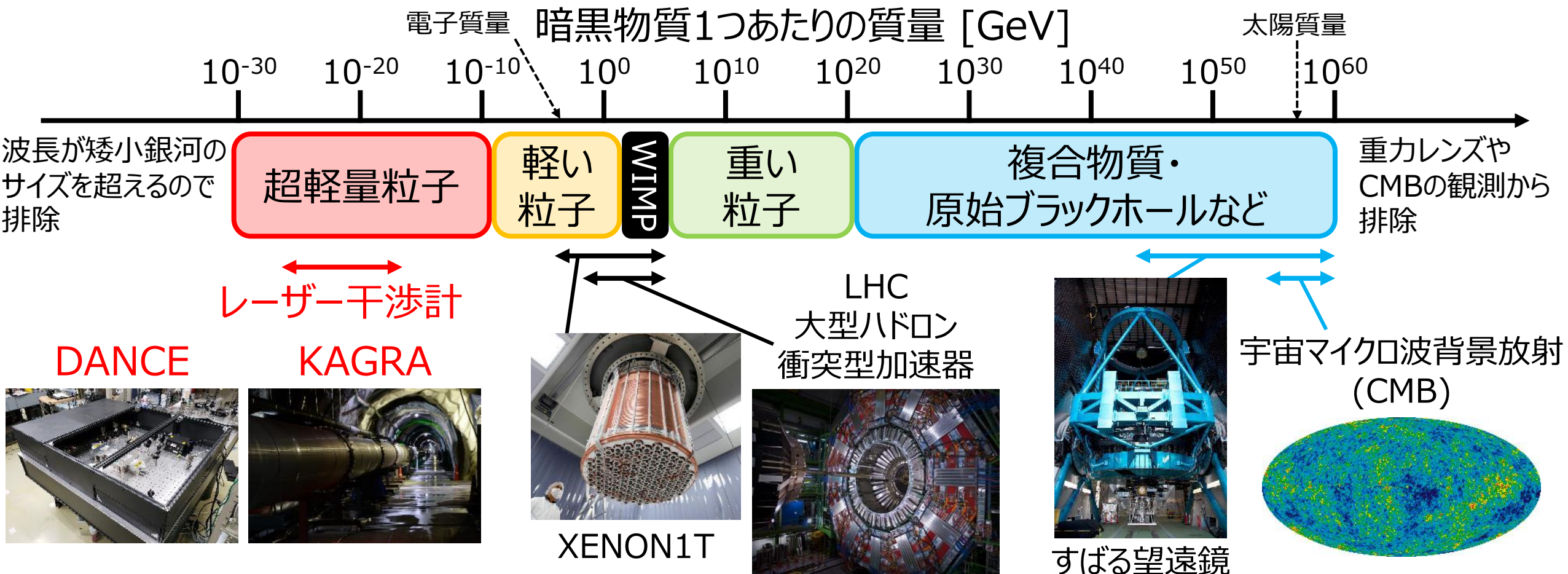
→ 宇宙の組成



暗黒物質の探索

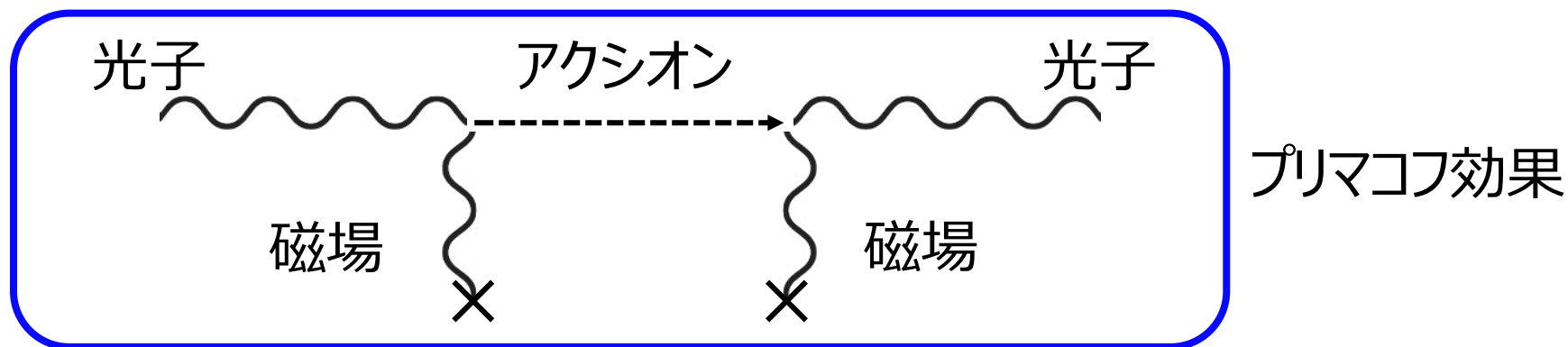
- 40年間WIMPに探索が集中していたが未発見
- 新発想による他の質量帯の候補の探索が求められている

※ 太陽系の暗黒物質密度
0.4 GeV/cm³



アクシオン・ALPsとその探索

- アクシオン: 量子色力学の強いCP問題を解決するために提案された未発見の素粒子
- Axion-like particles (ALPs): 弦理論から予言されたアクシオンに似た様々な素粒子
- 暗黒物質の有力候補
- これまでは強磁場下で光子に転換する効果を用いた探索が主流



- 超軽量で古典的な波としてふるまう

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

→ レーザー干渉計で磁場を用いずに高感度に探索できる

目次

- アクション暗黒物質の探索
- DANCEの原理
- DANCEの最初の実験結果
- 感度向上に向けた現在の実験状況
- DANCEから派生したアクション探索実験

アクシオンによる直線偏光の回転振動

- アクシオン-光子相互作用により右円偏光と左円偏光に速度差が生じる

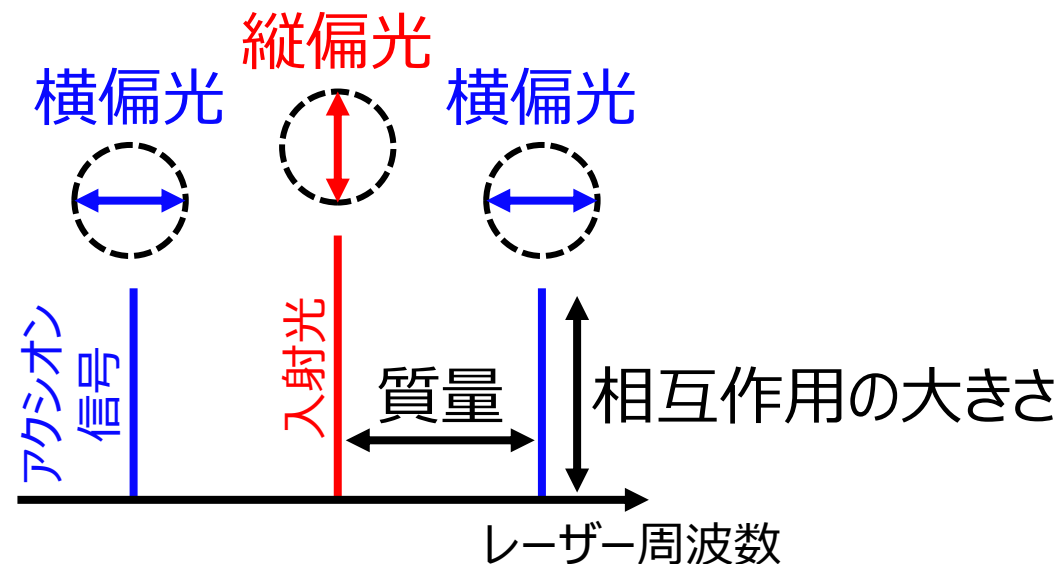
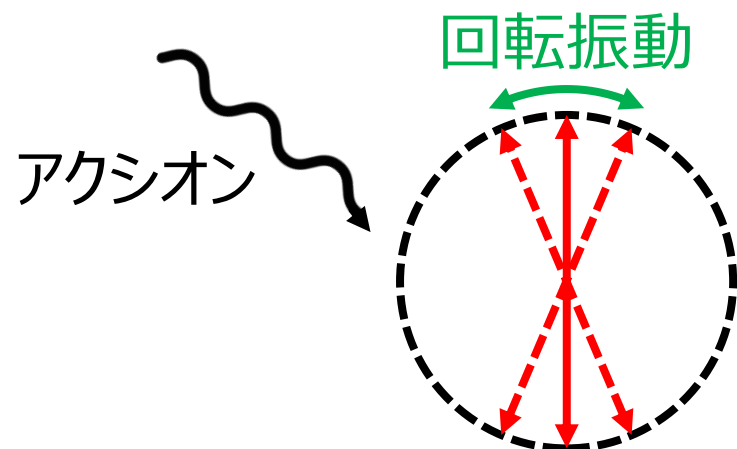
$$c_{L/R} = \sqrt{1 \pm \frac{g_{a\gamma} a_0 m_a}{k} \sin(m_a t + \delta_\tau)}$$

アクシオン-光子結合定数

アクシオン場

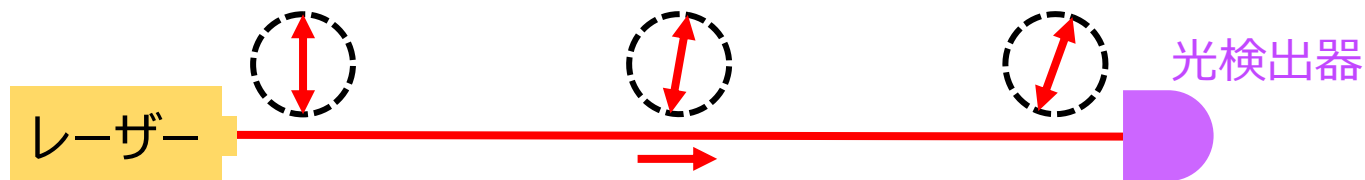
アクシオン質量

- 直線偏光の偏光面が回転振動する
 - 縦偏光をとばしたとき横偏光が生じる
- 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 分かる

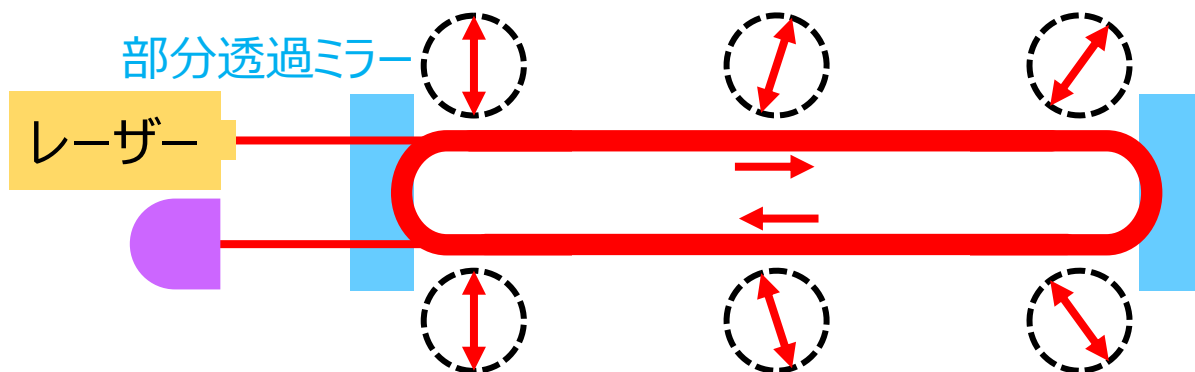


蝶ネクタイ型の光共振器

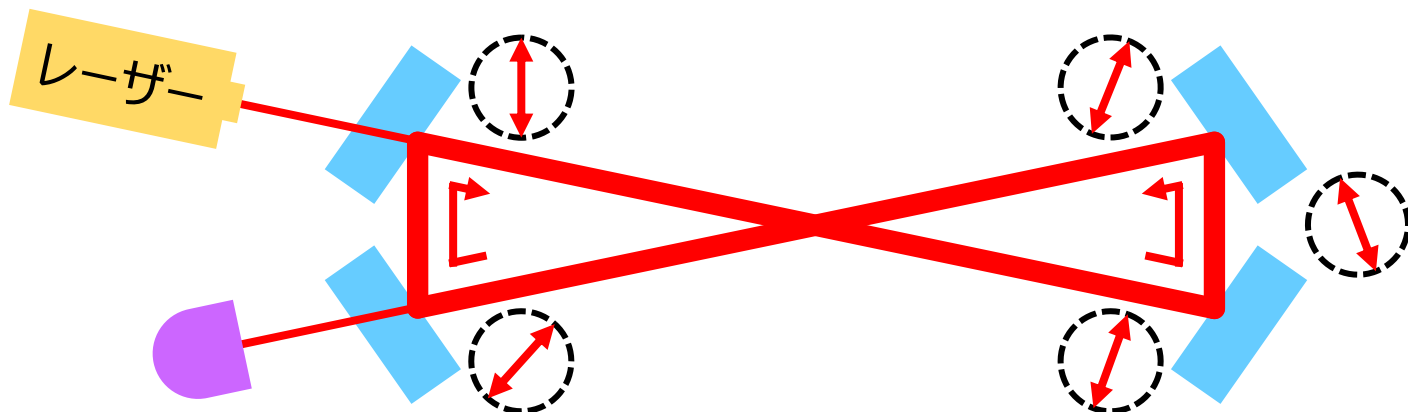
- 短い距離では偏光の回転角が小さい



- 線型の光共振器で距離を伸ばせるが鏡面反射で偏光が反転し信号がキャンセルしてしまう



- 蝶ネクタイ型の光共振器では偏光反転を防ぎつつ距離を伸ばすことで回転角を増幅できる

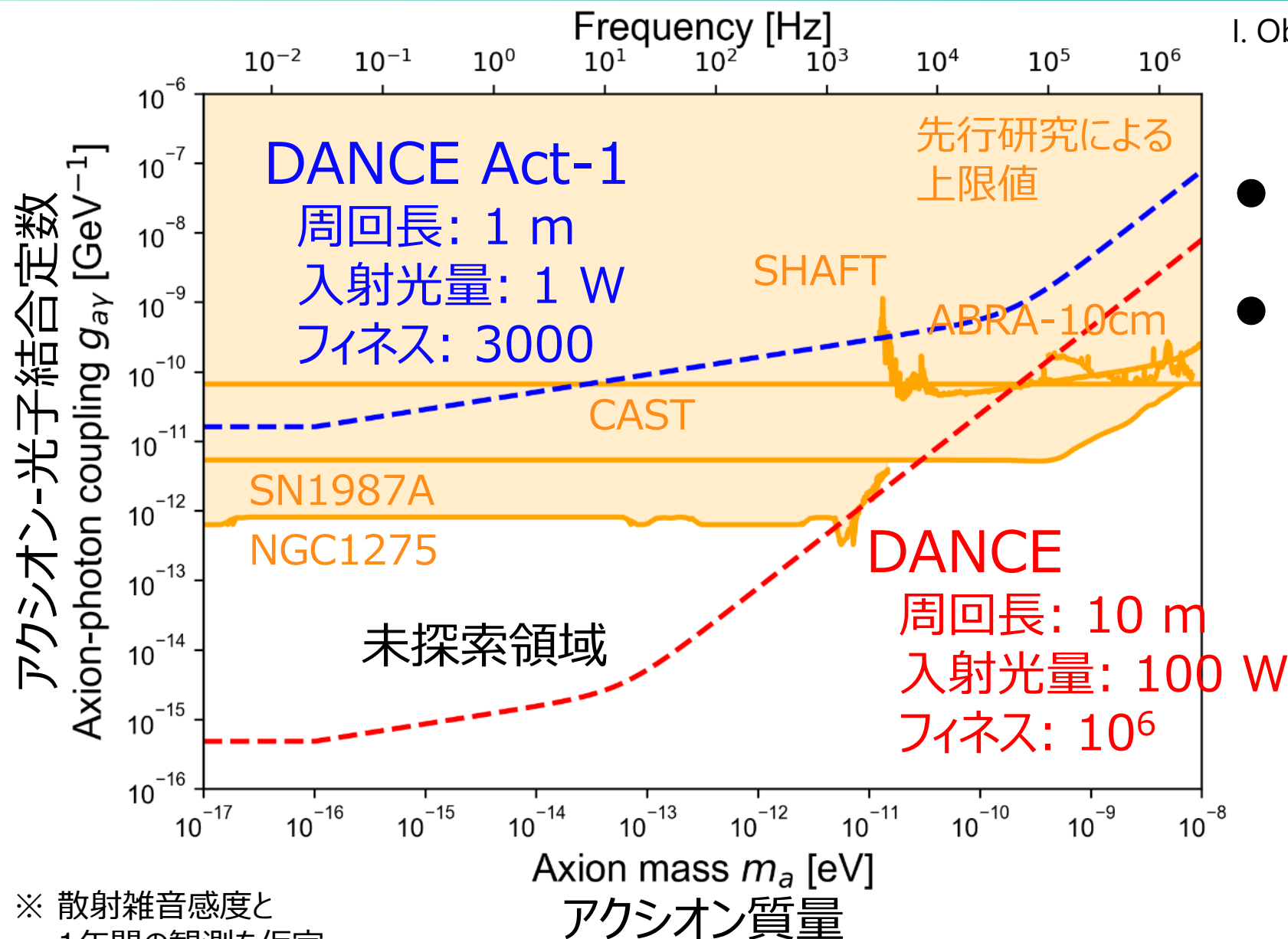


Dark matter
Axion search
with riNg Cavity
Experiment

蝶ネクタイ

DANCEの目標感度

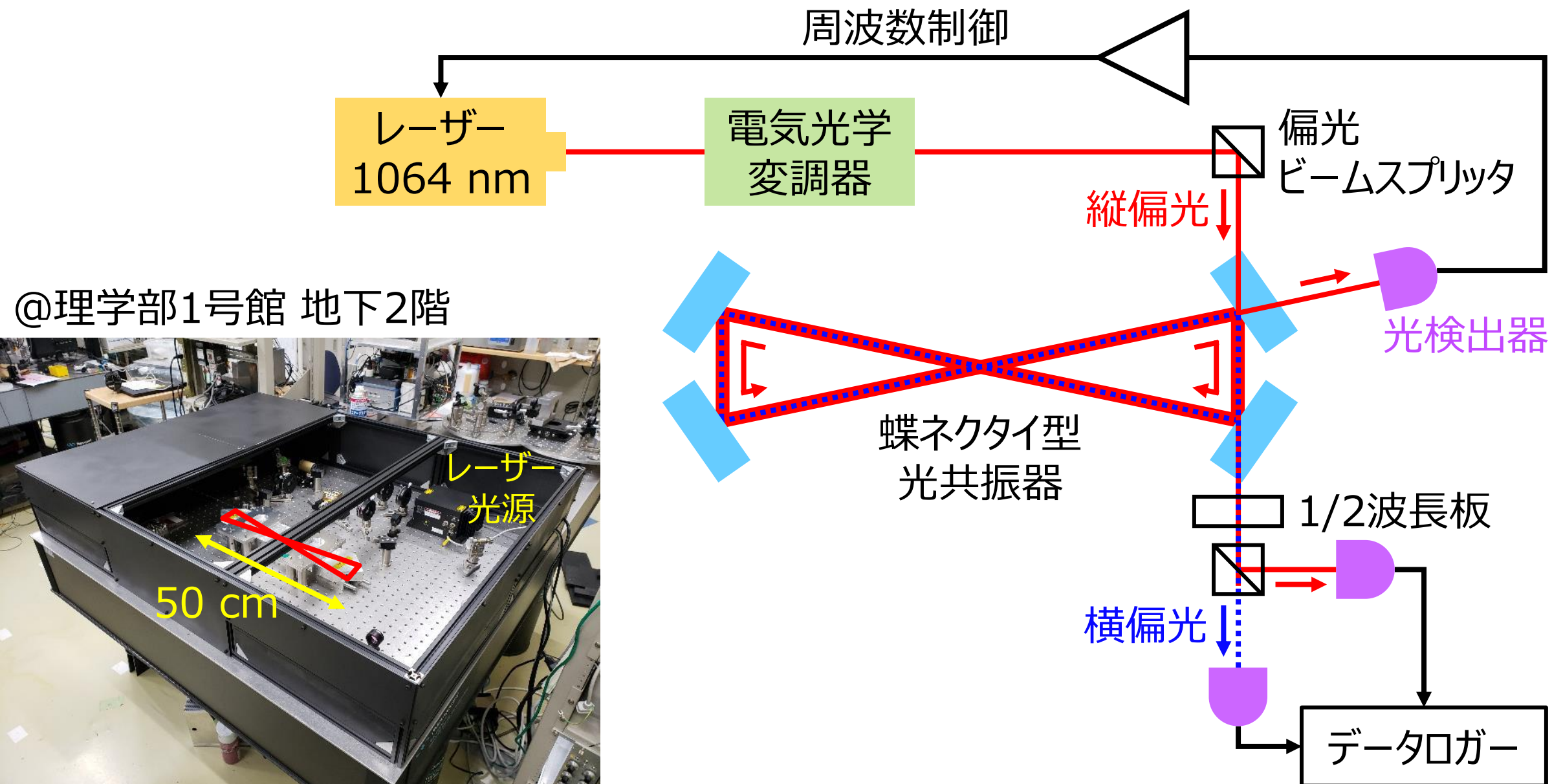
I. Obata+, [Phys. Rev. Lett. 121, 161301 \(2018\)](https://arxiv.org/abs/1805.08020)



- 実験室サイズでもCAST超え
- 大型化・高性能化で現在の上限値を3桁上回る感度で探索できる

※ 散射雑音感度と
1年間の観測を仮定

DANCE Act-1 実験装置

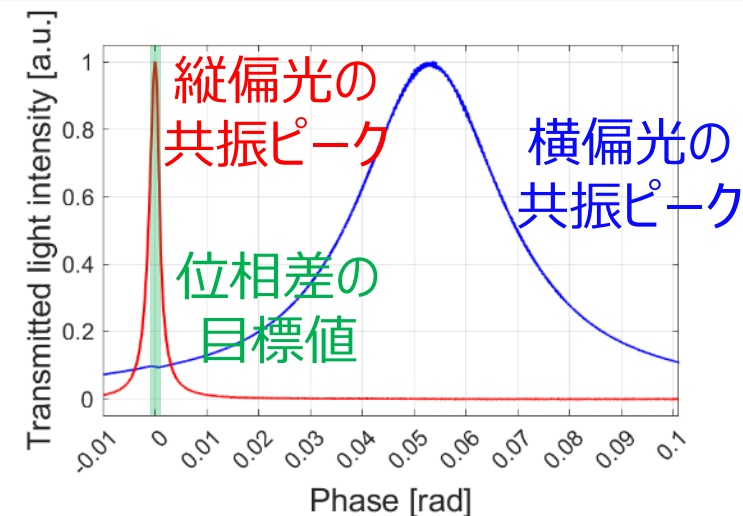


共振器の性能評価

YO+, [JPCS 2156 012042 \(2021\)](#)

	目標値	測定値 (2020年11月)	測定値 (2021年5月)
入射光量	1 W	~40 mW	242(12) mW
透過光量	1 W	~1 mW	153(8) mW
縦偏光のフィネス	3×10^3	~300	$2.85(5) \times 10^3$
横偏光のフィネス	3×10^3	~500	195(3)
偏光間の共振位相差	$< 1 \times 10^{-3}$ rad	~0.6 rad	$5.28(4) \times 10^{-2}$ rad

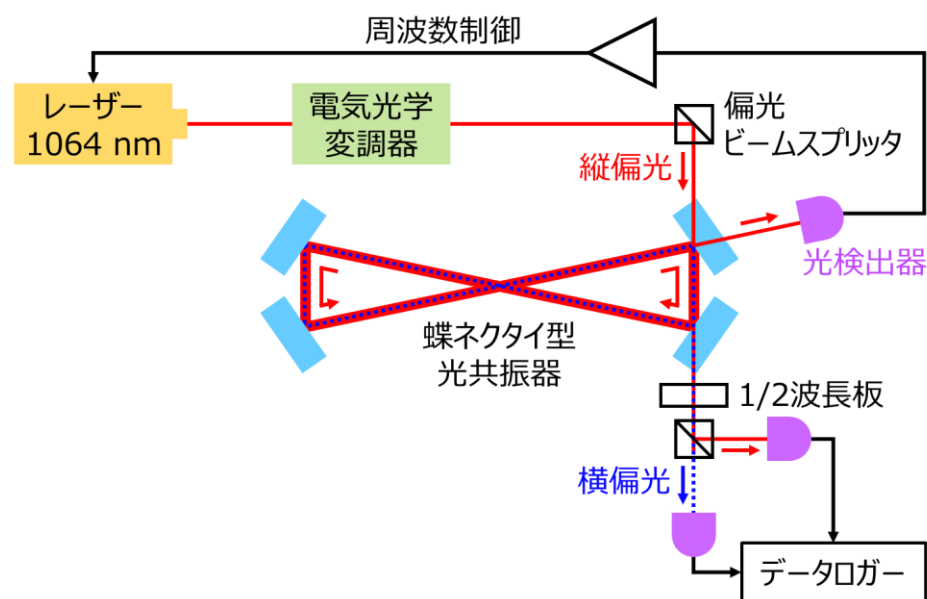
フィネス: 共振器内をレーザーが周回する回数に比例する物理量
共振ピークの鋭さで測定できる



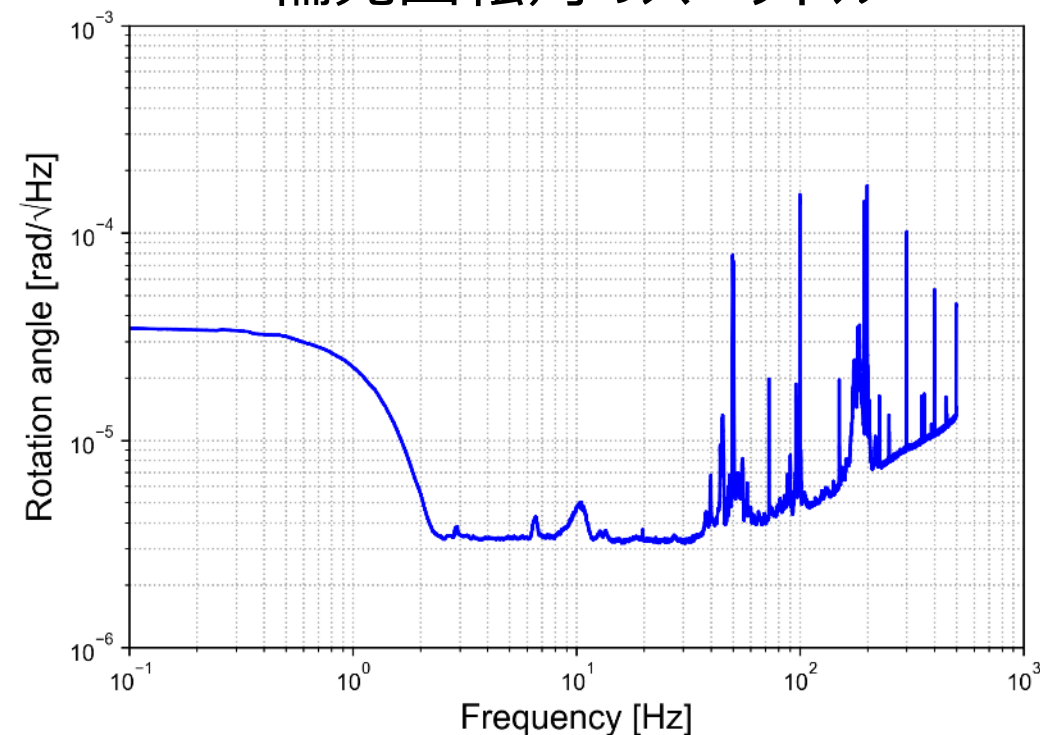
2週間の観測運転

- 2021年5月18日-30日にデータを取得した
- サンプルレート: 1 kHz
- 周波数制御が最も安定だった24時間 (×2セット) のデータを選択し解析した
- 縦偏光と横偏光の強度から偏光回転角に校正した

$$\phi(t) = \sqrt{\frac{P_p(t)}{P_s(t) + P_p(t)}} - 2\theta_{\text{HWP}}$$



偏光回転角のスペクトル



データ解析

- 宇宙論の研究者と共同でデータ解析

H. Nakatsuka+, [Phys. Rev. D 108, 092010 \(2023\)](#)

LVK Collaboration, [arXiv:2403.03004](#)

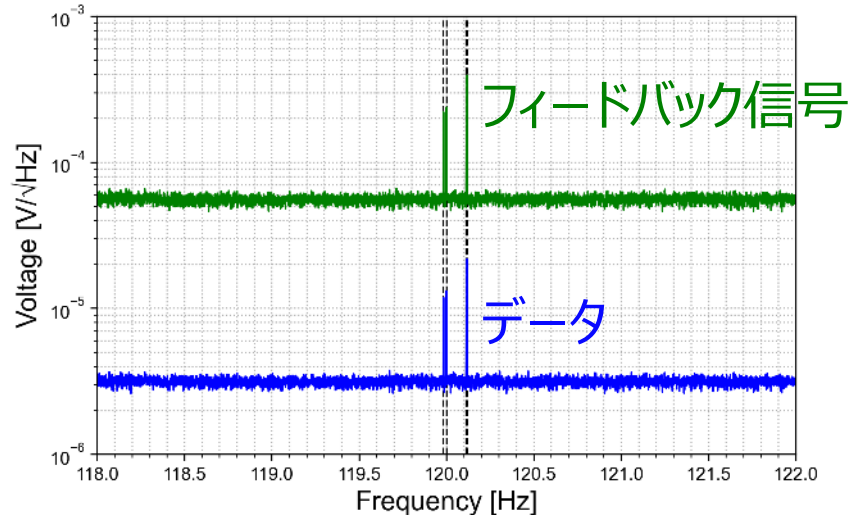
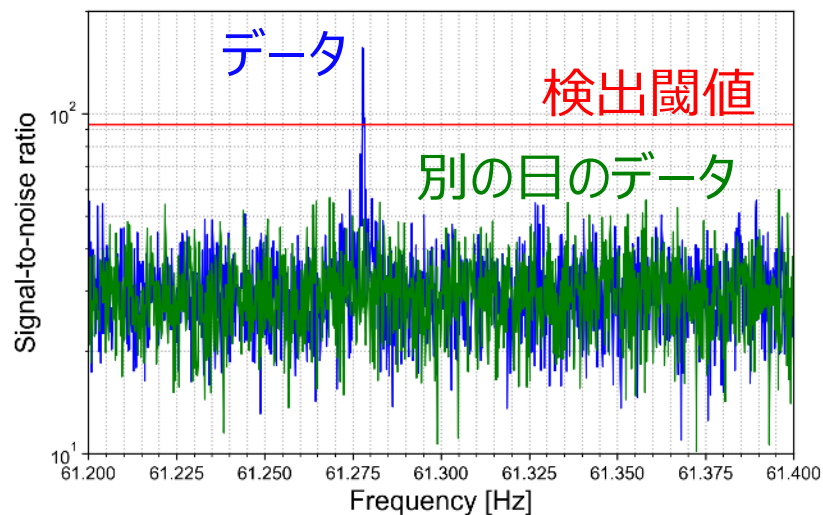
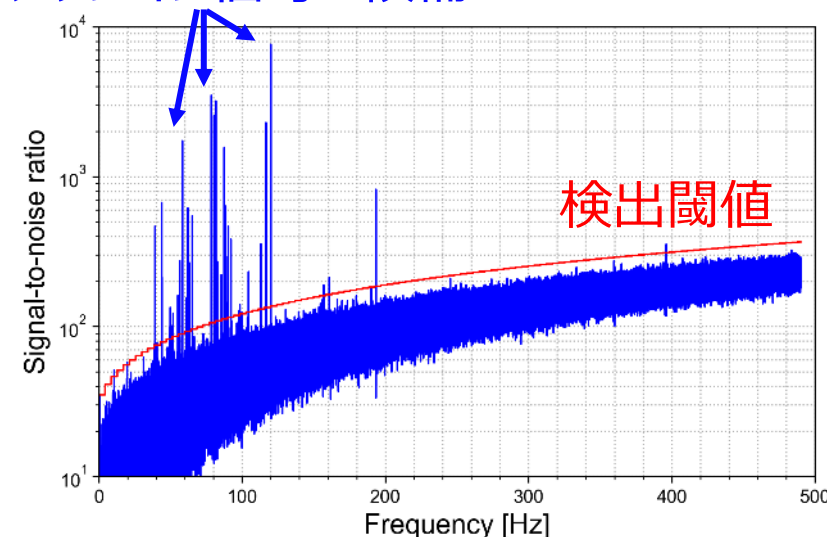
- 551点がアクシオン検出閾値を超えた

→ 3つの手順でアクシオン信号である可能性を棄却

- 2つのデータセットを比較: 551 → 271
- アクシオンの理論的なピーク幅と比較: 271 → 7
- 周波数制御のフィードバック信号と比較: 7 → 0

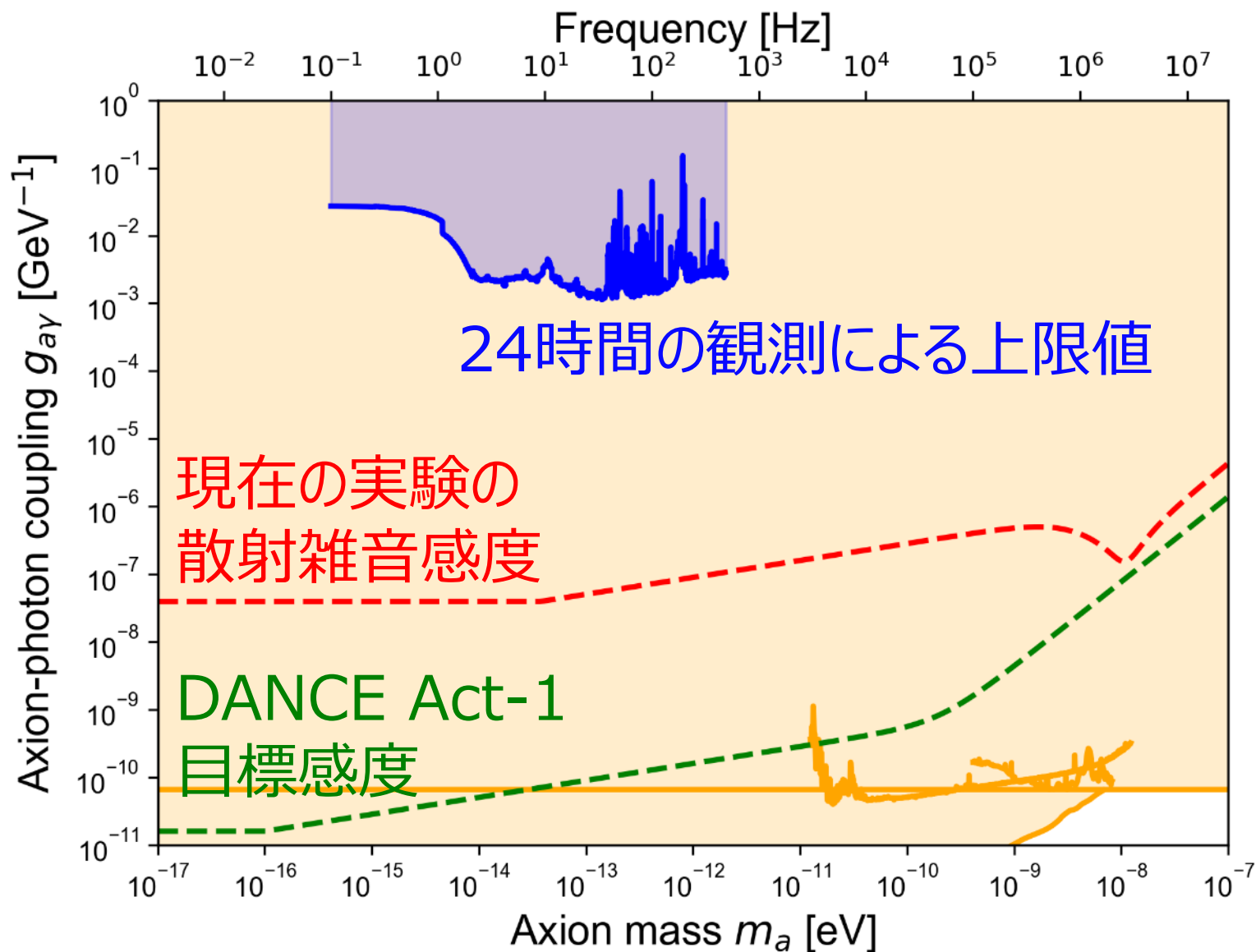
→ すべての候補が棄却され上限値をつけることに成功した

アクシオン信号の候補



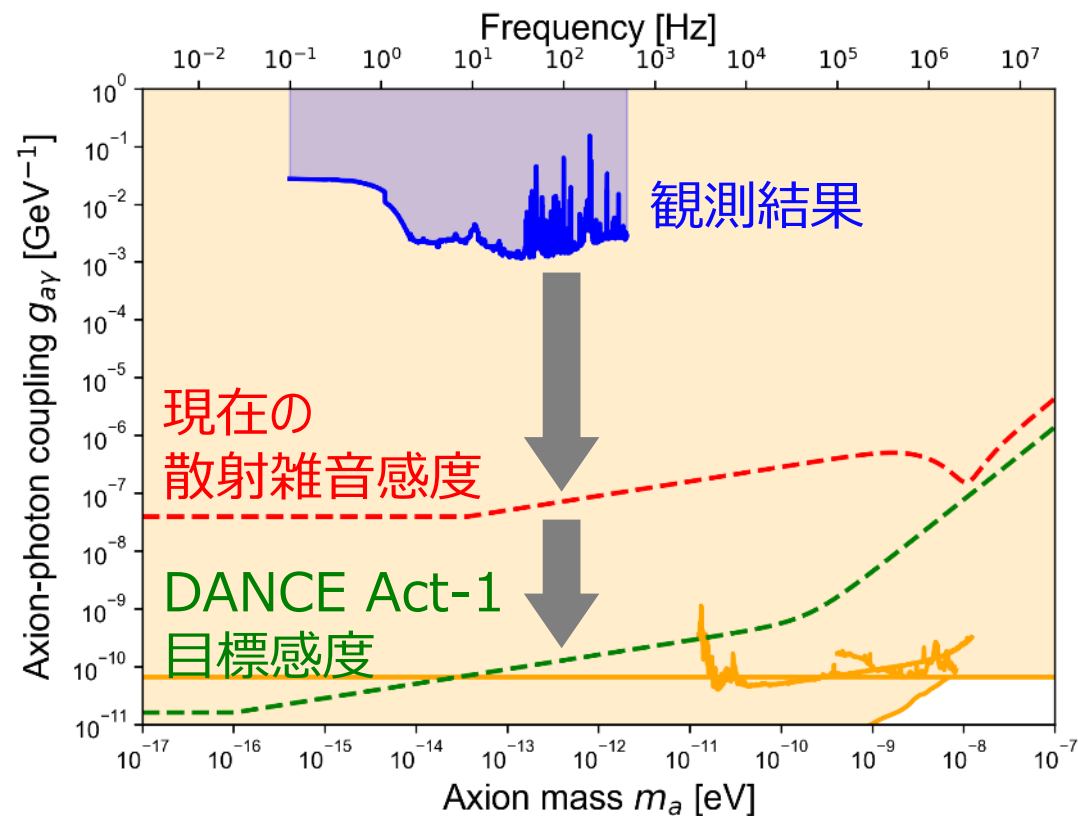
結果

YO+, [Phys. Rev. D 108, 072005 \(2023\)](#)



- 光共振器を用いた偏光観測による世界初のアクシオン探索
- DANCE Act-1の目標感度より約7桁感度が悪い

感度向上に向けた考察



1. 観測結果から散射雑音感度

- 現在の感度を制限している古典的な雑音を低減し量子的な散射雑音に到達する
 - レーザー強度雑音
 - レーザー周波数雑音
 - 機械振動雑音

2. 散射雑音感度から目標感度

- パラメータを改善し目標値を達成する
 - 観測時間: 1日 \rightarrow 1年
 - 透過光量: 0.2 W \rightarrow 1 W
 - 横偏光のフィネス: 200 \rightarrow 3000
 - 偏光間の共振位相差:
0.05 rad \rightarrow < 0.001 rad

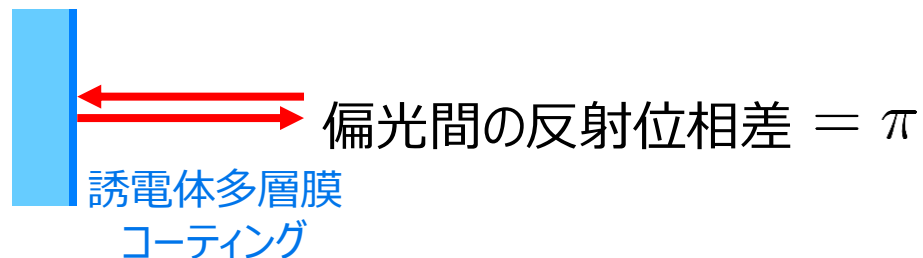
目次

- アクション暗黒物質の探索
- DANCEの原理
- DANCEの最初の実験結果
- 感度向上に向けた現在の実験状況
- DANCEから派生したアクション探索実験

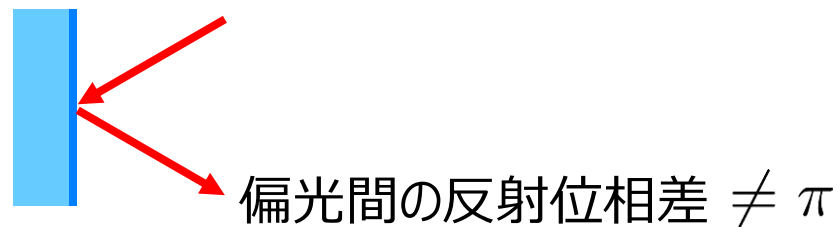
縦偏光と横偏光の共振位相差

- 共振器の鏡へレーザーが斜めに入射するとき偏光間の共振位相差がゼロではなくなる

垂直入射のとき

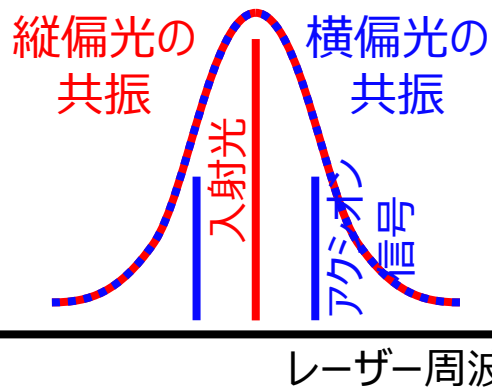


斜め入射のとき

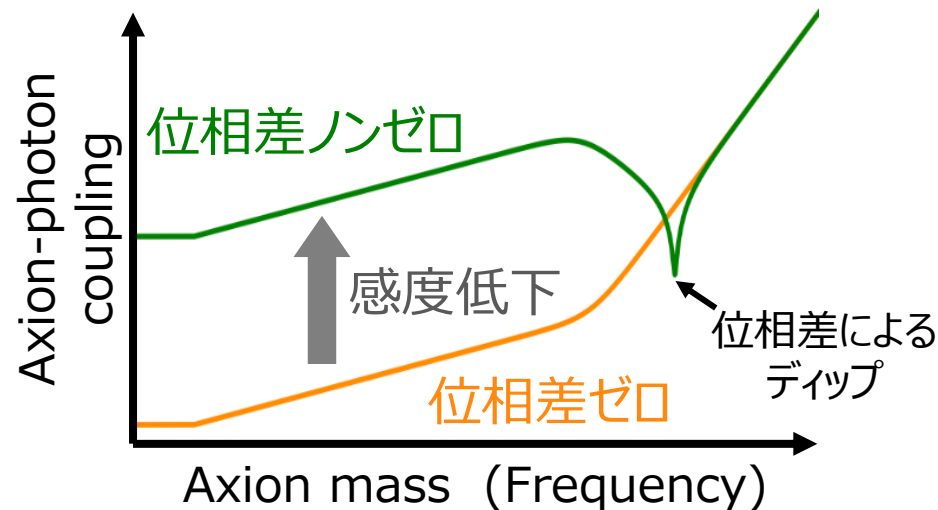
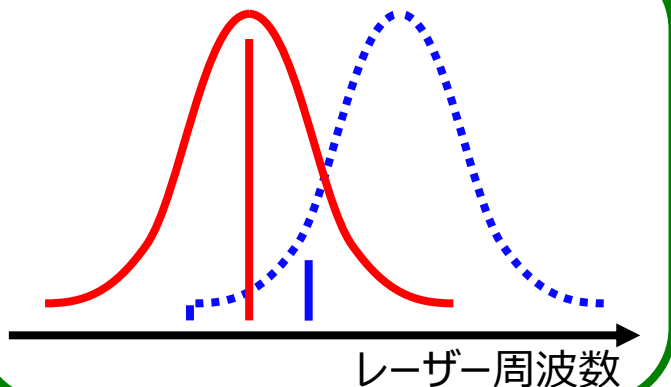


- 共振位相差ノンゼロのときアクシオン信号が共振器内で増幅されず感度が低下する
 - 一般的に知られていたが想定より大きいことが実験で明らかになった
 - フィネス3000, 位相差0.05 radのとき約4桁低下

共振位相差ゼロ



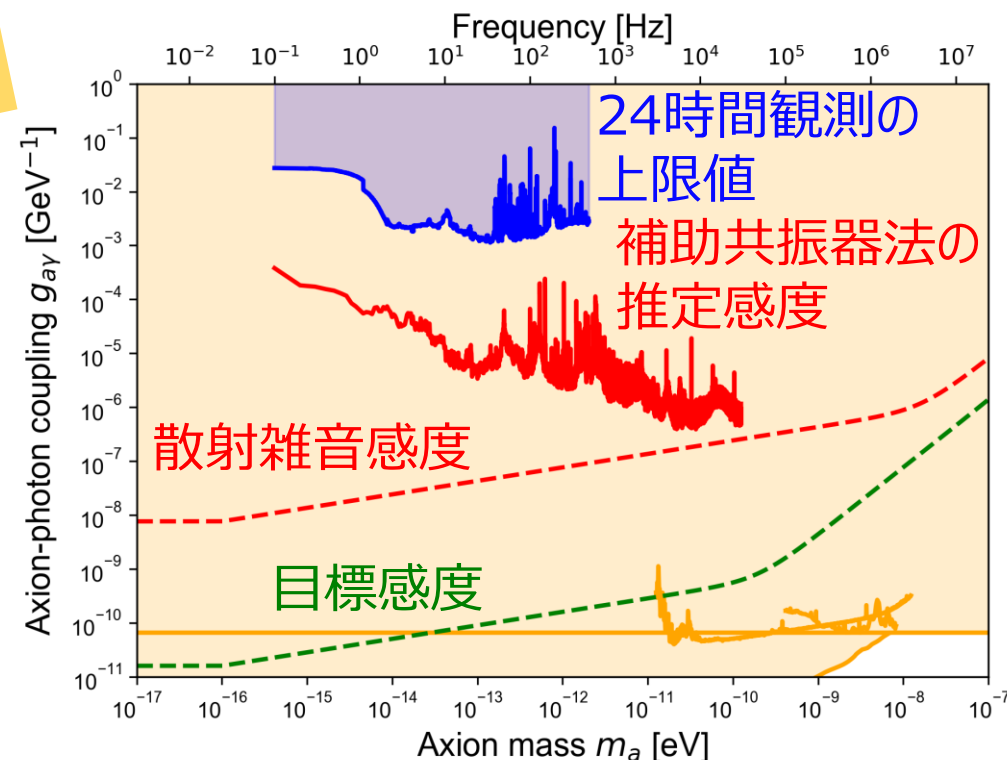
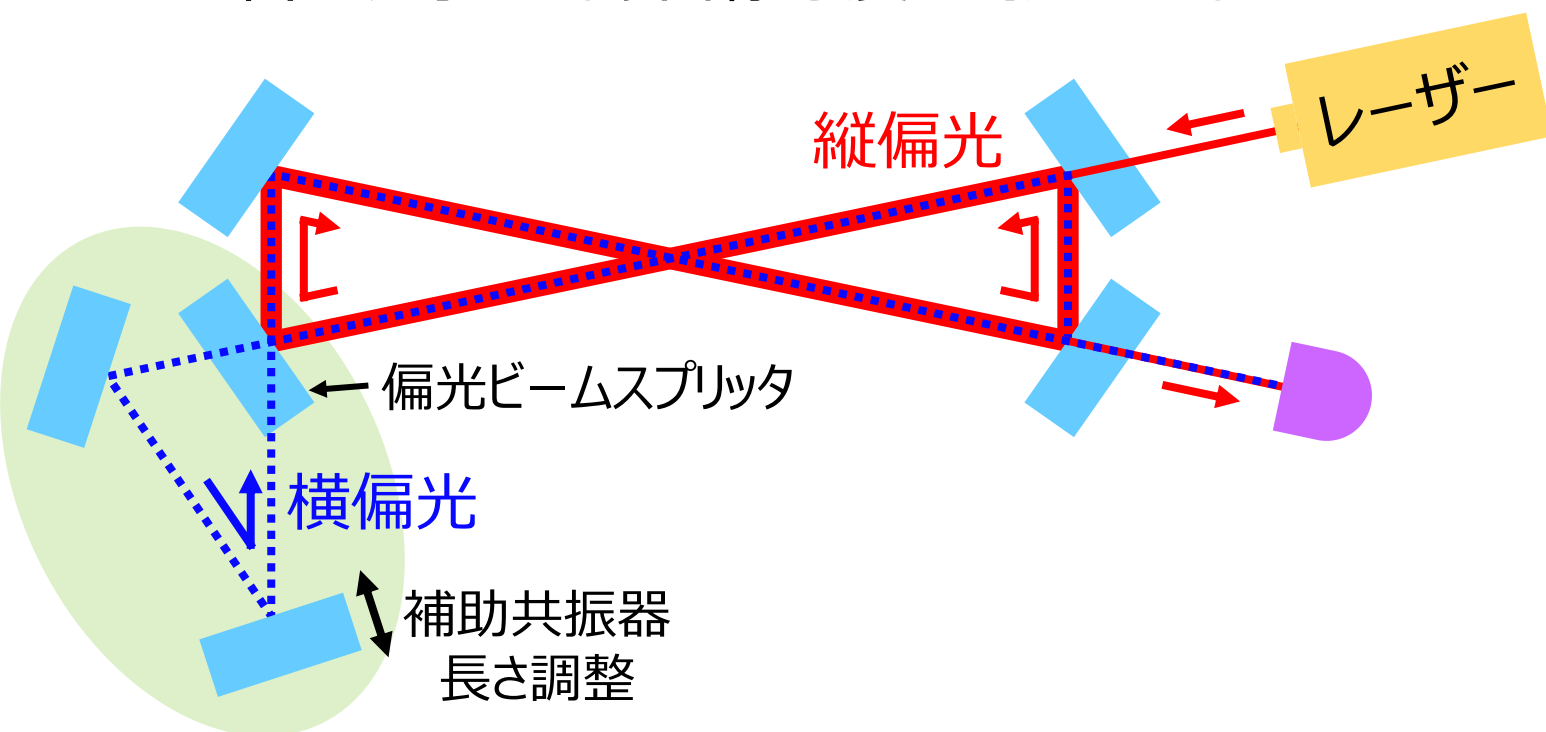
共振位相差ノンゼロ



新手法①：補助共振器法

- 偏光ビームスプリッタと補助共振器を導入し
補助共振器の長さを調整した
→ 偏光間の共振位相差ゼロを達成
- 共振器内の偏光ビームスプリッタでの光のロスで
フィネスが小さくなり目標感度に到達できない

	補助共振器なし	補助共振器あり
縦偏光のフィネス	$2.85(5) \times 10^3$	549(3)
横偏光のフィネス	195(3)	36.8(2)
共振位相差	0.0528(4) rad	0 rad



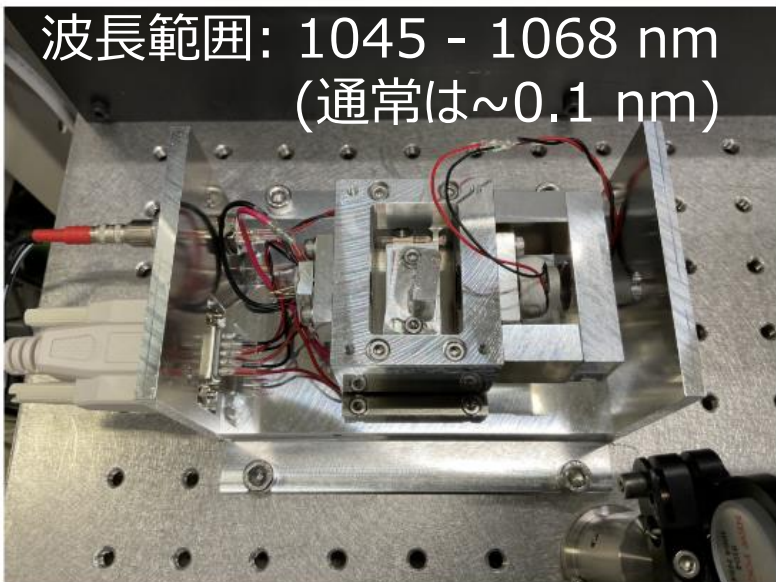
補助共振器

新手法②：ゼロ位相差ミラーと波長可変レーザー法

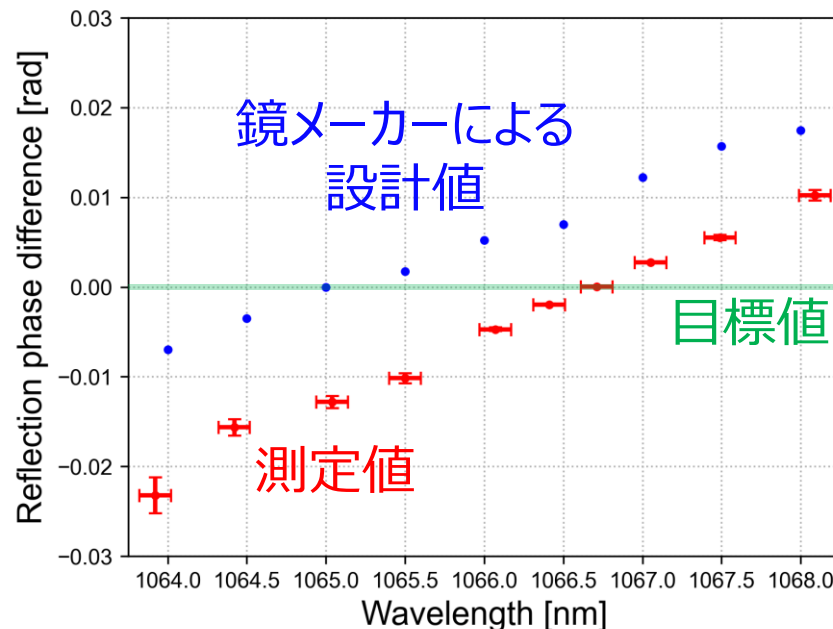
- 鏡のコーティング設計をメーカーと相談
 - 特定の波長で反射位相差の目標値を満たすのは製作精度が足りず難しい
 - 反射位相差に大きな波長依存性を持たせることは可能
 - 波長を大きく変えられるレーザー光源と組み合わせれば反射位相差がゼロになる波長を選択できる

波長可変レーザー

波長範囲: 1045 - 1068 nm
(通常は~0.1 nm)



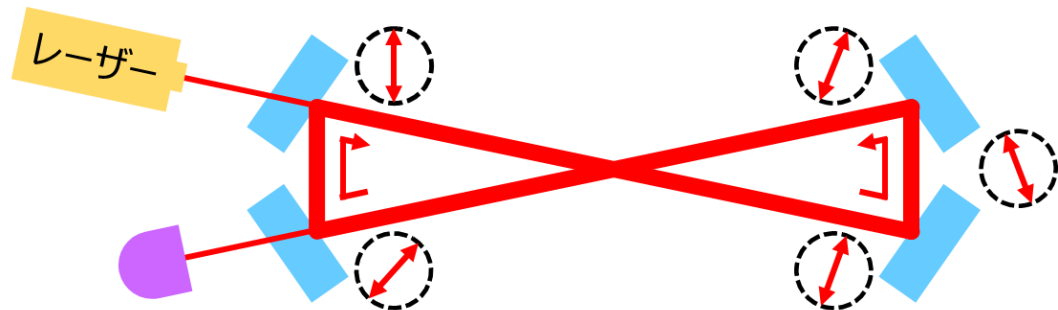
鏡1枚の反射位相差測定



- 1066.7 nmで目標値<0.3 mradを達成
- 蝶ネクタイ型の共振器を製作中

他の研究グループとの比較

- ライバルが増えつつあるが他の研究グループをリードしている



	DANCE (東大)			LIDA実験 (バーミンガム大)	ADBC実験 (MIT)
	1代目	2代目	3代目		
共振位相差の調整方法	なし	補助共振器	波長可変レーザー (予定)	なし (補助共振器を予定)	レーザーの鏡への入射角 (予定)
強み	<ul style="list-style-type: none"> 蝶ネクタイ型の構成を提案 最初に結果を出版 	<ul style="list-style-type: none"> 独自手法 初めて位相差ゼロを達成 	<ul style="list-style-type: none"> 独自手法 	<ul style="list-style-type: none"> ハイパワーレーザーと長い共振器長による高い感度 	<ul style="list-style-type: none"> 独自手法

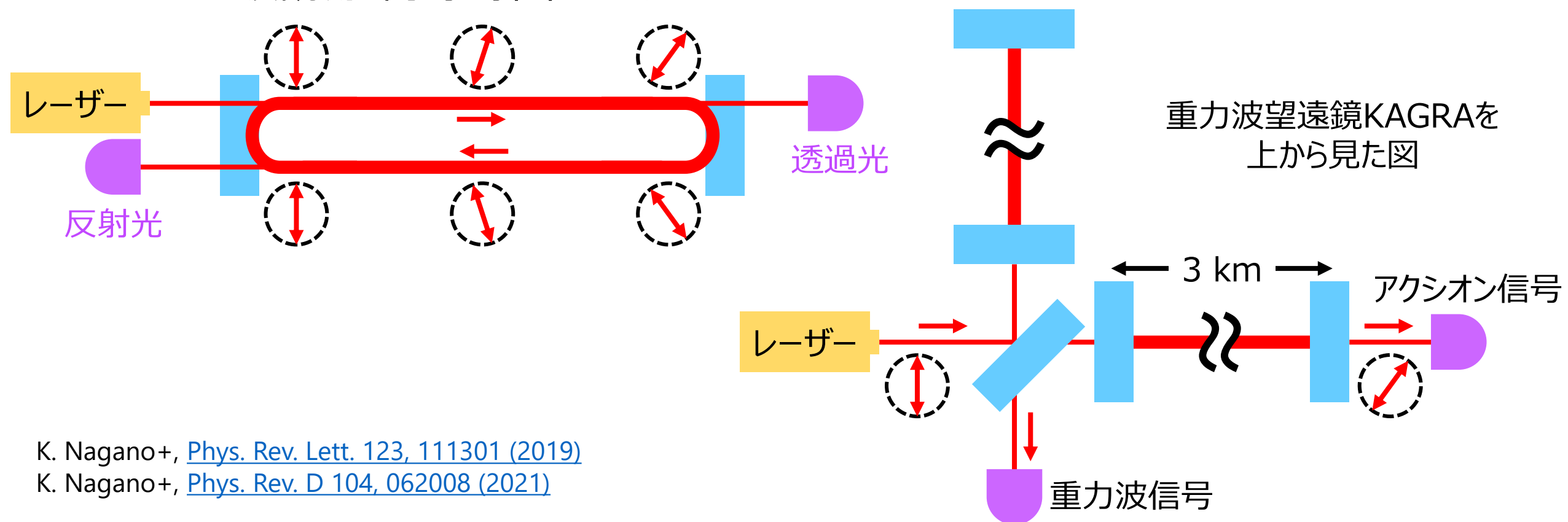
J. Heinze+, [Phys. Rev. Lett. 132, 191002 \(2024\)](#)

目次

- アクション暗黒物質の探索
- DANCEの原理
- DANCEの最初の実験結果
- 感度向上に向けた現在の実験状況
- DANCEから派生したアクション探索実験

派生実験①：重力波望遠鏡を用いたアクション探索

- 線型の光共振器の反射光ポートでは鏡面反射で偏光が反転し信号がキャンセルしてしまう
- kmサイズの線型共振器なら透過光ポートで探索できる
 - 重力波望遠鏡の腕共振器が使える
 - 重力波観測と同時に探索できる

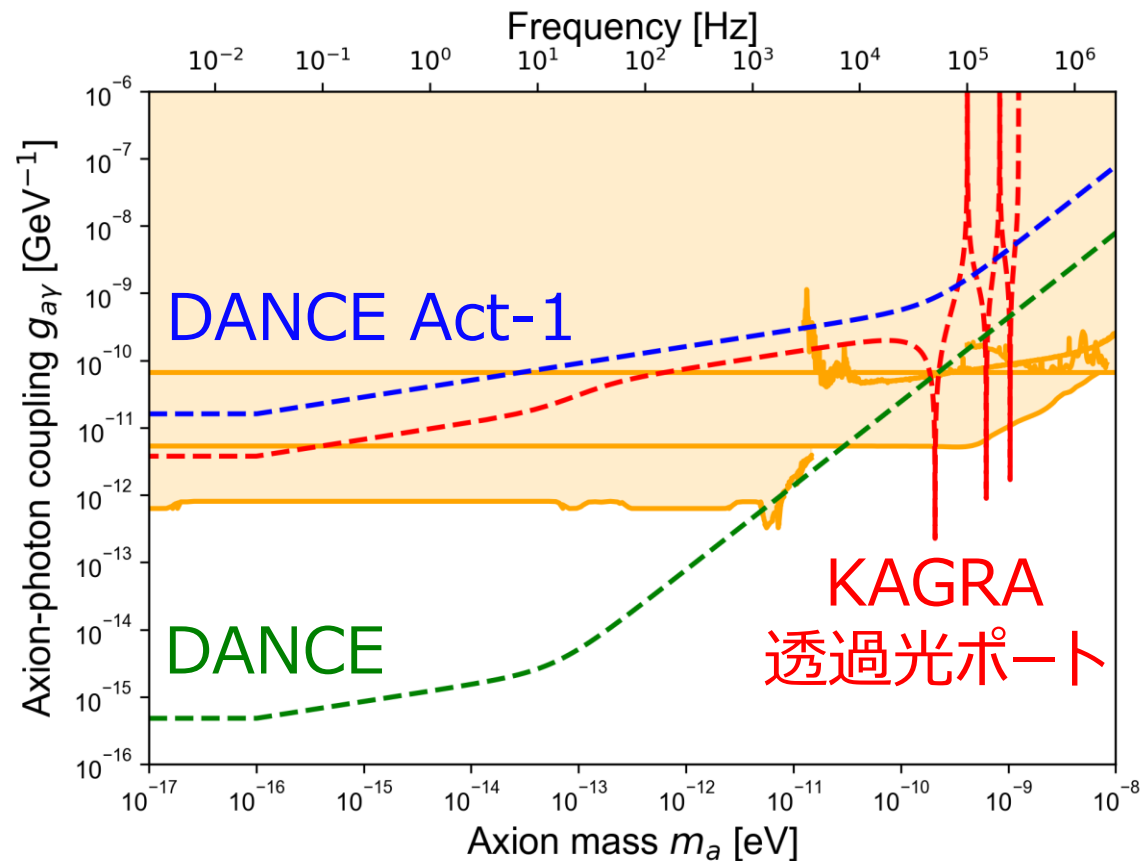


K. Nagano+, [Phys. Rev. Lett. 123, 111301 \(2019\)](#)

K. Nagano+, [Phys. Rev. D 104, 062008 \(2021\)](#)

派生実験①：重力波望遠鏡を用いたアクシオン探索

- 重力波望遠鏡でDANCEと相補的に探索できる



[klog #17692](#)

[klog #19227](#)

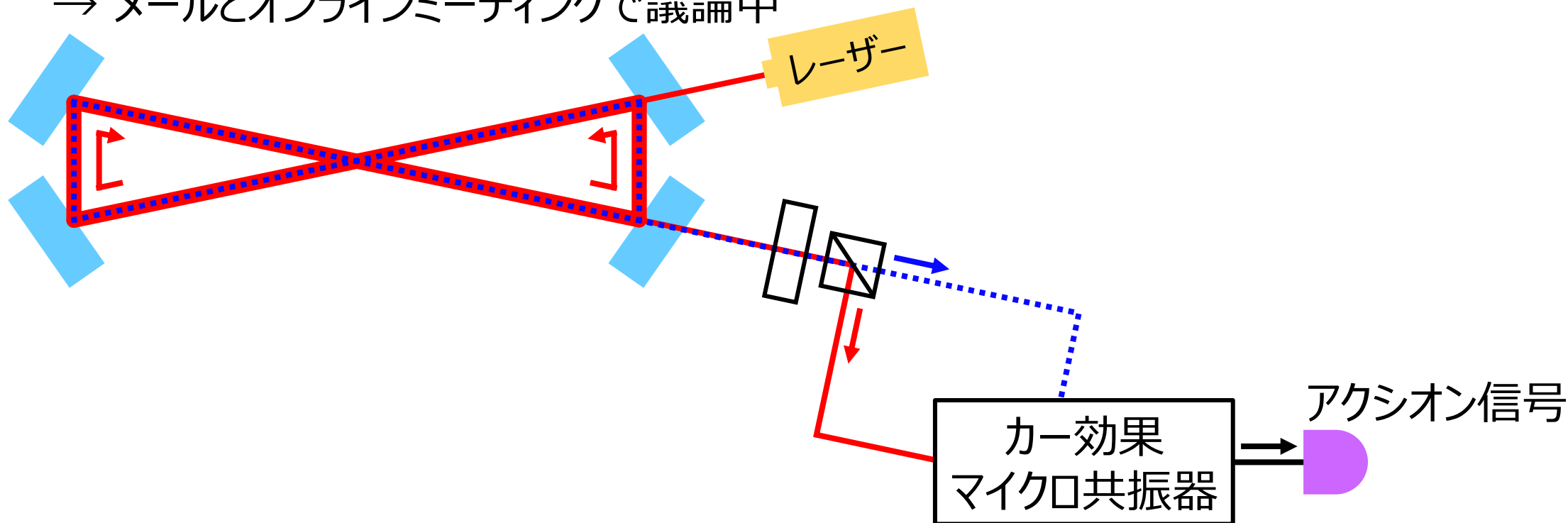


- 2021年7月にX腕透過光ポート
12月にY腕透過光ポート にアクシオン用の光学系を追加した
- 次期観測運転で重力波望遠鏡で初のアクシオンデータ取得をねらう

派生実験②：カー効果を用いたアクション信号増幅

- DANCEの結果の論文を読んだマックスプランクの学生からメールをもらった
- 電気光学カー効果を用いたマイクロ共振器を用いてDANCEの感度を向上できるかもしれないという提案
 - 電気光学カー効果：特定の物質に電場を加えると電場の2乗に比例した複屈折を生じる現象

→ メールとオンラインミーティングで議論中



まとめ

- DANCE: 蝶ネクタイ型の光共振器を用いたアクシオン暗黒物質の探索
 - 直線偏光の回転振動を観測する新しい手法
- 実験室サイズのDANCE Act-1が進行中
 - 初めての観測運転により上限値を得た
 - 偏光間の共振位相差の課題が明らかになった
 - 補助共振器・波長可変レーザーの導入による感度向上
- DANCEから派生した実験
 - 重力波望遠鏡の線型共振器を用いたアクシオン探索
 - カー効果を用いたアクシオン信号増幅

