

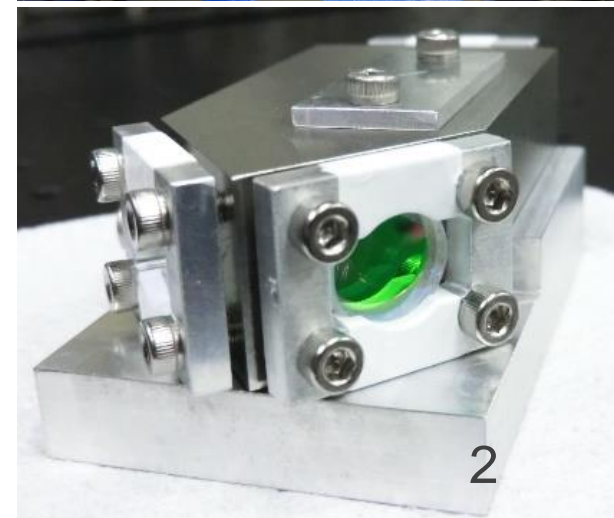
レーザー干渉計による 基礎物理実験

道村唯太

東京大学 大学院理学系研究科 物理学専攻

自己紹介

- 道村 唯太 (みちむら ゆうた)
東京大学 大学院理学系研究科 物理学専攻 助教
- **重力波望遠鏡**の開発
 - 大型低温重力波望遠鏡KAGRA
のレーザー干渉計開発
 - 宇宙重力波望遠鏡DECIGO
- その精密距離計測技術を利用した
基礎物理実験
 - Lorentz不変性の検証実験
 - アクシオンの探査実験
 - 巨視的量子力学の検証実験
などなど

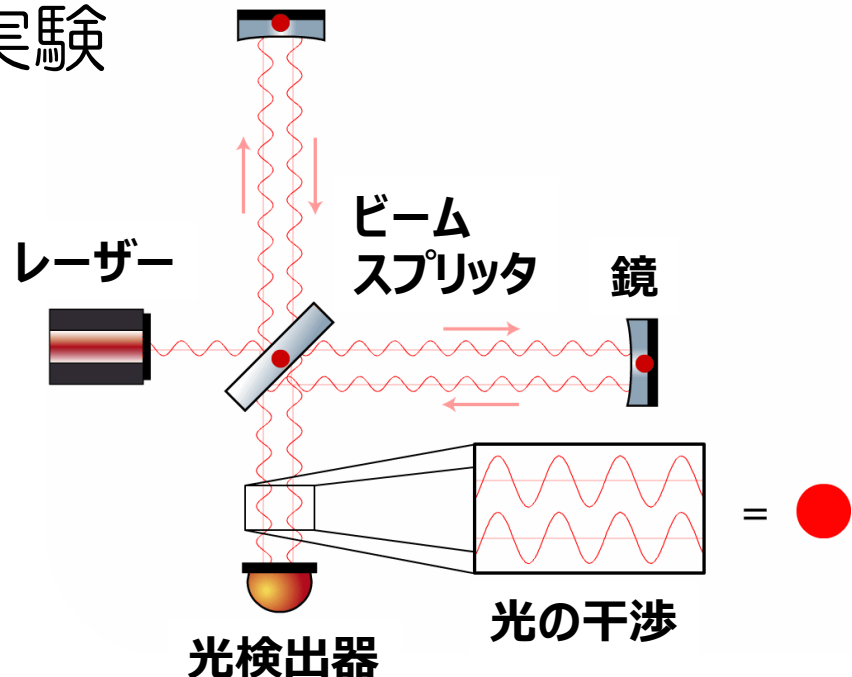


レーザー干渉計と光共振器

- レーザー光のわずかな位相変化を干渉を用いて光の強度変化に変える
- 距離、光の周波数、光の速さが精密に測定可能

$$\frac{\delta L}{L} = \frac{\delta \nu}{\nu} = \frac{\delta c}{c}$$

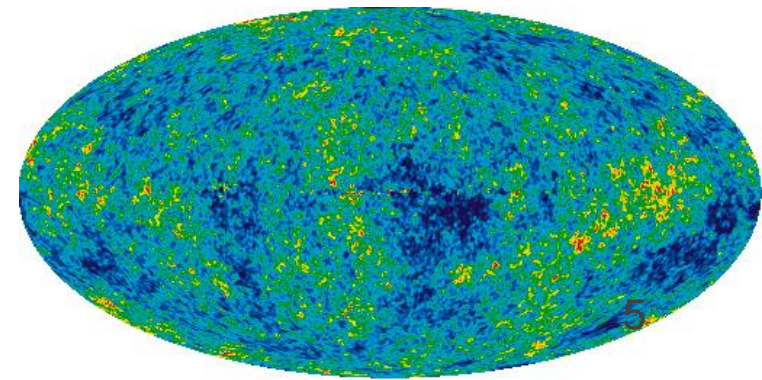
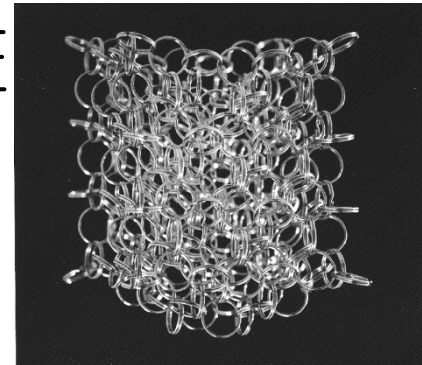
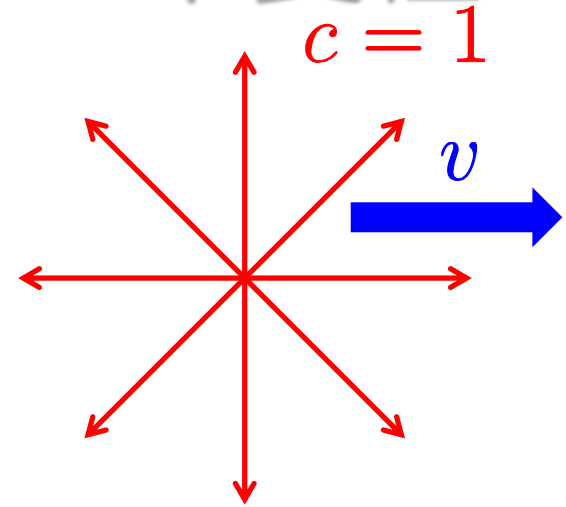
- Michelson-Morleyの実験
など古くから
基礎物理実験
に用いられてきた



光リング共振器を用いた Lorentz不変性の検証

特殊相対性理論とLorentz不変性

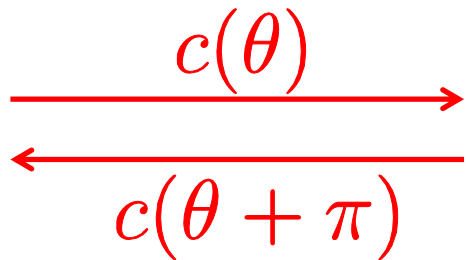
- 特殊相対性理論(1905)
 - 特殊相対性原理
 - 光速不変の原理
- Lorentz不変性は宇宙の基本的な対称性である
- 発表から100年以上、様々な実験的検証
 - 一度も「破れ」は見つかっていない
 - 全ての物理学の基礎
- Lorentz不変性の破れ
 - 量子重力理論からの示唆
 - CMBの異方性
 - 実験的検証が必要



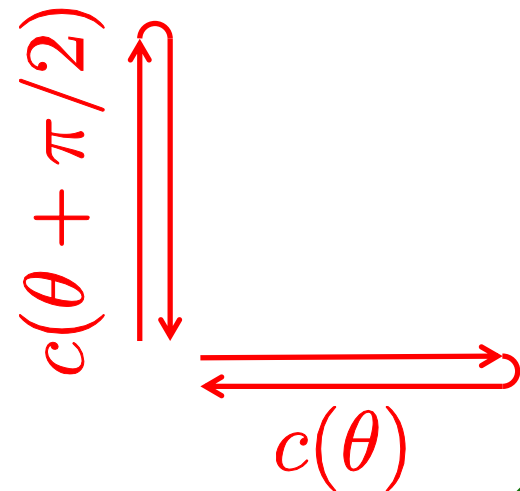
特殊相対性理論の検証

- その中でも「光速不変の原理」を検証
- 2種類の光速の等方性
 - 片道光速の等方性 (往路と復路の光速は等しい)
 - 往復光速の等方性 (直交2方向の往復光速は等しい)

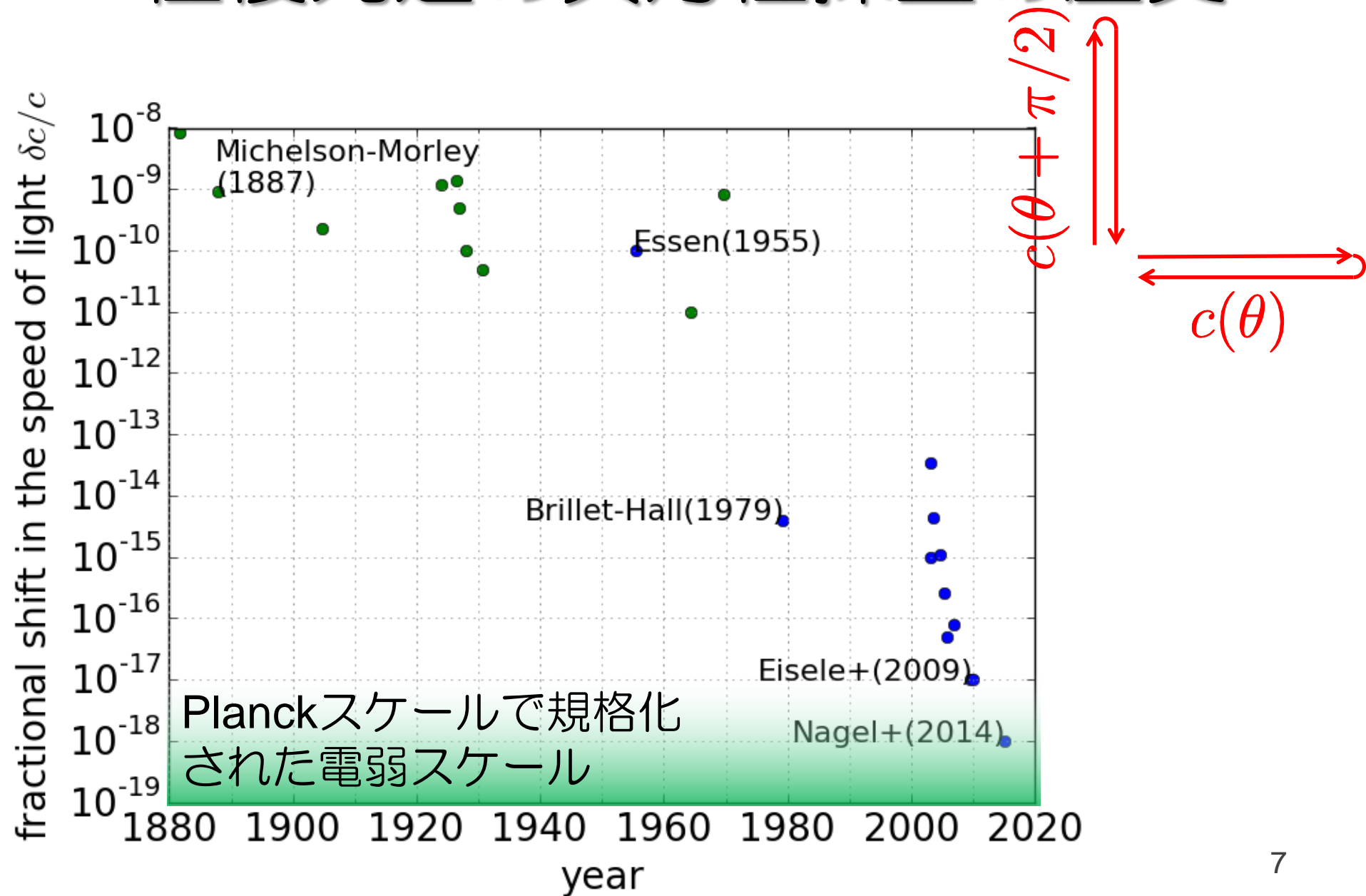
片道光速の等方性
(odd-parity)



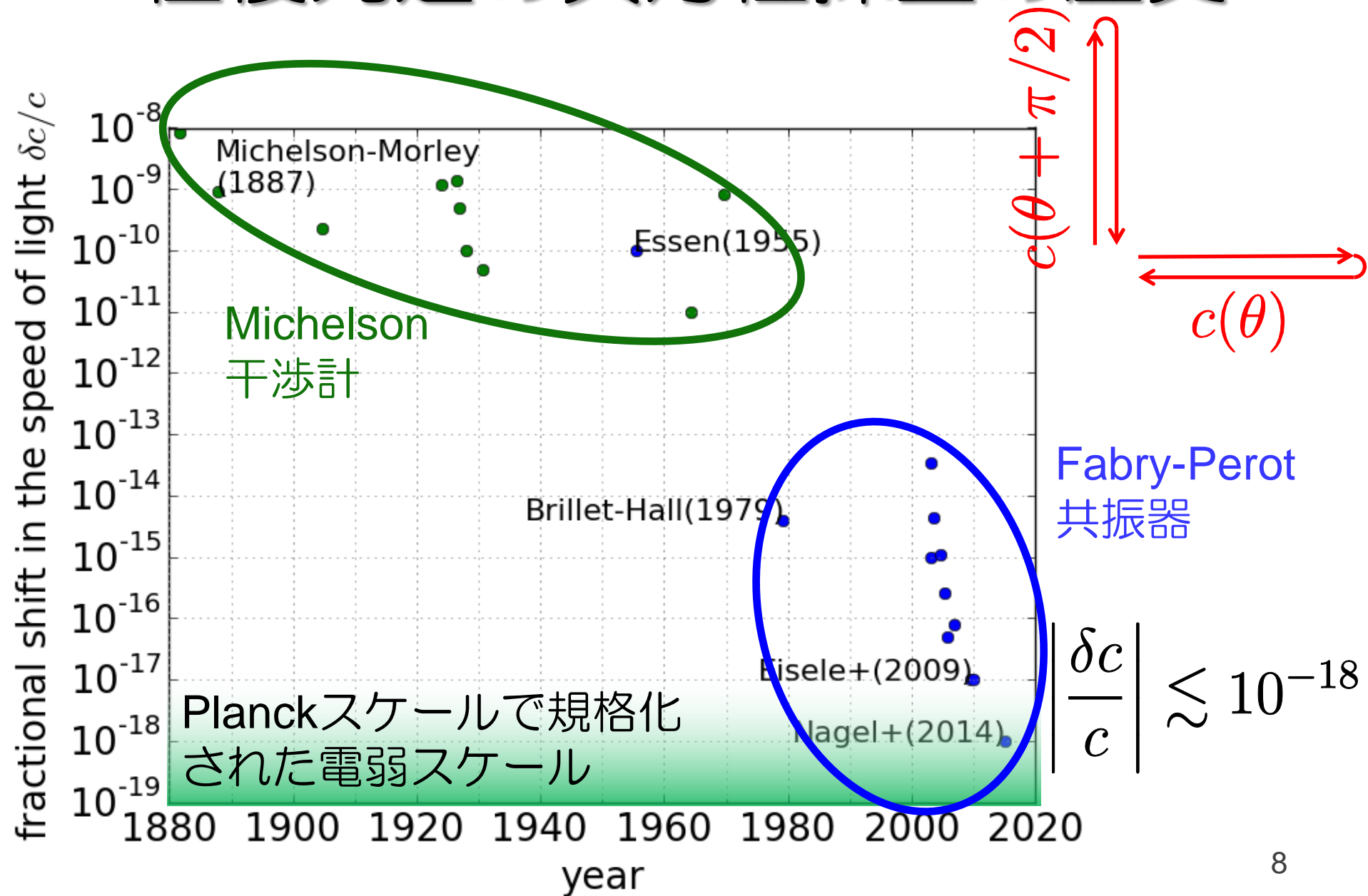
往復光速の等方性
(even-parity)



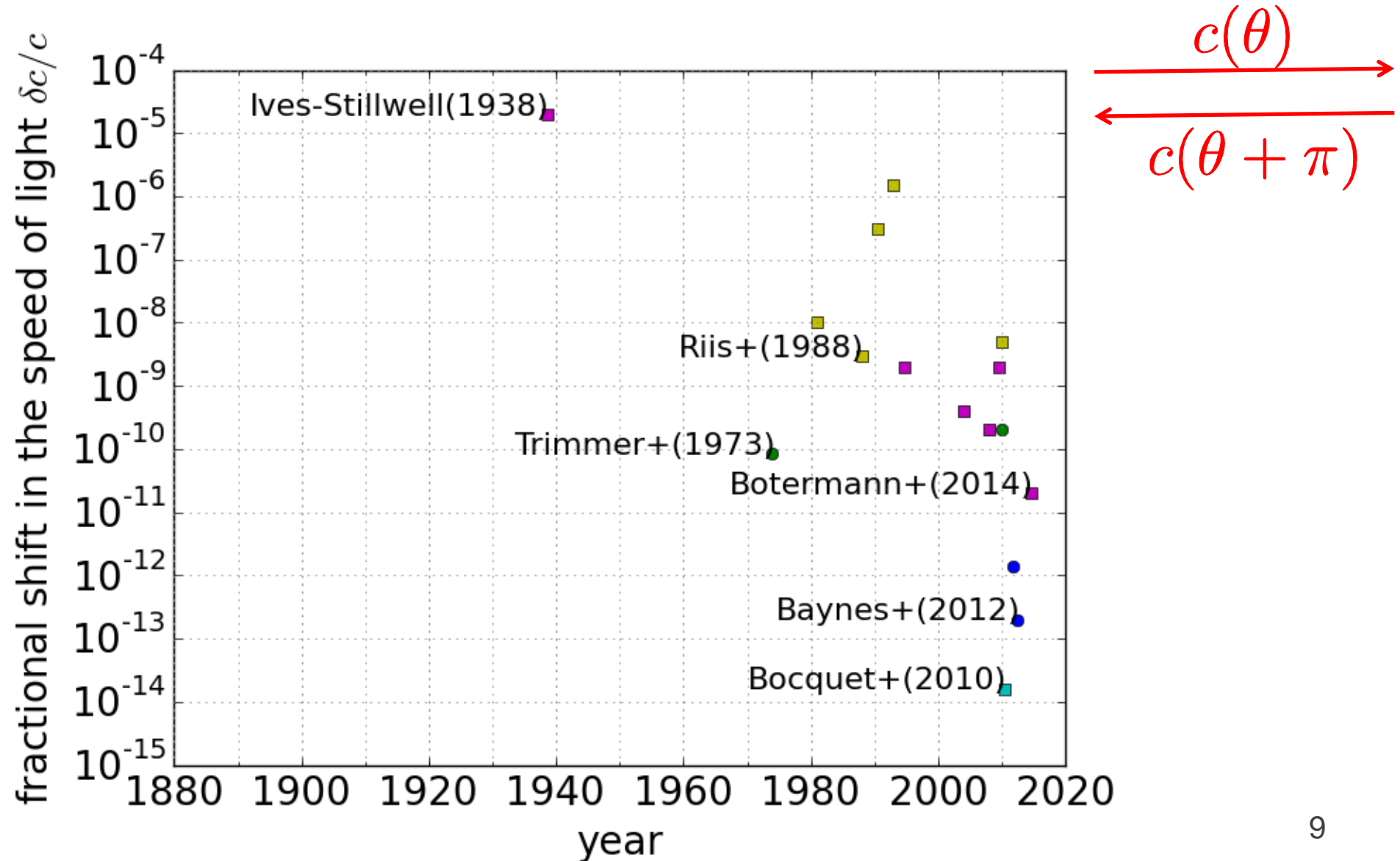
往復光速の異方性探査の歴史



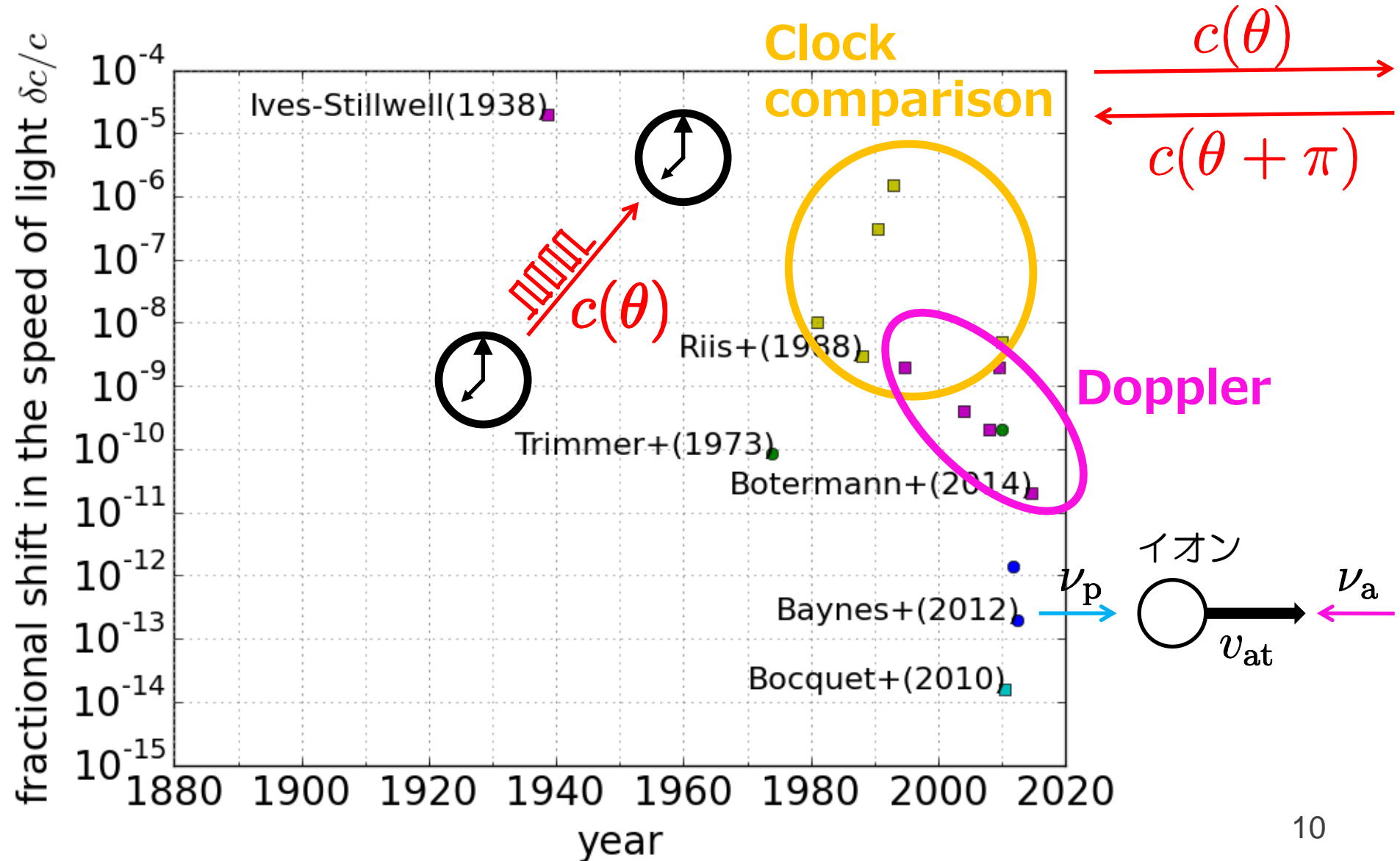
往復光速の異方性探査の歴史



片道光速の異方性探査の歴史



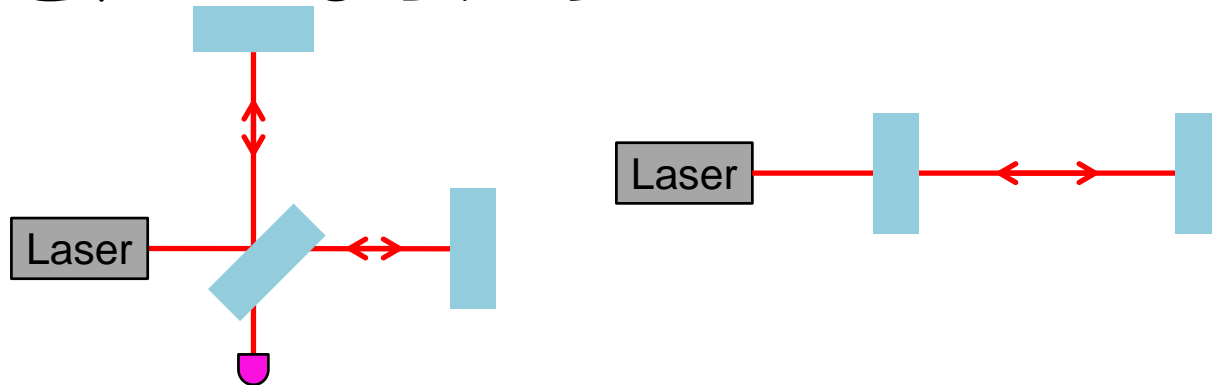
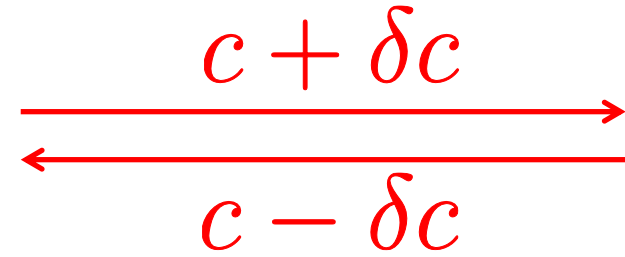
片道光速の異方性探査の歴史



片道光速の等方性検証

- 通常の干渉計、共振器では検証することができない

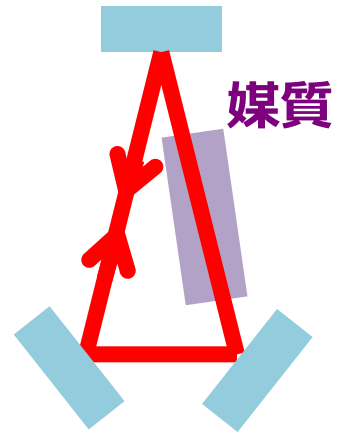
行き帰りの差がキャンセル
されてしまうため



- 非対称リング共振器を使うとできる

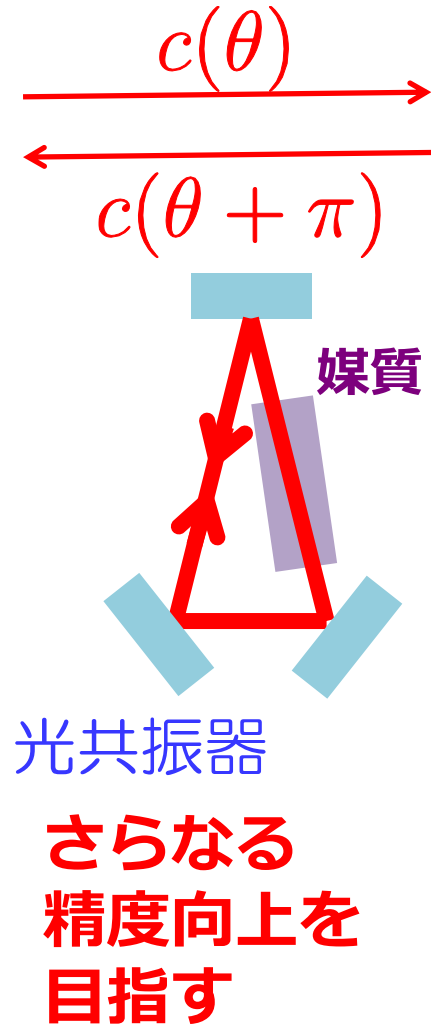
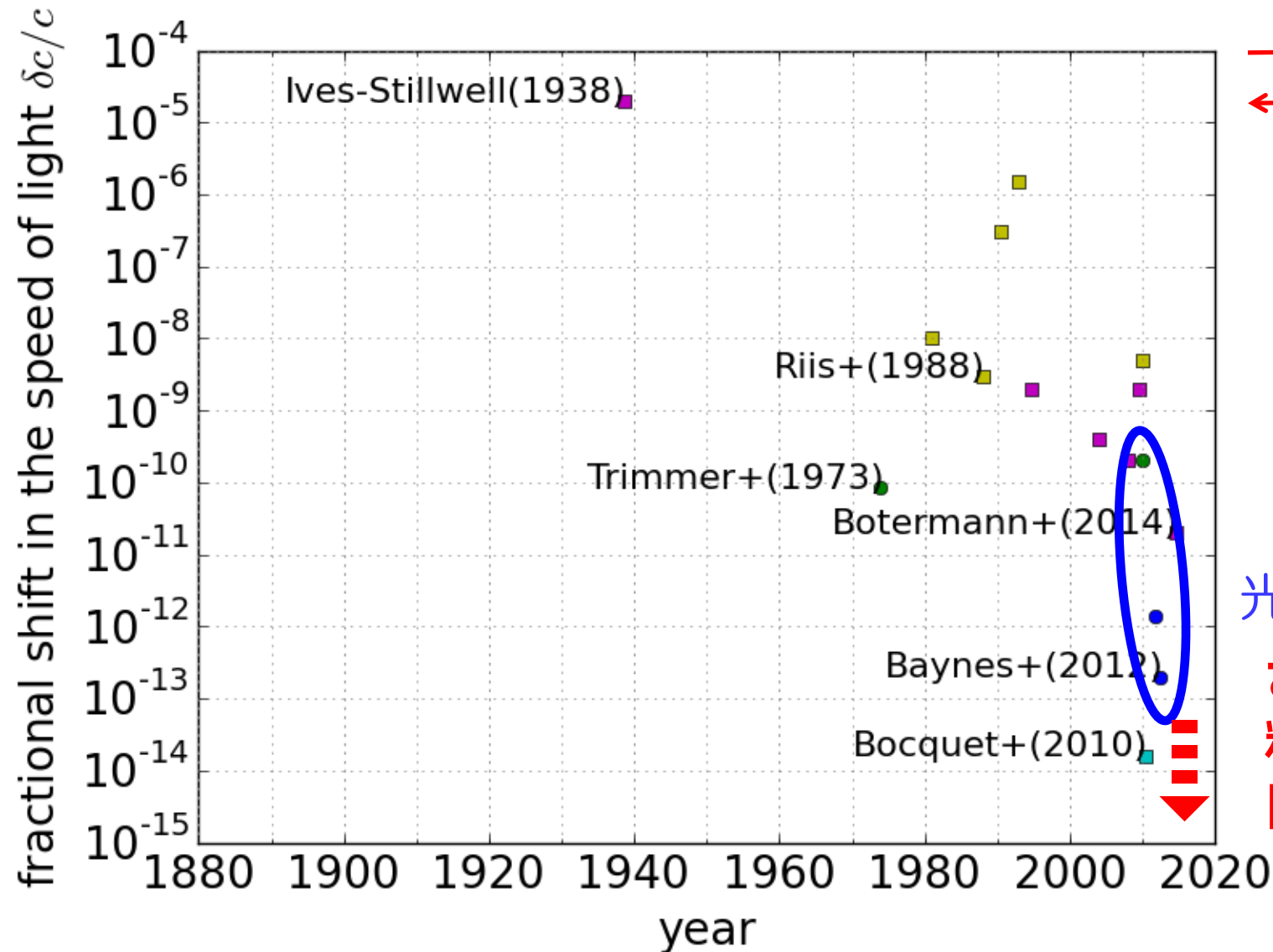
提案: M. E. Tobar+, PRD **71**, 025004 (2005)

実証: F. Baynes+, PRL **108**, 260801 (2012) $\left| \frac{\delta c}{c} \right| \lesssim 10^{-13}$



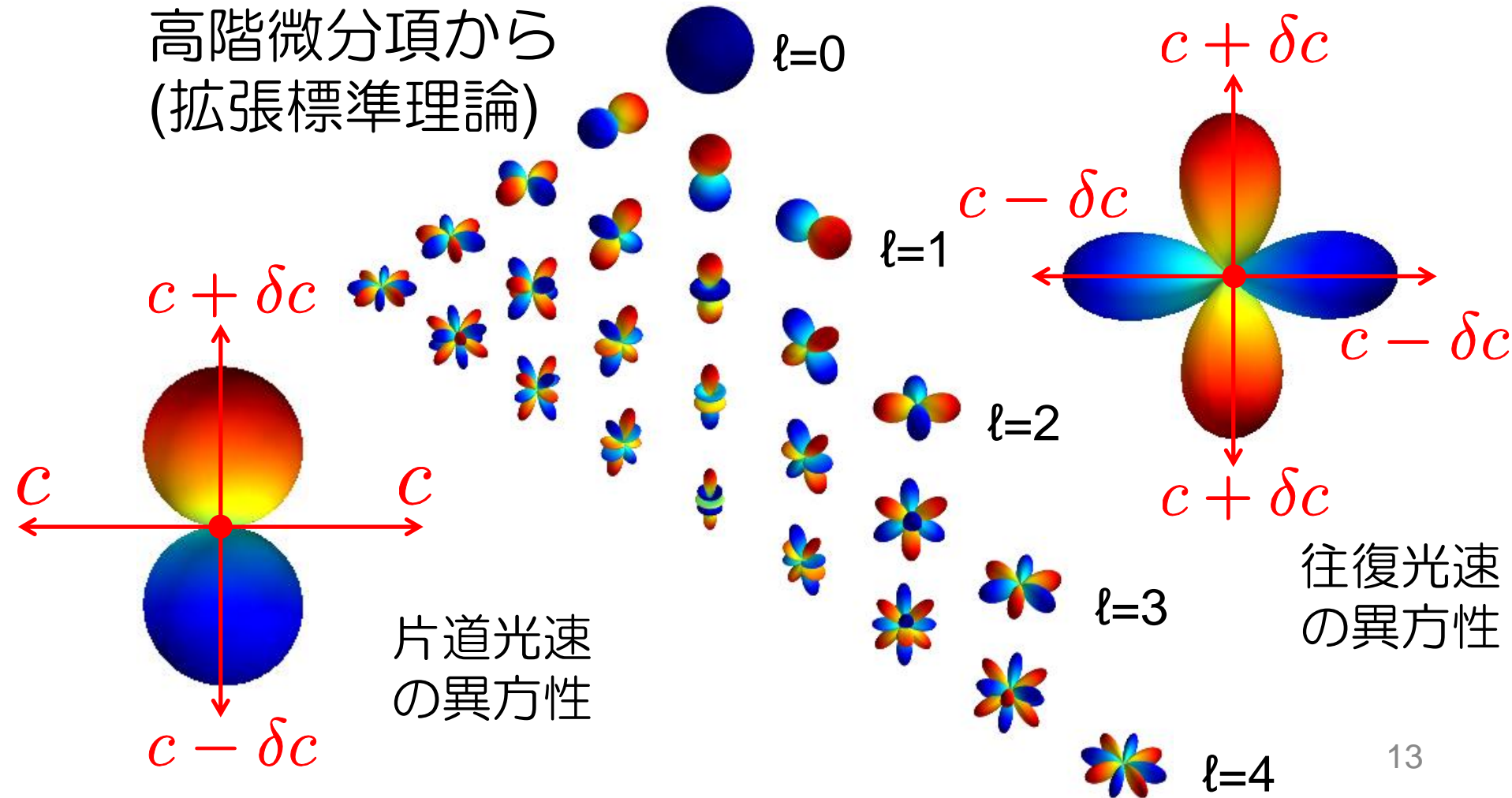
→我々はさらなる精度向上を行った

片道光速の異方性探査の歴史



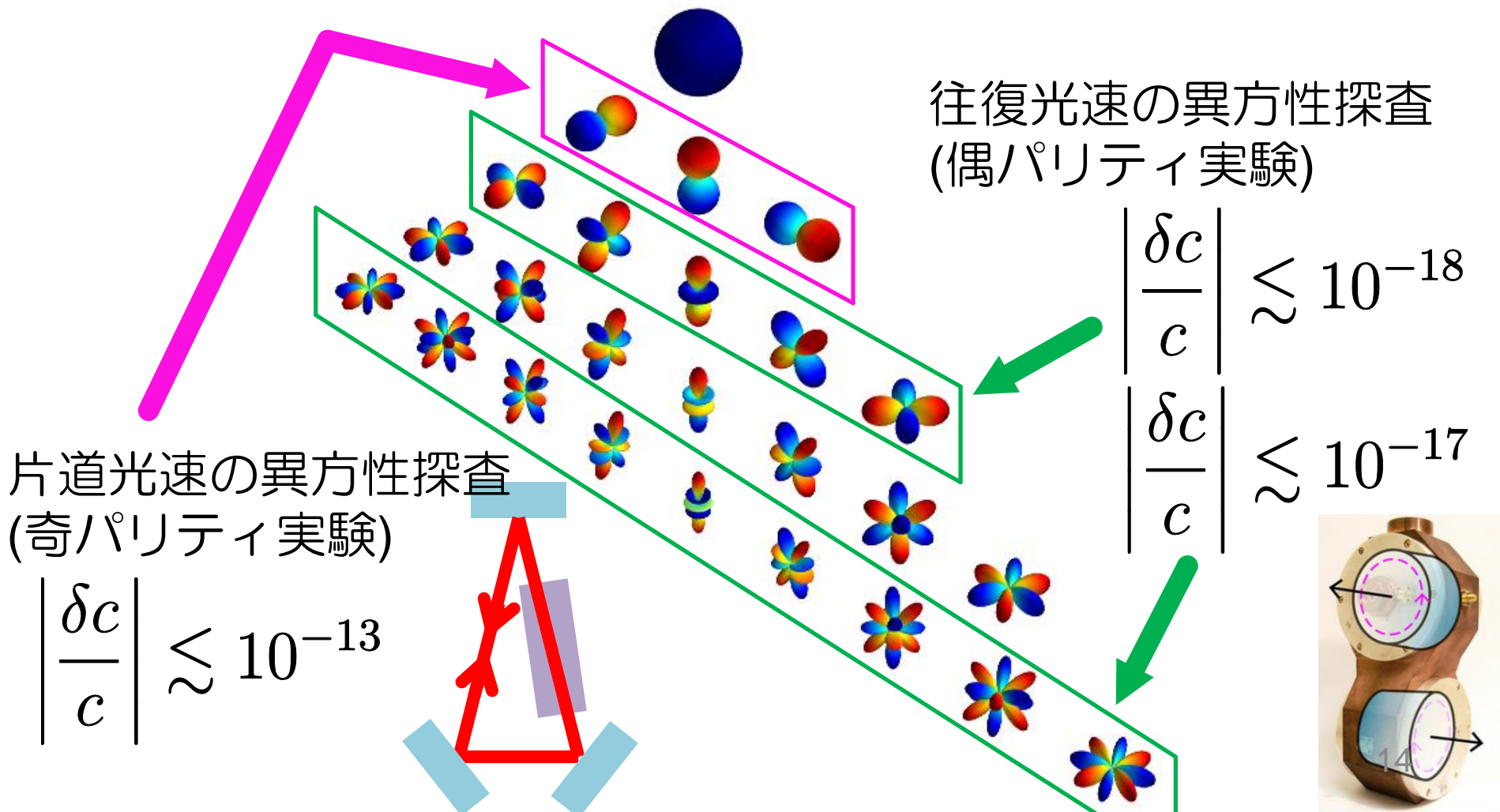
光速の高次の異方性

- 光速の異方性は球面調和関数展開できる
- 高次の異方性はLagrangianのLorentz不変性を破る
高階微分項から
(拡張標準理論)



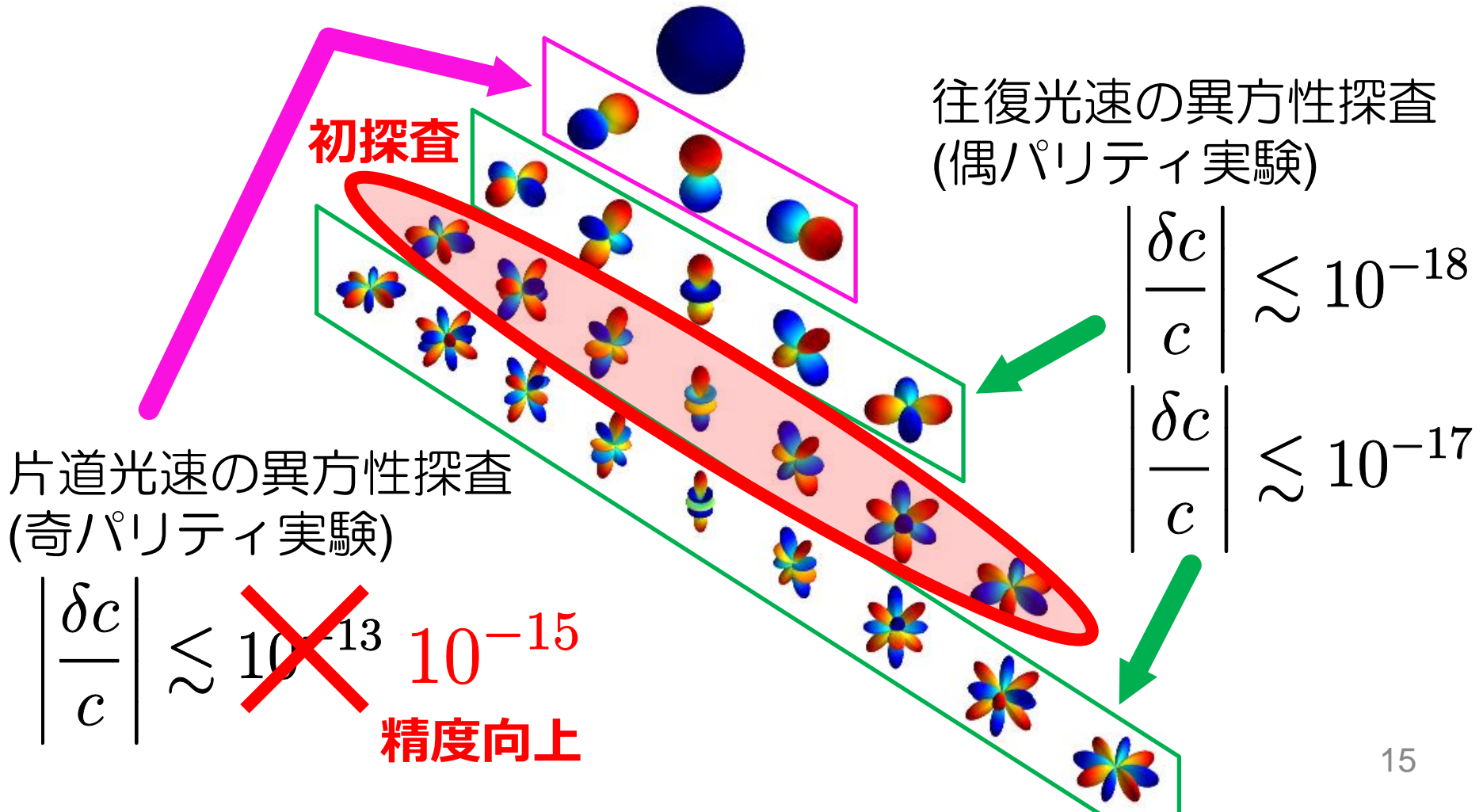
これまでの上限値

- 偶パリティ実験は $l = \text{even}$ のみを測定可能
- 奇パリティ実験は $l = \text{odd}$ のみを測定可能



本研究では

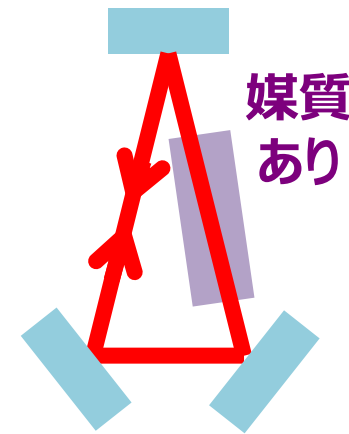
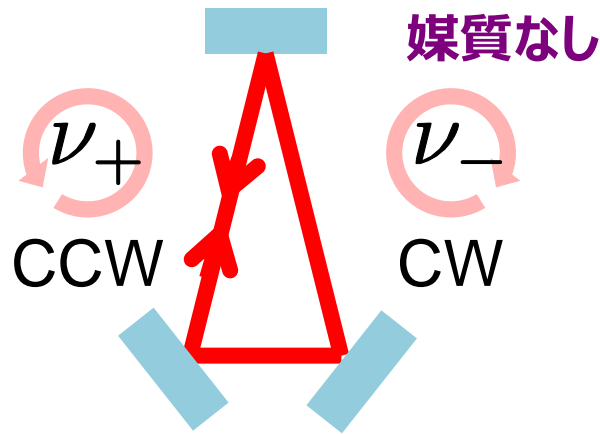
- 片道光速の異方性探査の精度向上
- $l = 3$ (六重極成分)の異方性の初探査



非対称光リング共振器

- 媒質を入れて非対称にすると、Lorentz不変性の破れに感度を持つ(共振周波数がずれる)

$c + \delta c$
 $c - \delta c$



LVで光速がずれる

↓
一周した時の
位相がずれる

↓
共振する光の
周波数がずれる

共振周波数
のずれ
 $\propto LV$

Lorentz不変の
場合

$$\begin{aligned}\nu_+ &= \nu_0 \\ \nu_- &= \nu_0\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\nu_+ &= \nu \\ \nu_- &= \nu\end{aligned}$$

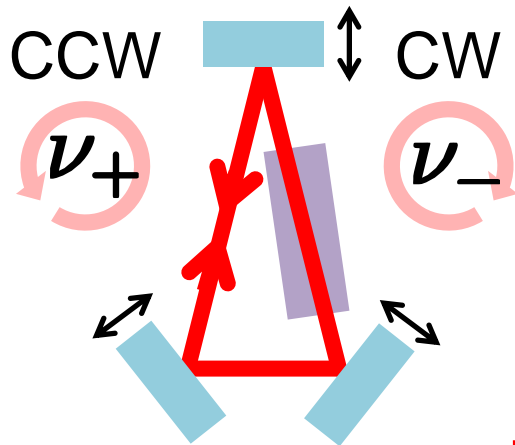
Lorentz不変性
が破れている
場合

$$\begin{aligned}\nu_+ &= \nu_0 \\ \nu_- &= \nu_0\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\nu_+ &= \nu - \delta\nu_{LV} \\ \nu_- &= \nu + \delta\nu_{LV}\end{aligned}$$

両回りの共振周波数を比較

- 共振器長変化は両回りに同相に効く
- 同相雑音除去により、環境変化に強くなる
→ 高真空、高レベル防振、温度制御が不要
- 比較は**ダブルパス構成**で行う



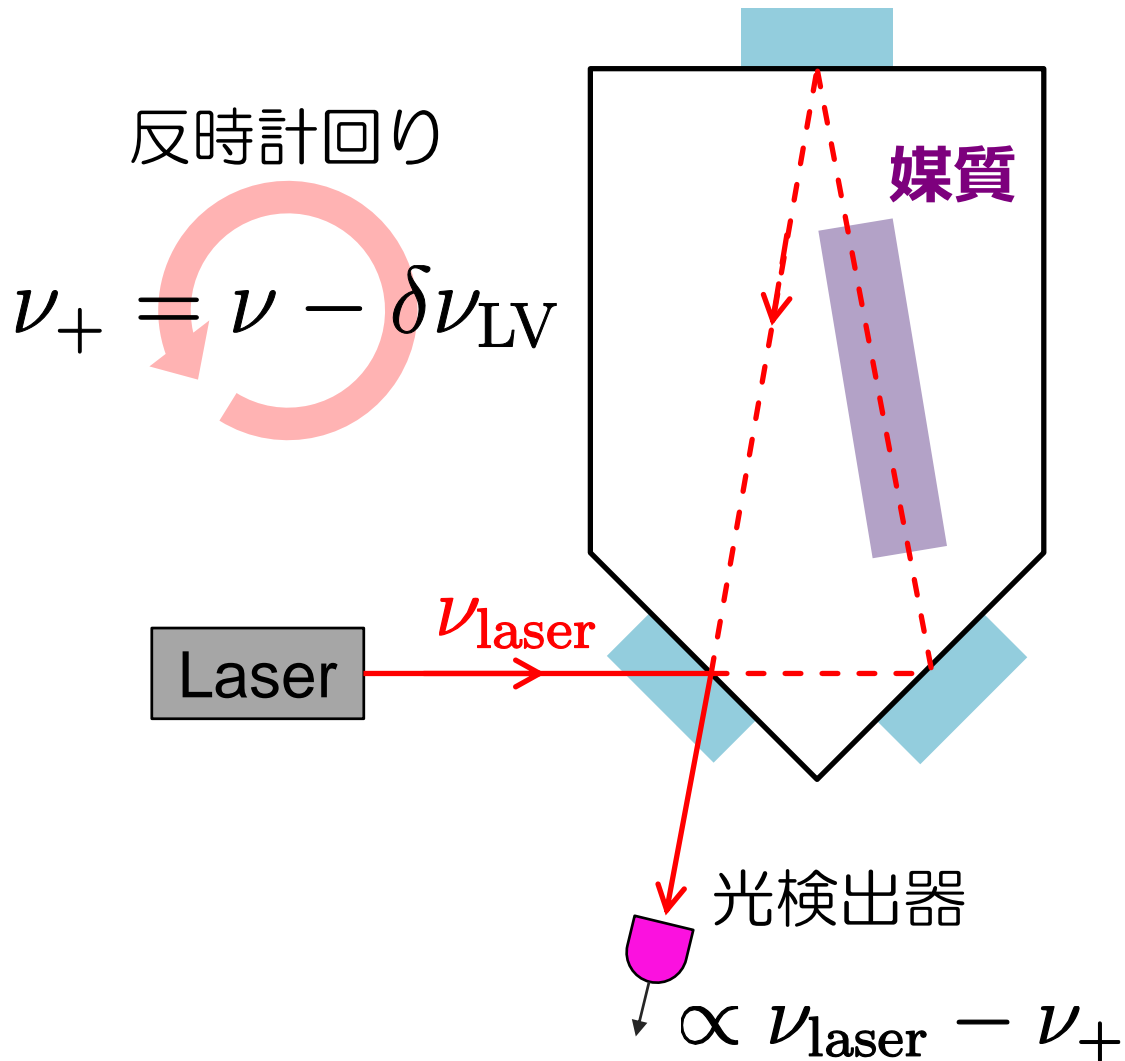
$$\begin{aligned}\nu_+ &= \nu + \delta\nu_{\text{noise}} - \delta\nu_{\text{LV}} \\ \nu_- &= \nu + \delta\nu_{\text{noise}} + \delta\nu_{\text{LV}}\end{aligned}$$

LVによる
共振周波数ずれは差動

共振器長変化による
共振周波数変動は同相

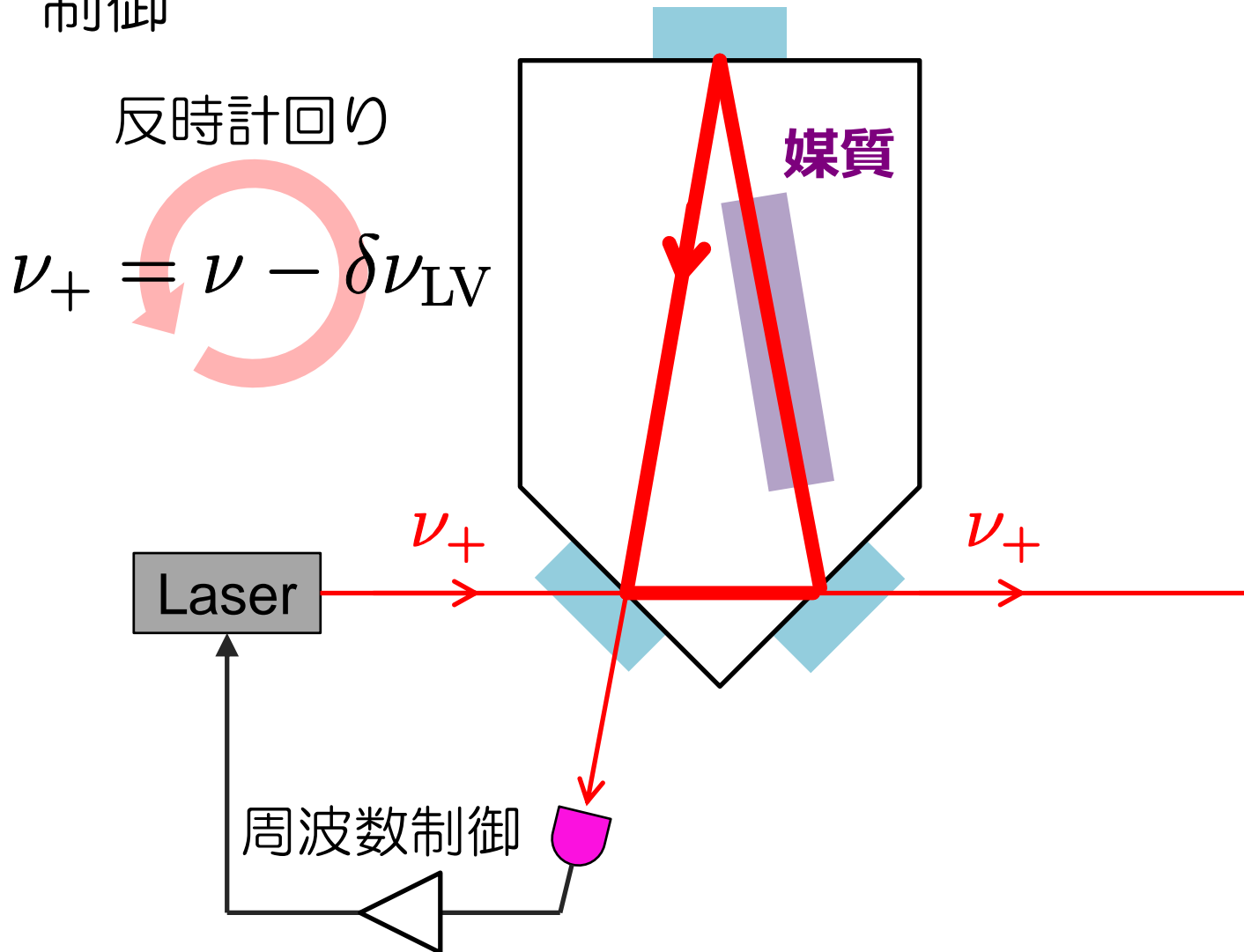
ダブルパス構成 (1/4)

- レーザー光を反時計回りに入射



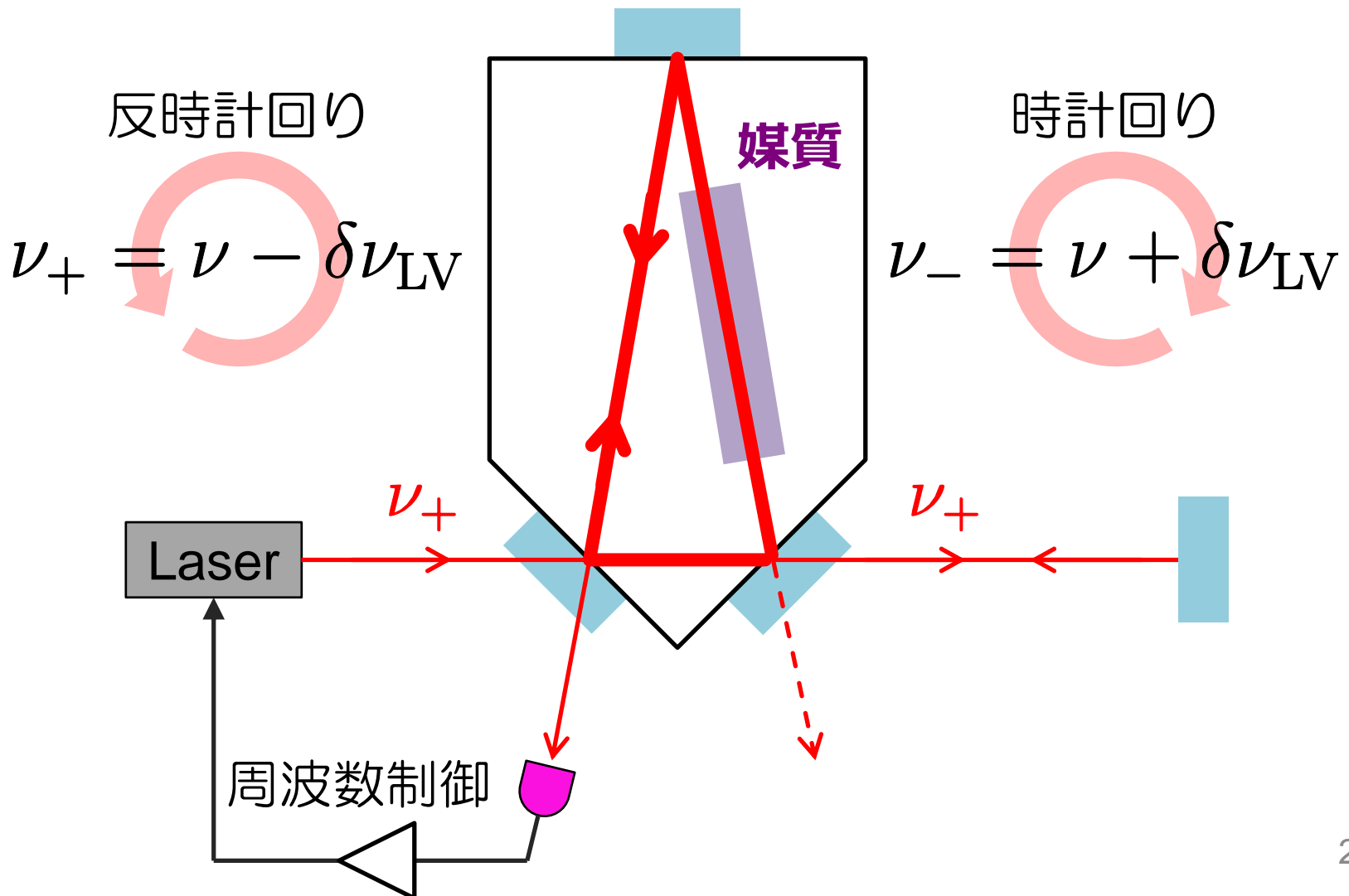
ダブルパス構成 (2/4)

- レーザー周波数を反時計回りの共振周波数(ν_+)に制御



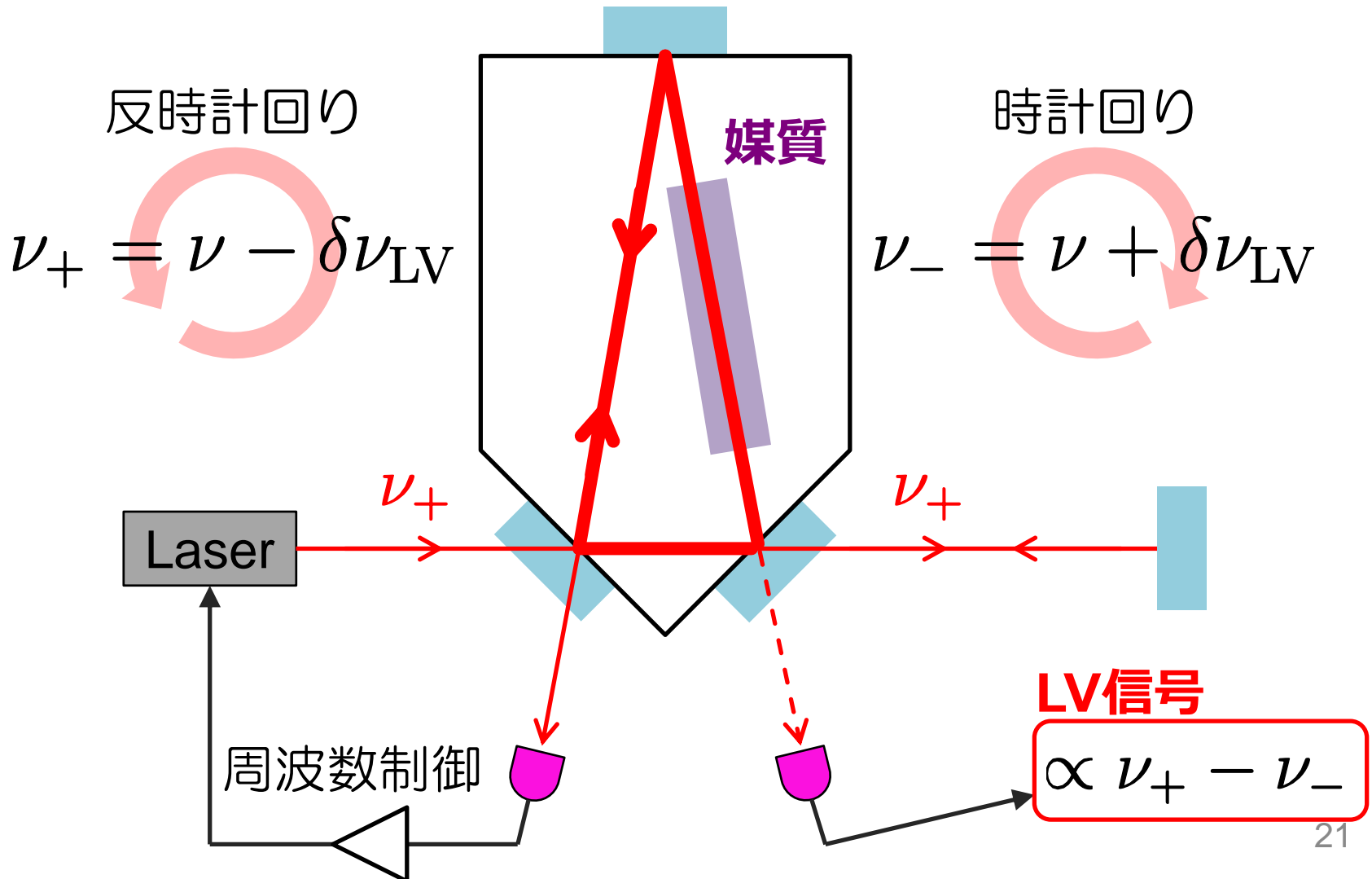
ダブルパス構成 (3/4)

- 透過光を打ち返し、時計回りに再入射



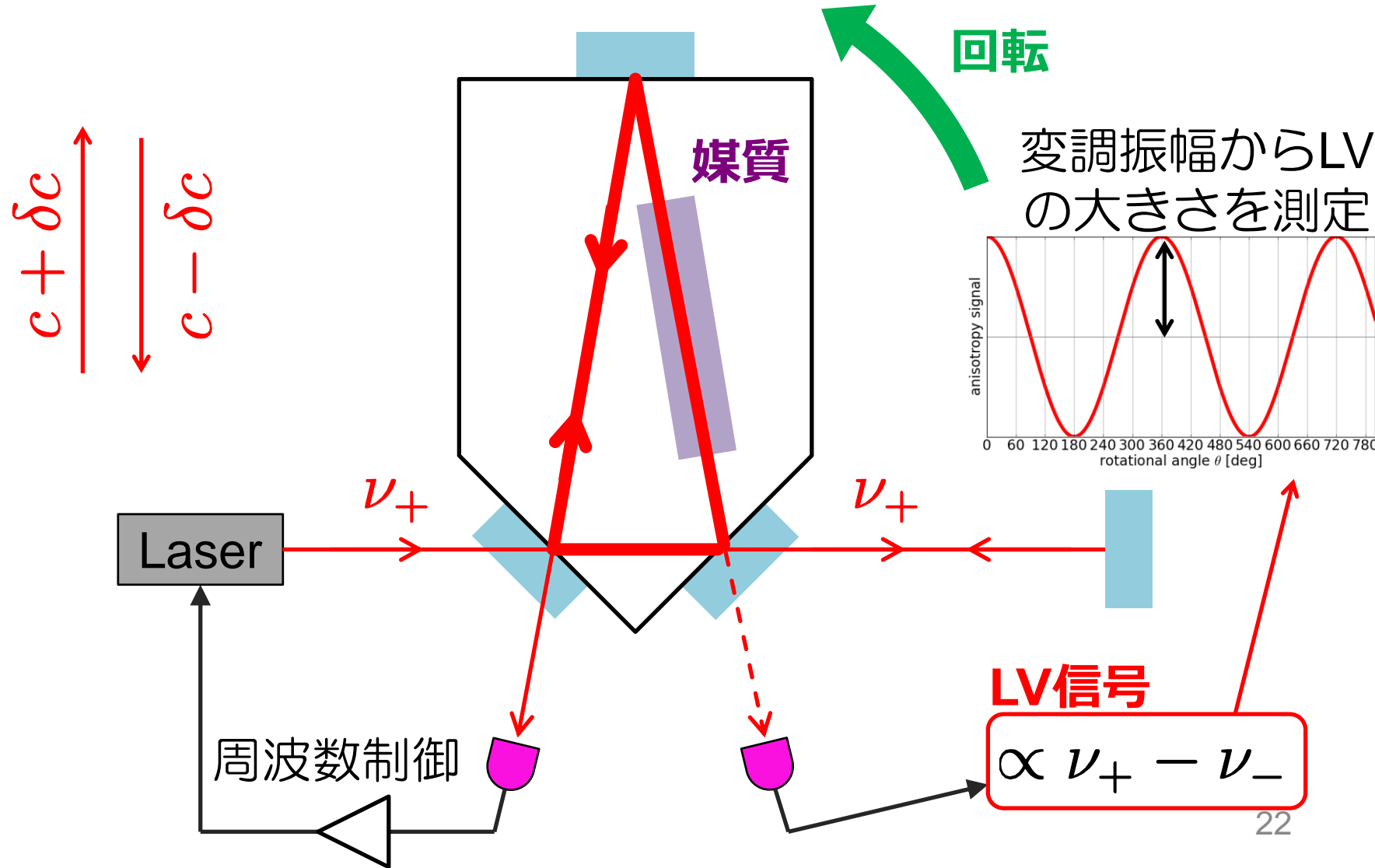
ダブルパス構成 (4/4)

- その反射光から、LV信号が得られる(**null測定**)



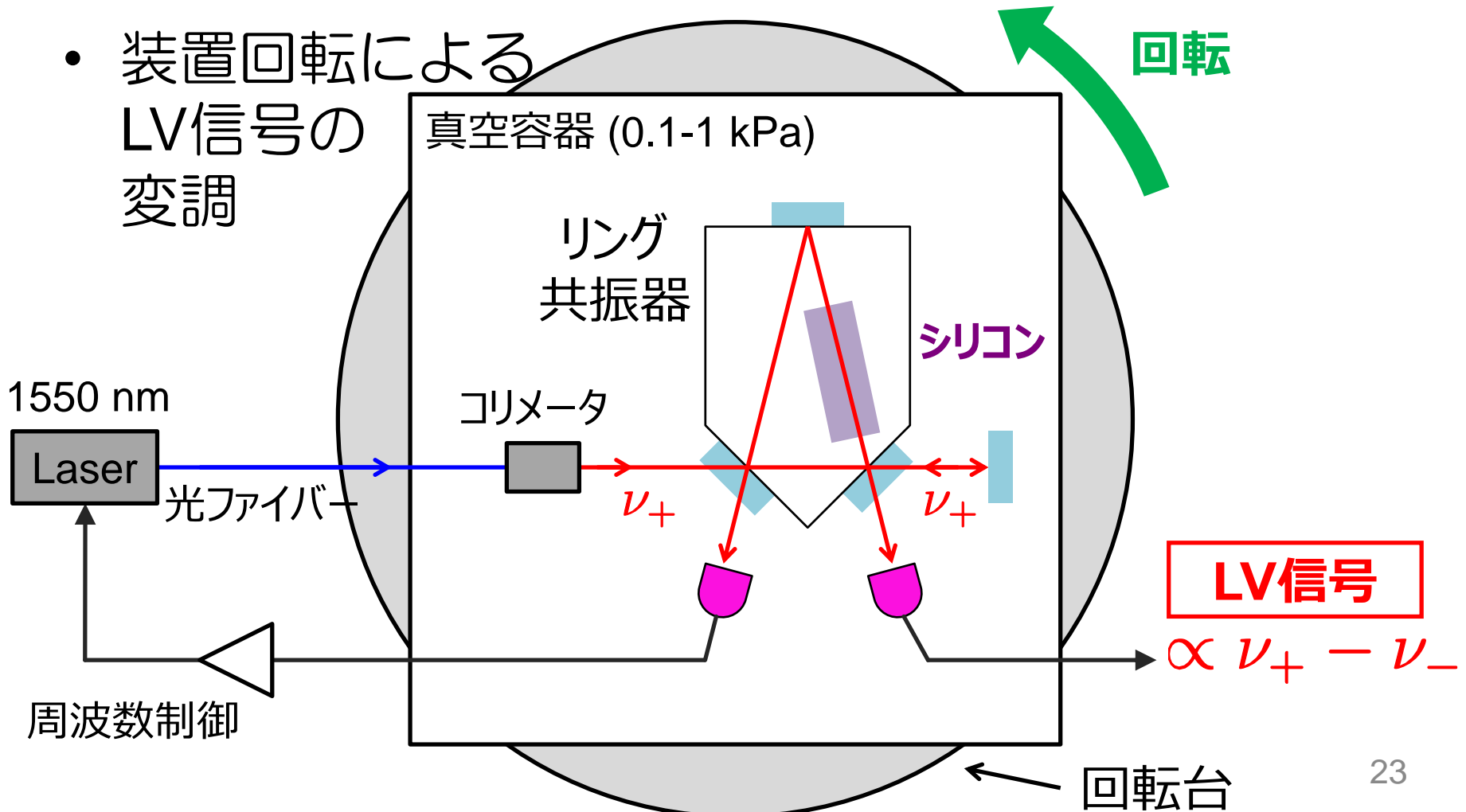
実験装置の回転

- 全体を回転させることにより、LV信号を変調

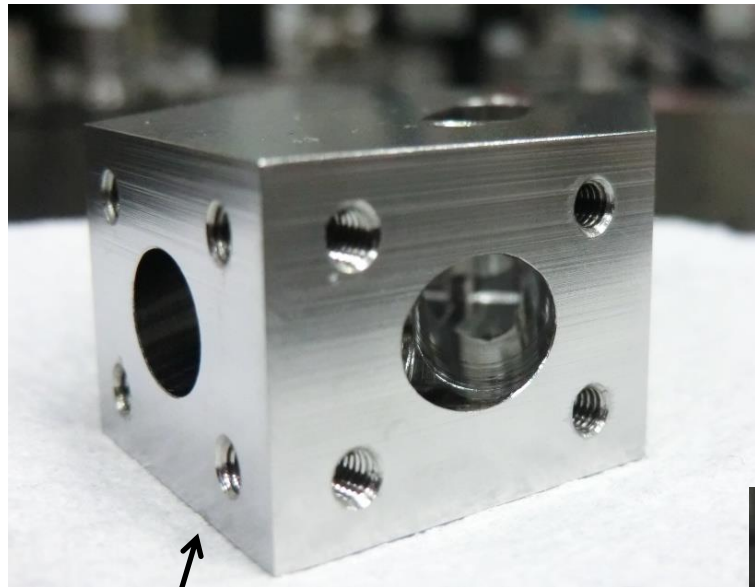


実験装置の概念図

- **ダブルパス構成**による共振周波数比較
- **シリコン**による大きな非対称性
- 装置回転によるLV信号の変調

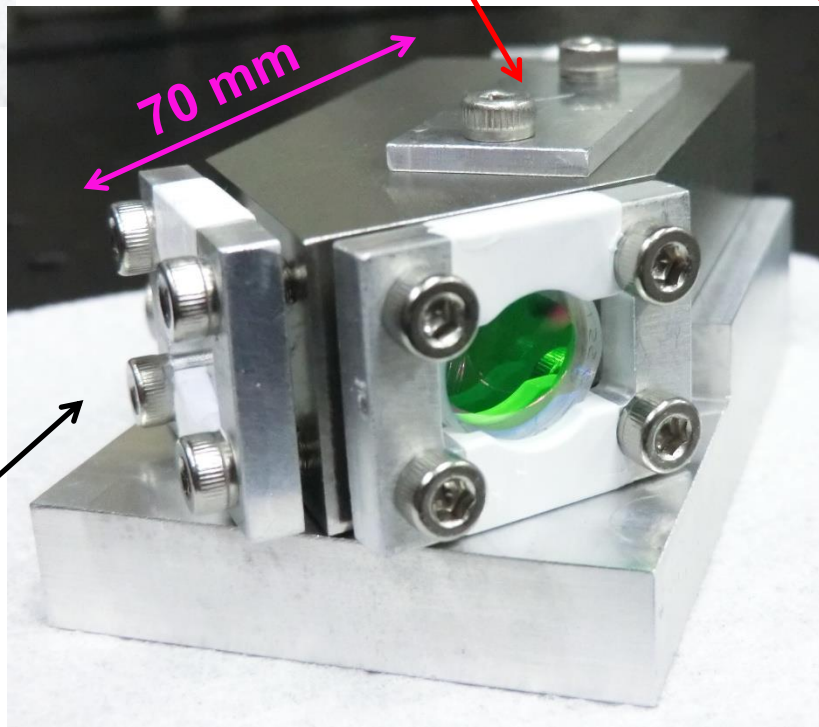


リング共振器の写真

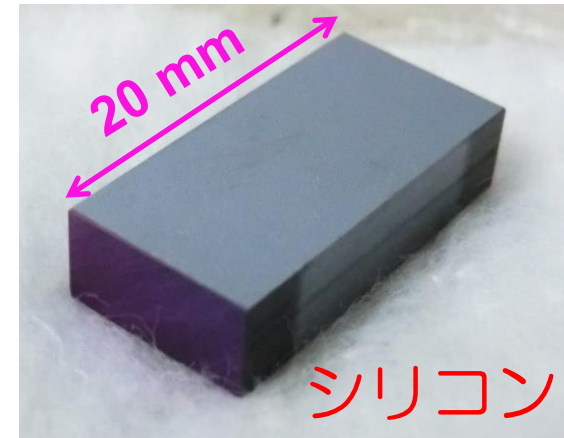


スペーサーは
スーパーインバー製
(低熱膨張合金 $10^{-7}/\text{K}$)

鏡を取り付けた状態



この中にシリコン



シリコン
(赤外光に
対して透明
 $n = 3.69$)

光学系の写真

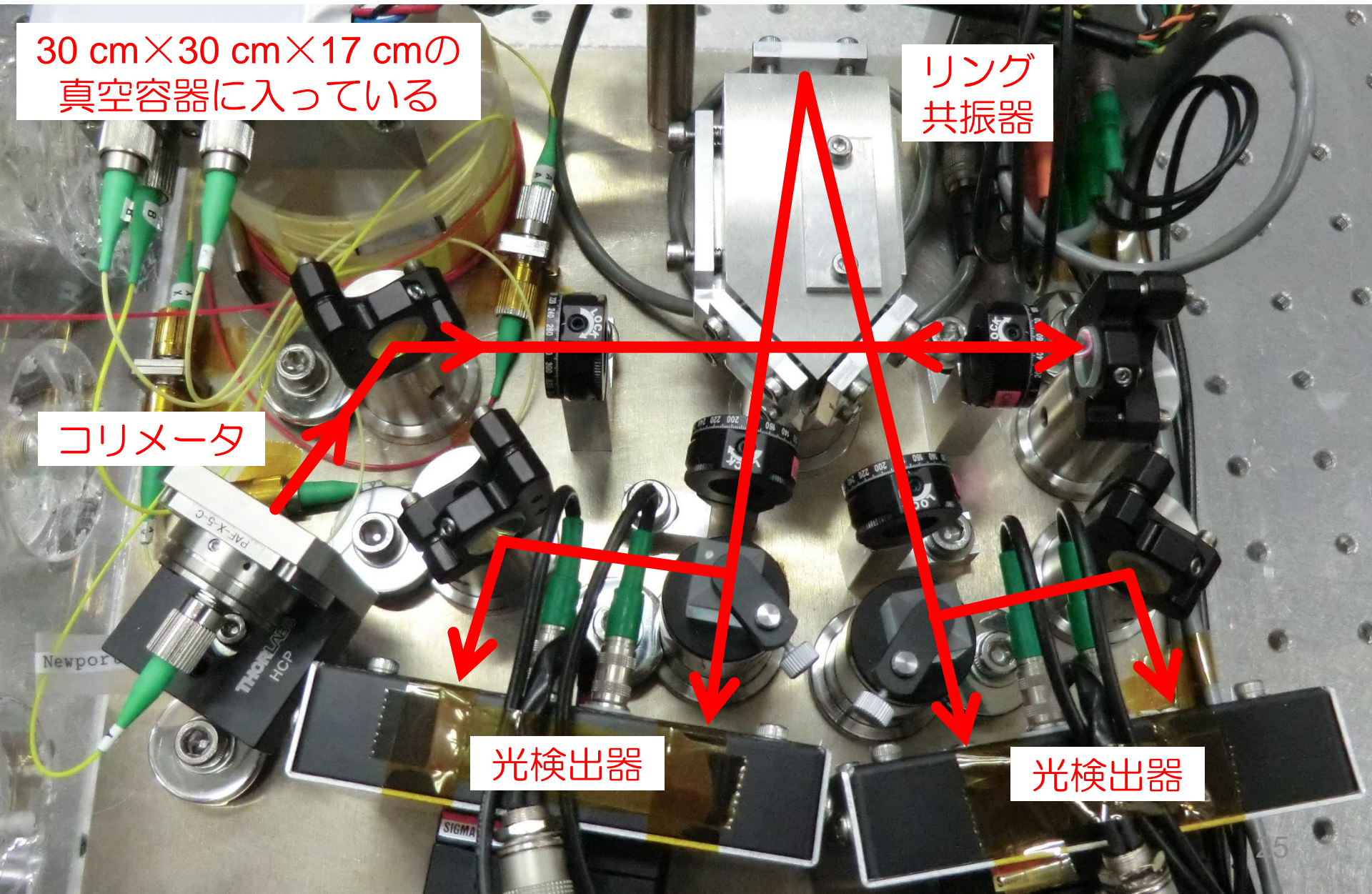
30 cm×30 cm×17 cmの
真空容器に入っている

リング
共振器

コリメータ

光検出器

光検出器



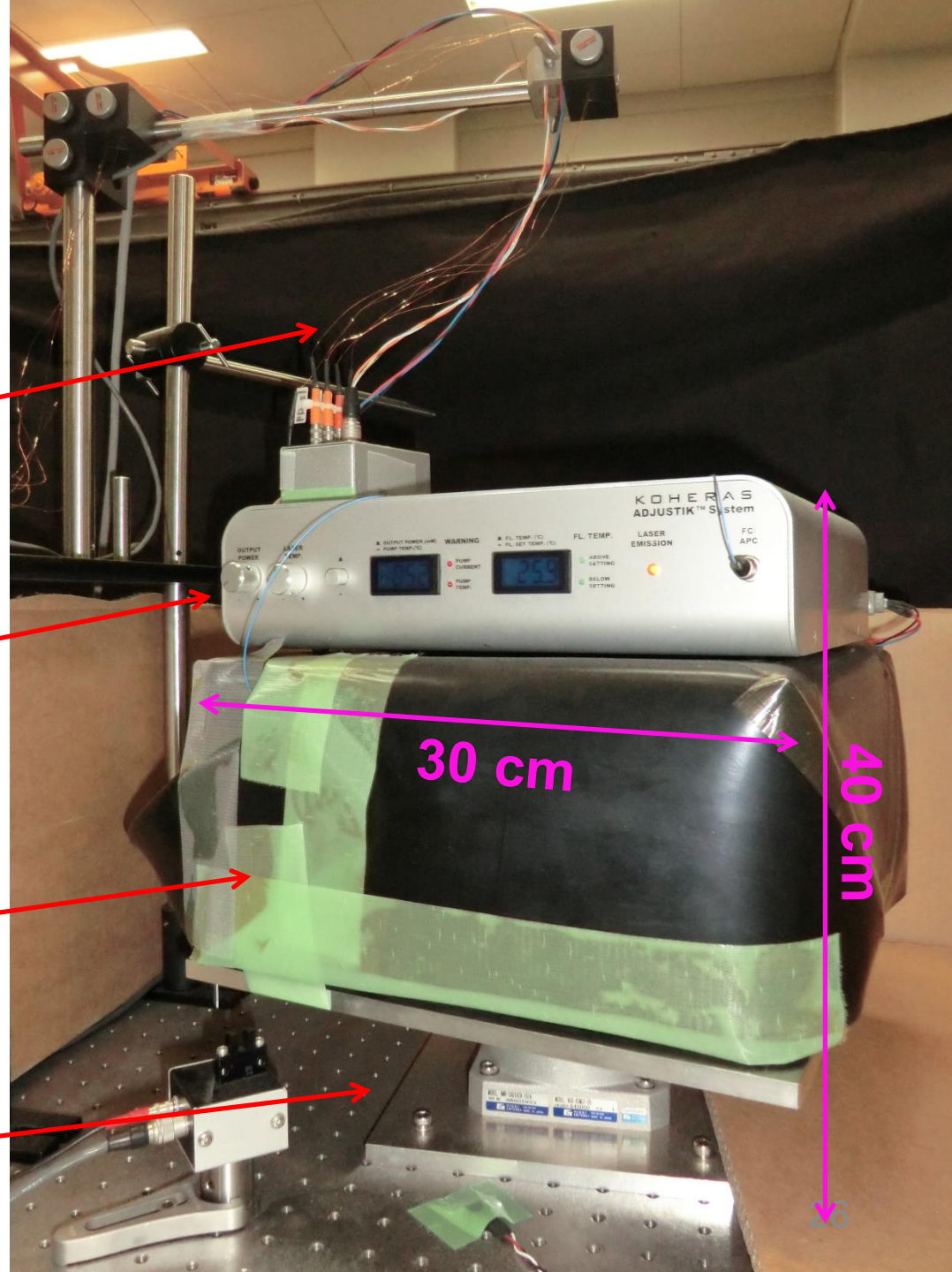
全体の写真

電気信号線
(信号取得、電源供給)

レーザー光源
(1550 nm)

真空容器+遮光シート
(中に光学系)

回転台



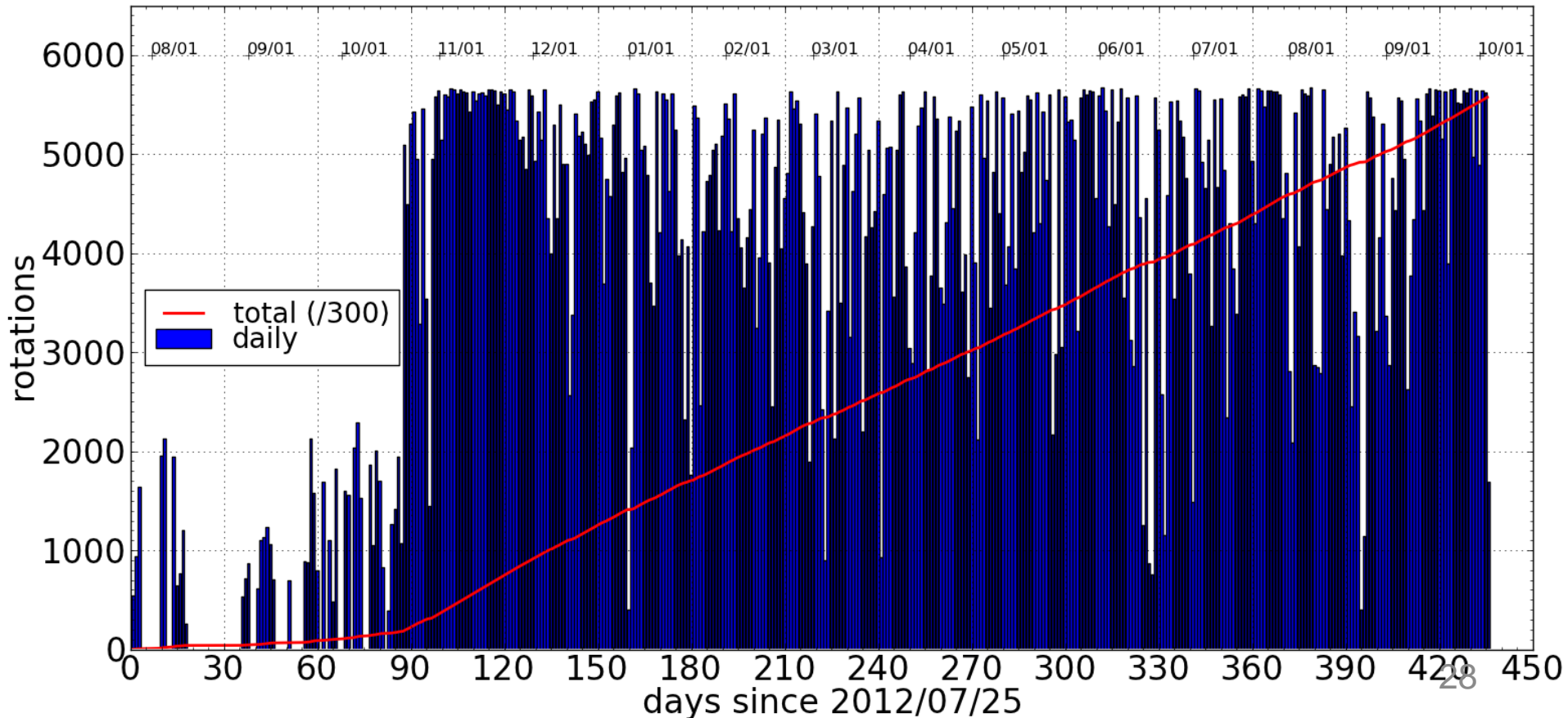
装置回転の動画

- 12秒で1回転、正回転と逆回転を繰り返す



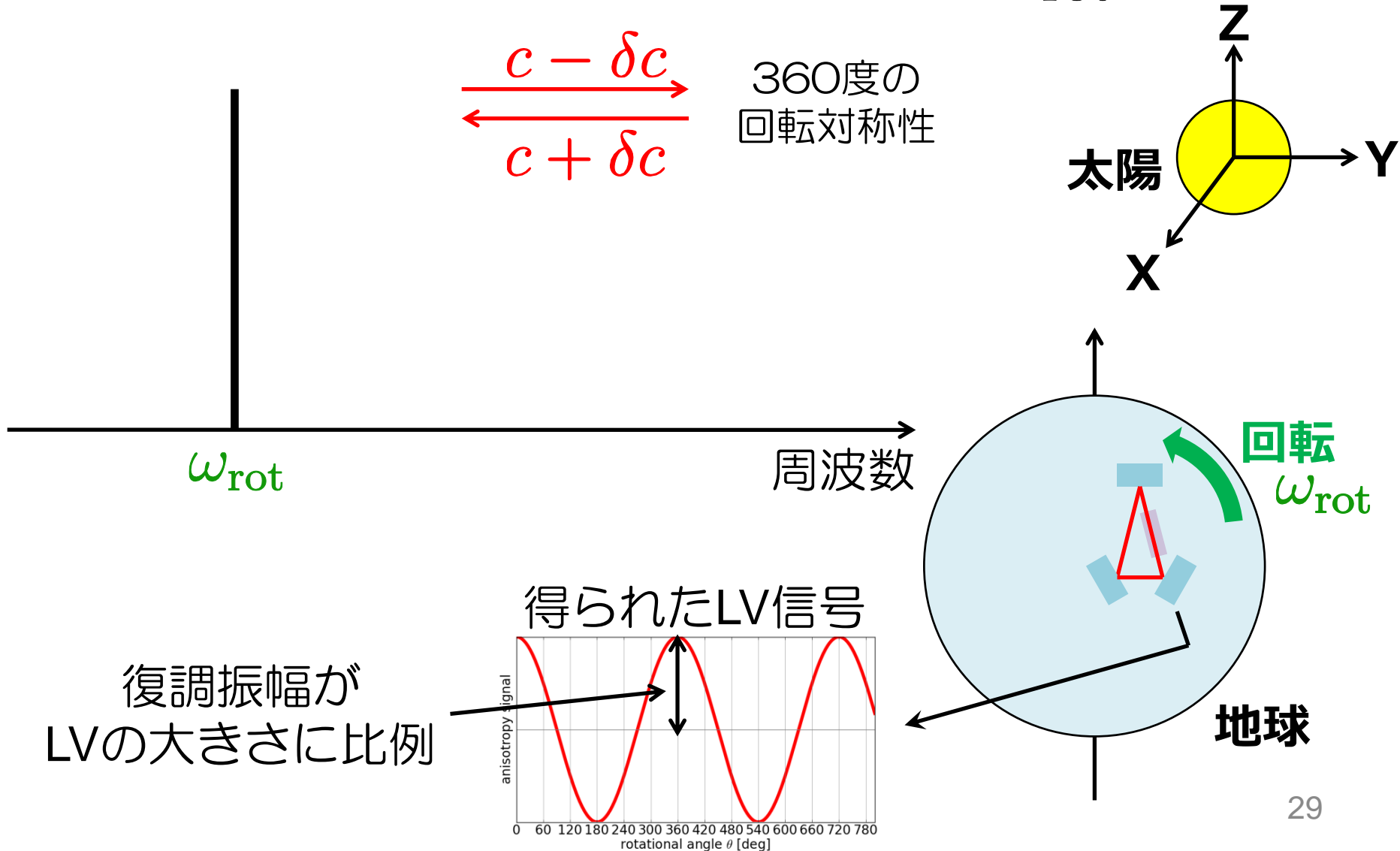
観測データ

- 東京大学(本郷)で2012年7月から2013年10月まで
- 測定日数: 393日 総回転数: 167万回転
- Duty cycle: 53% (10月中旬以降は64%)



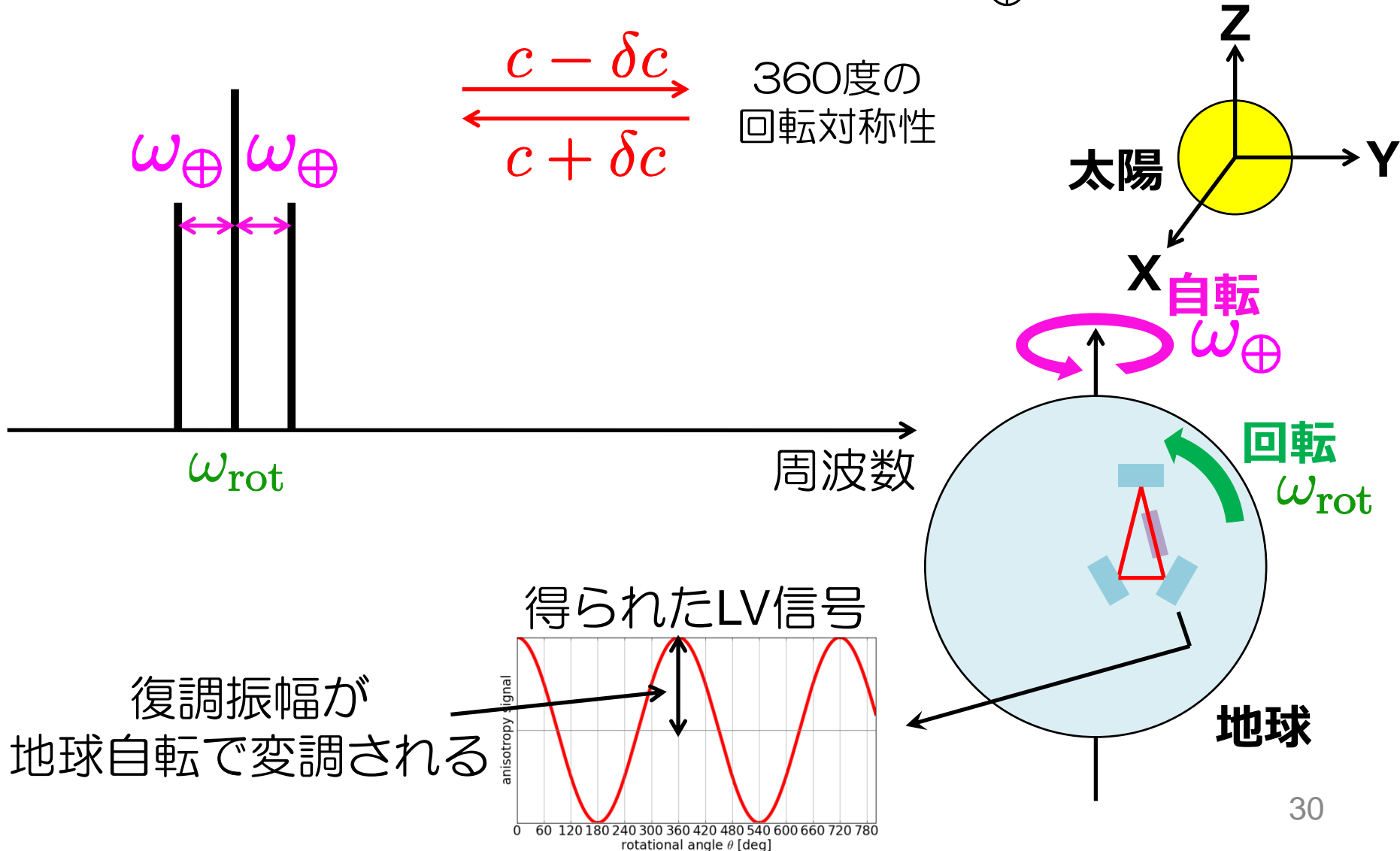
データ解析方法

- まず1回転分のデータを回転周波数 ω_{rot} で復調



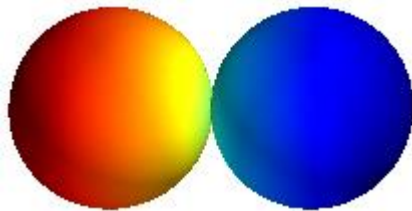
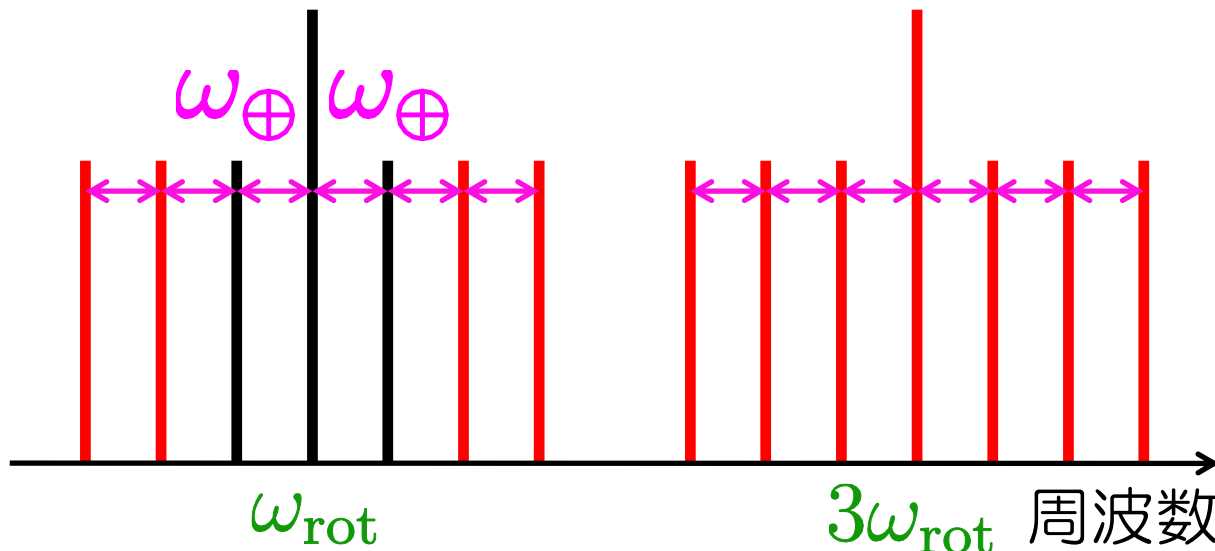
データ解析方法

- 次に1日分のデータを自転周波数 ω_{\oplus} で復調

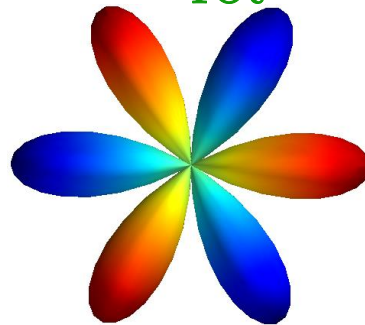


高次のデータ解析方法

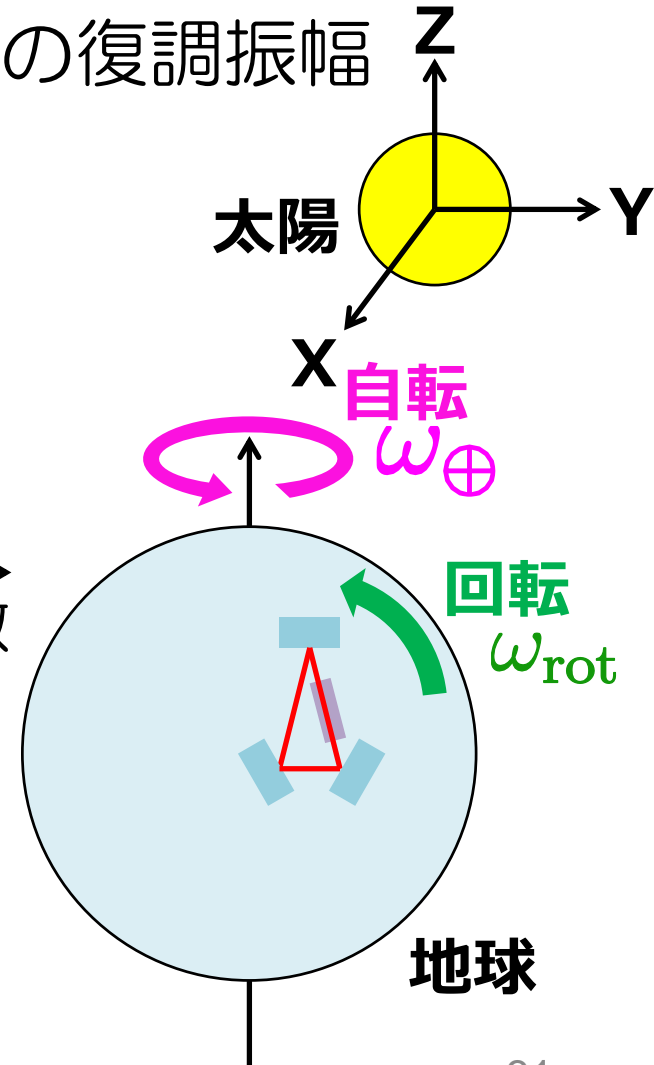
- 六重極成分は高調波に出てくる
 → sin成分とcos成分合計28個の復調振幅



360度の
回転対称性

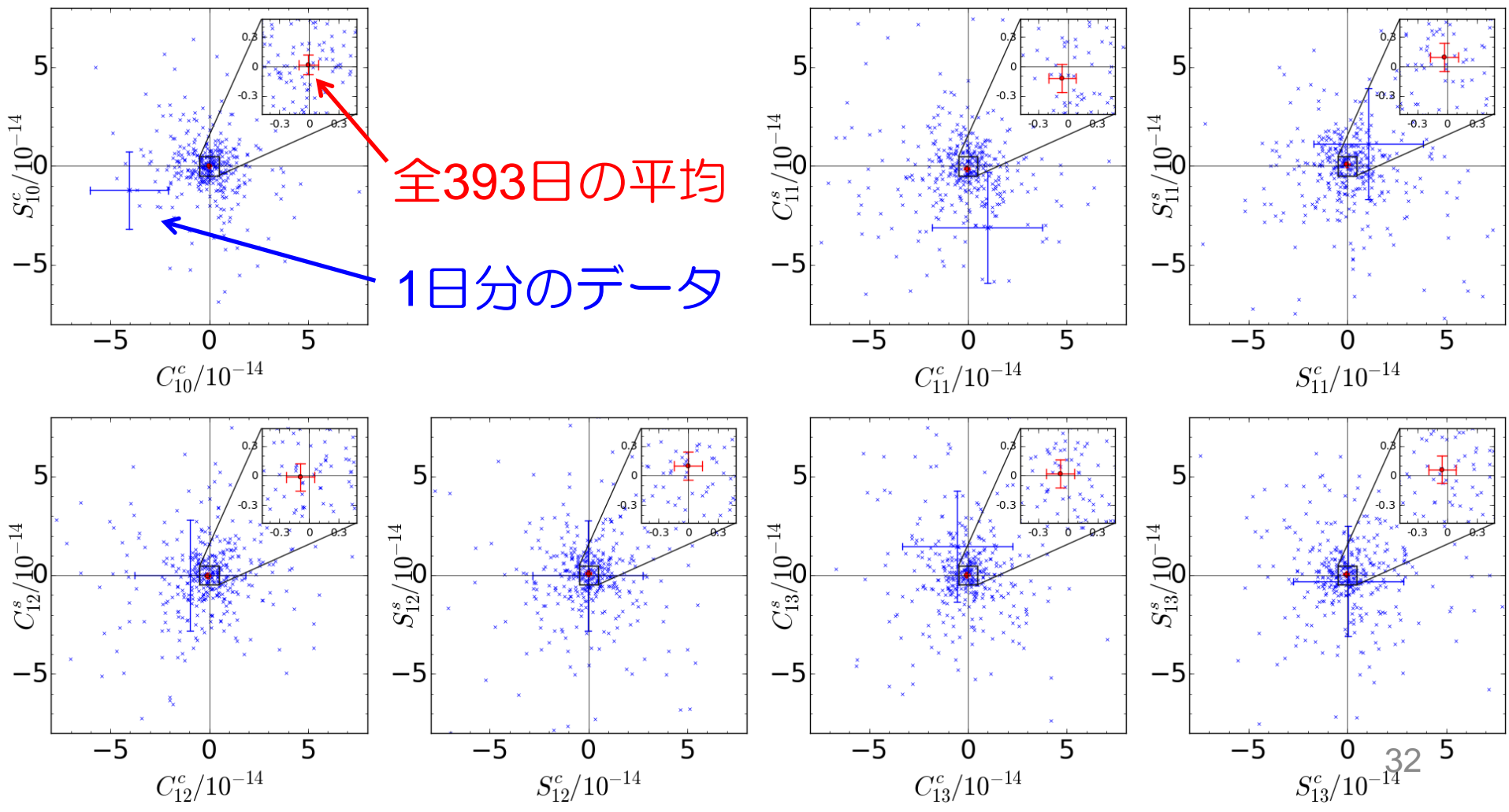


120度の
回転対称性



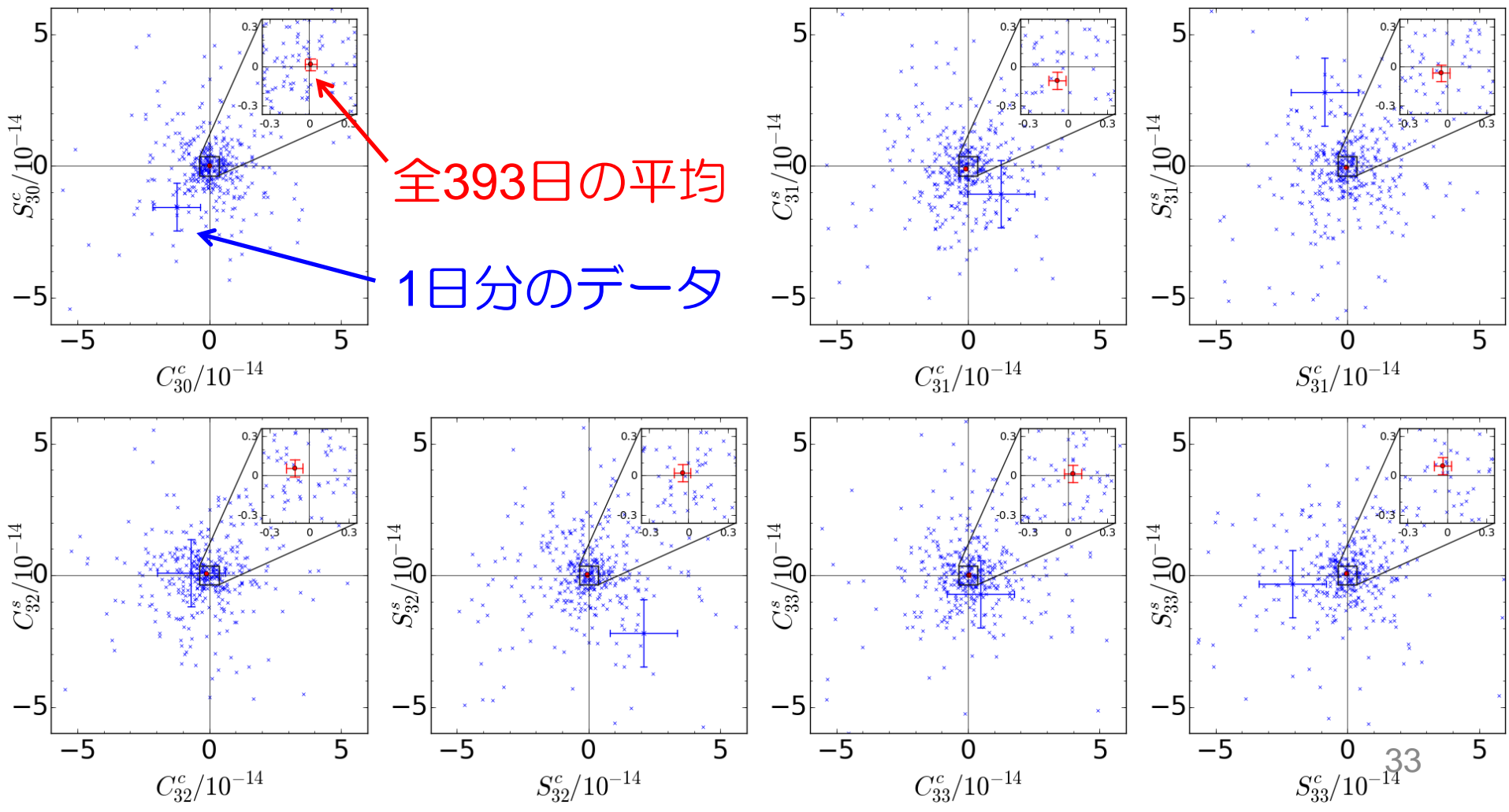
得られた復調振幅(ω_{rot})

- 2σ でゼロと一致
→ 有意なLorentz不変性の破れは見つからず



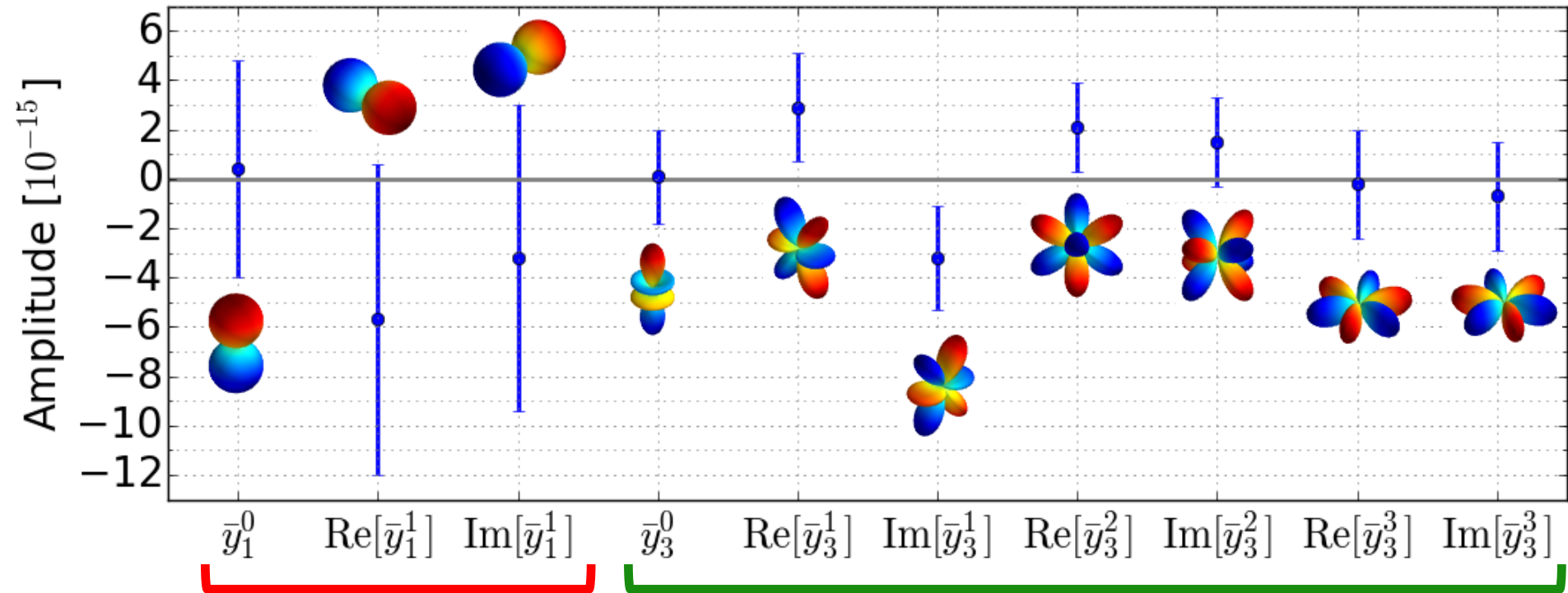
得られた復調振幅($3\omega_{\text{rot}}$)

- 2σ でゼロと一致
→ 有意なLorentz不変性の破れは見つからず



球面調和関数の各成分の測定値

- 1σ の統計的不確かさを表示
- 2σ でゼロと一致 \rightarrow Lorentz不変性を検証



$$\left| \frac{\delta c}{c} \right| \lesssim 6 \times 10^{-15}$$

(世界新)

$$\left| \frac{\delta c}{c} \right| \lesssim 2 \times 10^{-15}$$

(世界初)

まとめ

- 光リング共振器により光速の行き帰りの差を探查
シリコンによる大きな非対称性
ダブルパス構成によるnull測定
回転させながら1年間に渡るデータ取得
- 有意な異方性は見つからず、上限値をつけた
双極子成分(世界新) 六重極成分(世界初)

$$\left| \frac{\delta c}{c} \right| \lesssim 6 \times 10^{-15}$$

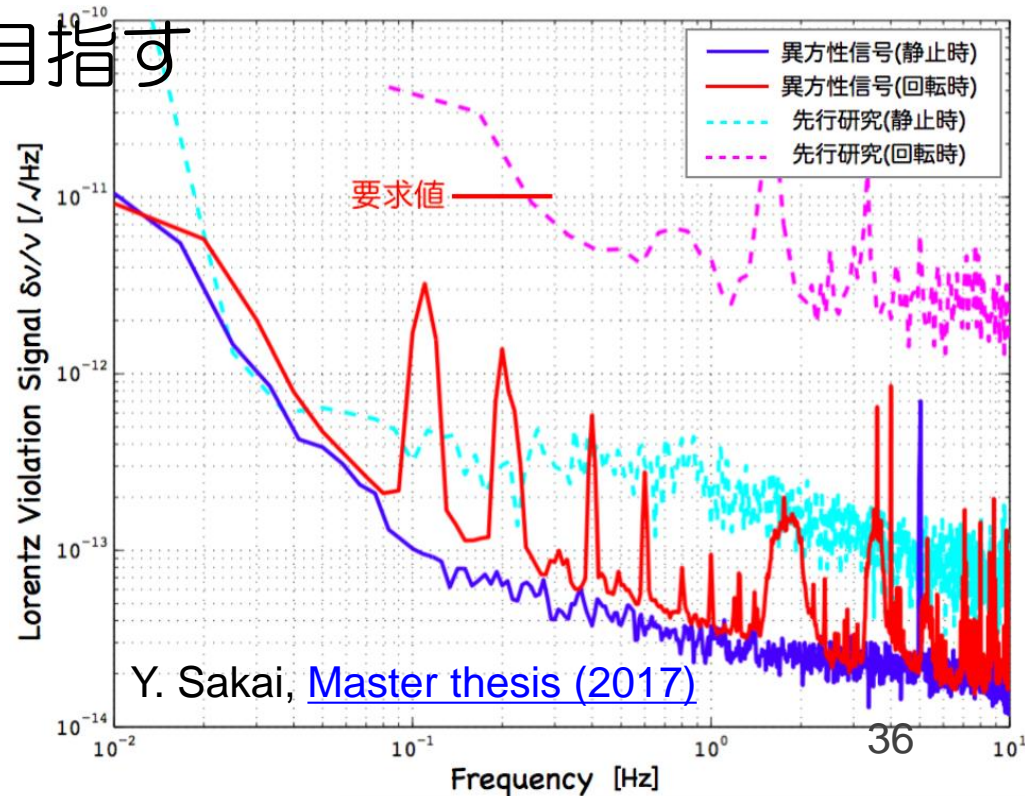
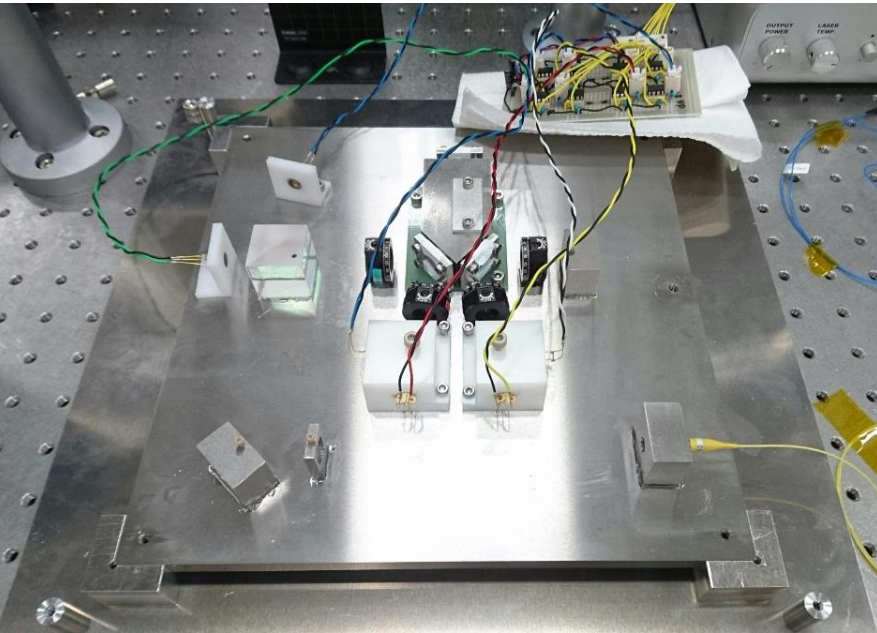
$$\left| \frac{\delta c}{c} \right| \lesssim 2 \times 10^{-15}$$

- Y. Michimura+, [PRL 110, 200401 \(2013\)](#)
Y. Michimura+, [PRD 88, 111101\(R\) \(2013\)](#)

今後の展望

- さらなる高感度化、回転に伴う雑音の低減に向けて開発中
 - 連続回転の実現 (酒井, -2017)
 - 光学系のモノリシック化 (武田, -2017)
 - 回転台の大型化、電源供給方法見直し (武田, -2019)
- 今年中に観測開始を目指す

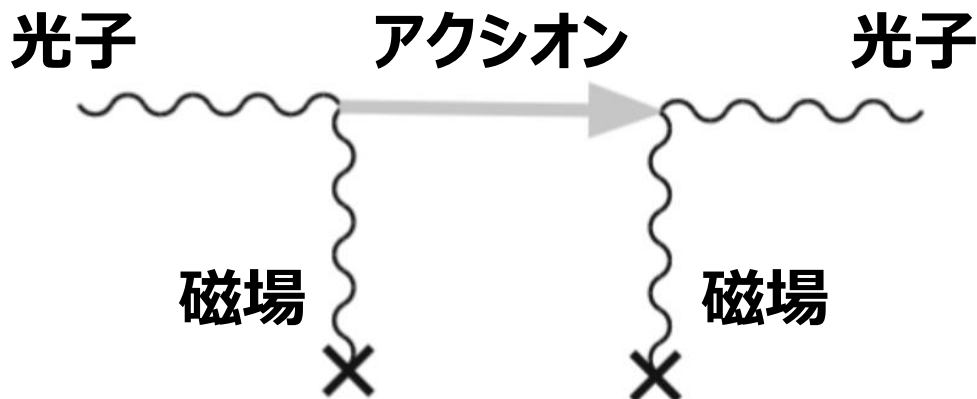
H. Takeda, [Master thesis \(2017\)](#)



光共振器を用いた アクシオン暗黒物質の探索

アクシオン

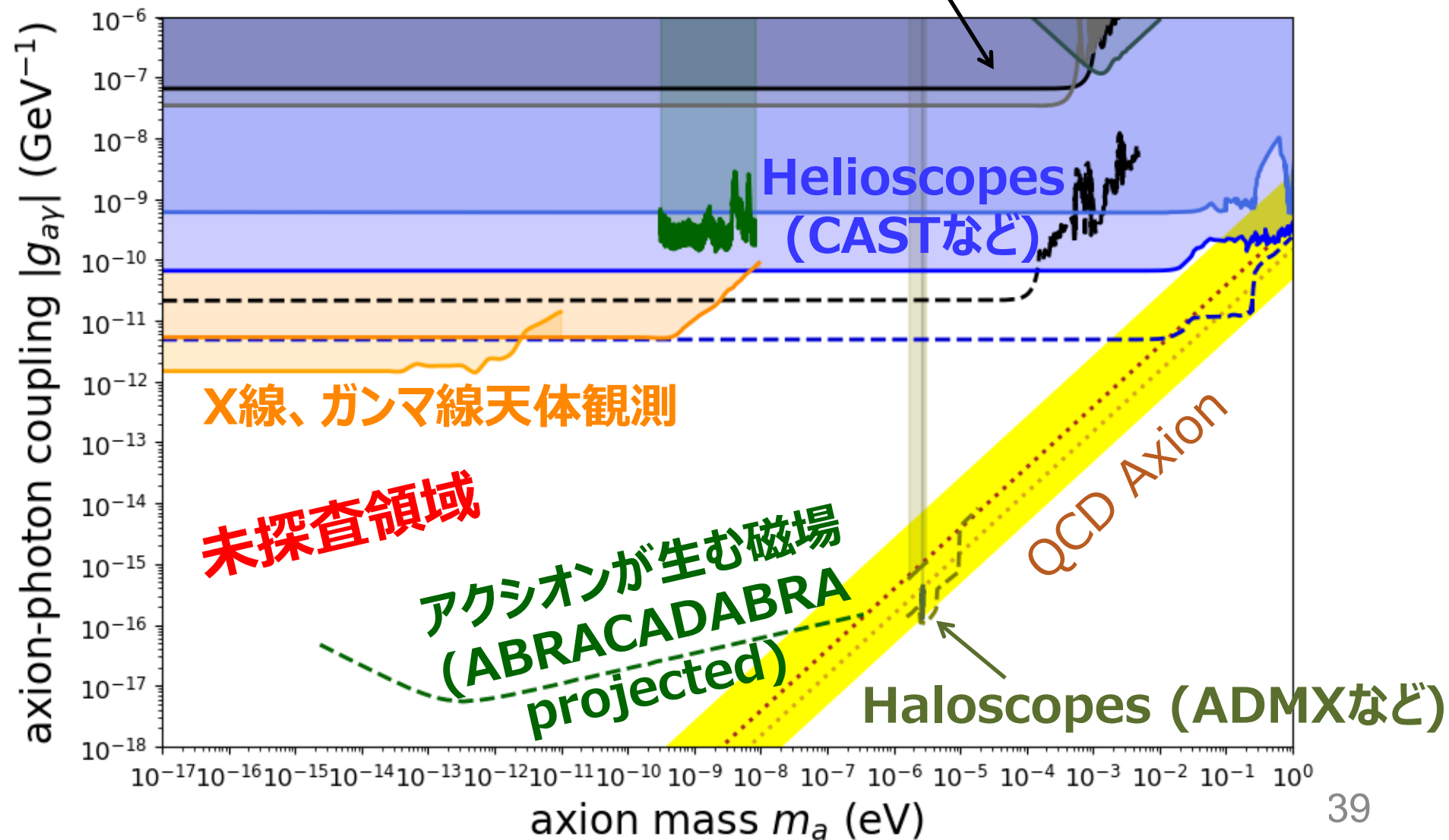
- 量子色力学の強いCP問題を解決するために導入された擬スカラー粒子
- ひも理論など高次元理論からも様々な axion like particles (**ALPs**)が予言されている
- **暗黒物質**の候補($m \ll \text{keV}$ 、物質と微小な相互作用)
- アクシオンの探査方法
 アクシオン-光子相互作用を探査する方法が主流
 特に**磁場**を用いる手法が盛ん



Primakoff効果

アクシオン-光子相互作用

Light Shining through Wall (ALPSなど)



円偏光の速度差に着目

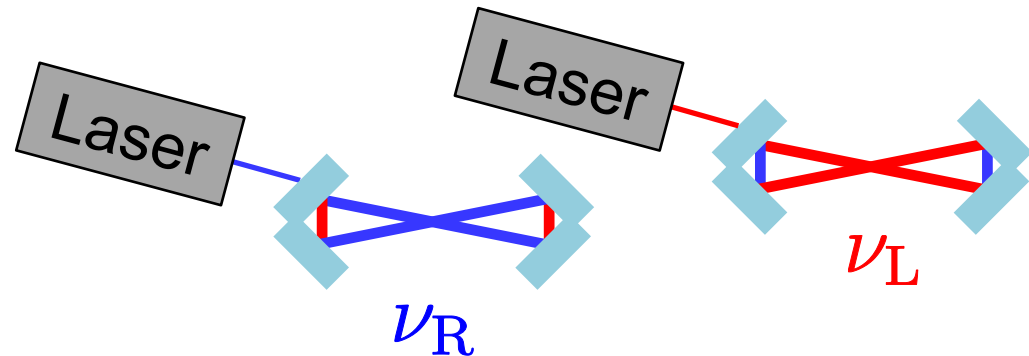
- アクシオン-光子相互作用($\frac{g_{a\gamma}}{4} a F_{\mu\nu} \tilde{F}^{\mu\nu}$)により
左円偏光と右円偏光に速度差が生じる

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

coupling constant axion field axion mass

- 円偏光の速度差を光共振器の共振周波数差として測定

$$\frac{\delta c}{c} = \frac{\nu_L - \nu_R}{\nu}$$



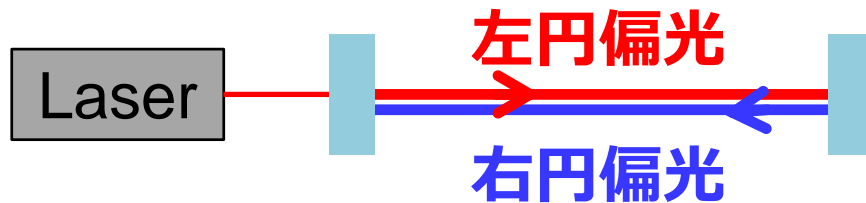
- 振動源となりうる強磁場を用いずに探查することが可能

我々のアイディア

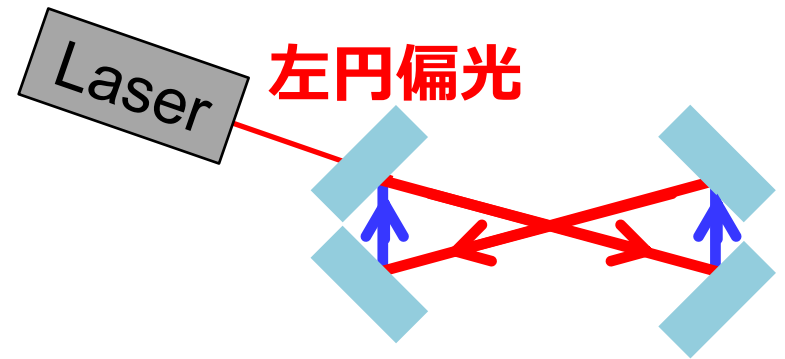


- **ボウタイ**共振器を用いる

線形共振器では光速の差の影響がキャンセル



ボウタイ共振器なら大丈夫

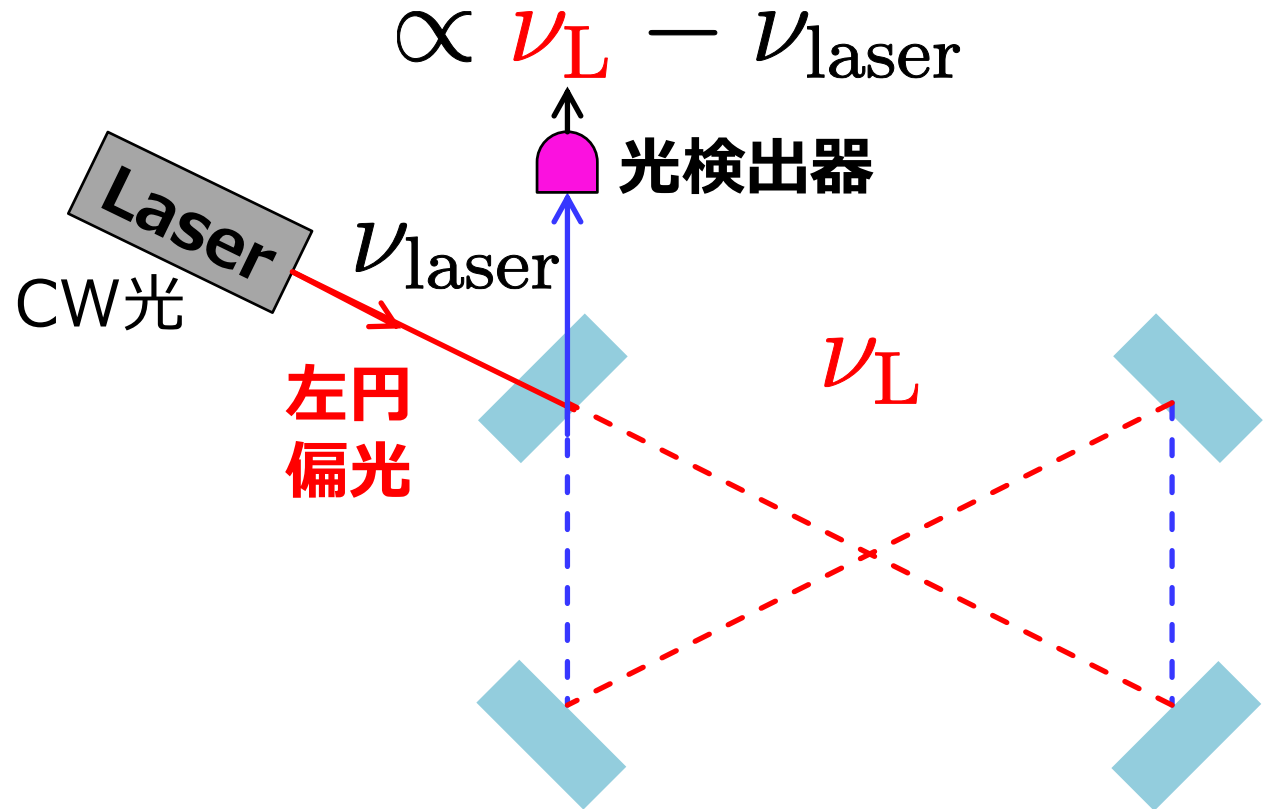


- **ダブルパス**構成を用いる
透過光を打ち返すことで同じ共振器を逆回りに使って円偏光の間の**共振周波数差**を又ル測定

Y. Michimura+, [PRL 110, 200401 \(2013\)](#)

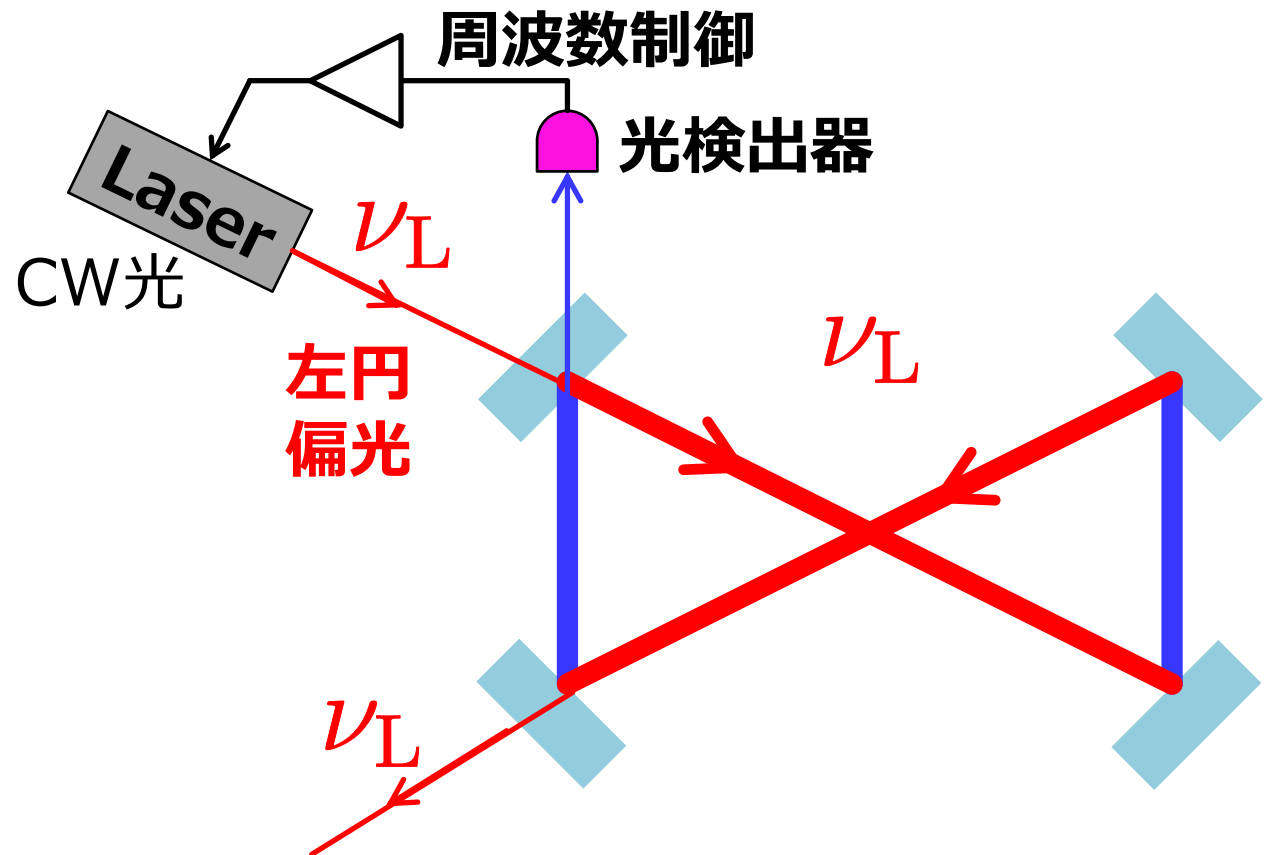
ボウタイ共振器とダブルパス構成

- 左円偏光を共振器に入射



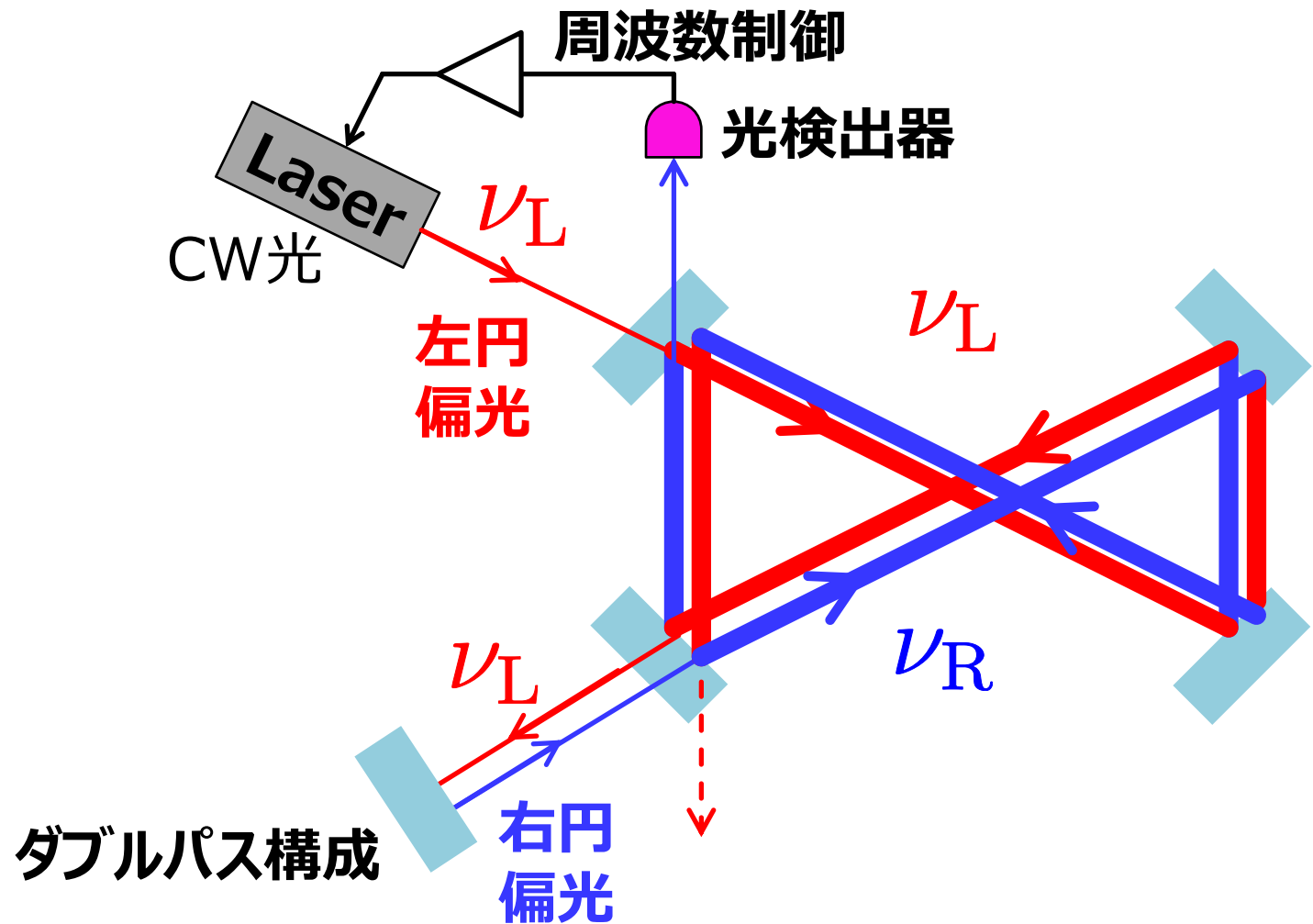
ボウタイ共振器とダブルパス構成

- レーザーの周波数を左円偏光の共振周波数(ν_L)に制御



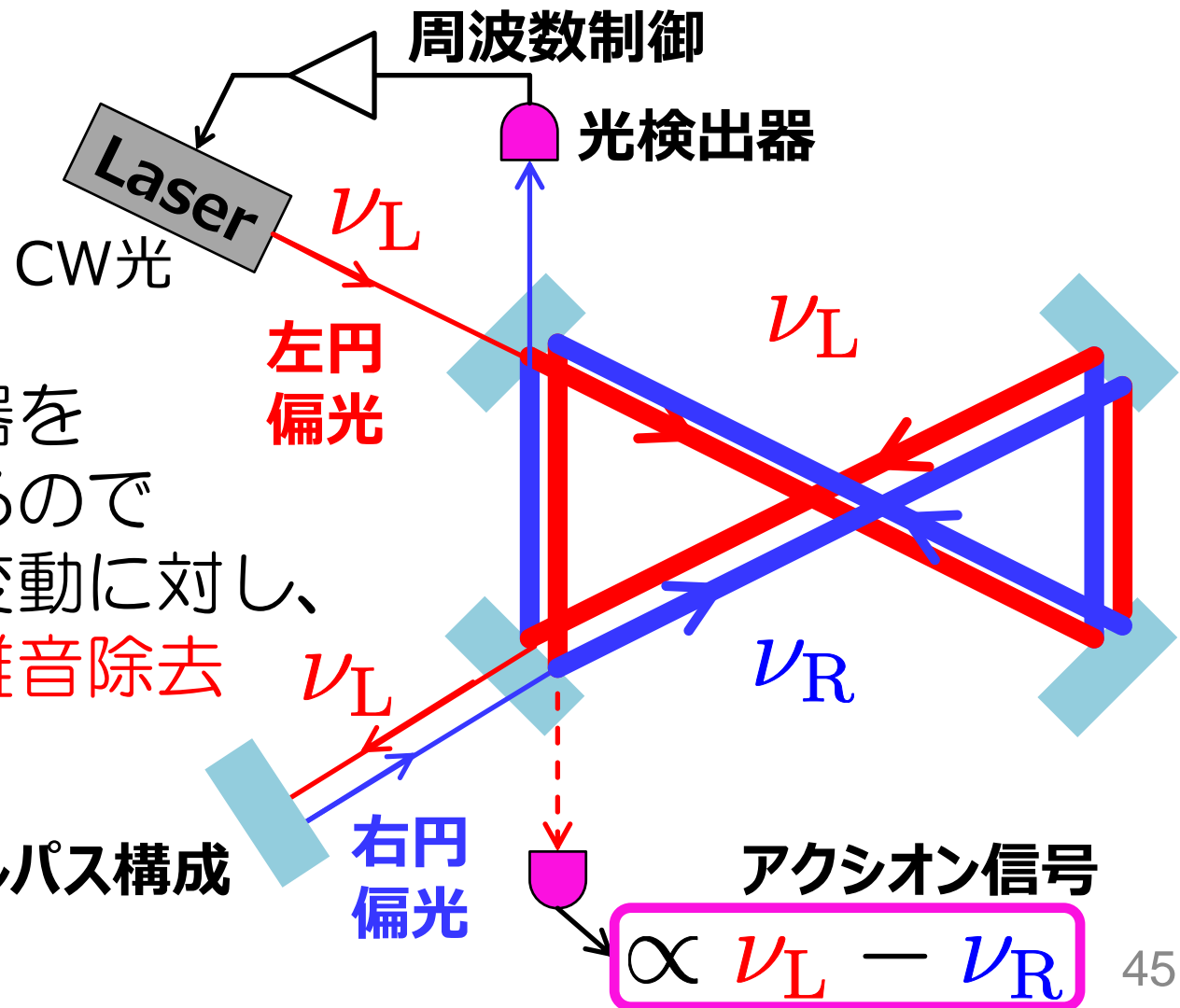
ボウタイ共振器とダブルパス構成

- 透過光を打ち返す(右円偏光を逆回りに入射)



ボウタイ共振器とダブルパス構成

- 共振器の反射光からアクション信号が取り出せる
(null測定)



- 同じ共振器を使っているので共振器長変動に対し、高い**同相雑音除去**

この構成の感度

- **DANCE**
Dark matter Axion search with riNg Cavity Experiment
- 共振器長変動(変位雑音)は同相雑音除去により原理的には雑音にならない
- 光検出器の散射雑音で決まる

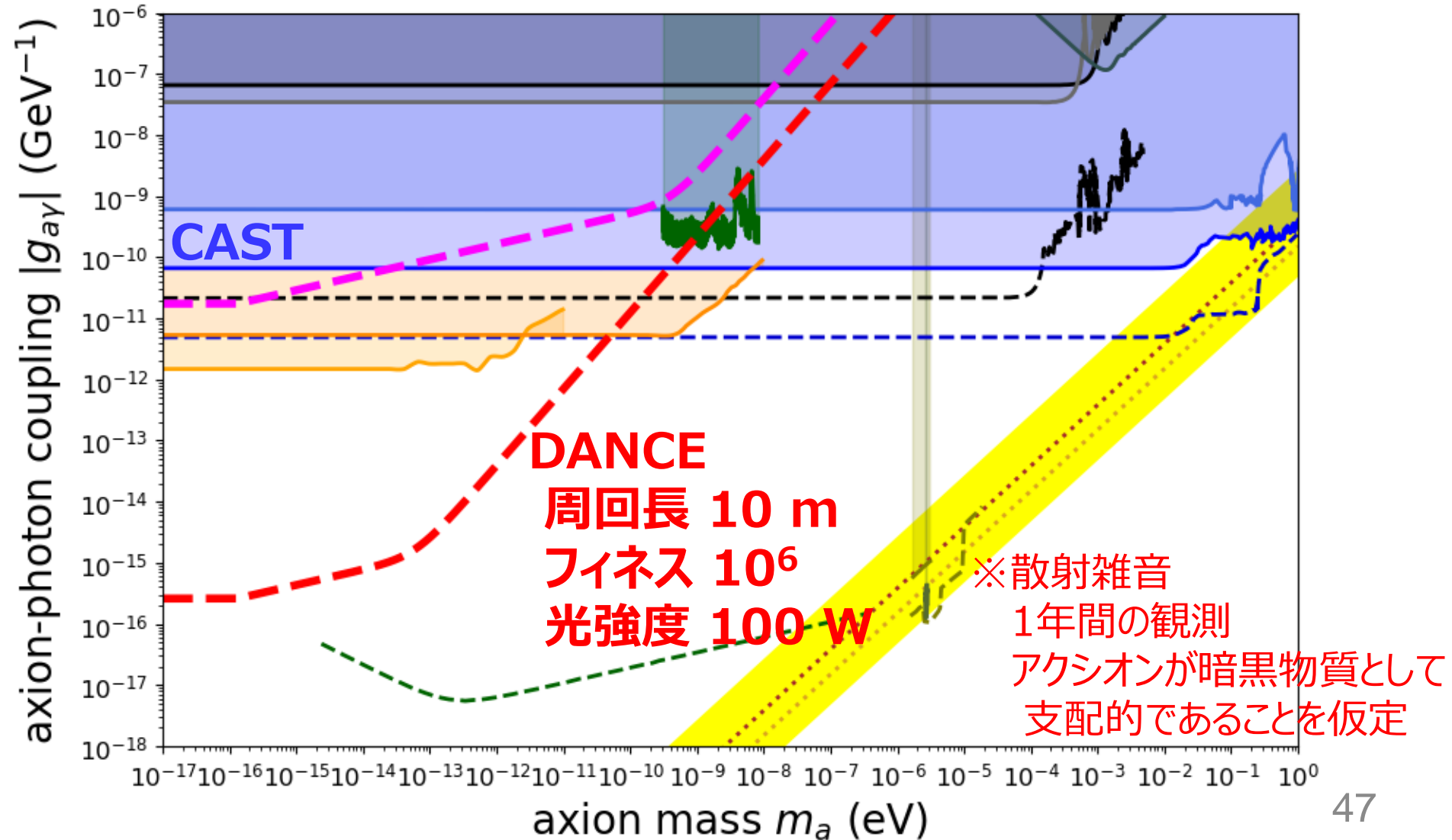
$$\sqrt{S_{\text{shot}}} = \sqrt{\frac{\lambda}{4\pi P} \left(\frac{\pi^2}{L^2 \mathcal{F}^2} + m_a^2 \right)}$$

input laser power
cavity length
finesse
axion mass

- アクシオンの密度 = 暗黒物質の密度 と仮定すれば感度が計算できる

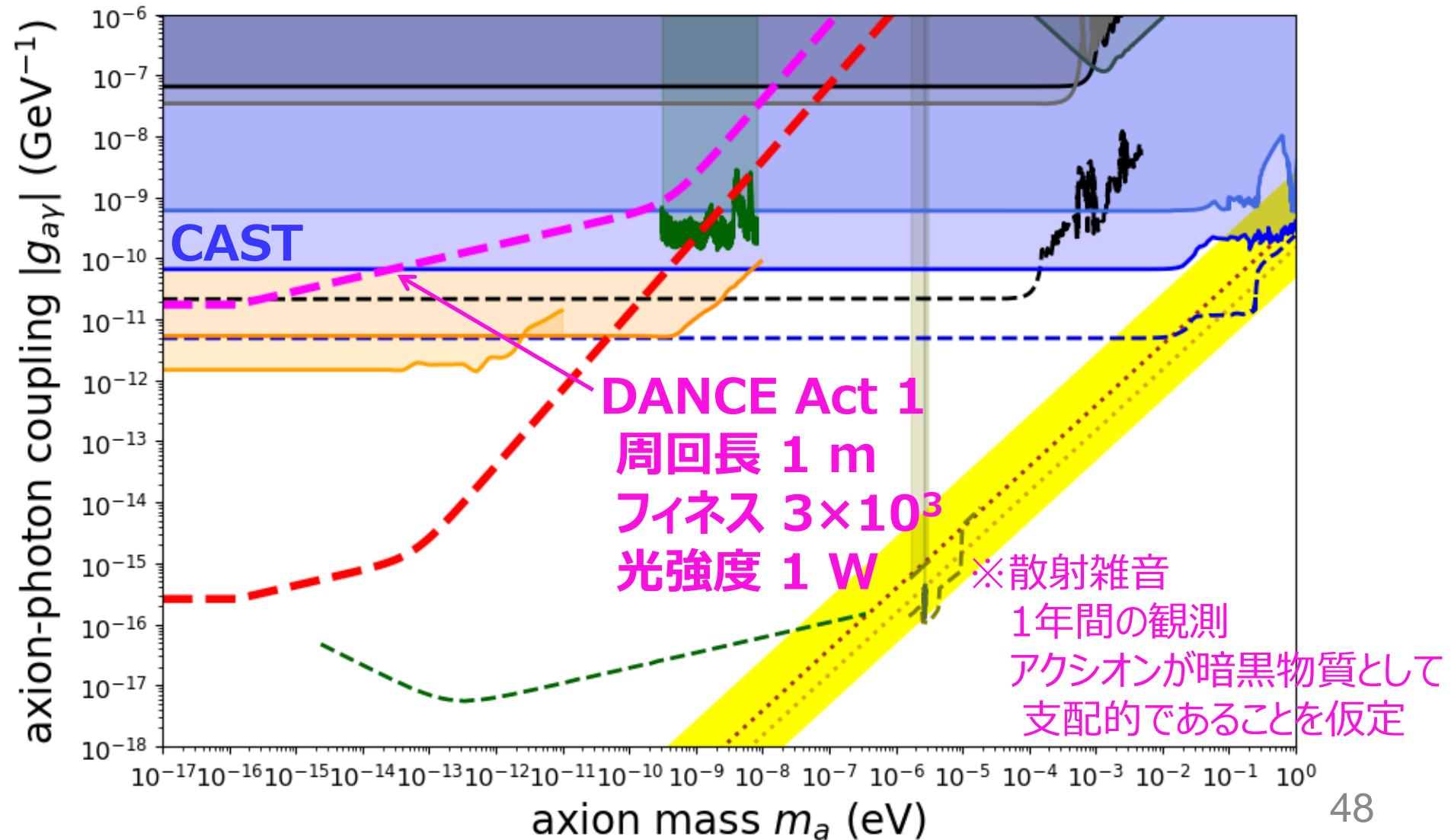
未探査領域を探査可能

Dark matter Axion search with riNg Cavity Experiment

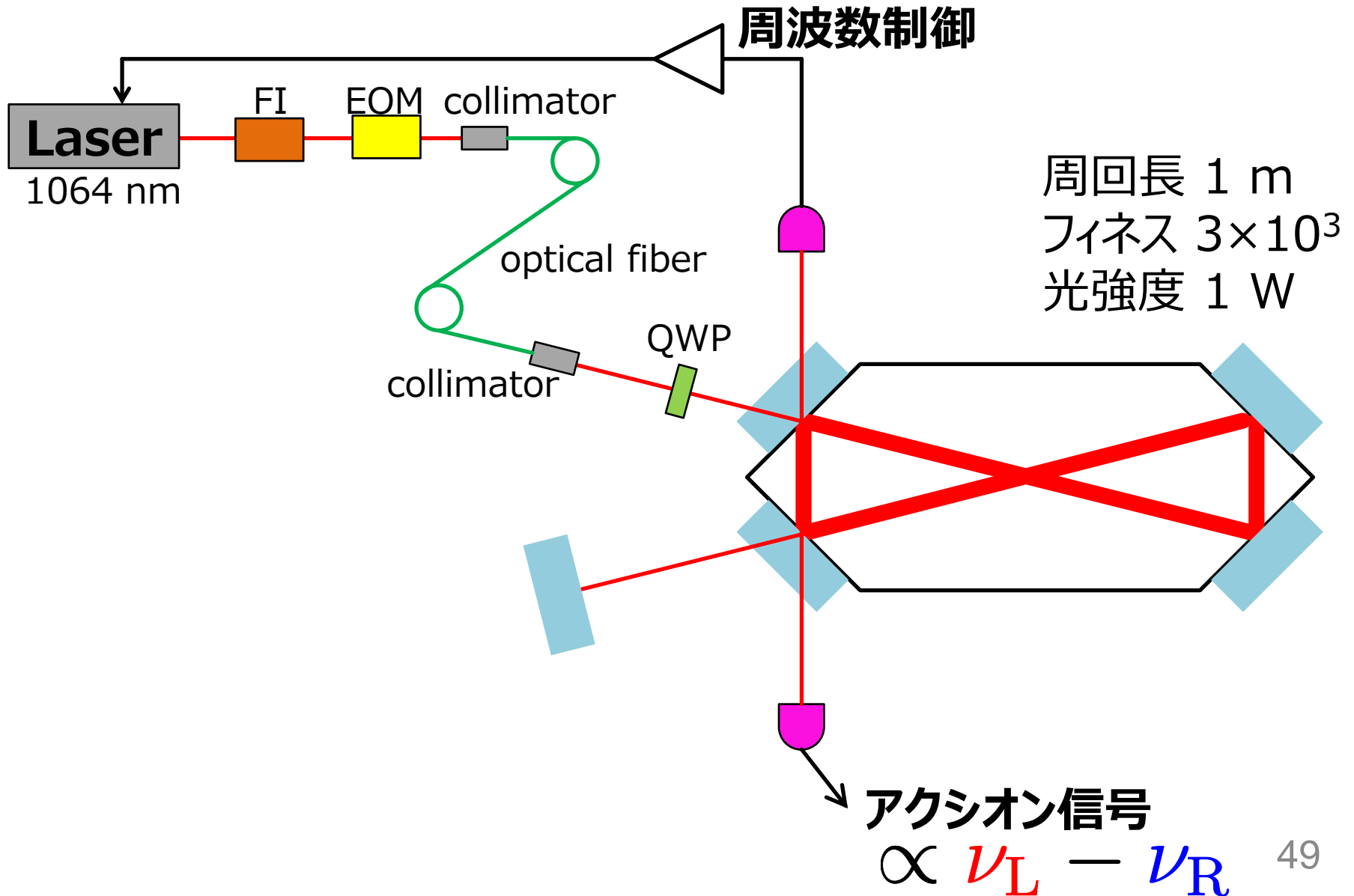


プロトタイプ実験でもCAST超え

Dark matter Axion search with riNg Cavity Experiment

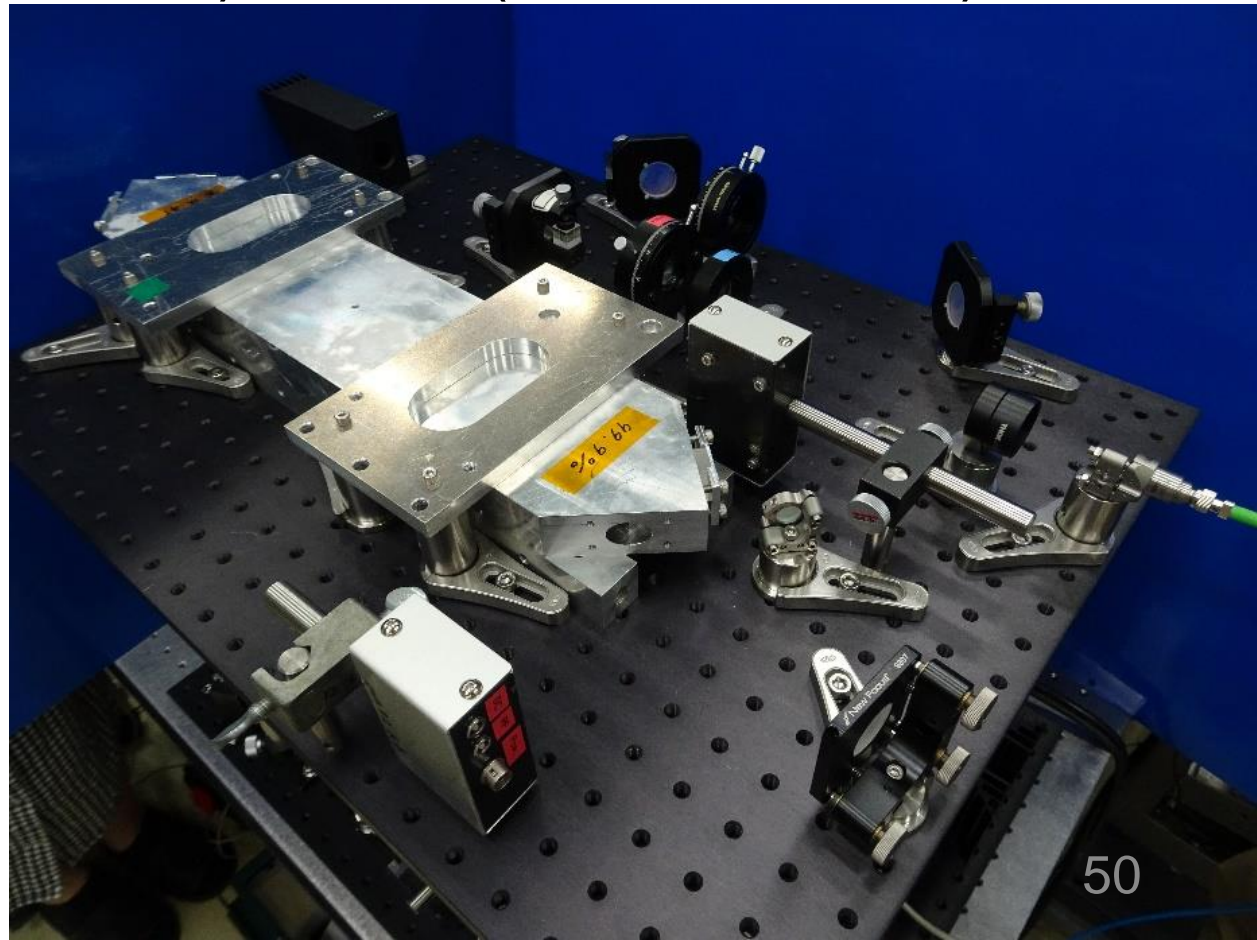


DANCE Act 1の構成



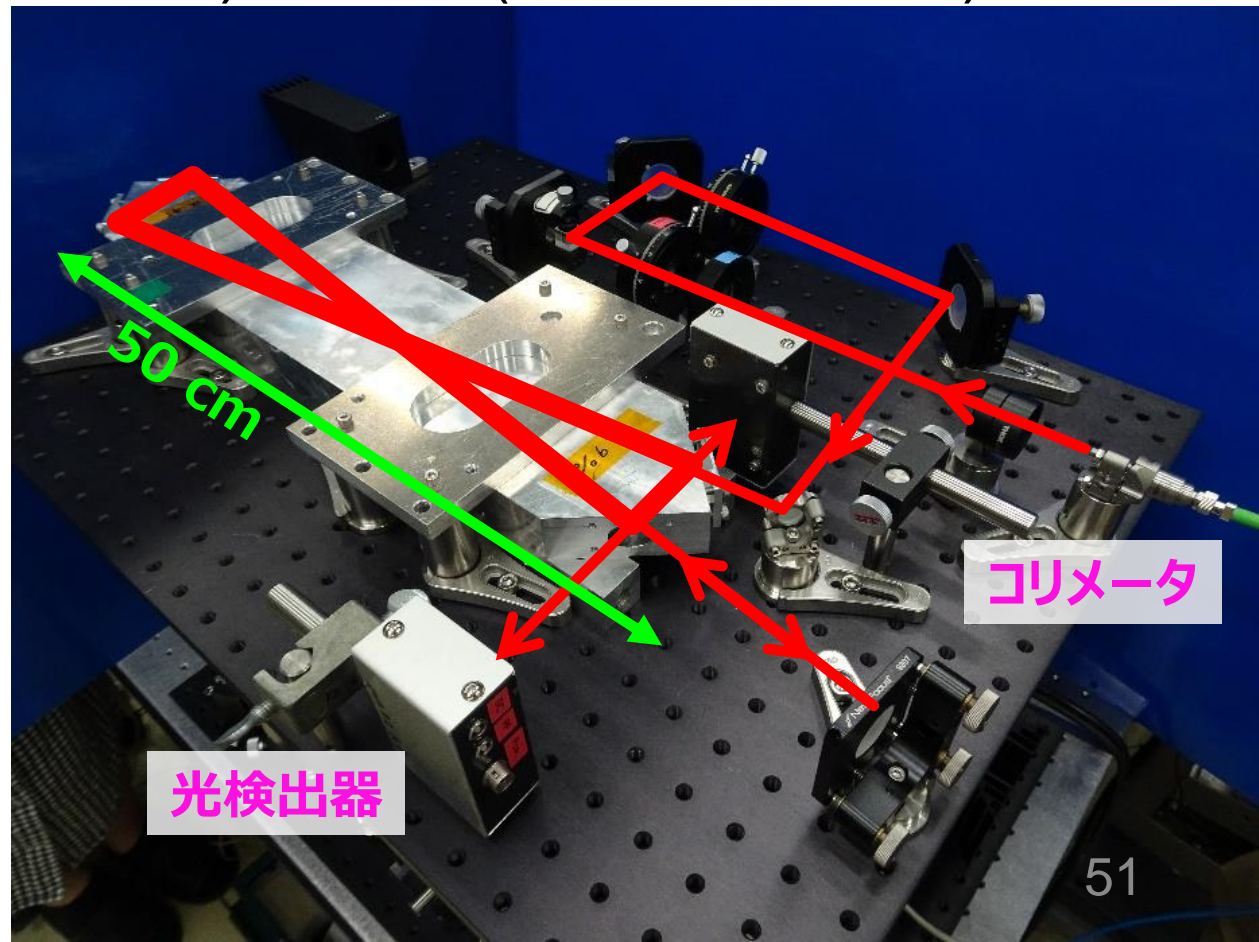
DANCE Act 1の実施状況

- 光学系の組み立て完了
- 光共振器の性能評価
 - フィネス $(1.9 \pm 0.5) \times 10^3$ (設計値 3×10^3)
- 2019年秋までに最初のデータ



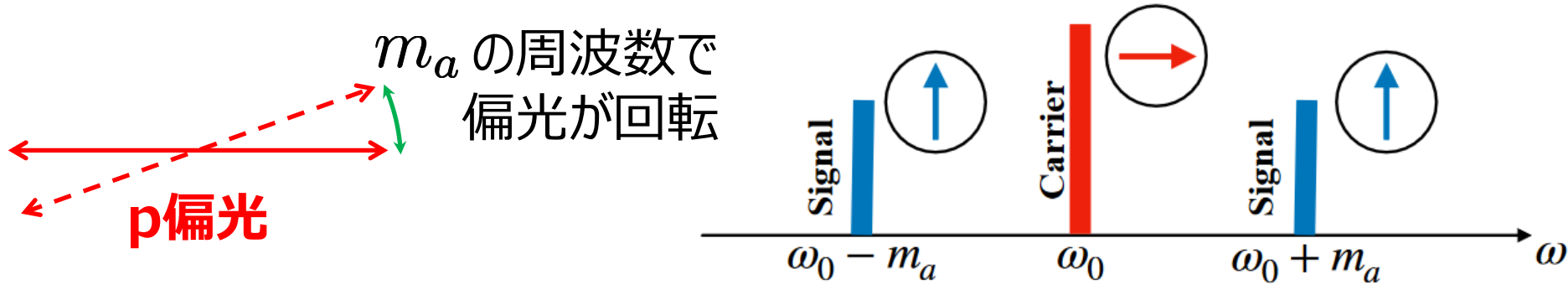
DANCE Act 1の実施状況

- 光学系の組み立て完了
- 光共振器の性能評価
 - フィネス $(1.9 \pm 0.5) \times 10^3$ (設計値 3×10^3)
- 2019年秋までに最初のデータ



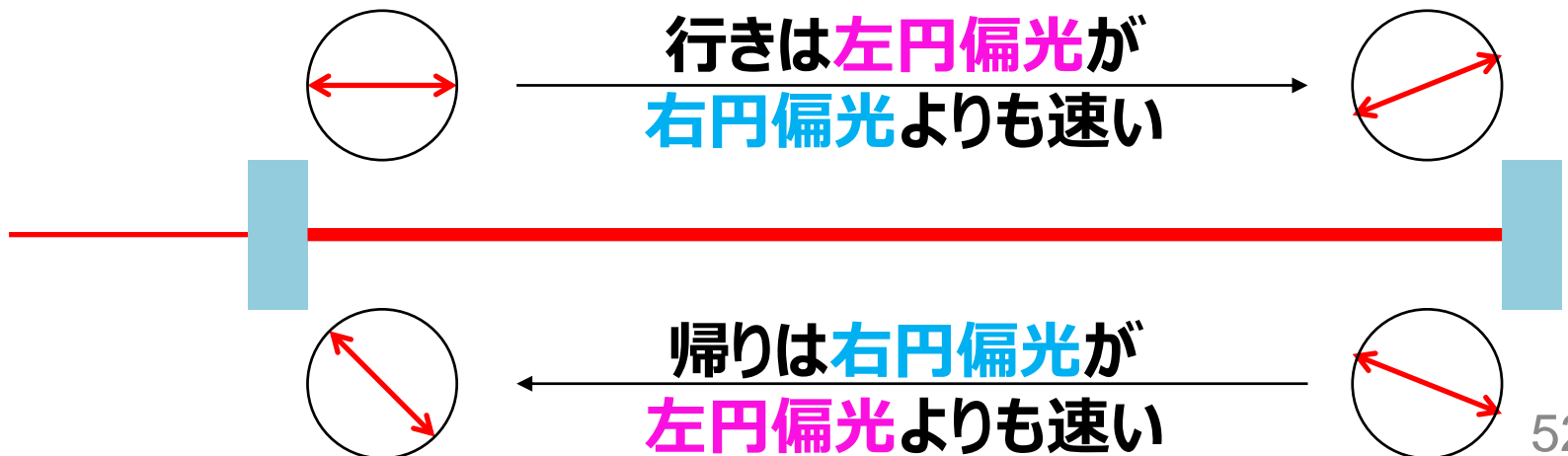
線形光共振器でもできる

- 円偏光間の速度差は直線偏光の回転を生む



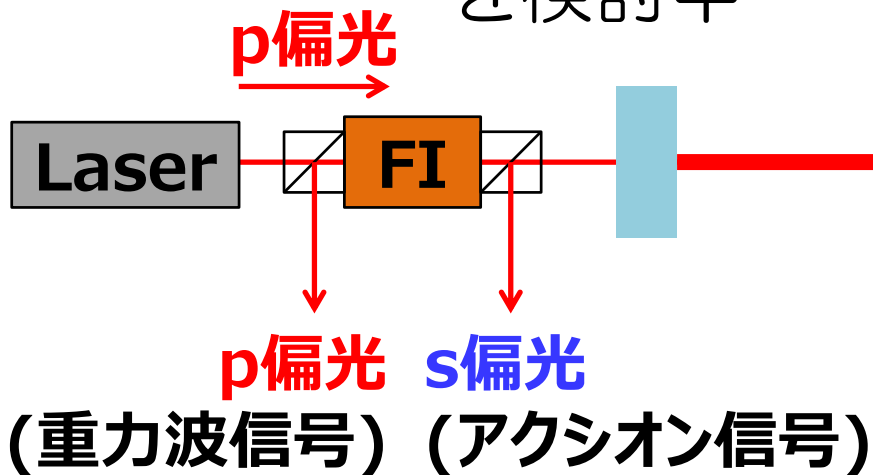
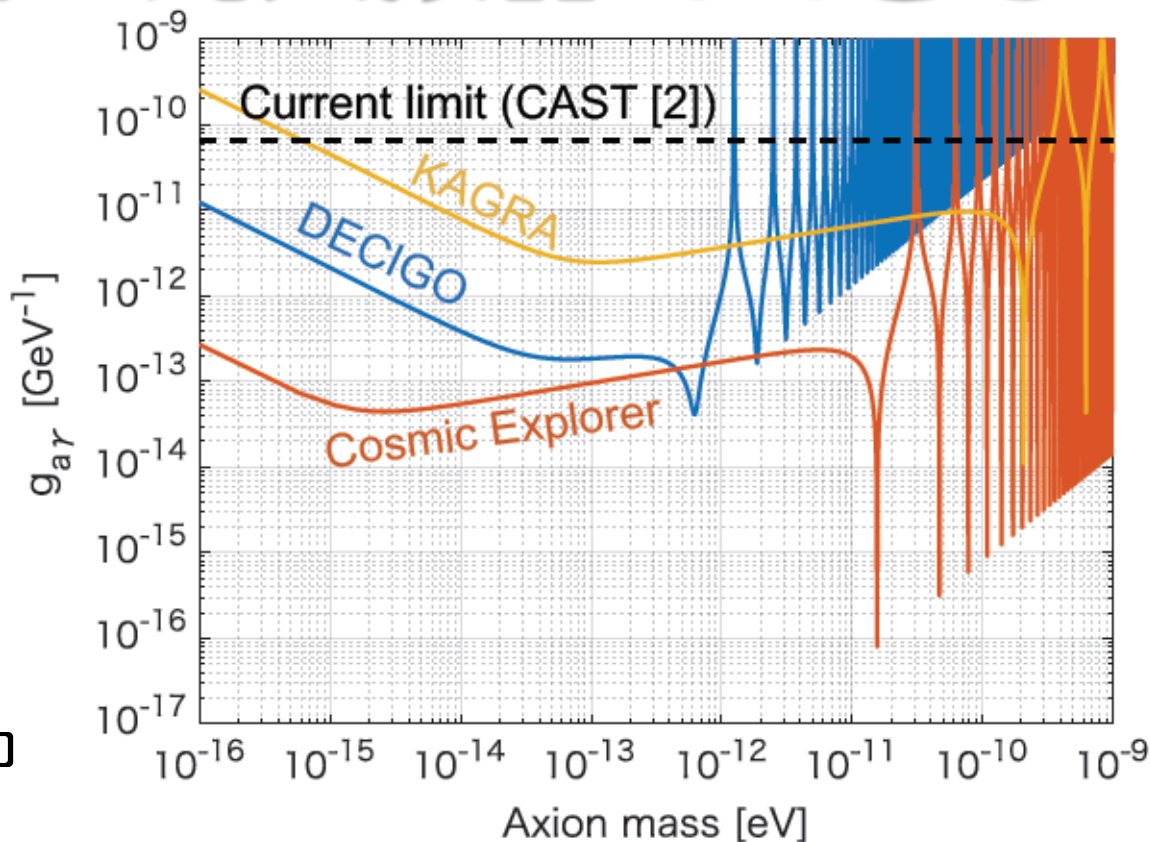
H. Liu+, [arXiv:1809.01656](https://arxiv.org/abs/1809.01656)

- 直線偏光の振動周期と光共振器の往復時間が一致すると高い感度を持つ



重力波検出器の光共振器でできる

- 長共振器長、
高光強度が有利
- 重力波信号と
区別可能
重力波信号は
p偏光に出る
- KAGRAへの導入
を検討中



K. Nagano+,
[arXiv: 1903.02017](https://arxiv.org/abs/1903.02017)

鏡との重力相互作用を見たり、
重力波信号を使って解析的に
探索する方法とは別！

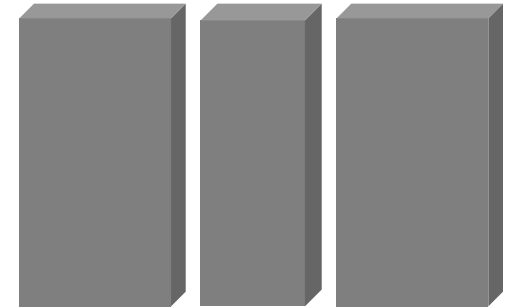
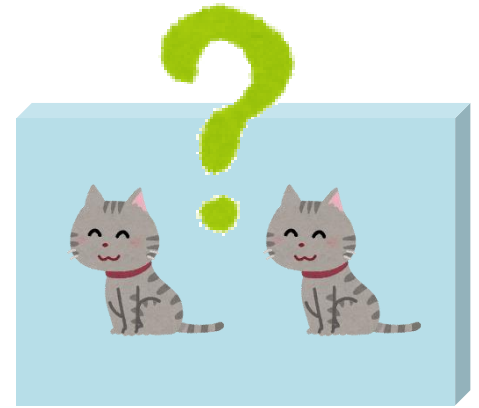
まとめ

- **光リング共振器**を用いてアクシオン暗黒物質を
探査する新手法を提案
I. Obata, T. Fujita, YM, [PRL 121, 161301 \(2018\)](#)
- **円偏光**の光速差を測定する
ボウタイ共振器と**ダブルパス**構成
- アクシオン質量 $m_a \lesssim 10^{-10}$ eV で既存の上限値
を**数桁超える**探査が可能
- プロトタイプ実験**DANCE Act 1**が進行中
CASTの上限値を数倍超える探査
2019年中に最初の探査開始予定
- レーザー干渉計型**重力波検出器**でも探査可能
K. Nagano, T. Fujita, YM, I. Obata, [arXiv: 1903.02017](#)

ミリグラム鏡を用いた 巨視的量子力学の検証

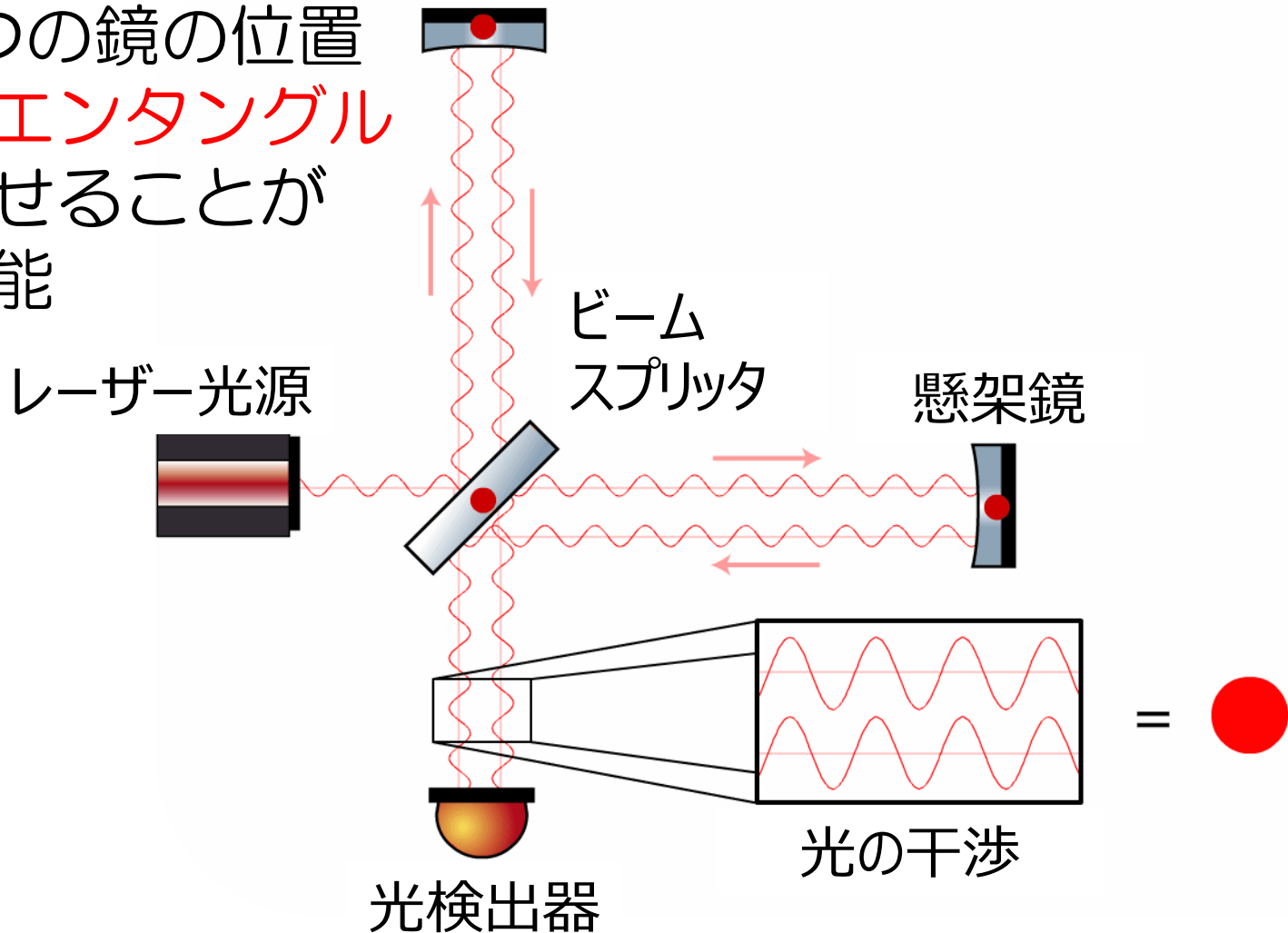
巨視的量子力学

- 量子力学はスケールによらない
- にもかかわらず、**巨視的重ね合わせ**は観測されていない
- 様々な解釈
 - 古典的雑音が大きいだけ
 - 非線形シュレディンガー方程式
 - 重力デコヒーレンス
- 古典・量子境界を探るため、**幅広い質量スケールで検証**する必要あり
 - **機械光学系**で基底状態実現



量子系としての重力波検出器

- 測定のためのレーザー光で鏡が反動を受ける
- 2つの鏡の位置をエンタングルさせることが可能



ミリグラムスケール

- **基底状態**実現が達成されている最大質量は**40 ng**
(プランク質量は22 ug)

R. W. Peterson, PRL **116**, 063601 (2016)

- **重力**測定が行われた最小質量は**90 g**

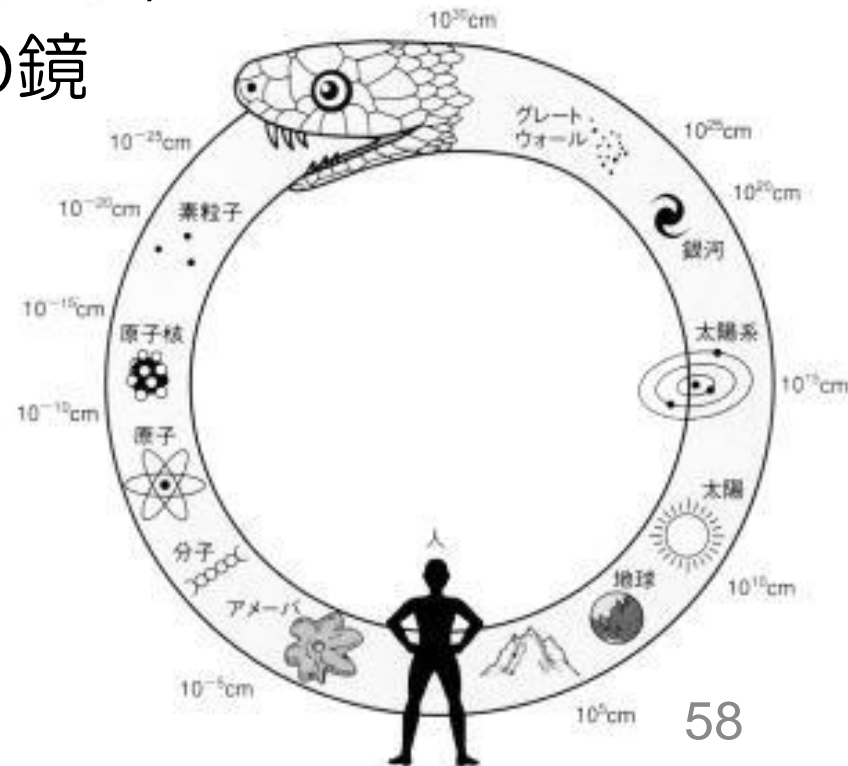
R. C. Ritter+, PRD, 42, 977 (1990)

http://umdb.um.u-tokyo.ac.jp/DKankoub/ouroboros/11_01/tokubetsuten.html

- 重力波検出器は**20-40 kg**の鏡を用いて**標準量子限界**に到達見込み

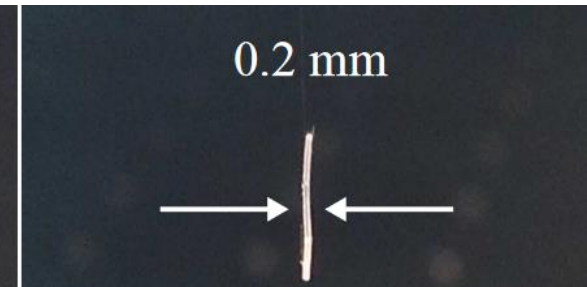
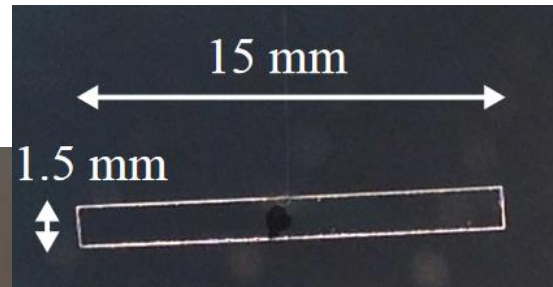
- **mgスケール**が古典・量子境界を探るフロンティア

J. Schmöle+,
CQG 33, 125031 (2016)



様々なアプローチ

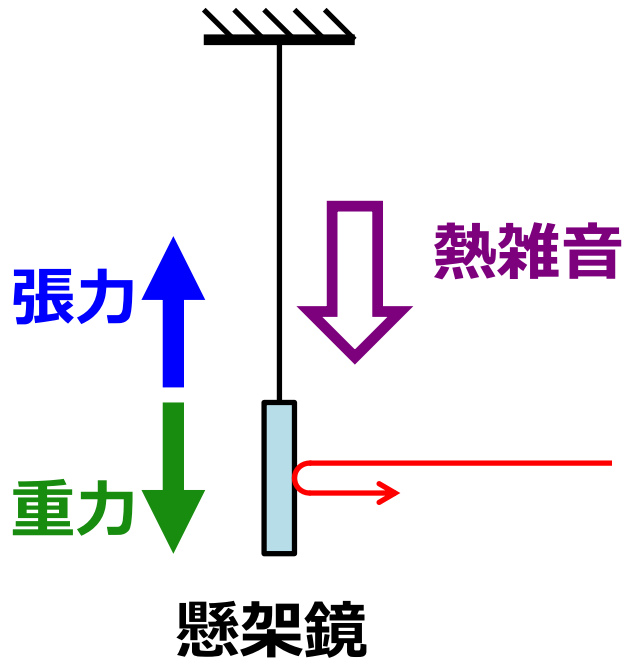
- 単振り子 (東北大学 松本伸之)
N. Matsumoto+, [PRL **122**, 071101 \(2019\)](#)
- ねじれ振り子
K. Komori+, [arXiv:1907.13139](#)
- 光学浮上
Y. Michimura+, [Optics Express **25**, 13799 \(2017\)](#)



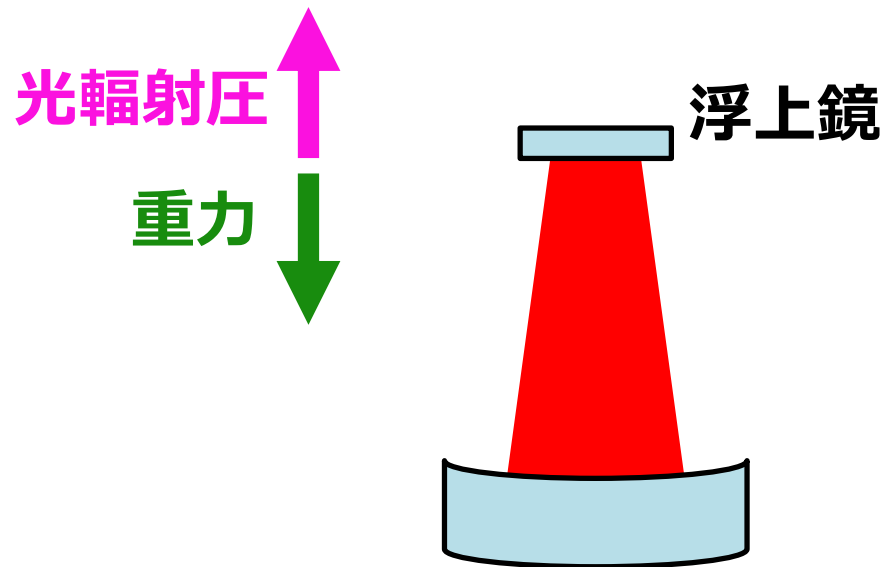
鏡の光学浮上

- 振り子を用いた実験では懸架系の散逸から熱的揺動力が混入し、量子性を覆い隠してしまう
- 光輻射圧のみを用いて支持する光学浮上を提案

機械的支持

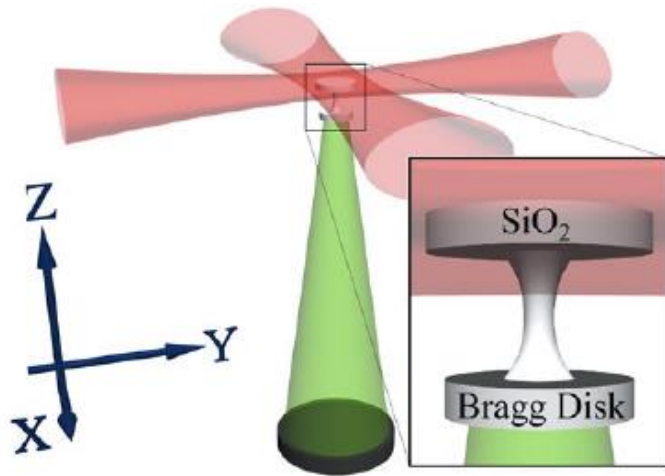


光学浮上

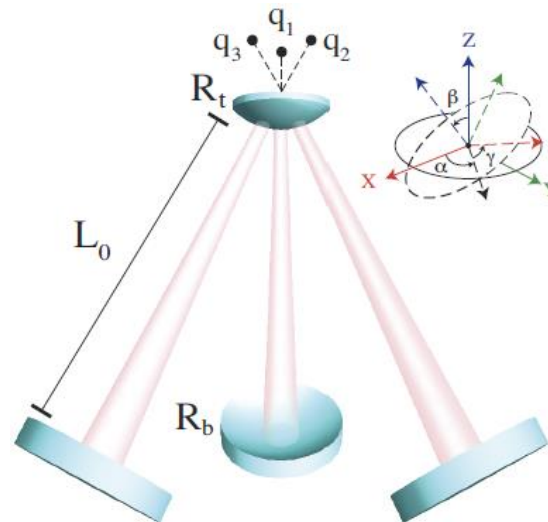


サンドイッチ構成

- これまで提案されていた手法に比べ
シンプルな構成
- 浮上鏡を**上下**から光共振器ではさむ

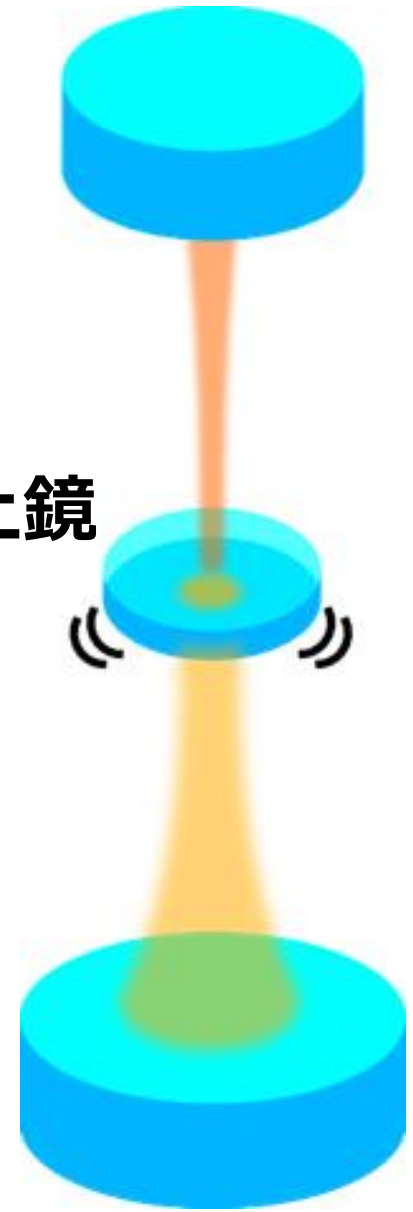


S. Singh+: PRL 105, 213602 (2010)



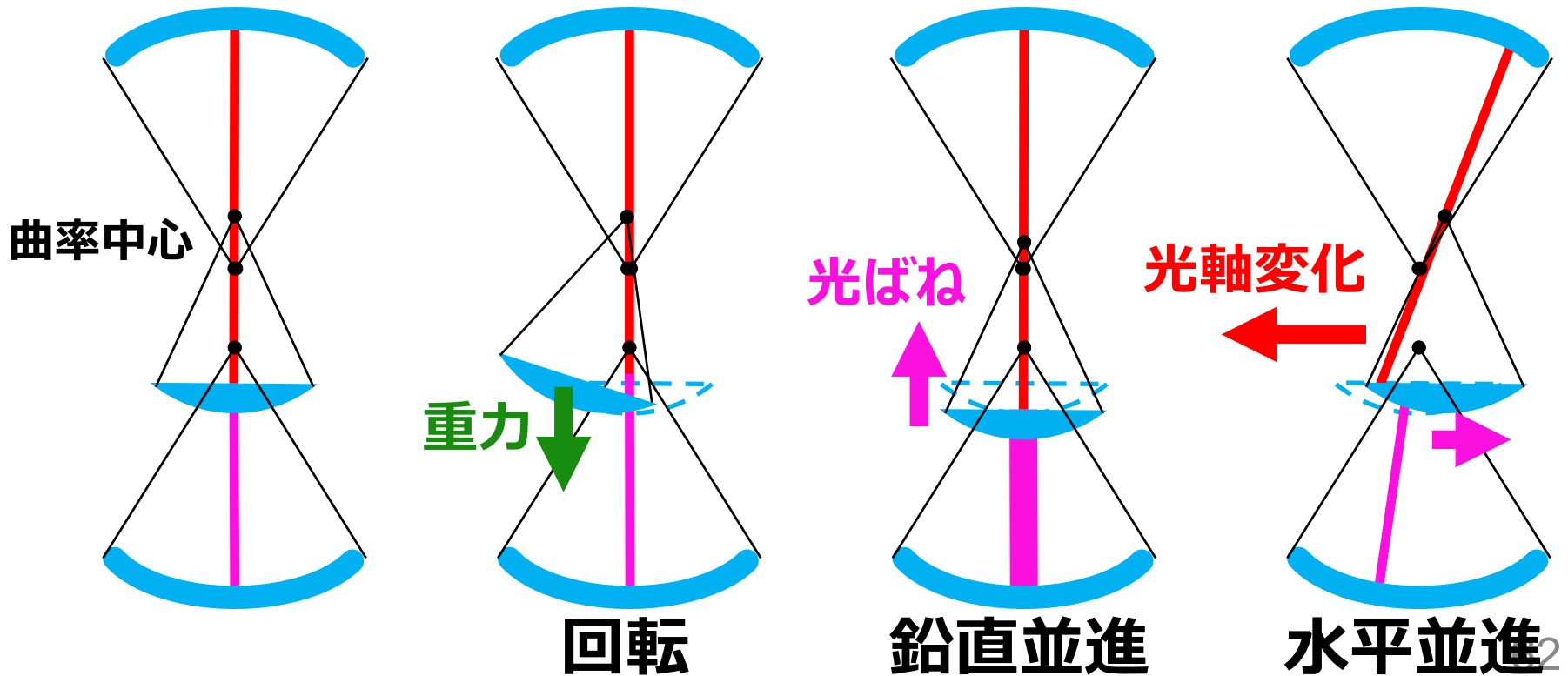
G. Guccione+: PRL 111, 183001 (2013)

浮上鏡



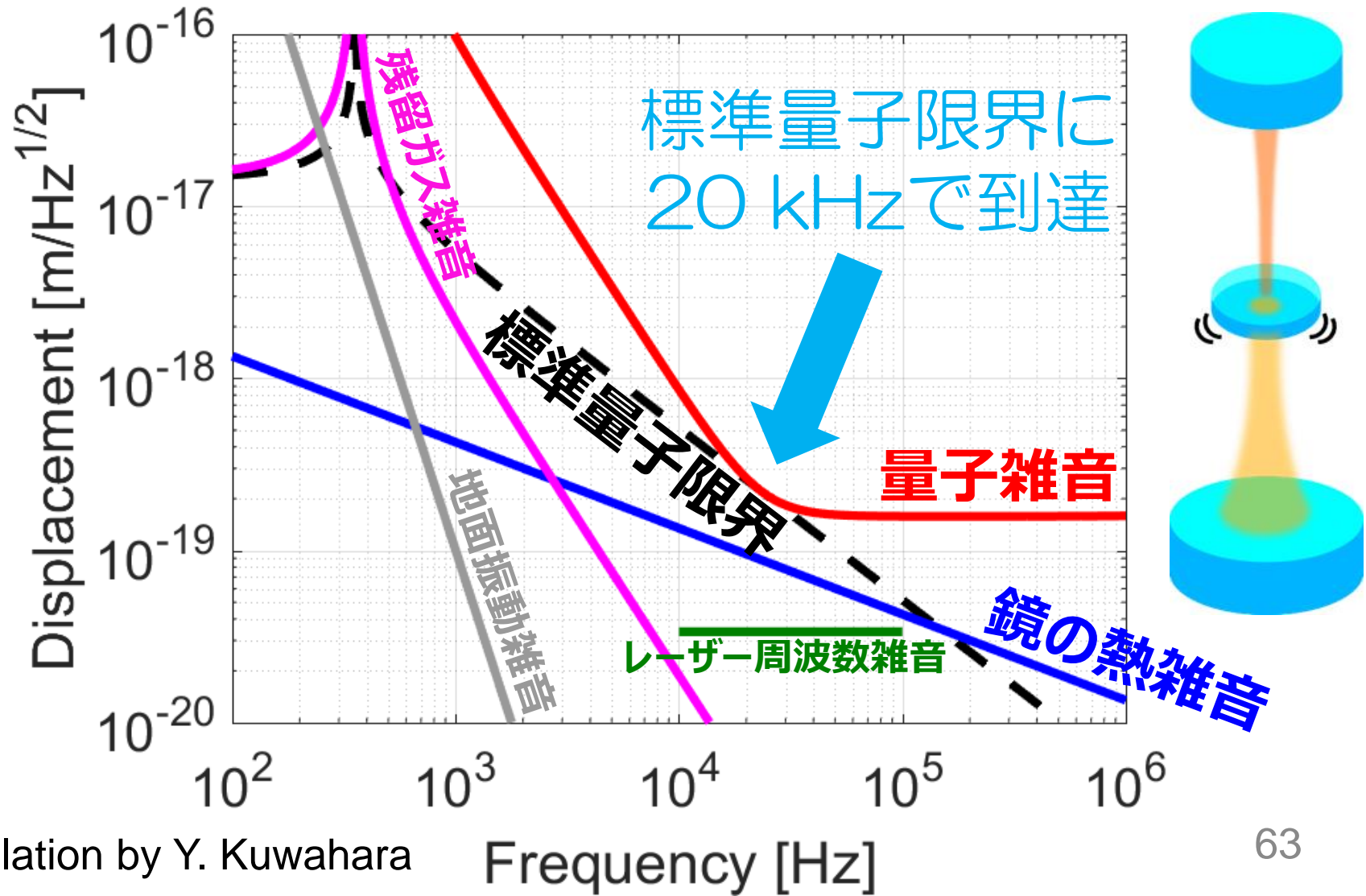
浮上の安定性

- 回転は**重力**により安定
- 鉛直方向は**光ばね効果**により安定
- 水平方向は**光軸の変化**により安定



標準量子限界の到達

- 0.2 mg鏡、フィネス100、13 W + 4 W入射で可能



試作鏡の製作と性能評価

- 試作鏡の設計値
 - 質量 **1.6 mg**
 - ϕ 3mm, t 0.1 mm
 - 曲率半径 30 ± 10 mm
 - 反射率 99.95 %

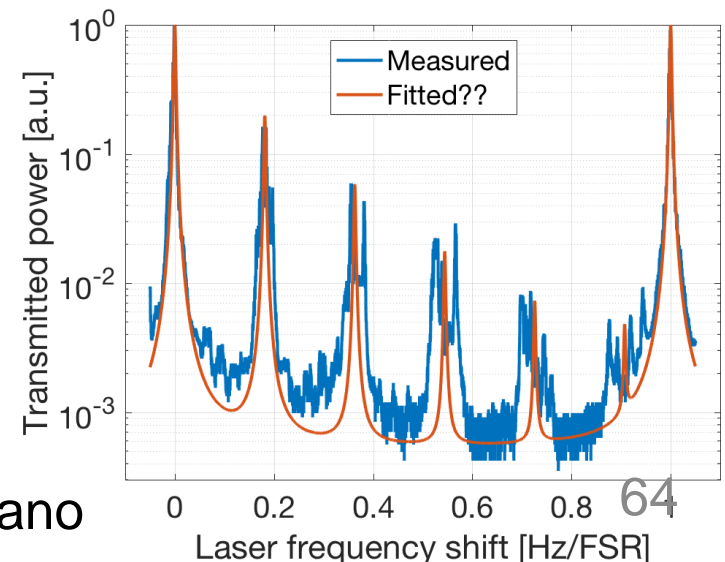


- 8枚発注して7枚納品、
うち欠けていないのは1枚のみ

- 光共振器を組んで曲率や
反射率を評価

曲率: 15.9 ± 0.5 mm
(preliminary)

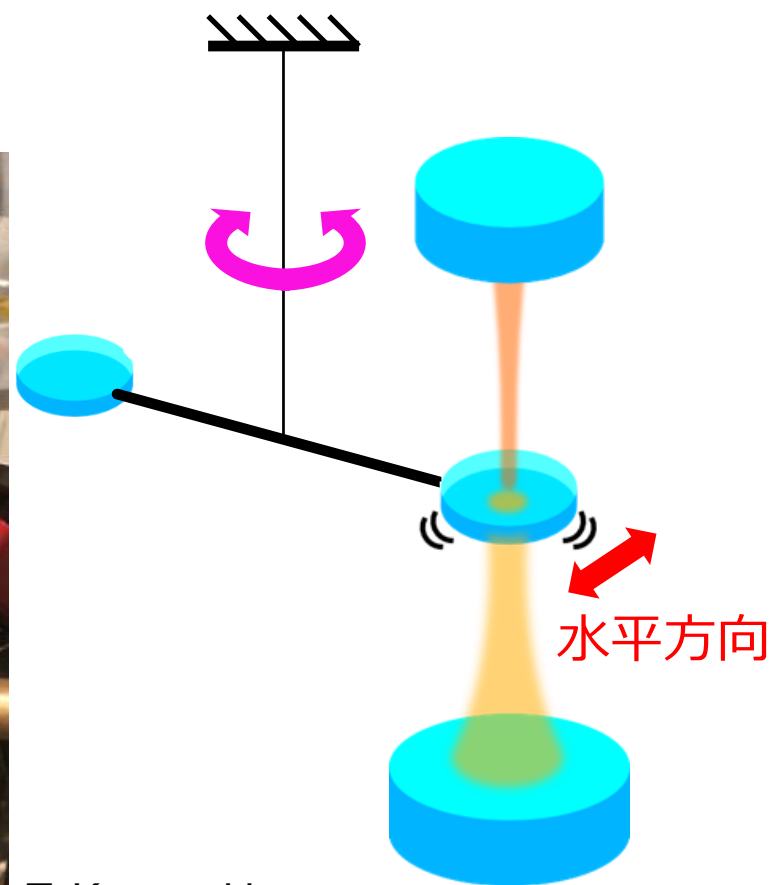
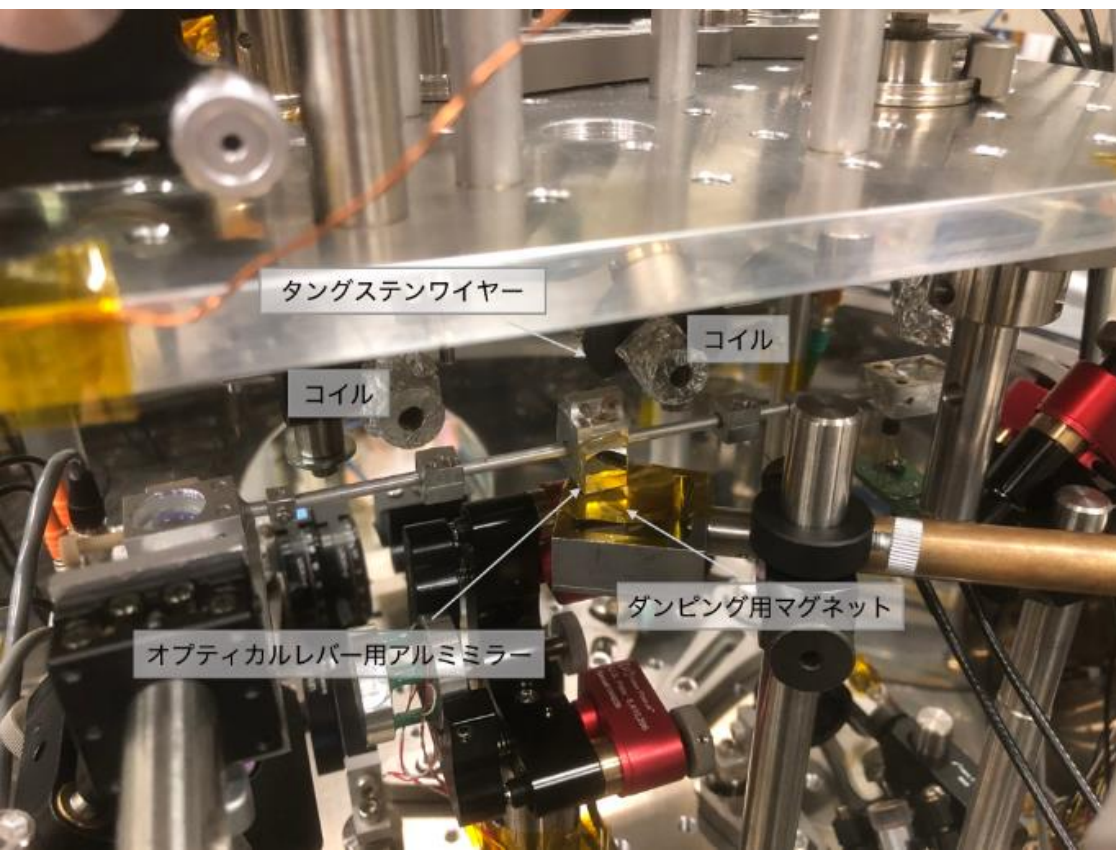
反射率: 99.5%以上



Plot by K. Nagano

ねじれ振り子による安定性検証

- ねじれ振り子で浮上鏡を模擬
- 浮上鏡に働く復元力を測定
- 浮上に至る手順を検証

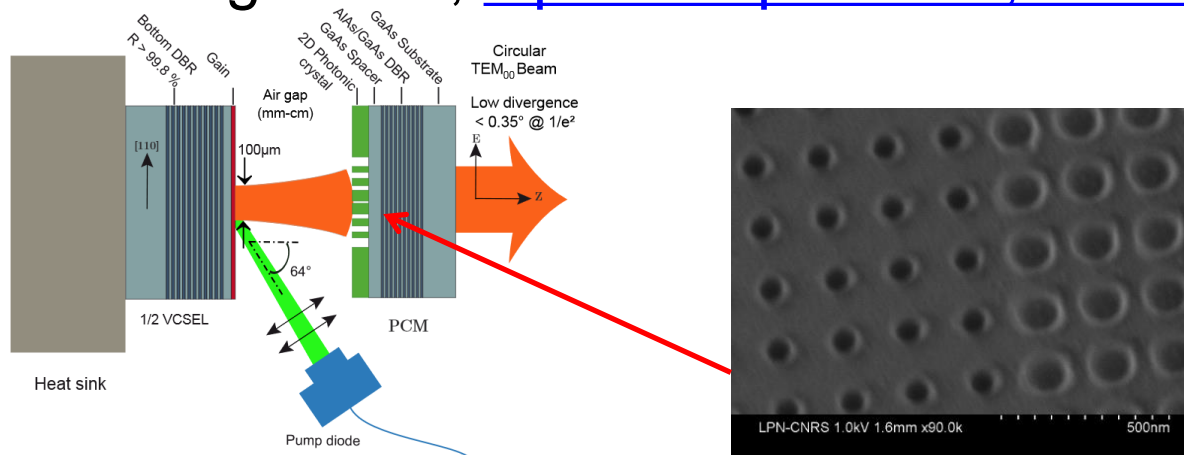


T. Kawasaki,
[Master thesis \(2019\)](#)

今後の展望

- 今年度中に安定性検証実験を完了
- 新しいアイディアでの浮上鏡の開発
フォトニック結晶を用いる？
反射率99%以上、曲率20 mmが実現されており、十分な性能

M. S. Seghilani+, [Optics Express 22, 5962 \(2014\)](#)



- ゆくゆくは巨視的エンタングルメントの実現、
重力デコヒーレンスの検証など

まとめ

- 巨視的量子力学の検証を目指してミリグラムスケールでの実験を様々なアプローチで行っている
 - 単振り子
 - ねじれ振り子
 - 光学浮上鏡
- 特に、我々が新提案したサンドイッチ構成による鏡の光学浮上を紹介
- 例えば0.2 mgの鏡が20 kHzで標準量子限界に到達可能
- ねじれ振り子を用いた安定性検証実験が進行中

研究室のメンバー



[日本語](#) / [English](#) / [RSS](#)

- ▶ [研究室紹介](#)
- ▶ [研究内容](#)
- ▶ [メンバー](#)
- ▶ [連絡先・アクセス](#)
- ▶ [年次報告](#)
- ▶ [出版論文](#)
- ▶ [学位論文](#)
- ▶ [セミナー](#)
- ▶ [講義資料](#)
- ▶ [新着情報](#)

サイト内検索

検索

まとめのまとめ

- 大型重力波望遠鏡の精密距離計測技術を用いて様々なテーブルトップ実験を行っている
- テーブルトップでしかできない最先端の基礎物理実験がある！

