

革新的光科学技術を駆使した最先端科学の創出

# 超精密偏光計測が可能にする 新しいダークマター探索

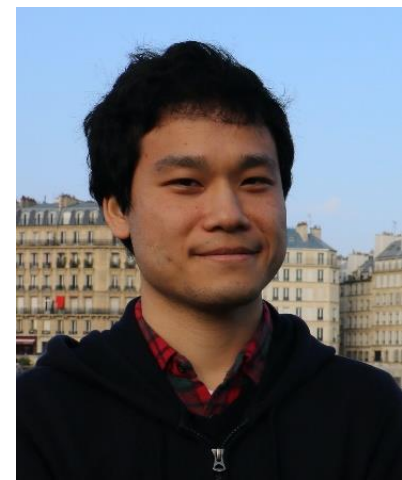


道村唯太

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

スライドは <https://tinyurl.com/YM20210304>



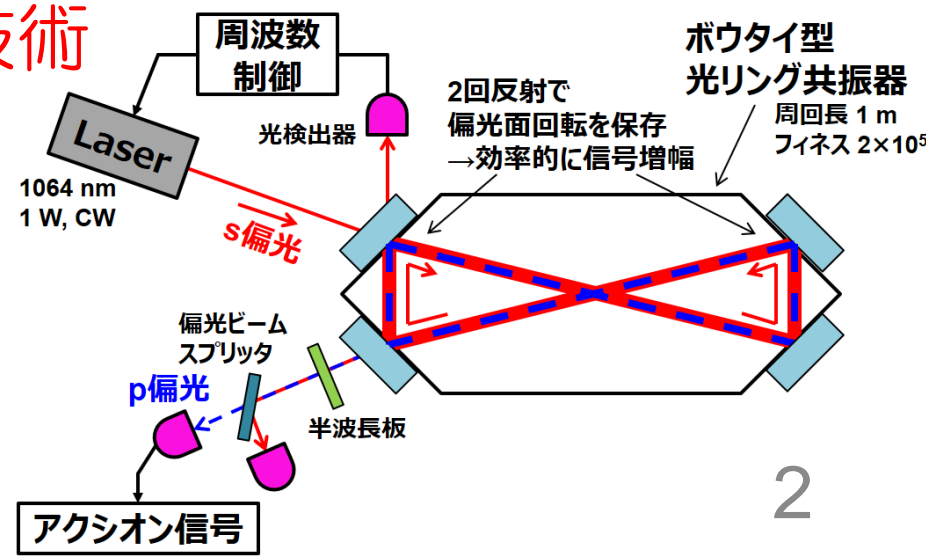
# さきがけ研究の概要

- 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

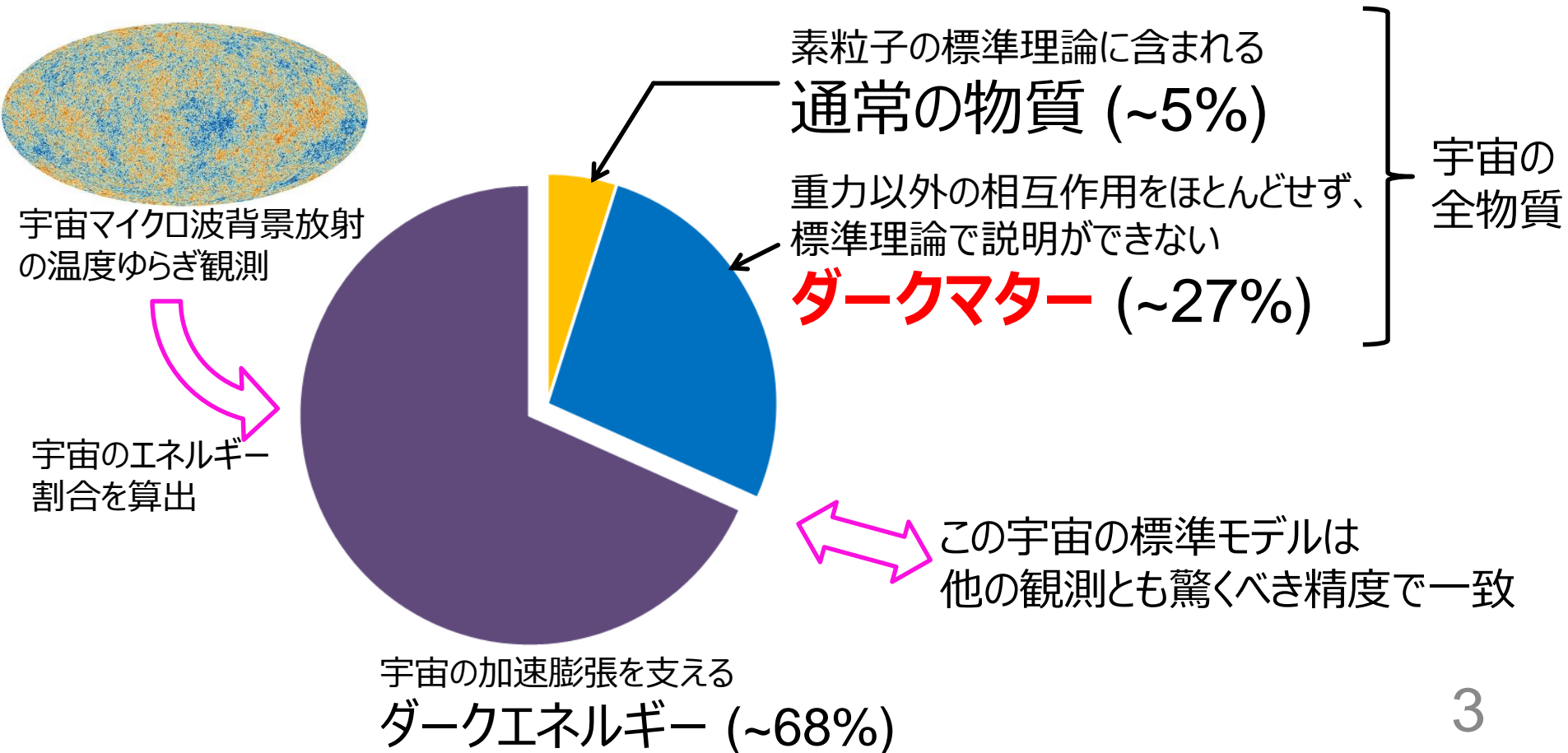
- 超精密偏光計測
- 超低振動光共振器

- ダークマター探索の  
新局面を開拓



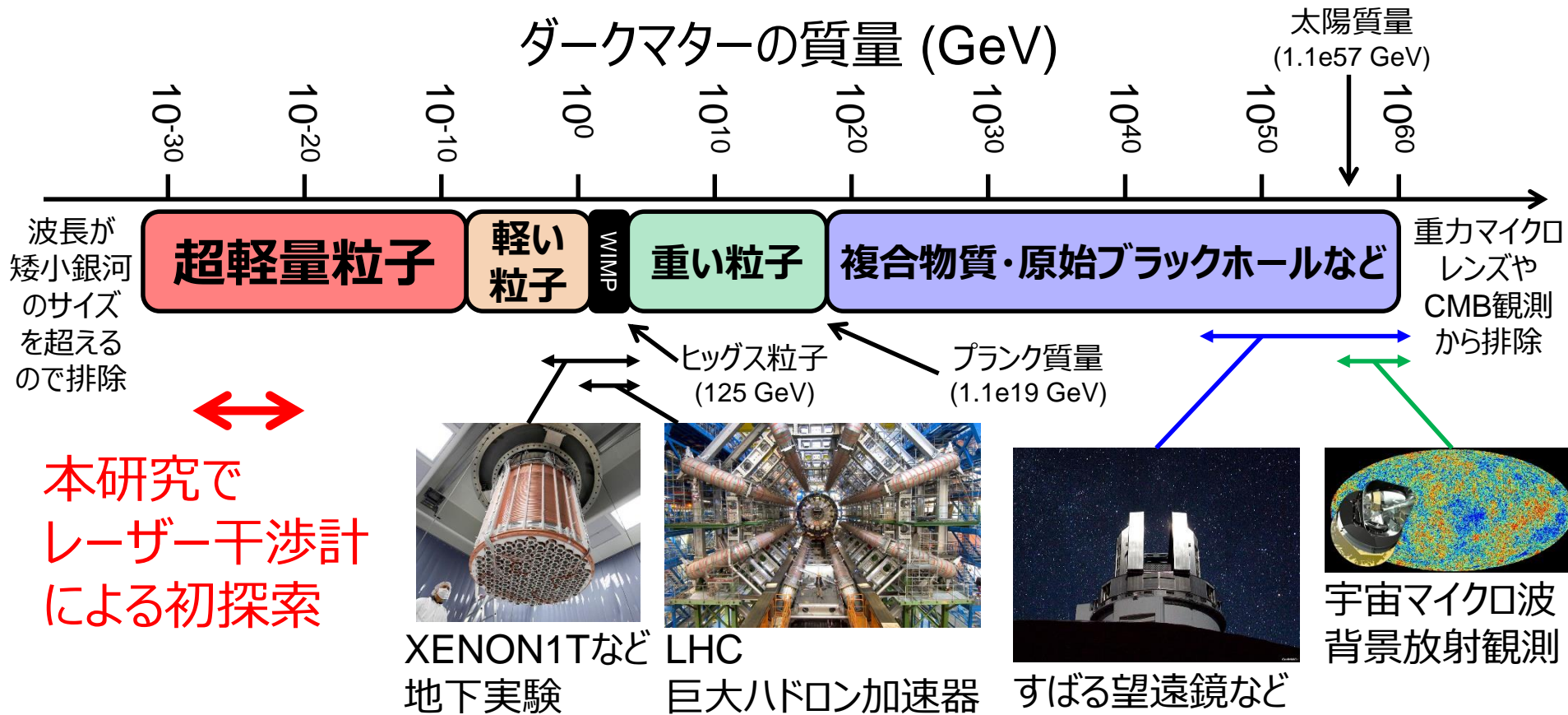
# 背景: ダークマターの謎

- 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



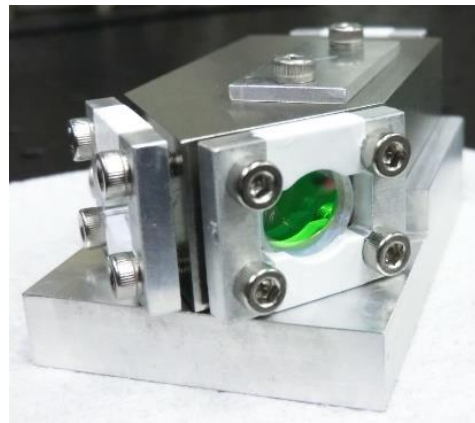
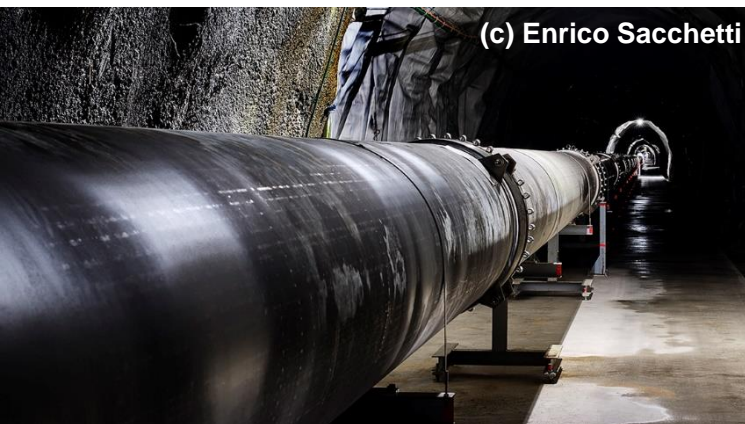
# 背景: ダークマター探索

- 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



# 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



# 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

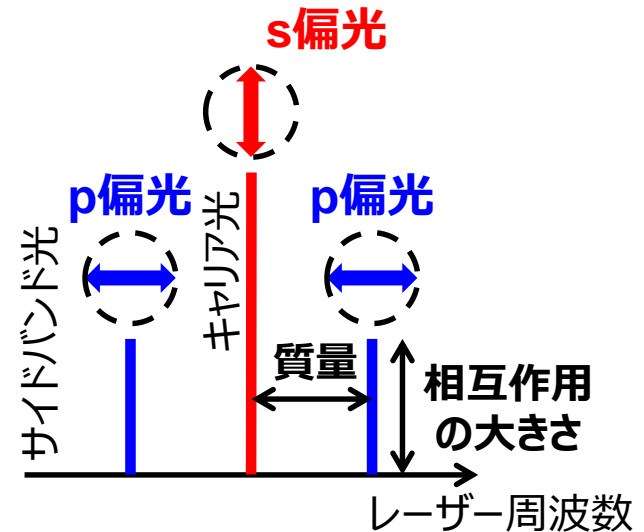
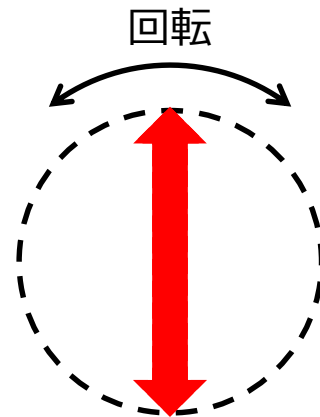
光の振幅  
アクシオン場

アクシオン  
質量

アクシオン質量に  
対応した周波数

- 直線偏光の偏光面が**周期的に回転**

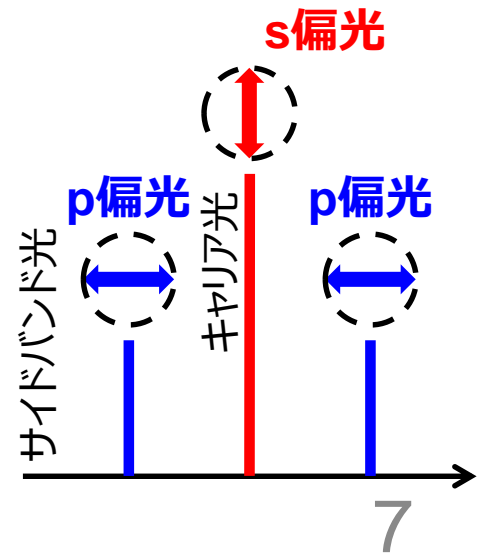
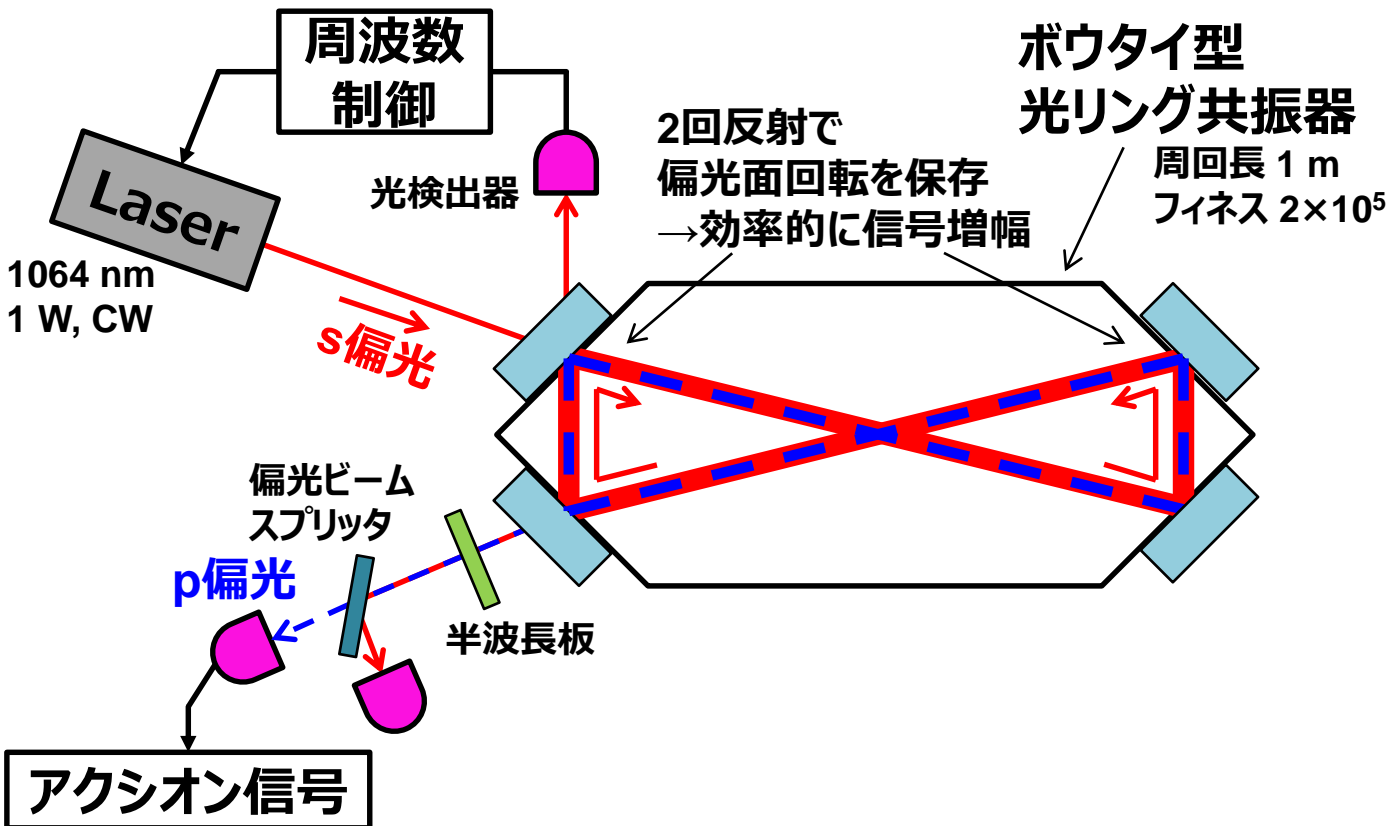
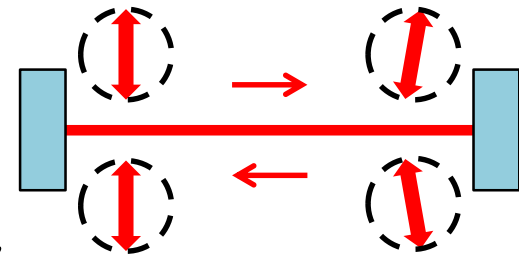
s偏光の場合、  
p偏光成分が  
生じる



- 回転の周期からアクシオンの質量  
振幅から相互作用の大きさ がわかる

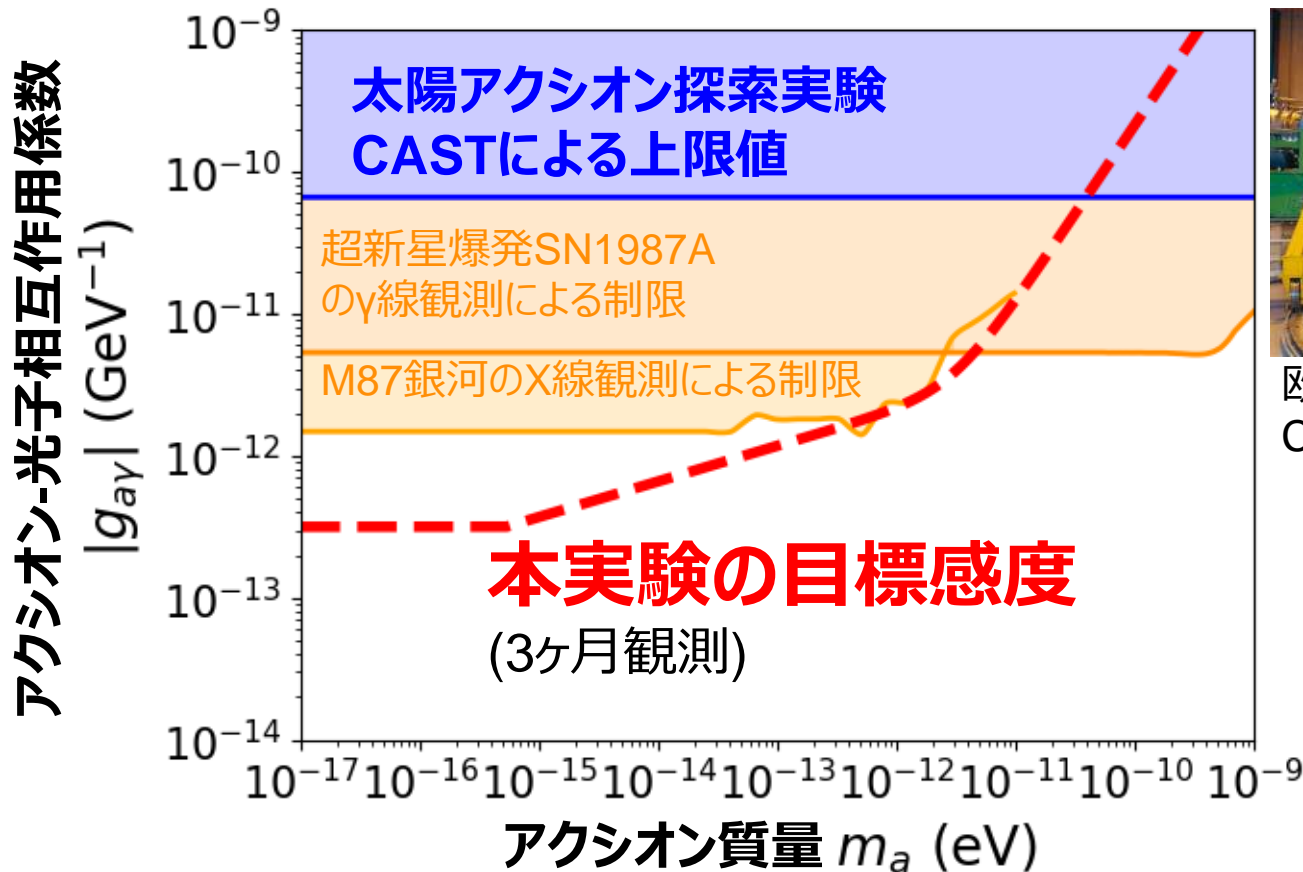
# 手法: 光リング共振器の偏光計測

- 線形光共振器では鏡の反射で偏光が反転
- ボウタイ型光リング共振器を利用し、信号を効率的に増幅 [ [PRL 121, 161301 \(2018\)](#) で提案 ]



# 達成目標: 世界最高感度での探索

- 先行研究の未探索領域を探索可能
- レーザー干渉計による世界初の本格探索



欧州原子核研究機構(CERN)  
CAST

※ 天体観測からの制限は天体のモデルや銀河内の磁場モデルに依存するため不定性がある  
本研究のようなテーブルトップ実験は不定性が少ない

- 目標感度はショットノイズ限界を仮定



# 研究の現状

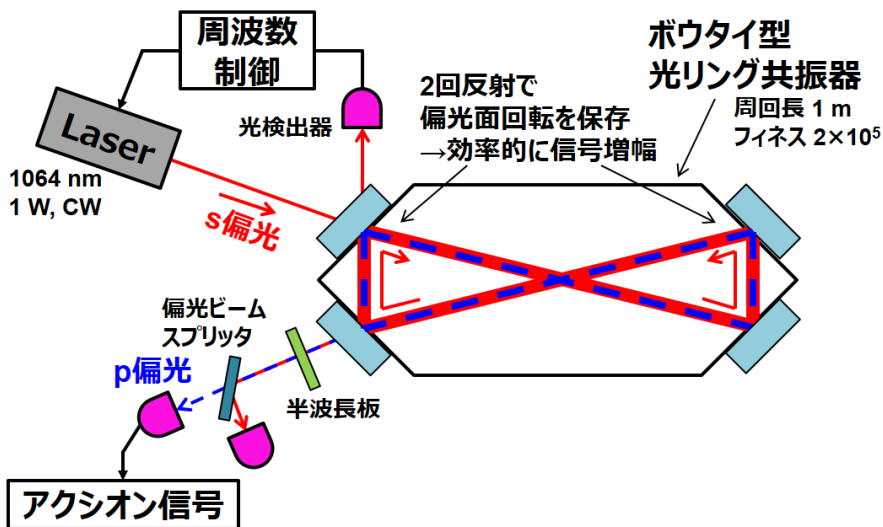
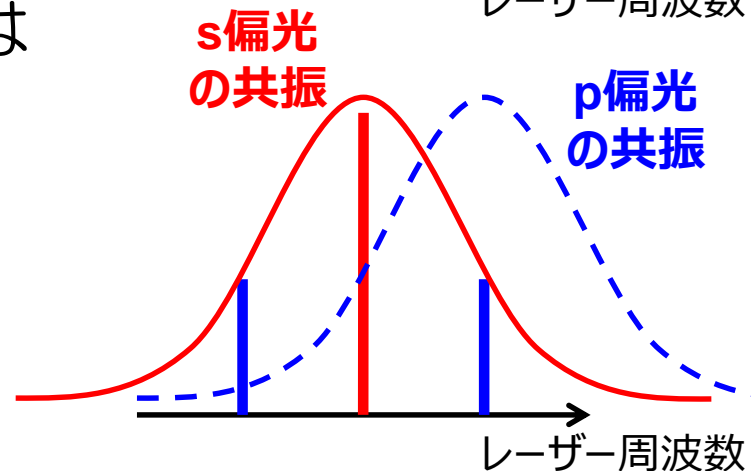
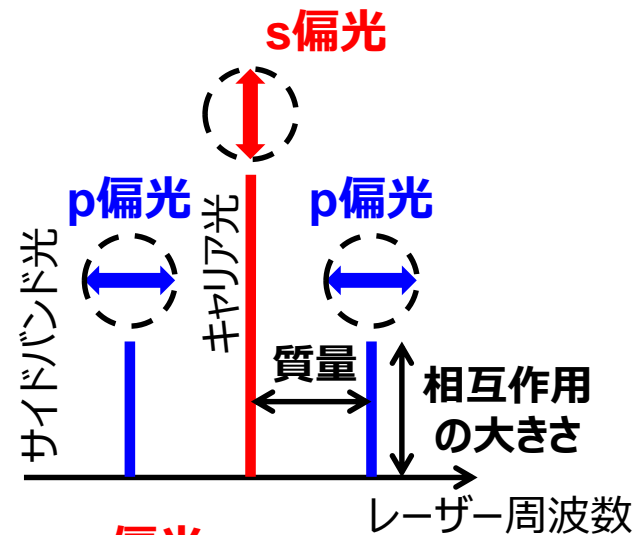
- 2020年8月にプロトタイプ実験で**動作確認に成功**
- 2020年11月にさきがけスタート
  - フィネスの向上、入射光強度の向上
  - カバーによる環境雑音の低減



	2020年11月	現状	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	~270 mW	1 W
フィネス (キャリア)	525(19) p偏光	$2.80(34) \times 10^3$ s偏光	$2 \times 10^5$
フィネス (サイドバンド)	~300 s偏光	193(10) p偏光	$2 \times 10^5$
s偏光とp偏光の 共振周波数差	~28 MHz	3.92(16) MHz	0 Hz

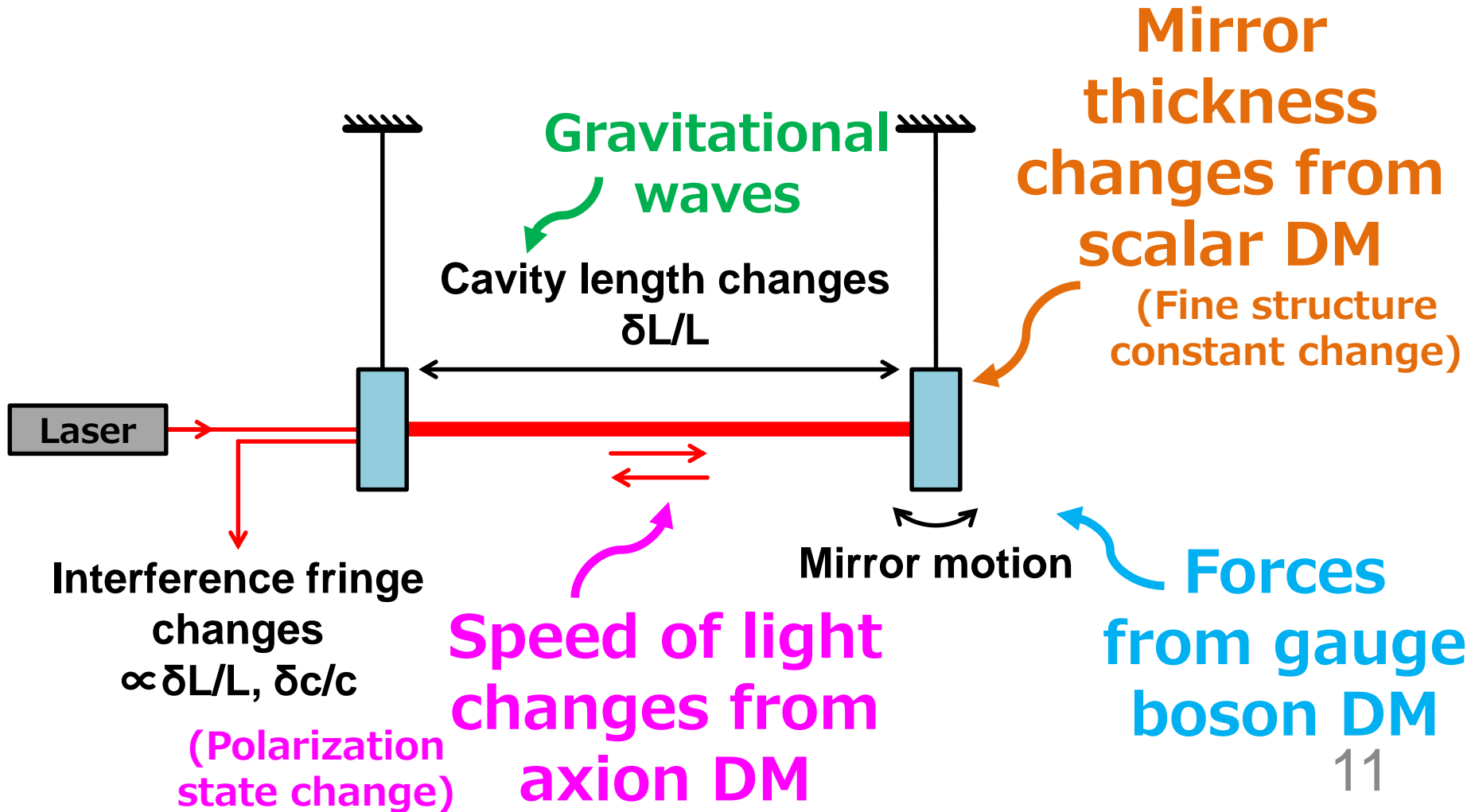
# 実験的に面白い(難しい)ところ

- 偏光検出部の工夫
  - 偏光依存性の少ない光学素子
  - DC readoutによるショットノイズの低減
- s偏光とp偏光が同時共振しない
  - 鏡での反射位相の差が原因
  - 低周波での広帯域感度実現には同時共振が望ましい



# その他のダークマター探索の可能性

- レーザー干渉計は重力波やダークマターからの振動する僅かな変化に高感度

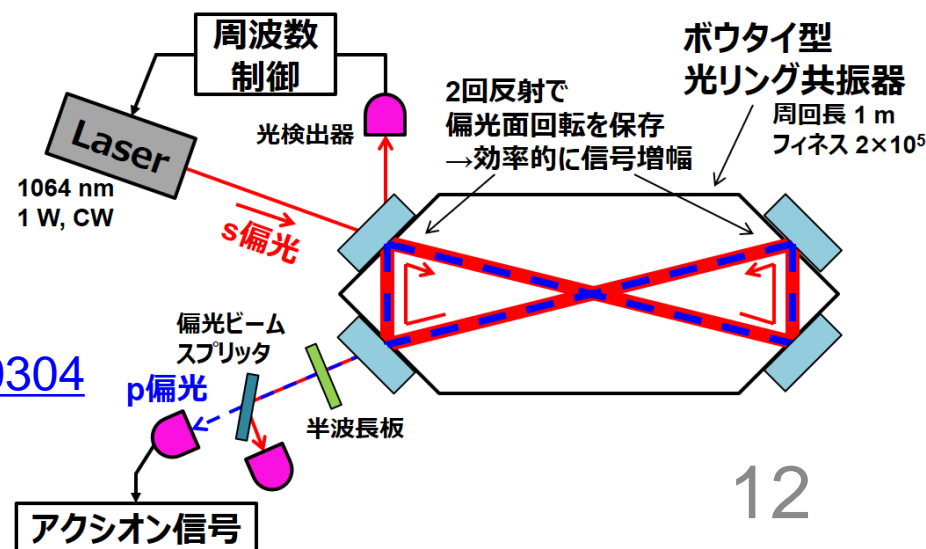


# まとめ

- ダークマター探索は新局面を迎えている
- レーザー干渉計を用いた超軽量ダークマター探索が世界中で注目
- 有力候補である**アクシオン**に着目
- アクシオンによる**偏光面回転**を**ボウタイ型光リング共振器**で増幅し、超精密計測
- **世界最高精度**での探索を目指す



スライドは  
<https://tinyurl.com/YM20210304>



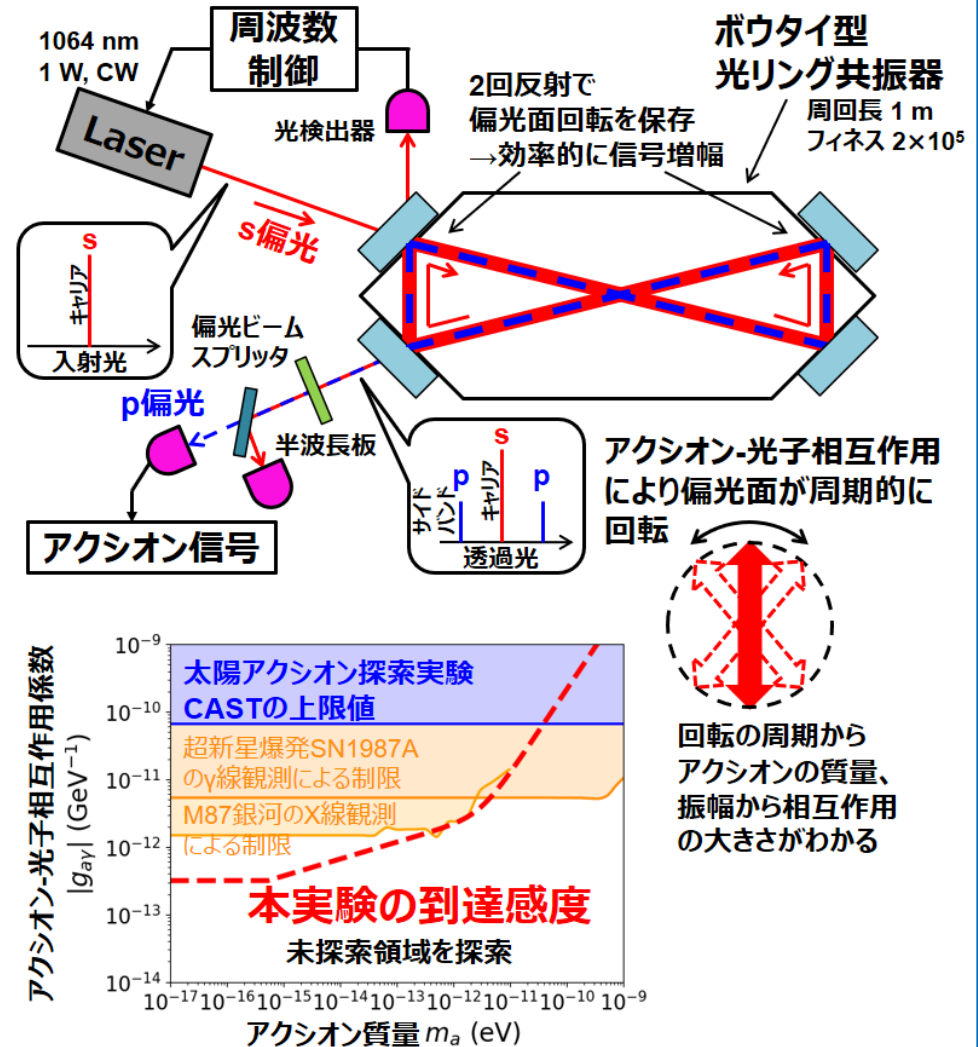
# 事前提出した 研究紹介資料

# 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)  
革新的光科学技術を駆使した最先端科学の創出

## 研究紹介

様々な宇宙観測によって、宇宙の全物質の約80%はダークマターであることが明らかになりましたが、その正体は全くわかっていません。多様なダークマター候補のうち、近年高い注目を集めているのがアクシオンと呼ばれる、光子とわずかに相互作用する未発見粒子です。本研究ではレーザー干渉計を用いて、アクシオンが変化させる**光の偏光状態を精密に計測**するという新発想の手法により、**かつてない精度でダークマター探索**を行います。



## 研究の特色やアピールしたいこと

これまでのアクシオンダークマター探索では、強磁場を用いる手法が盛んでした。さらなる高感度化のためにはより強い磁場を用いるか、大型化が必要になっています。一方、本実験は**磁場が不要**で、将来的な高感度化も十分可能な手法です。

光の偏光を用いて、レーザー干渉計によりアクシオンダークマターを探索する手法は近年立て続けに提案論文が出ています。我々は、**ボウタイ共振器**を用いて効率的に信号を増幅する**独自のアイデア**を提案しました。

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  
ABRACADABRA実験

ドイツ電子シンクロトロン(DESY)

ALPS実験

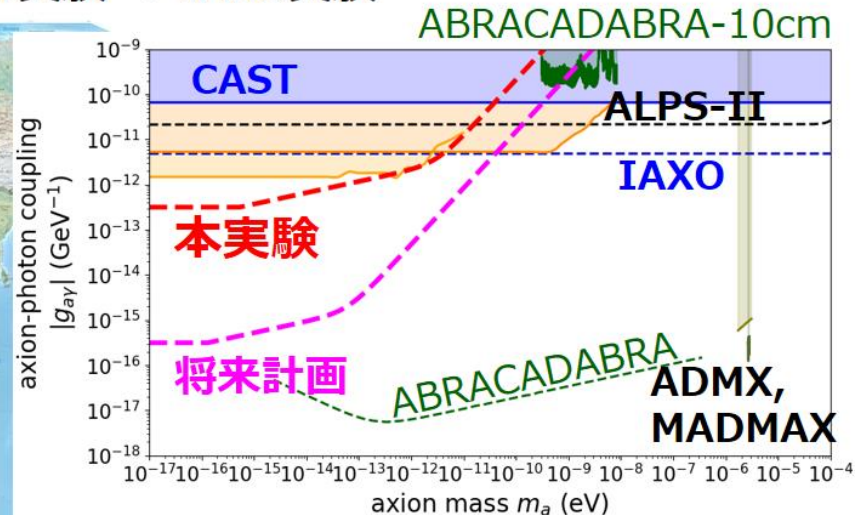
欧州原子核研究機構(CERN)

CAST実験 → IAXO実験



マックス・プランク物理学研究所  
MADMAX実験

ワシントン大学  
ADMX実験



※ これらは全て磁場を用いる実験

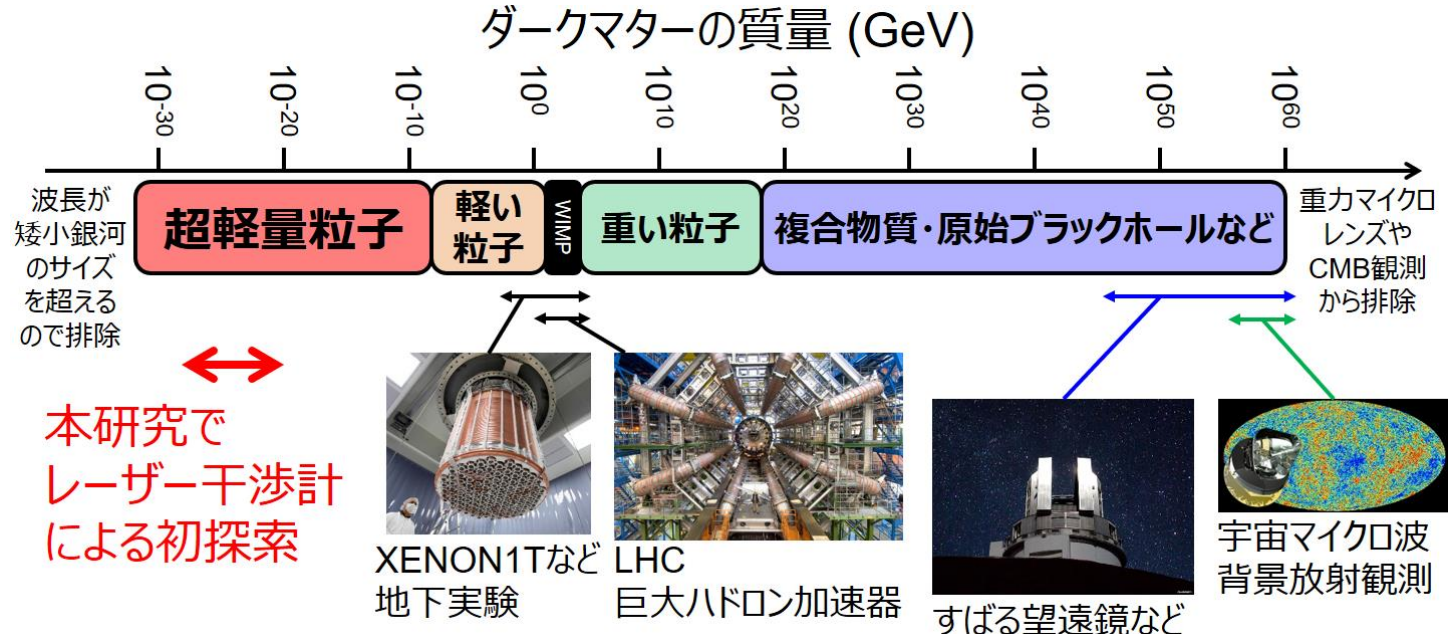
## 交流会で期待すること:

- 本研究では、直線偏光のわずかな回転を超精密に測定する必要があります。**偏光の様々な測定方法**について意見交換をしたいと思います。
- 偏光の超精密測定が可能になれば、アクシオンダークマター探索だけでなく、量子電磁気学が予言する真空の複屈折探索や宇宙マイクロ波背景放射の偏光観測、表面弾性波の測定など様々な展開が期待できます。様々な**展開先**について**意見交換**をしたいと思います。
- ダークマター探索は今、新局面を迎えています(次ページ参照)。新しいアイデアが突破口を切り拓くかもしれません。**様々なダークマター探索方法**を議論したいと思います。



## 任意の資料:

ダークマターは1930年代に銀河の回転速度の観測から存在が指摘されました。現在では様々な宇宙観測によって、宇宙の全物質の約80%はダークマターであることがわかっています。一方、長年の大規模な観測や実験にもかかわらず、その**正体は全くわかっていません**。ダークマターの候補としては、超軽量粒子から原始ブラックホールまで、**90桁近くに及ぶ質量範囲の多様な候補**が考えられています。この中でも特に有望視されてきたのは、通常の物質とわずかに相互作用するWIMPと呼ばれる重い粒子です。素粒子物理学からも存在が強く示唆されていたため、巨大ハドロン加速器LHCや大規模な地下実験で巨額の予算と歳月をかけて探索されましたが、検出の兆候は得られていません。近い将来、こうした手法は高感度化に限界を迎えると考えられており、**現状打開のためにはより多様なダークマター候補を新しい発想で探索することが重要**です。








詳しくはこちら: <https://granite.phys.s.u-tokyo.ac.jp/michimura/>

補足スライド

# 国内外の動向

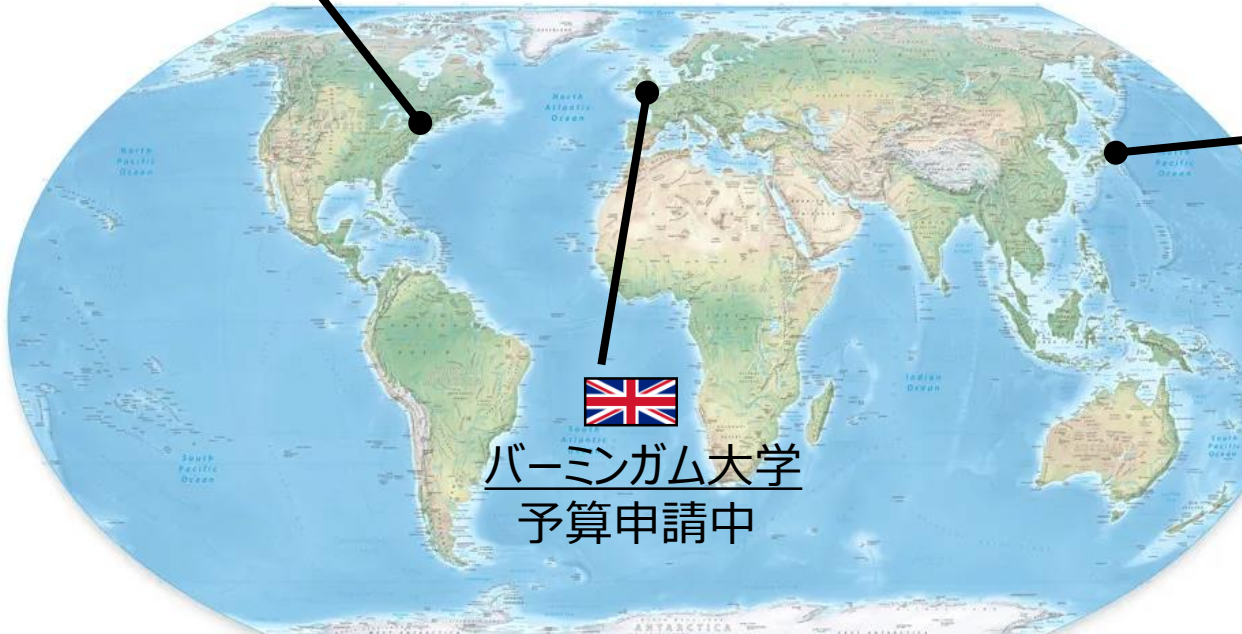
- 米英と初探索を目指す国際競争が始まろうとしている状況


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 \(2020\)](#)



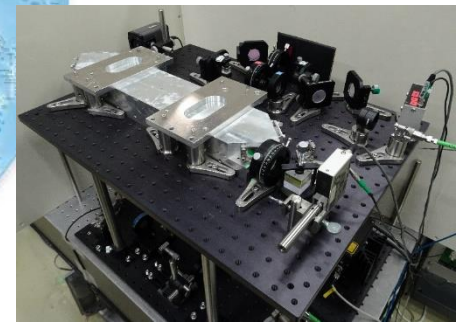
マサチューセッツ工科大学  
プロトタイプ実験に着手



  
バーミンガム大学  
予算申請中

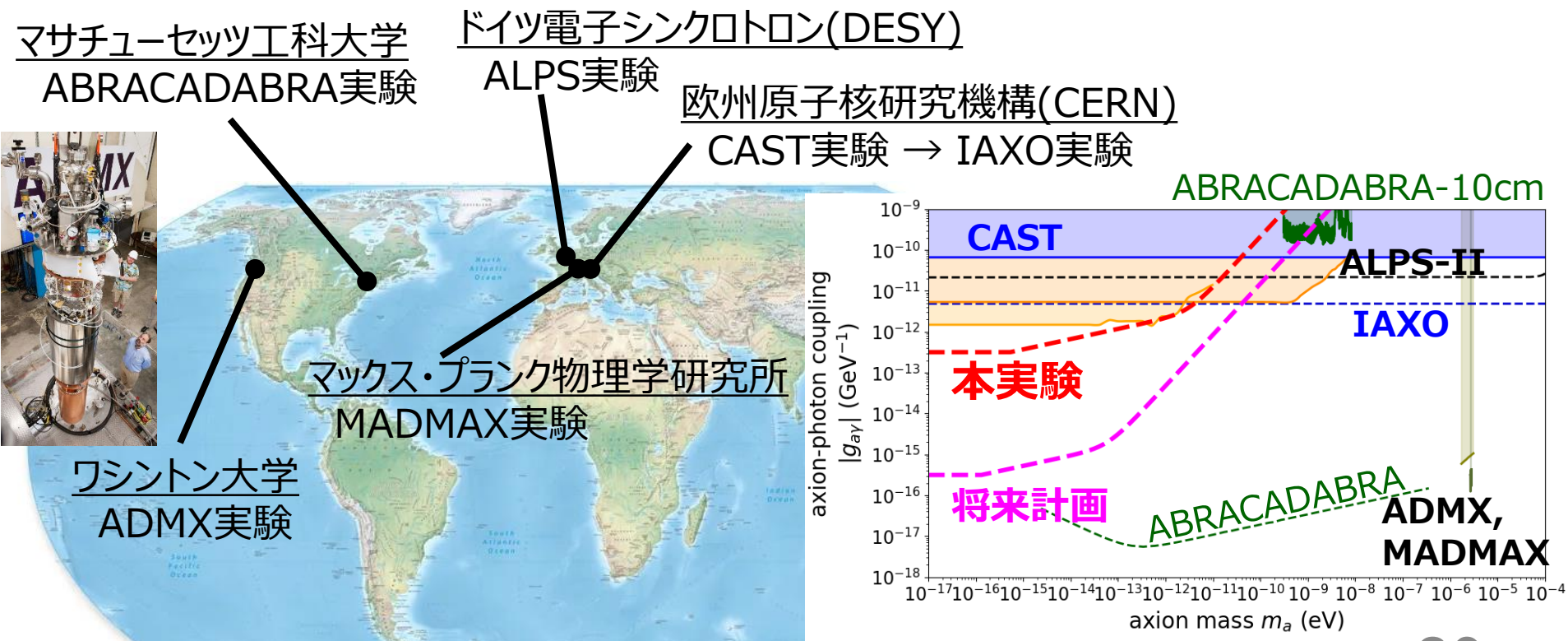


ボウタイ共振器を  
用いる**独自のアイデア**  
プロトタイプ実験で原理検証  
KAGRAの経験で優位性



# 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



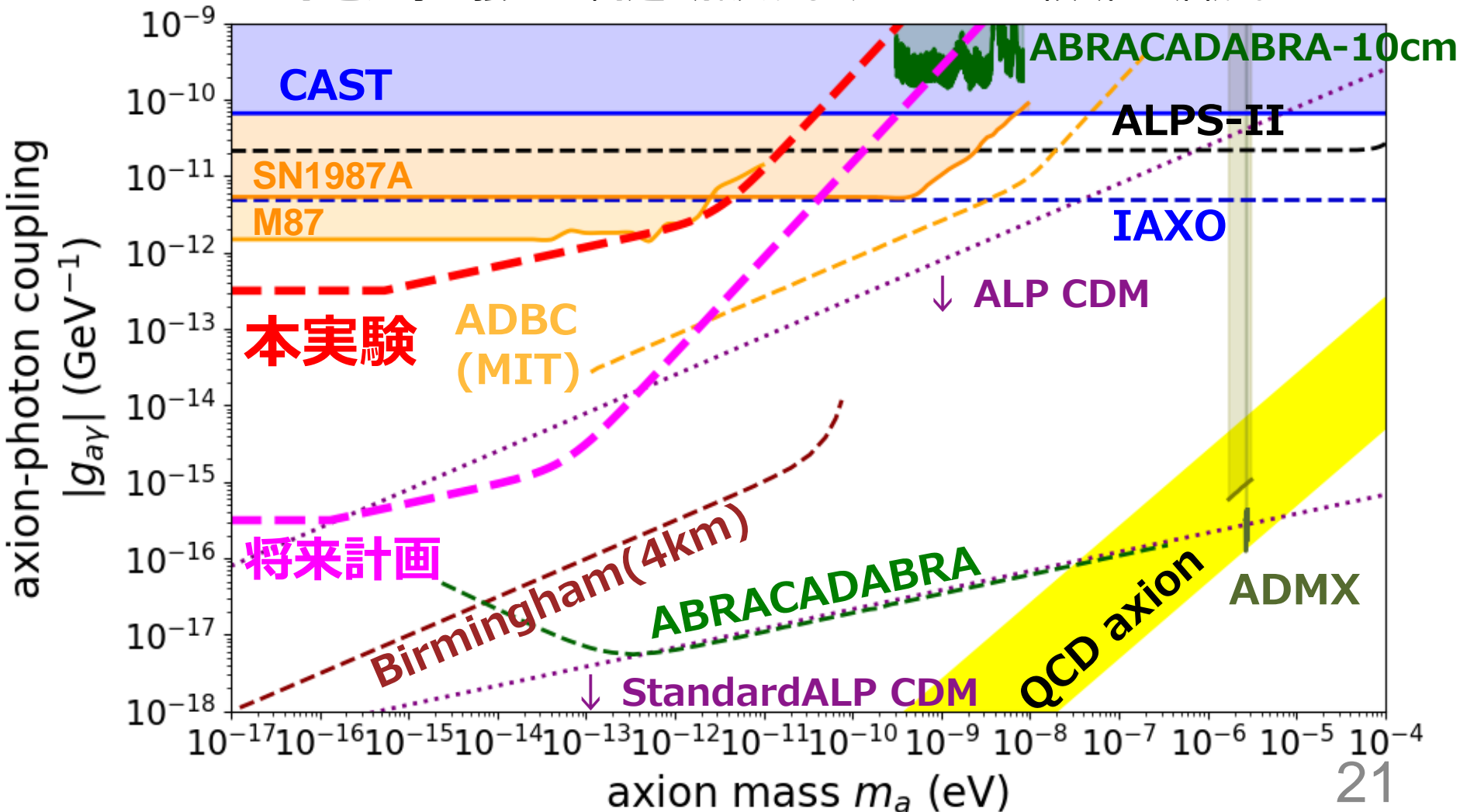
※ これらは全て磁場を用いる実験

# 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

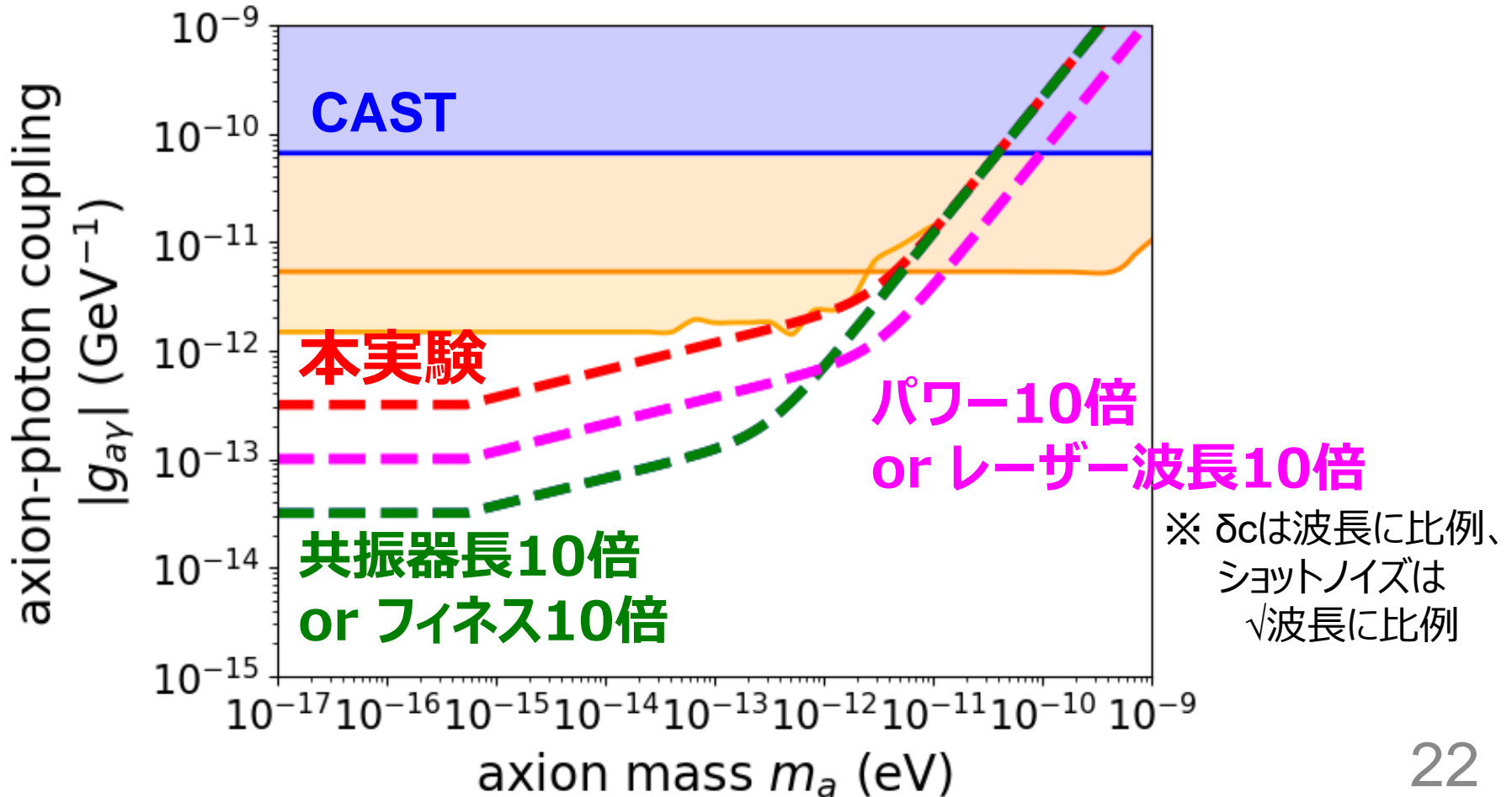
紫点線はP. Arias+ JCAP 06, 013 (2012)からの一例

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