

電気情報工学特別講義 第7回

道村唯太

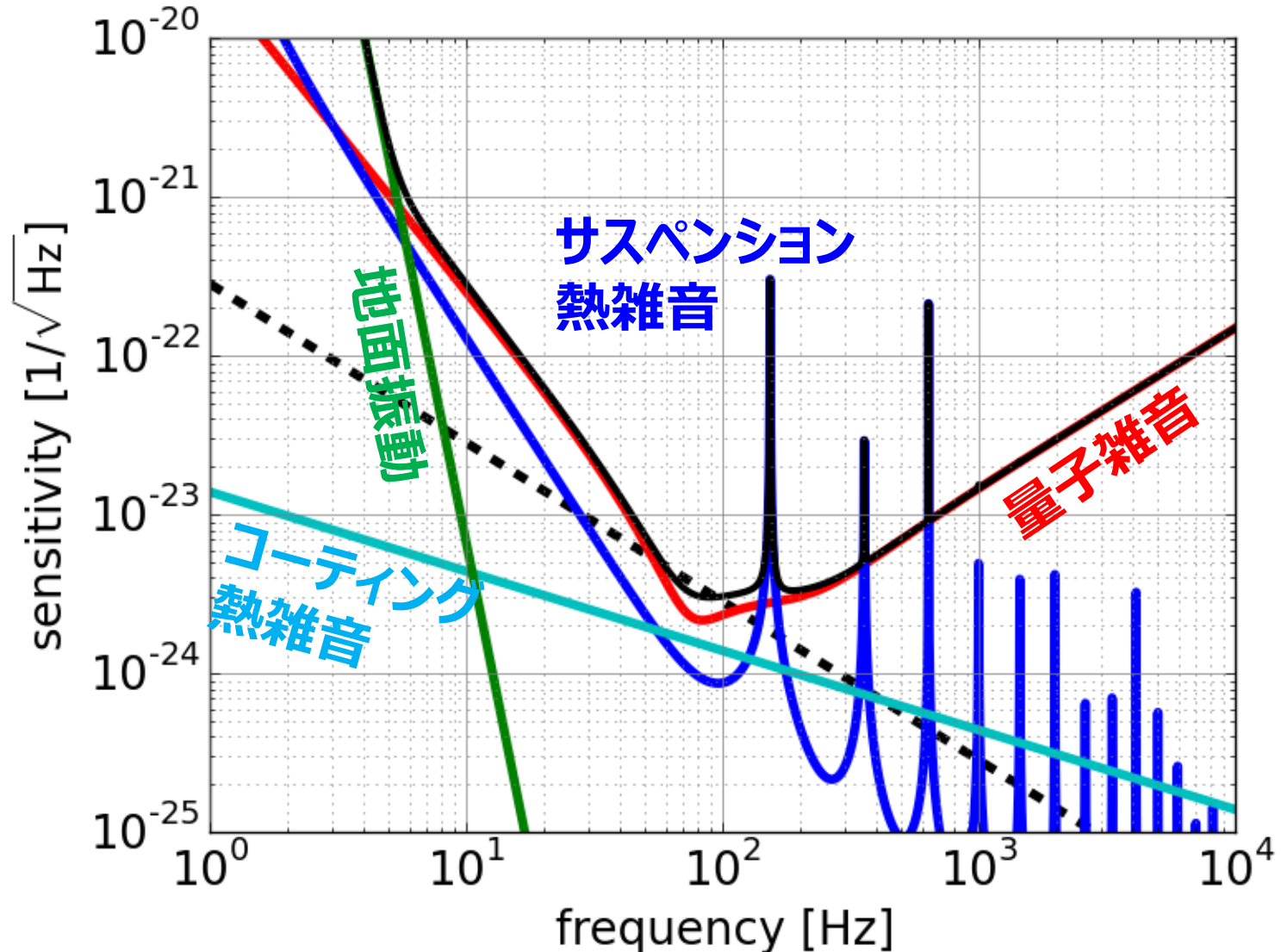
東京大学 大学院理学系研究科 物理学専攻

講義スケジュール

- 10月3日(月)
 - 3限 第1回 重力波の初検出について
 - 4限 第2回 重力波望遠鏡KAGRAの紹介
- 10月4日(火)
 - 2限 第3回 干渉計と共振器の原理
 - 3限 第4回 パワースペクトルと伝達関数
 - 4限 第5回 様々な雑音とその低減方法
- 10月5日(水)
 - 2限 第6回 重力波望遠鏡のこれから
 - 3限 第7回 精密測定技術の応用
 - 4限 第8回 「重力波天文学の夜明けとKAGRA」

重力波望遠鏡を制限する雑音

- 量子雑音、熱雑音、地面振動雑音



極限計測技術

- 量子雑音、熱雑音、地面振動雑音は他の実験でも究極的な感度限界となる
- 重力波望遠鏡の技術が他の実験に使える

巨視的量子力学の検証

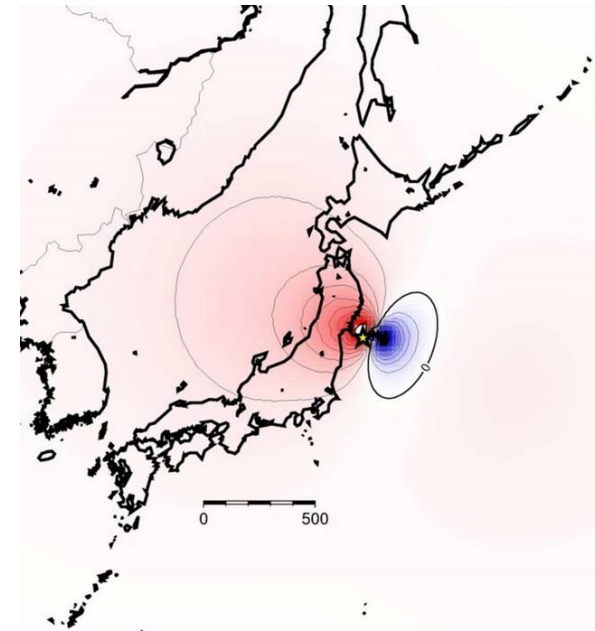
ローレンツ不変性の検証

重力逆二乗則の検証

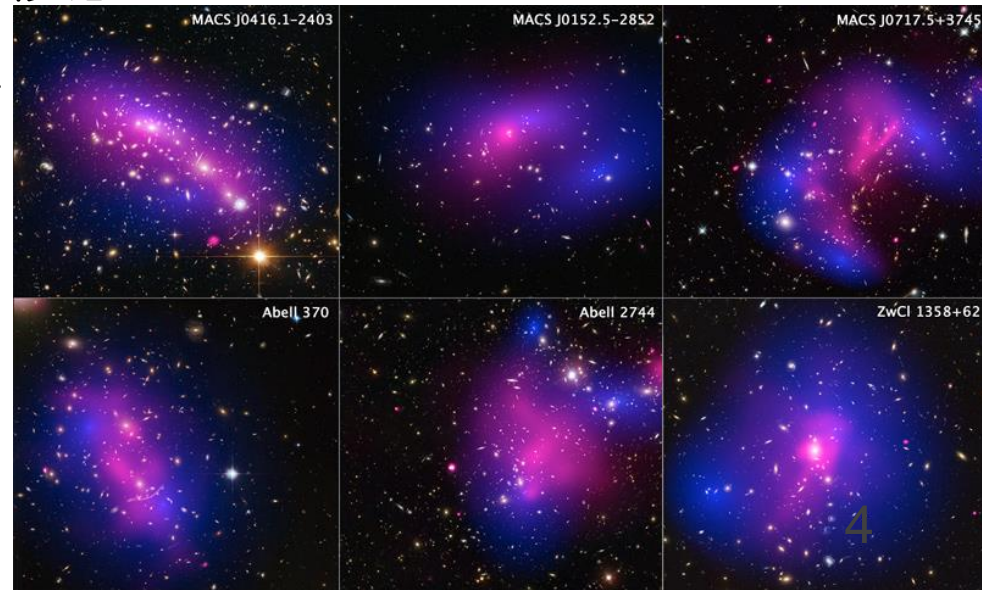
ダークマター探索

地震速報

などなど



日本物理学会誌2016年9月号表紙
(木村将也、亀伸樹)



今回のお話

- 重力波望遠鏡の極限計測技術を用いた基礎物理実験の例を3つ
- 巨視的量子力学の検証
 - 量子力学の重ね合わせ
 - 量子重力理論
- ローレンツ不変性の検証
 - 光速の等方性
- 重力逆二乗則の検証
 - 自然界の4つの相互作用
 - 余剰次元

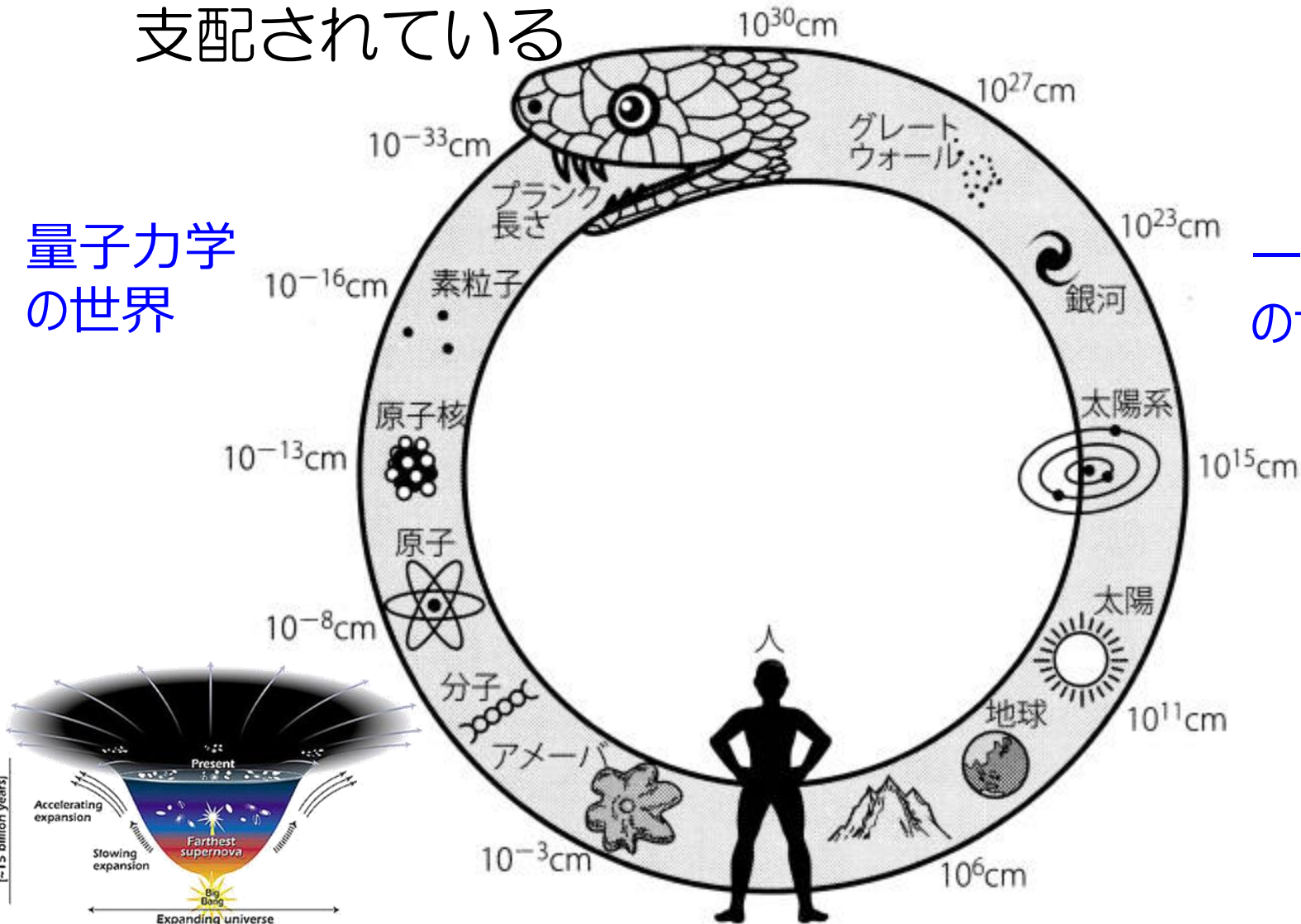
巨視的量子力学

ウロボロス

- マクロな宇宙の創生は、ミクロな素粒子の法則に支配されている

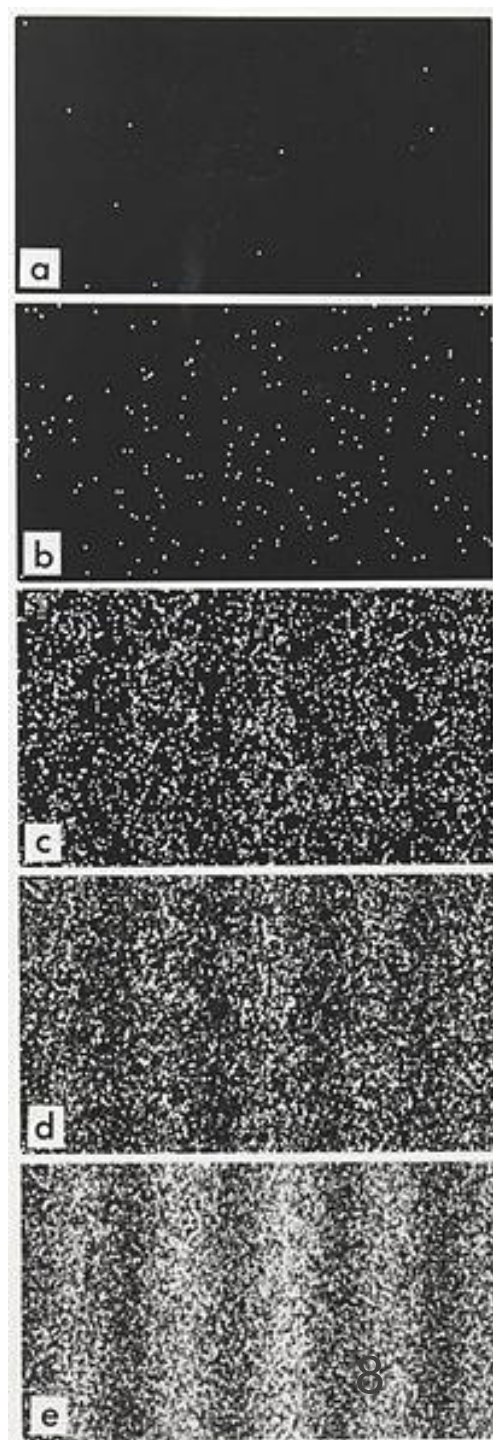
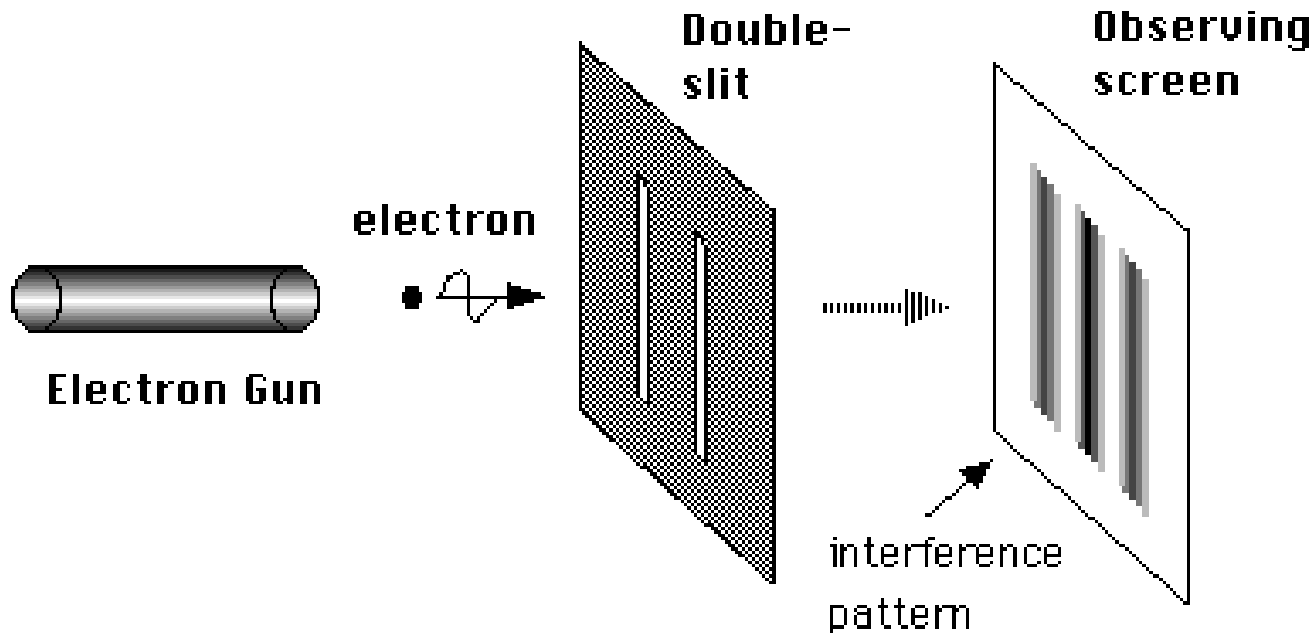
量子力学
の世界

一般相対論
の世界



二重スリット実験

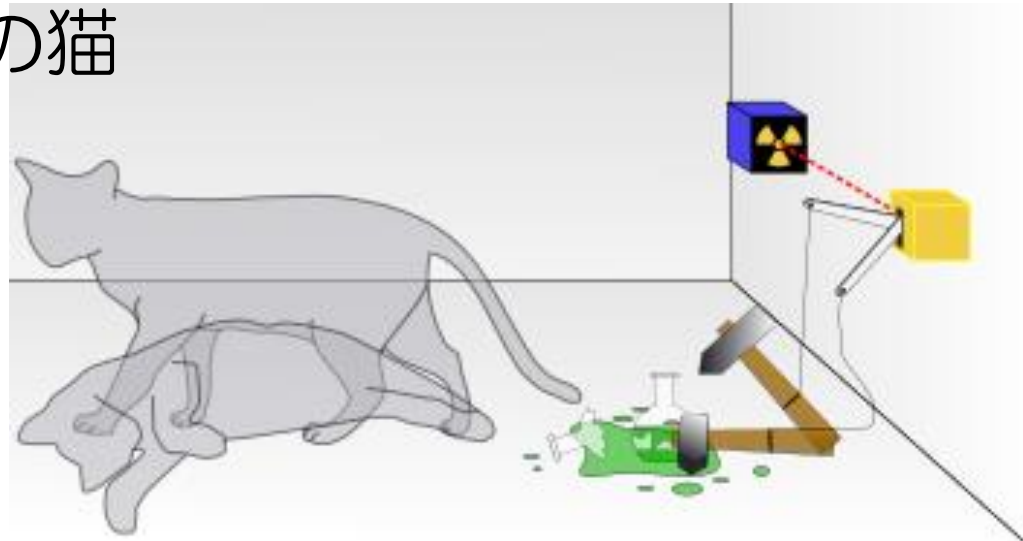
- 電子を1個ずつ発射させても、干渉縞が見える
→ 位置の重ね合わせ



水面波の干渉

巨視的な二重スリット実験

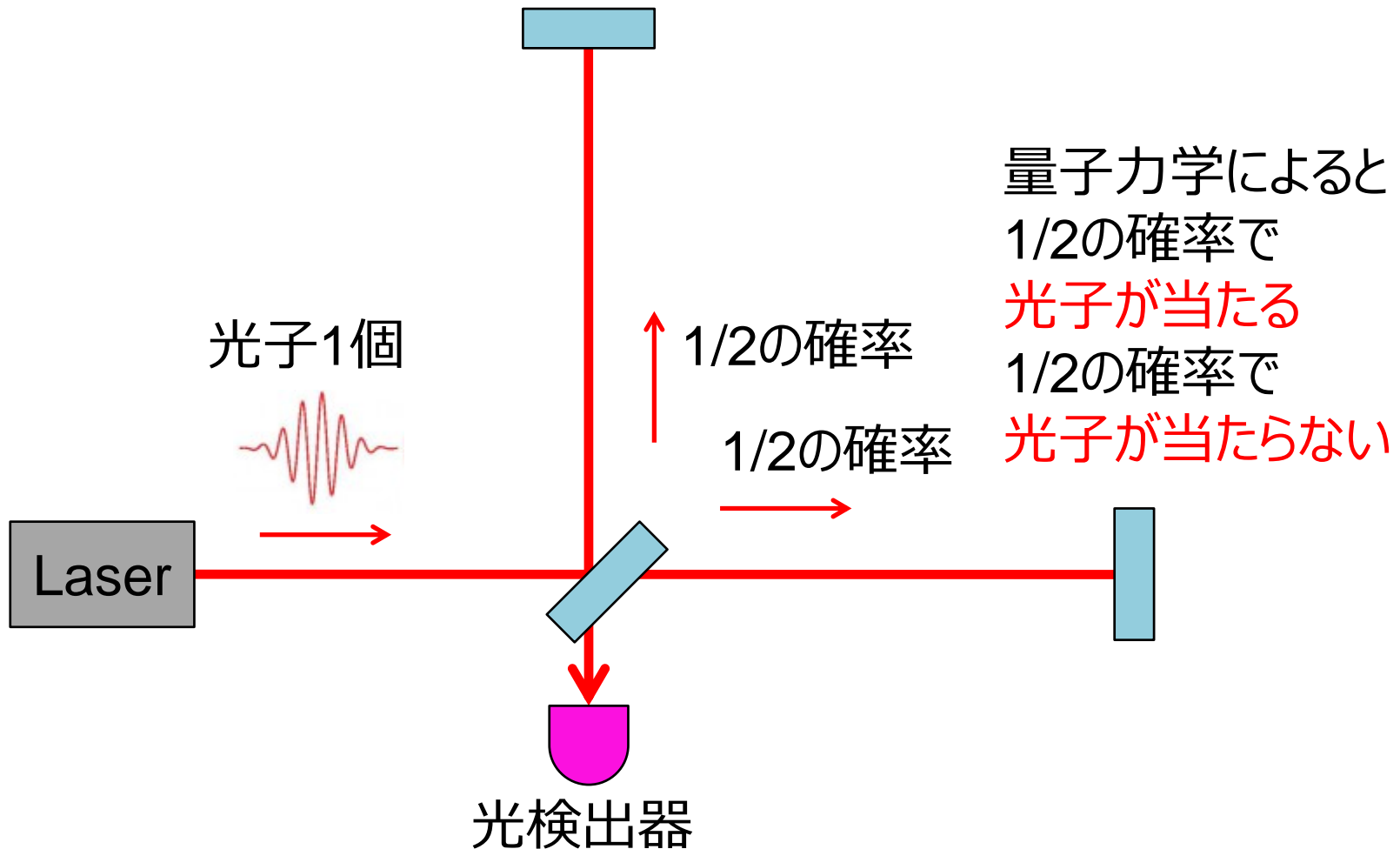
- 量子力学が正しければ、大きなものでも重ね合わせ状態が作れるはず
シュレディンガーの猫



- 現在では高分子(2013年)でも観測例がある
- しかしそれ以上のスケールでは観測例がない
雑音が大きくて見えないだけ？
量子力学の修正が必要？

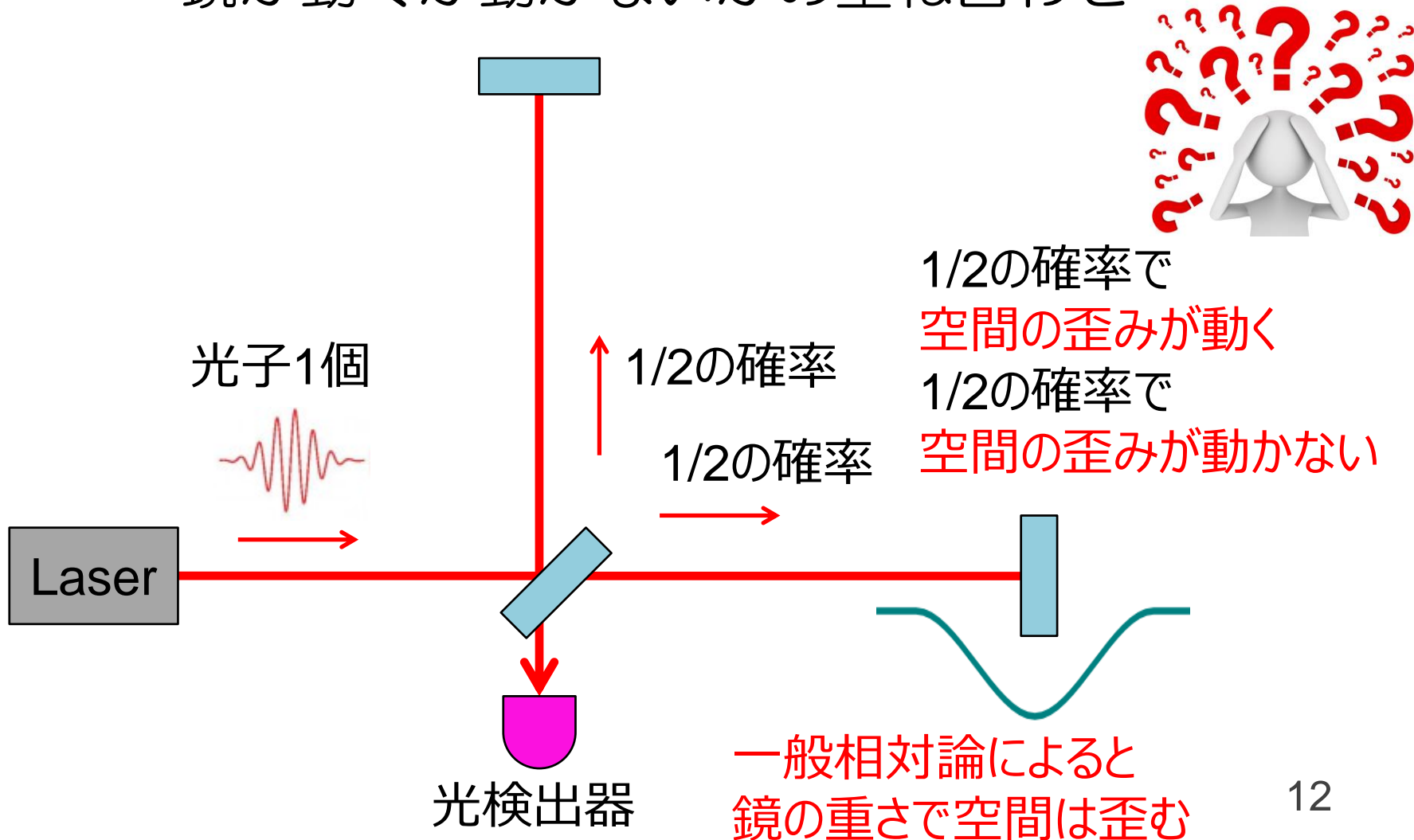
重力波望遠鏡

- 光子が当たるか当たらないかの重ね合わせ
→ 鏡が動くか動かないかの重ね合わせ



重力波望遠鏡

- 光子が当たるか当たらないかの重ね合わせ
→ 鏡が動くか動かないかの重ね合わせ



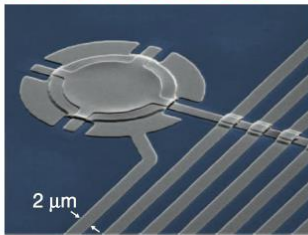
巨視的量子力学

- 重ね合わせ状態の持続時間には**質量依存性**がある？

さまざまな質量スケールで測定する必要

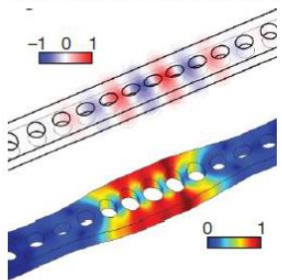
Planck mass (22 ug)

reached SQL



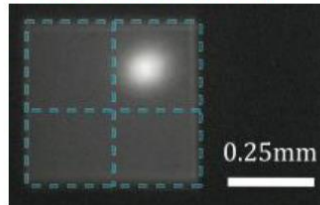
membrane, 48 pg
Taufel+ (2011)

reached SQL

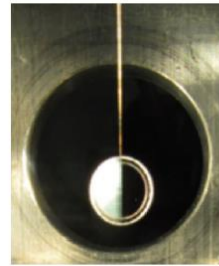


nanobeam, 311 fg
Chan+ (2011)

reached SQL

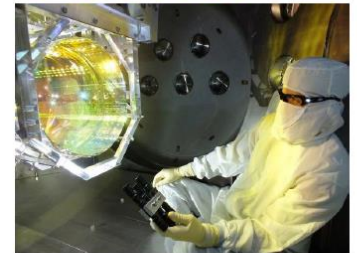


membrane, 7 ng
Peterson+ (2016)

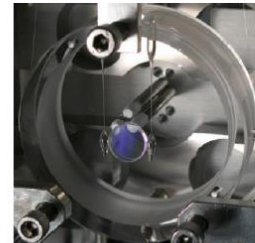


suspended mirror, 5 mg
Matsumoto+ (2015)

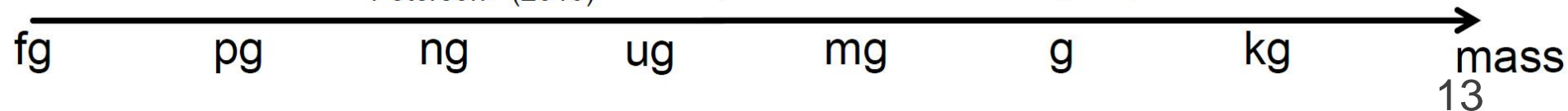
SQL soon?



suspended mirror, 40 kg
aLIGO

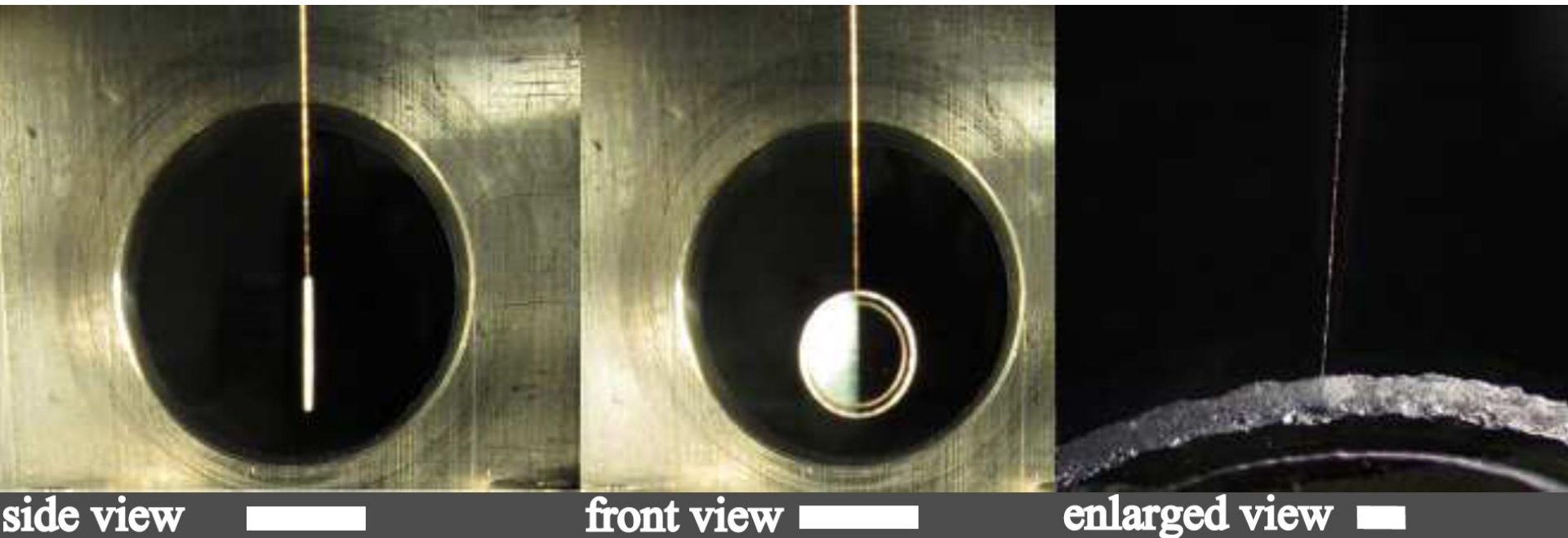


suspended mirror, 1 g
Neben+ (2012)



mgスケールでの検証

- 重力波望遠鏡タイプの5 mg懸架鏡
直径4 mm、厚さ0.2 mm
- 直径3 μm のタングステン線で懸架
熱雑音を小さく



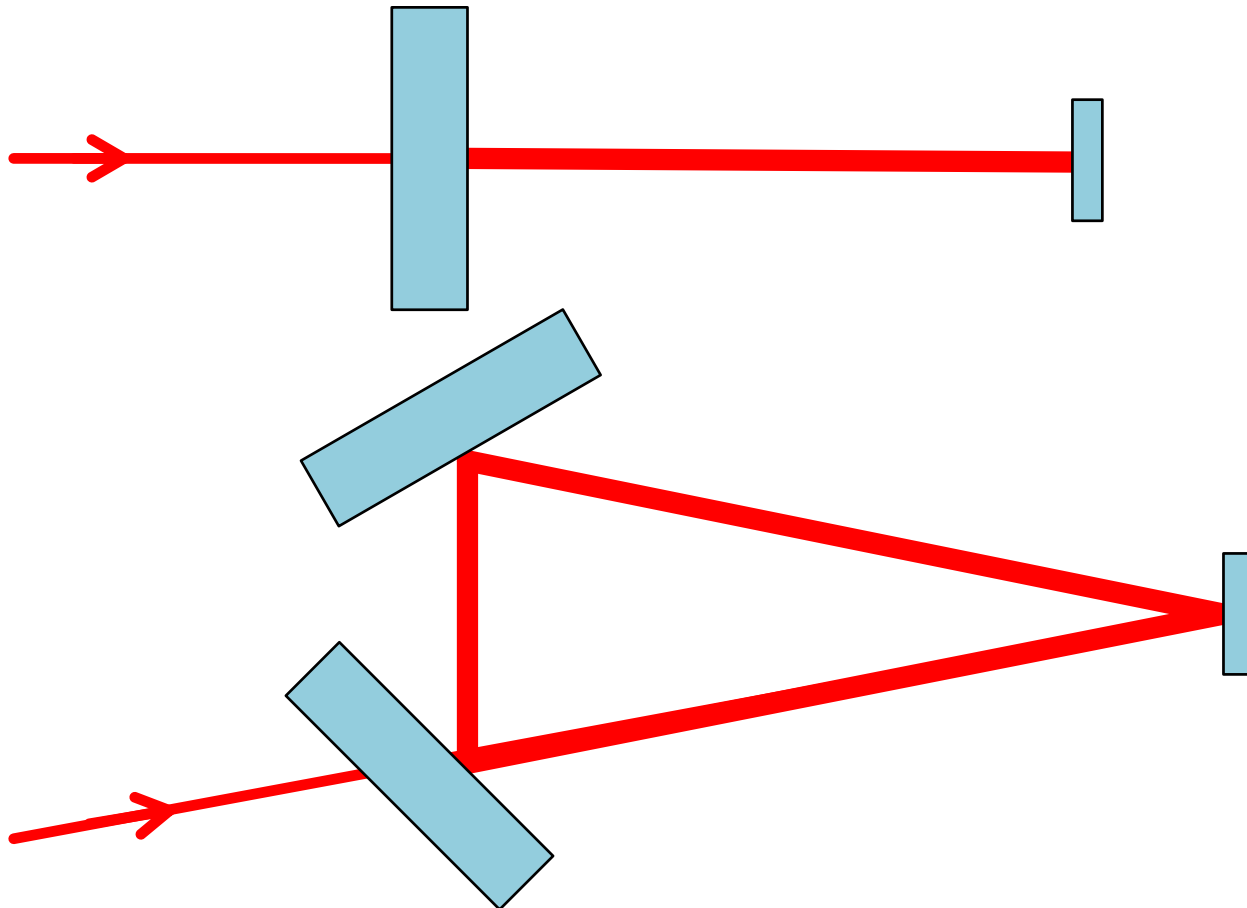
side view

front view

enlarged view

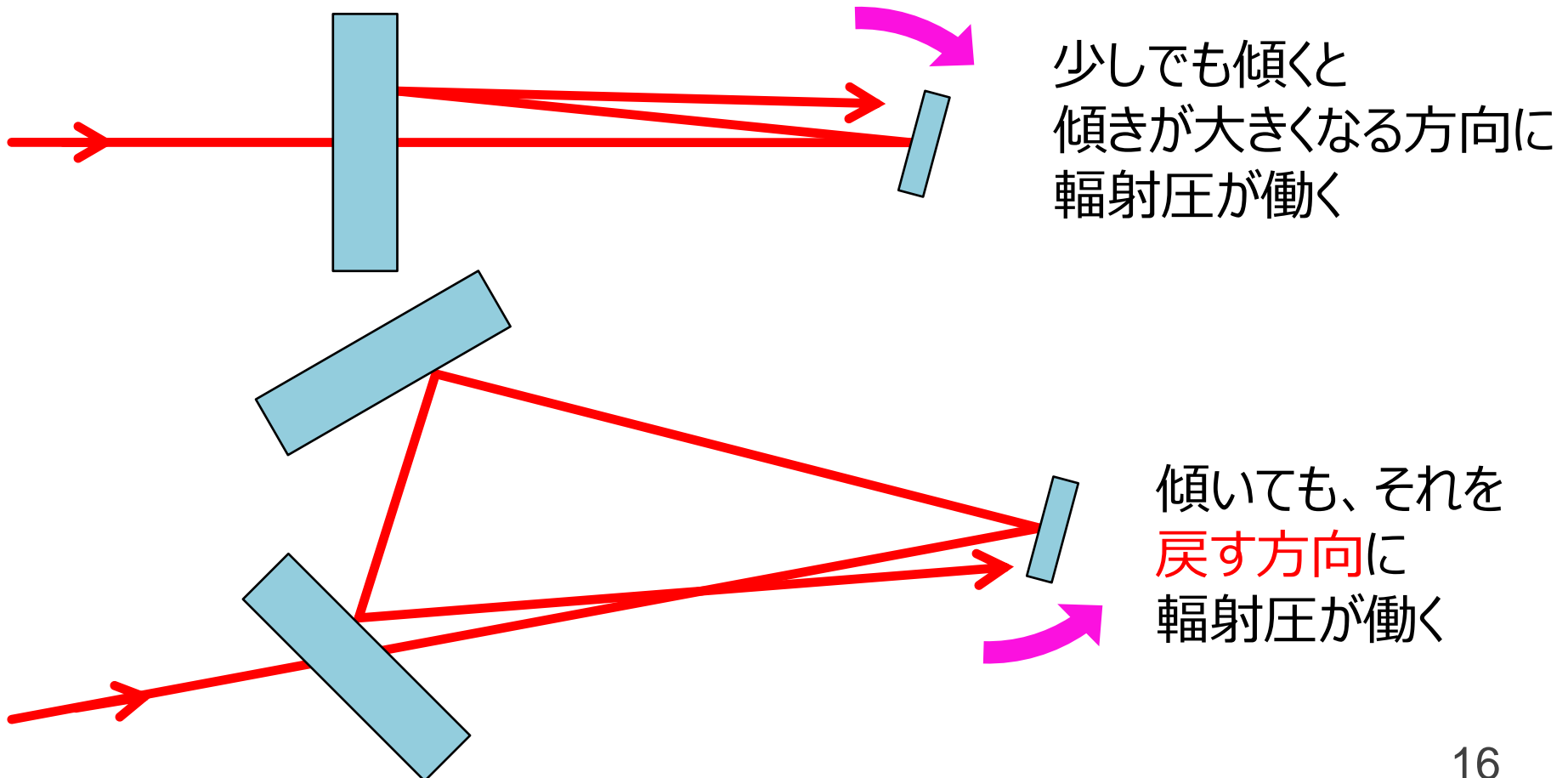
共振器構成の工夫

- 三角形にすることで角度不安定性を回避
高い光強度を鏡に当てられるように



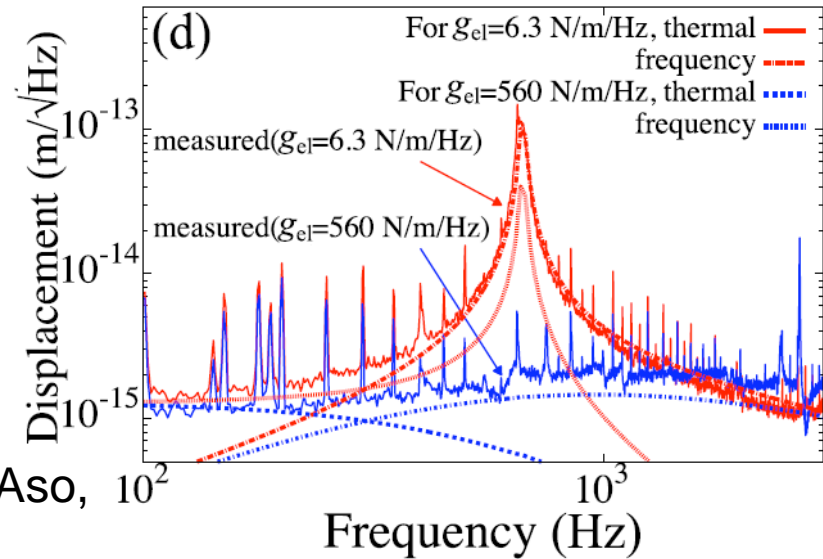
共振器構成の工夫

- 三角形にすることで角度不安定性を回避
高い光強度を鏡に当てられるように



5 mg実験の現状

- サスペンション熱雑音とレーザー周波数雑音で制限装置の改良中



N. Matsumoto, K. Komori, S. Ito, Y. Michimura, Y. Aso, 10²
Phys. Rev. A 94, 033822 (2016)

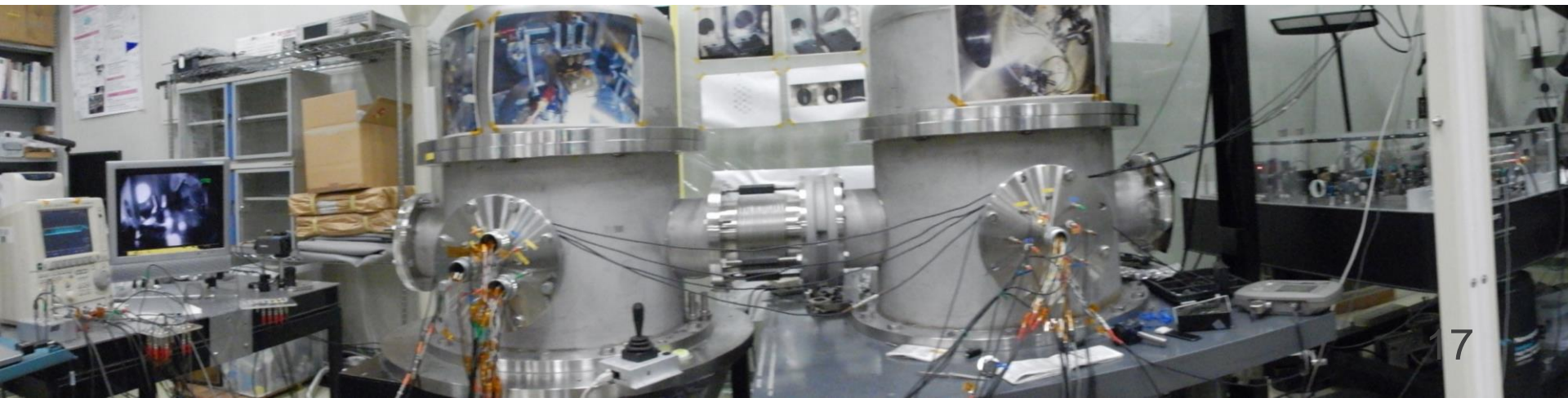
小森健太郎 東京大学修士論文 2015

モニタ

メイン
真空槽

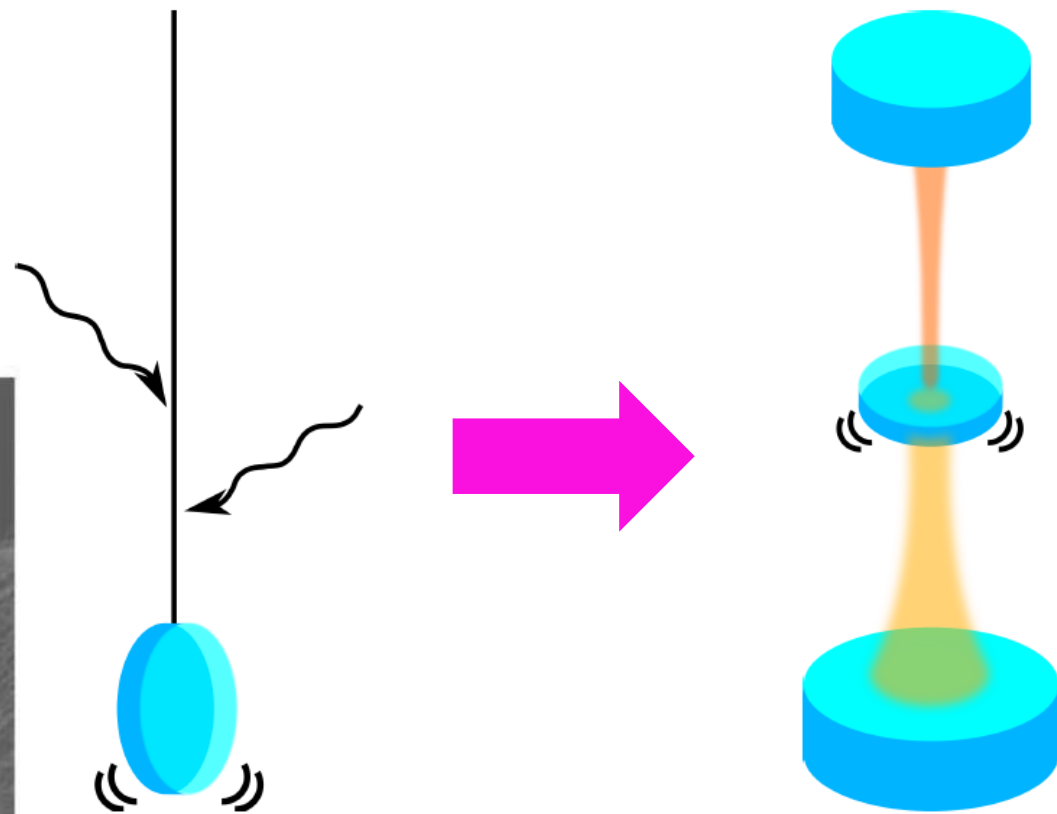
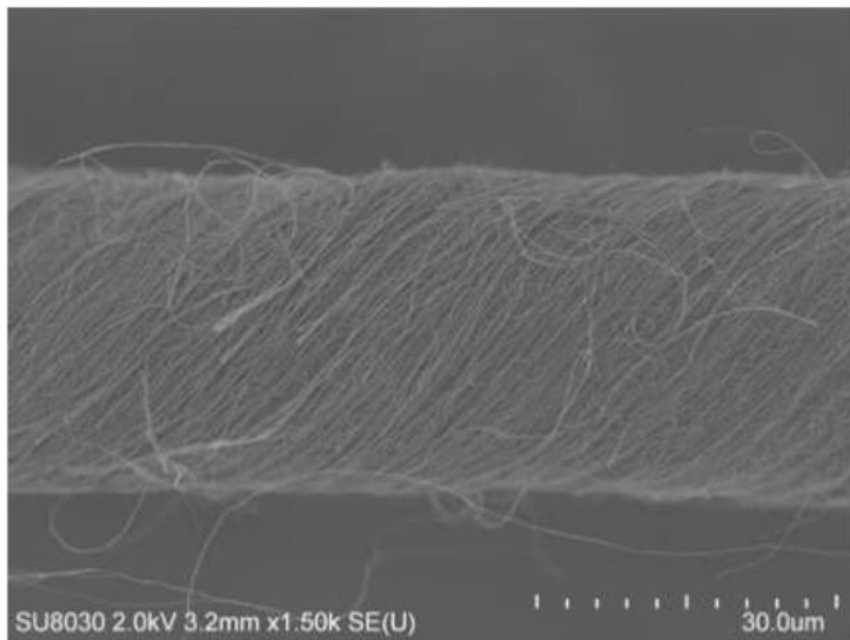
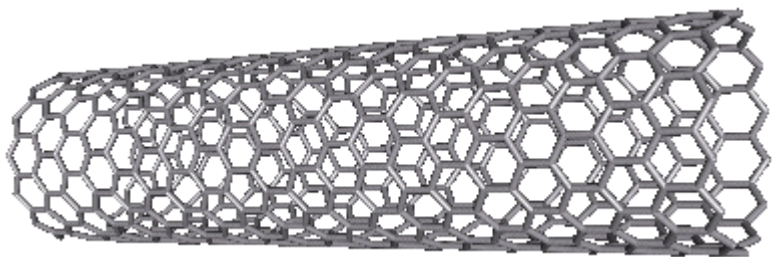
レーザー安定化
真空槽

入射光学系



将来計画

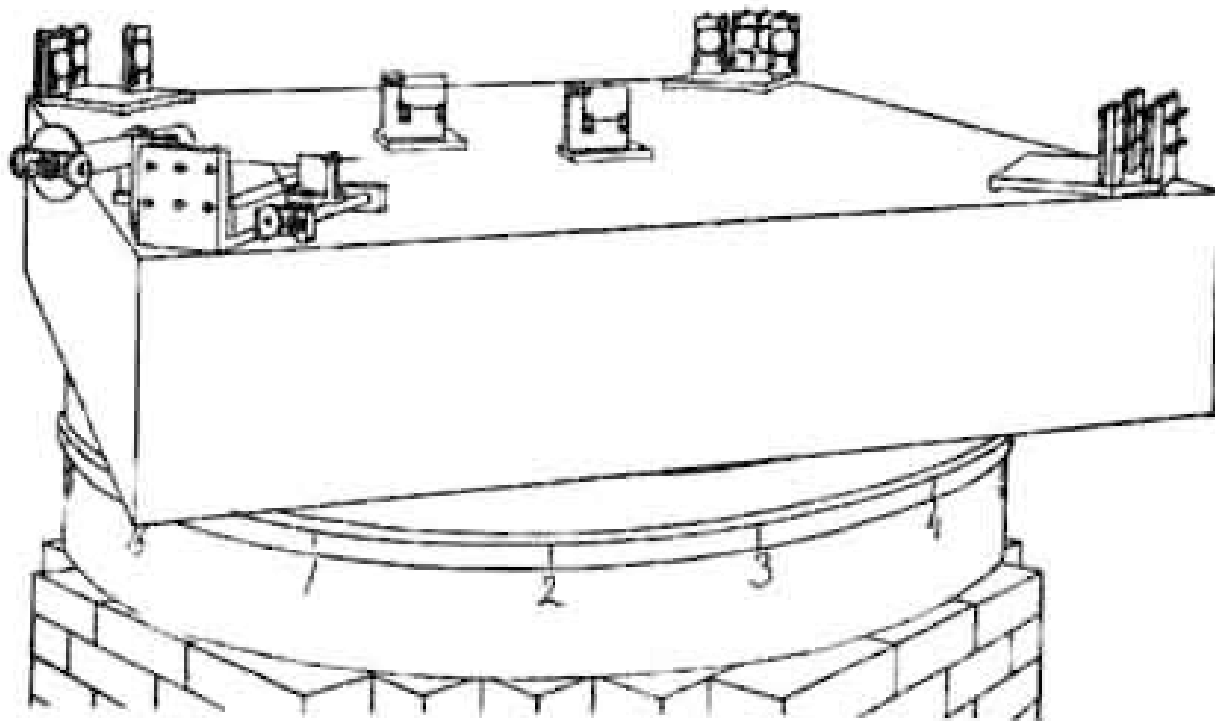
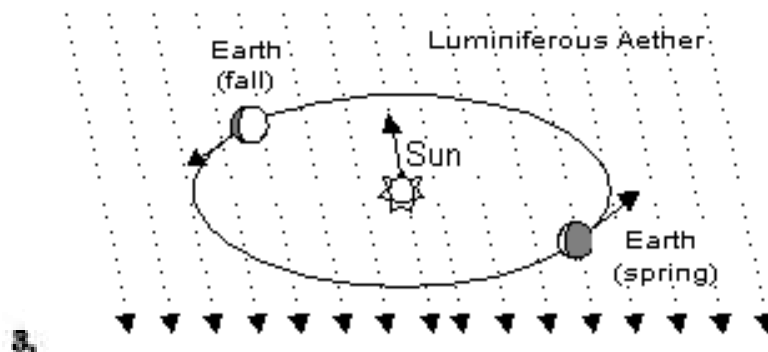
- 新しい鏡の支持方法
カーボンナノチューブファイバー(CNTF)
光学浮上



ローレンツ不変性

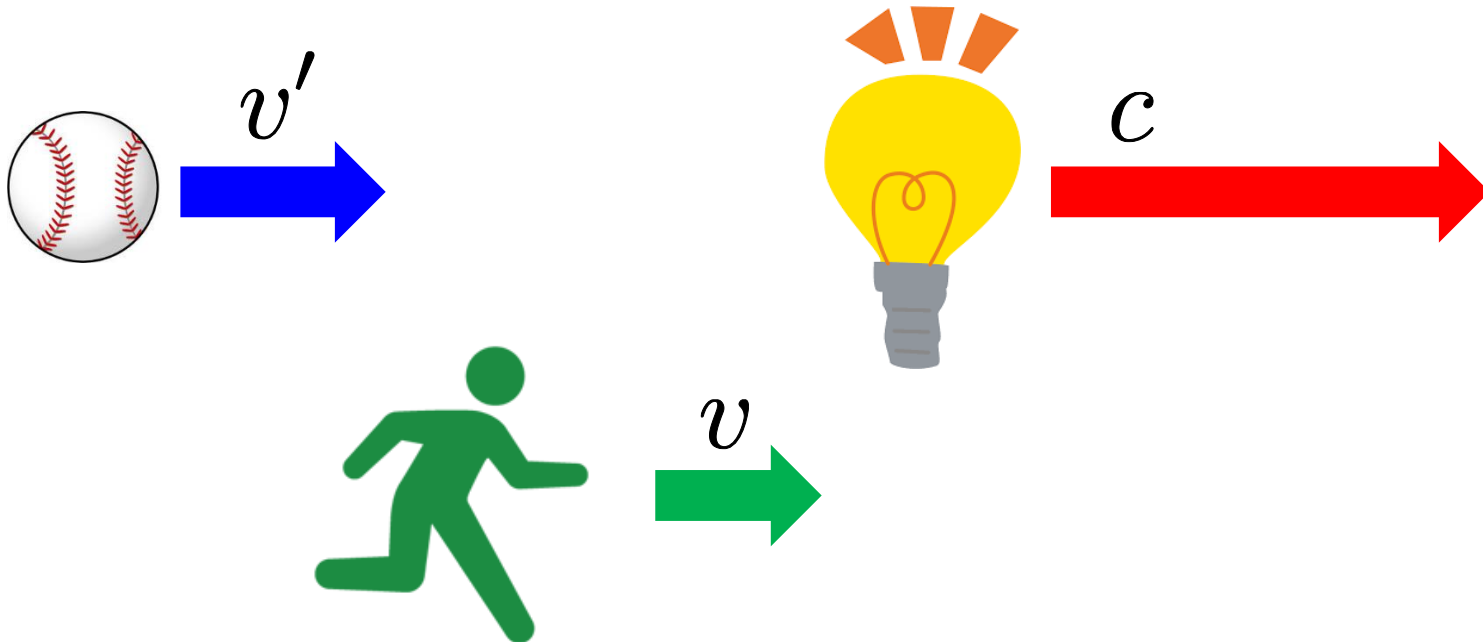
Michelson-Morleyの実験

- 1887年 Albert A. MichelsonとEdward W. Morley



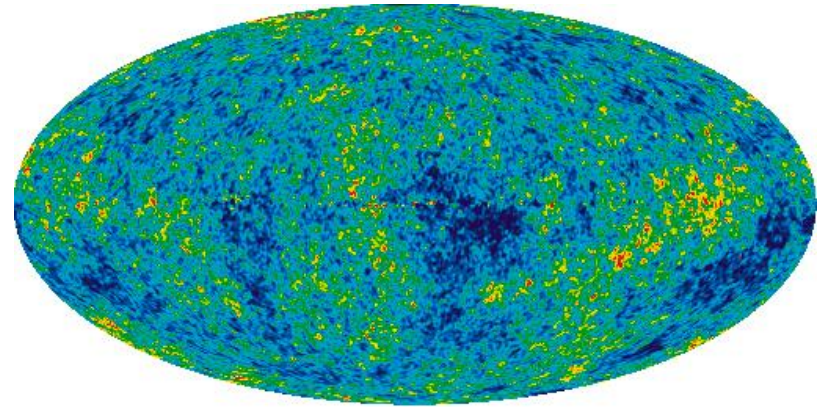
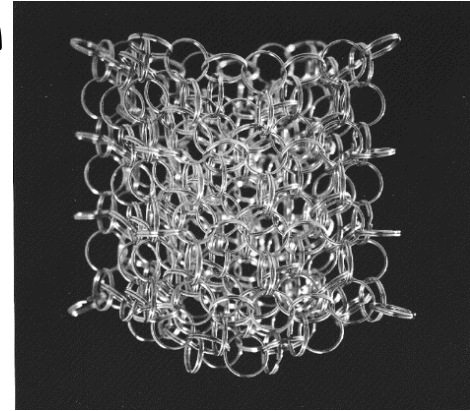
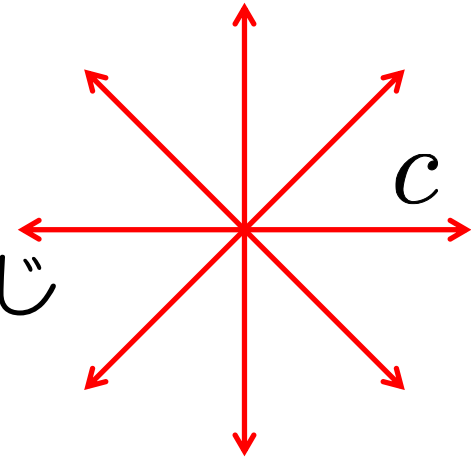
特殊相対性理論

- 1905年 Albert Einstein
「運動物体の電気力学について」
- どの慣性系でも物理法則は同じ
- 光速度不変の原理



Lorentz不変性

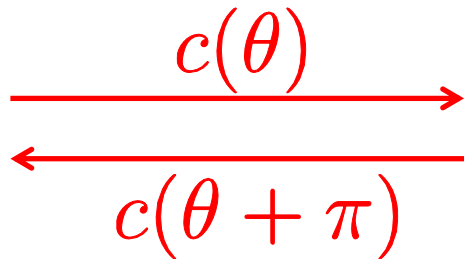
- 特殊相対性理論
Lorentz変換に対して物理法則は同じ
→ Lorentz不変性
- 様々な実験的検証
一度も「破れ」は見つかっていない
全ての物理学の基礎
- Lorentz不変性の破れ？
量子重力理論: わずかに破れている
可能性
宇宙マイクロ波背景放射:
わずかな異方性



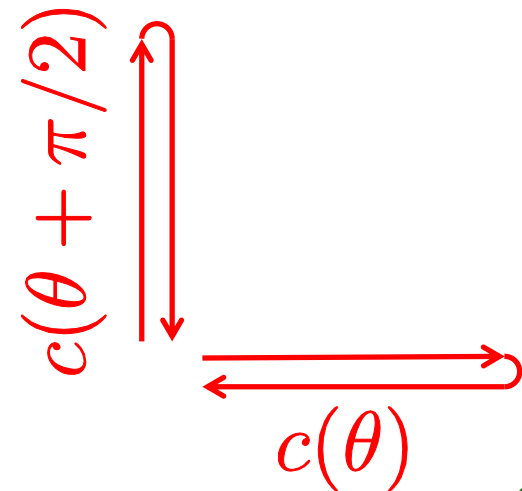
光速の等方性検証

- 2種類の等方性
 - 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

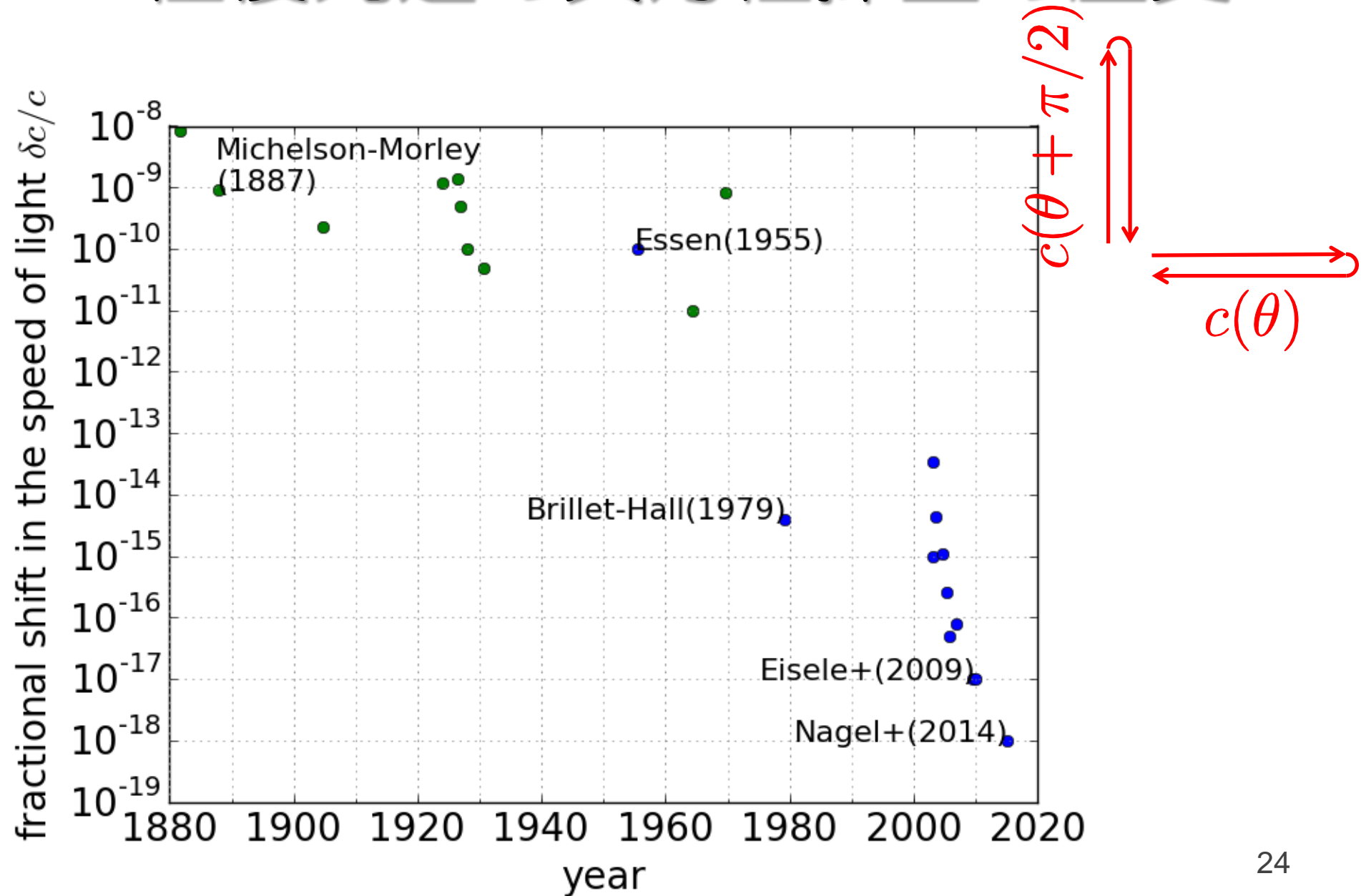
片道光速の等方性



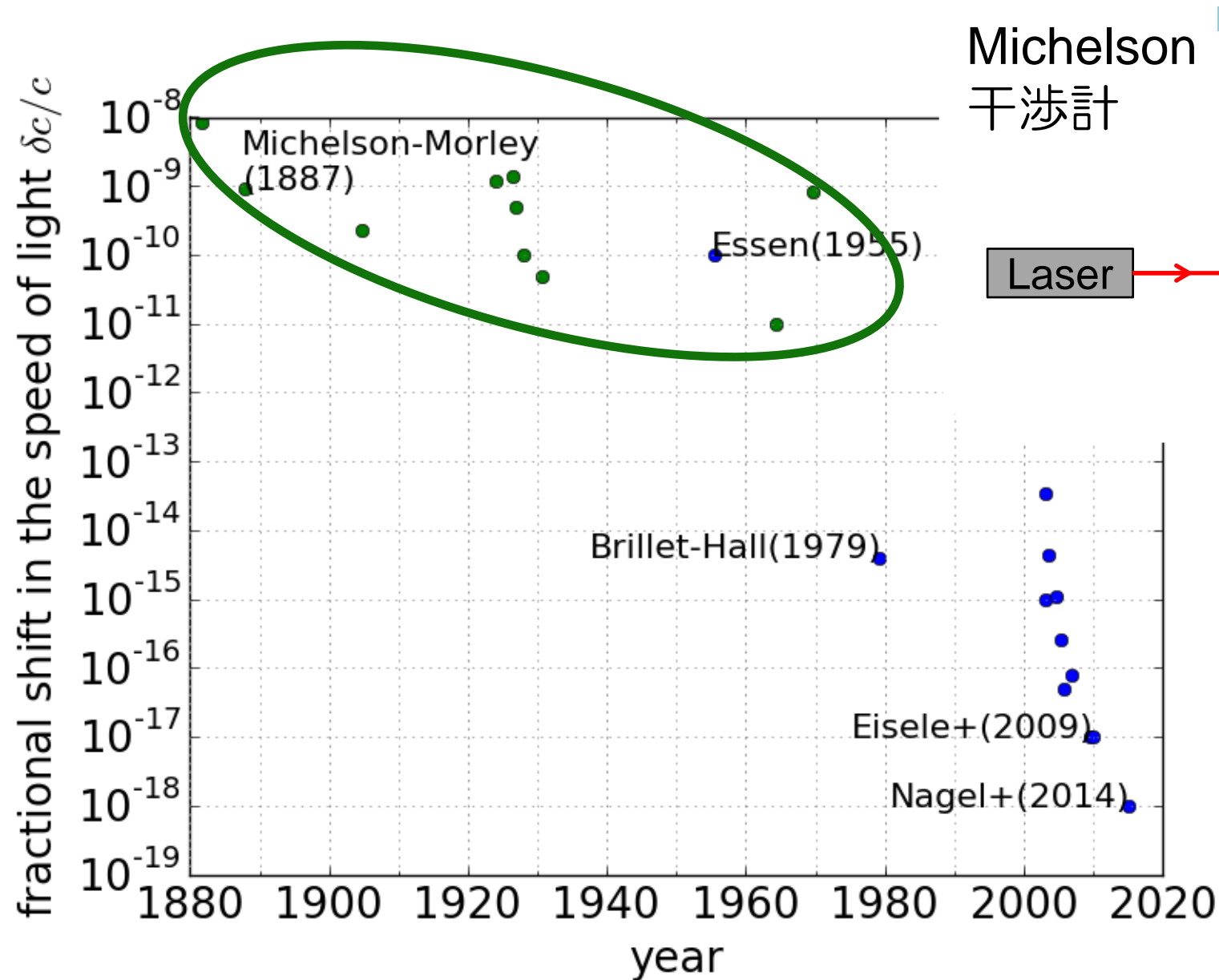
往復光速の等方性



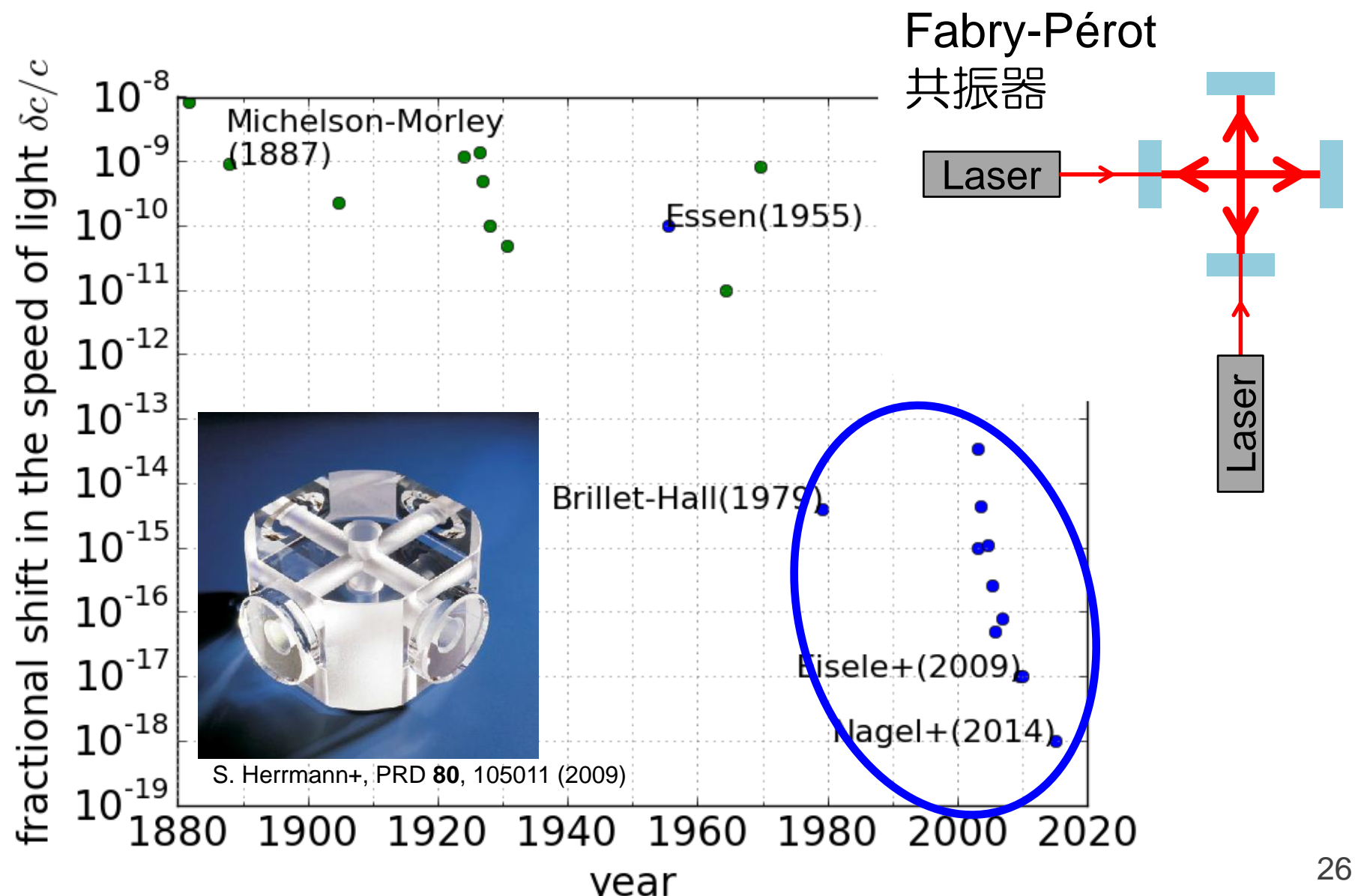
往復光速の異方性探査の歴史



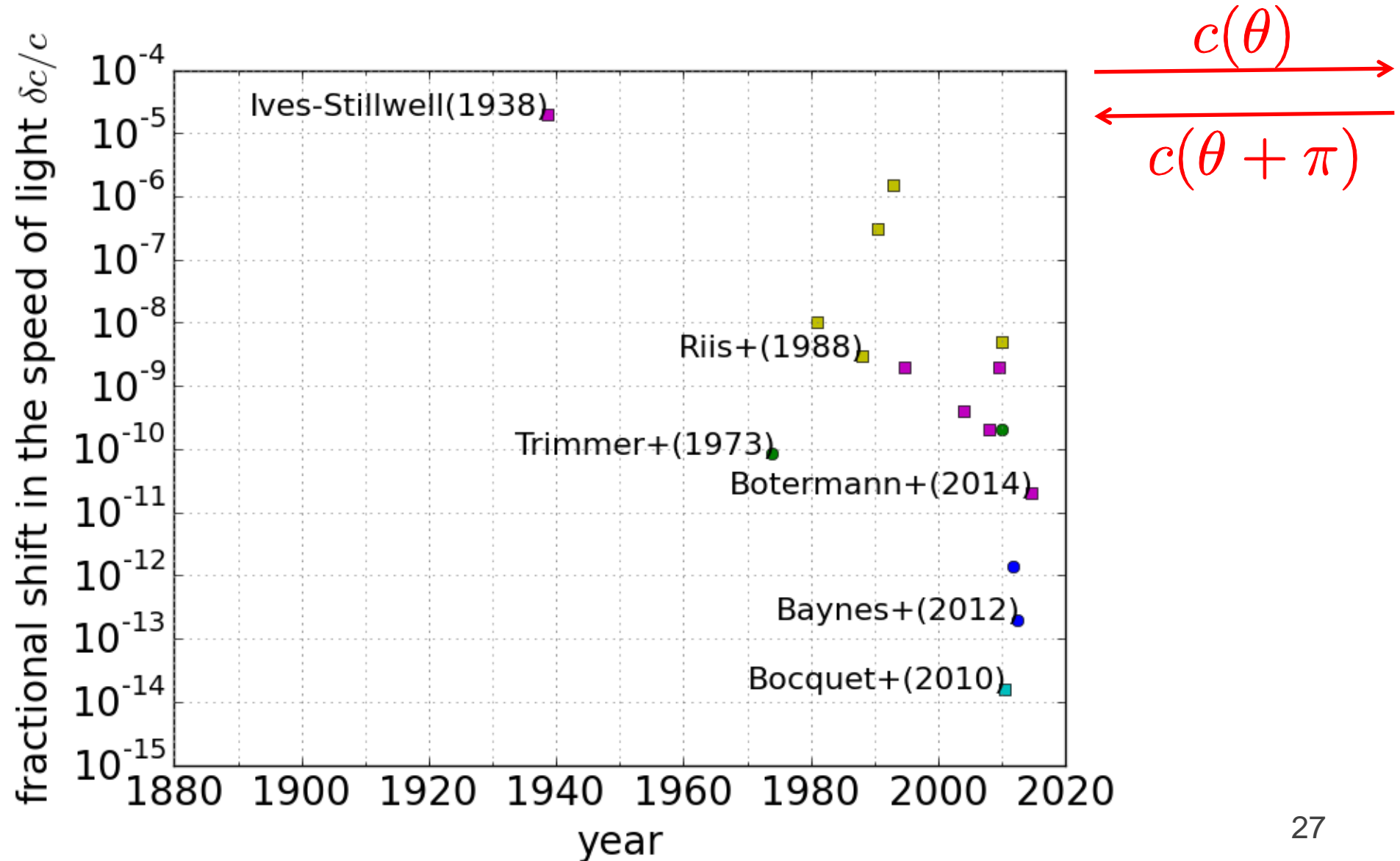
往復光速の異方性探査の歴史



往復光速の異方性探査の歴史

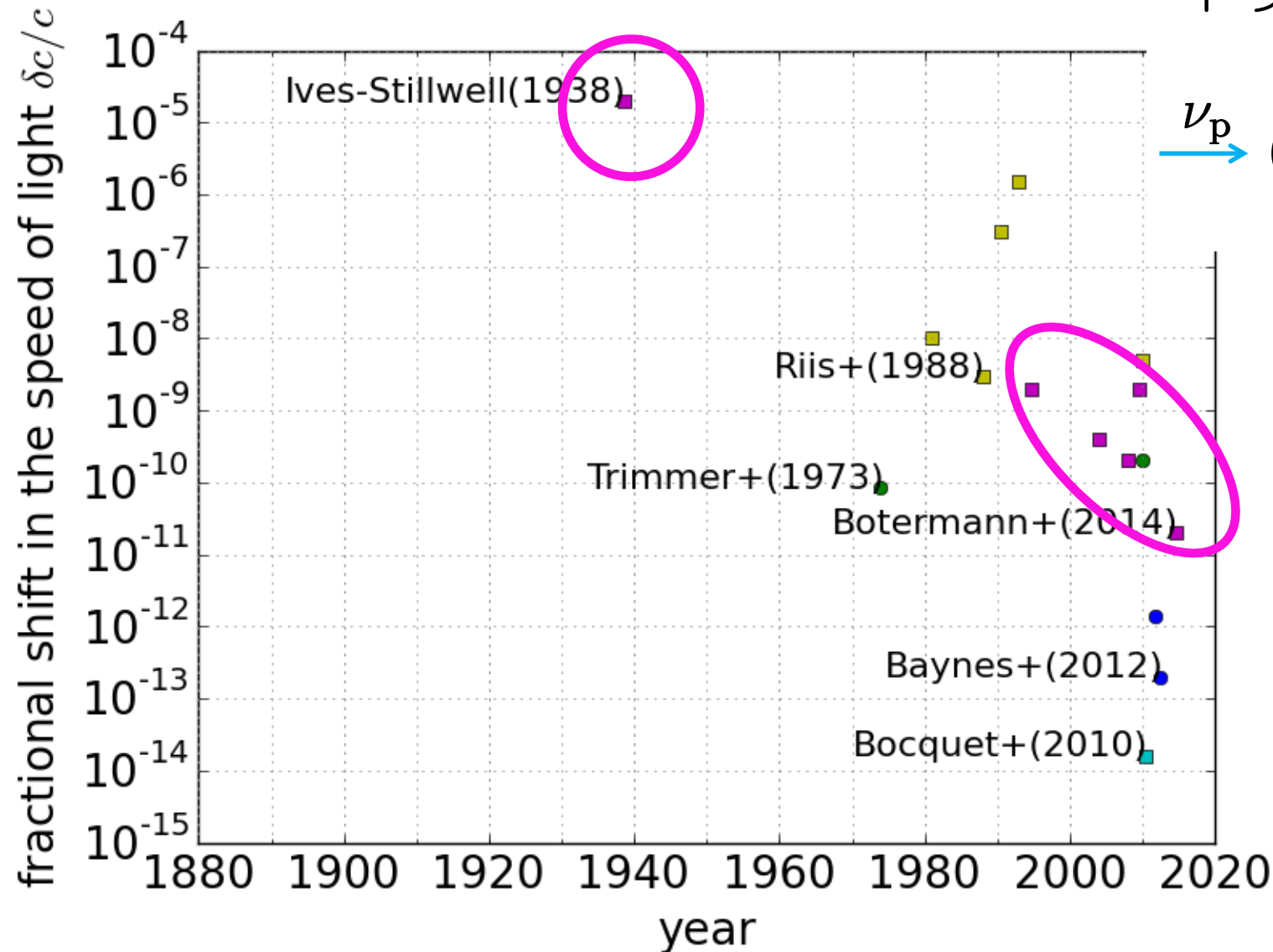
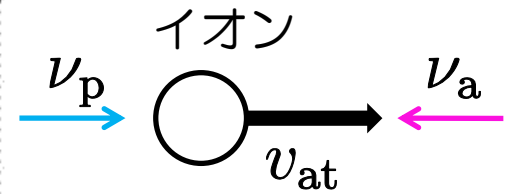


片道光速の異方性探査の歴史



片道光速の異方性探査の歴史

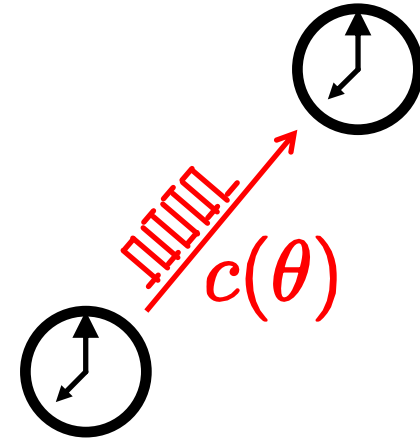
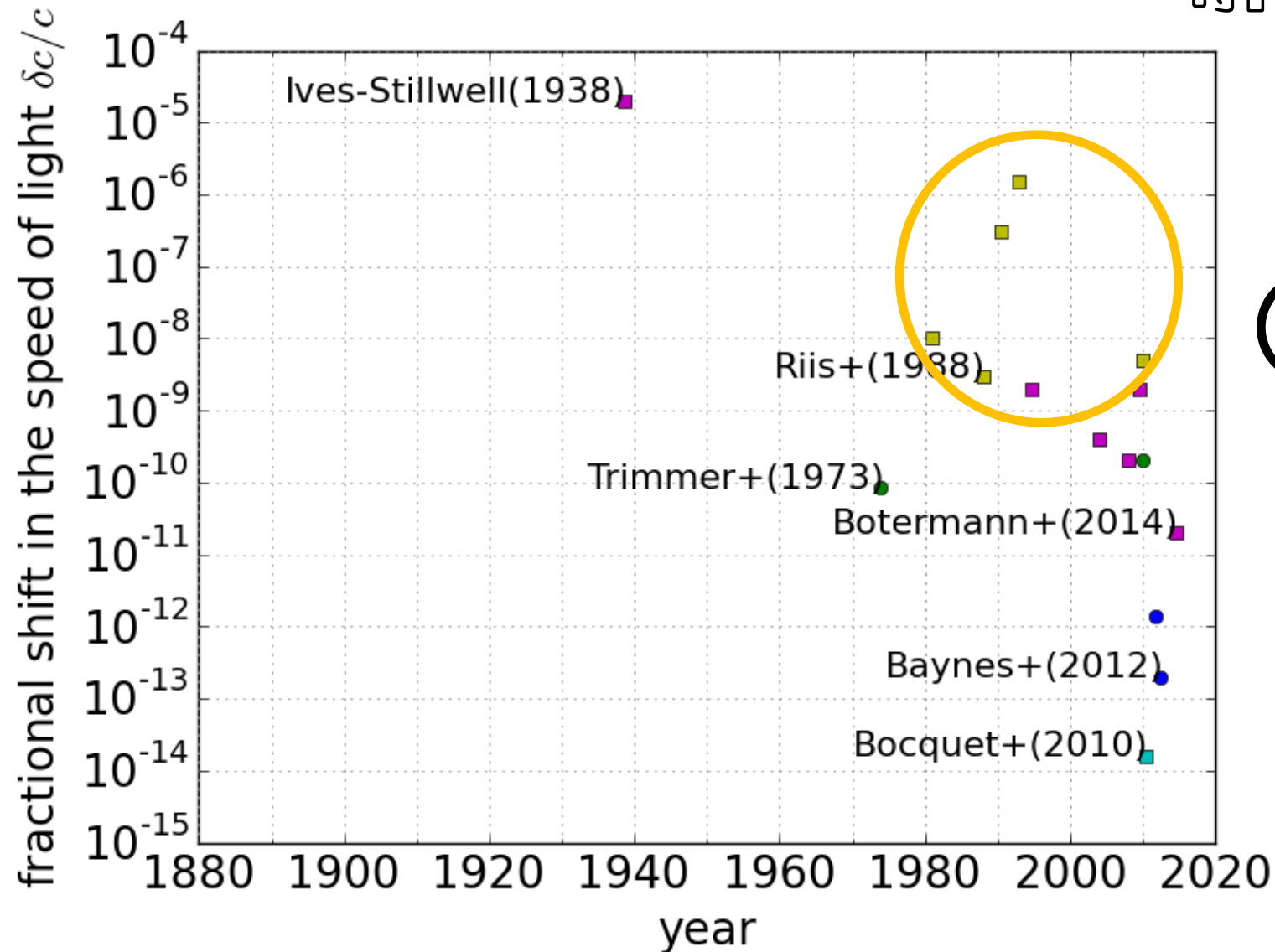
ドップラー実験



絶対静止系として
 CMB静止系を仮定
 した場合
 $(v_{lab} = 369 \text{ km/s}$
 $= 1e-3 * c)$

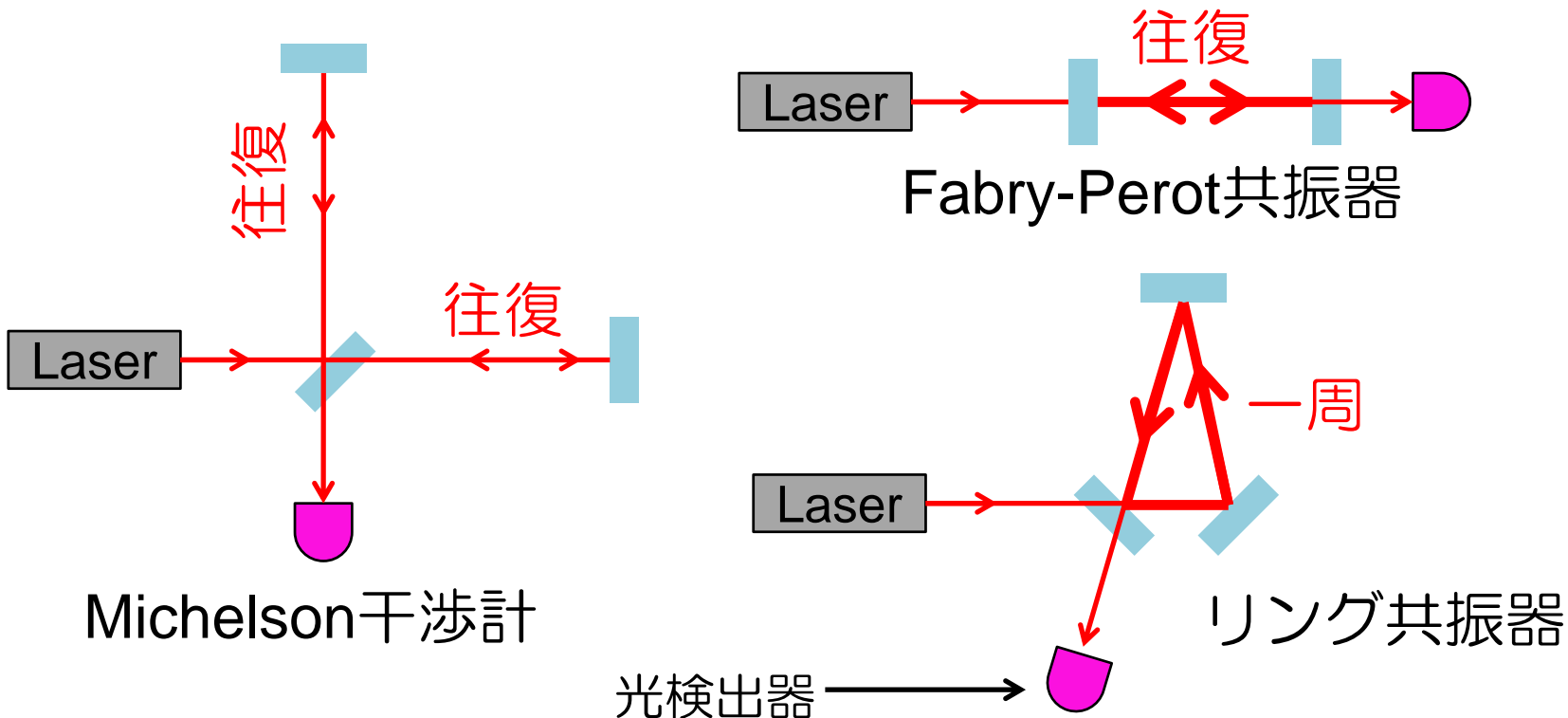
片道光速の異方性探査の歴史

時計比較実験



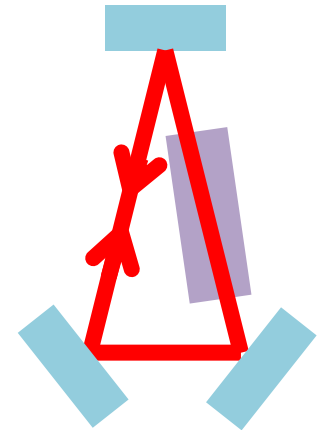
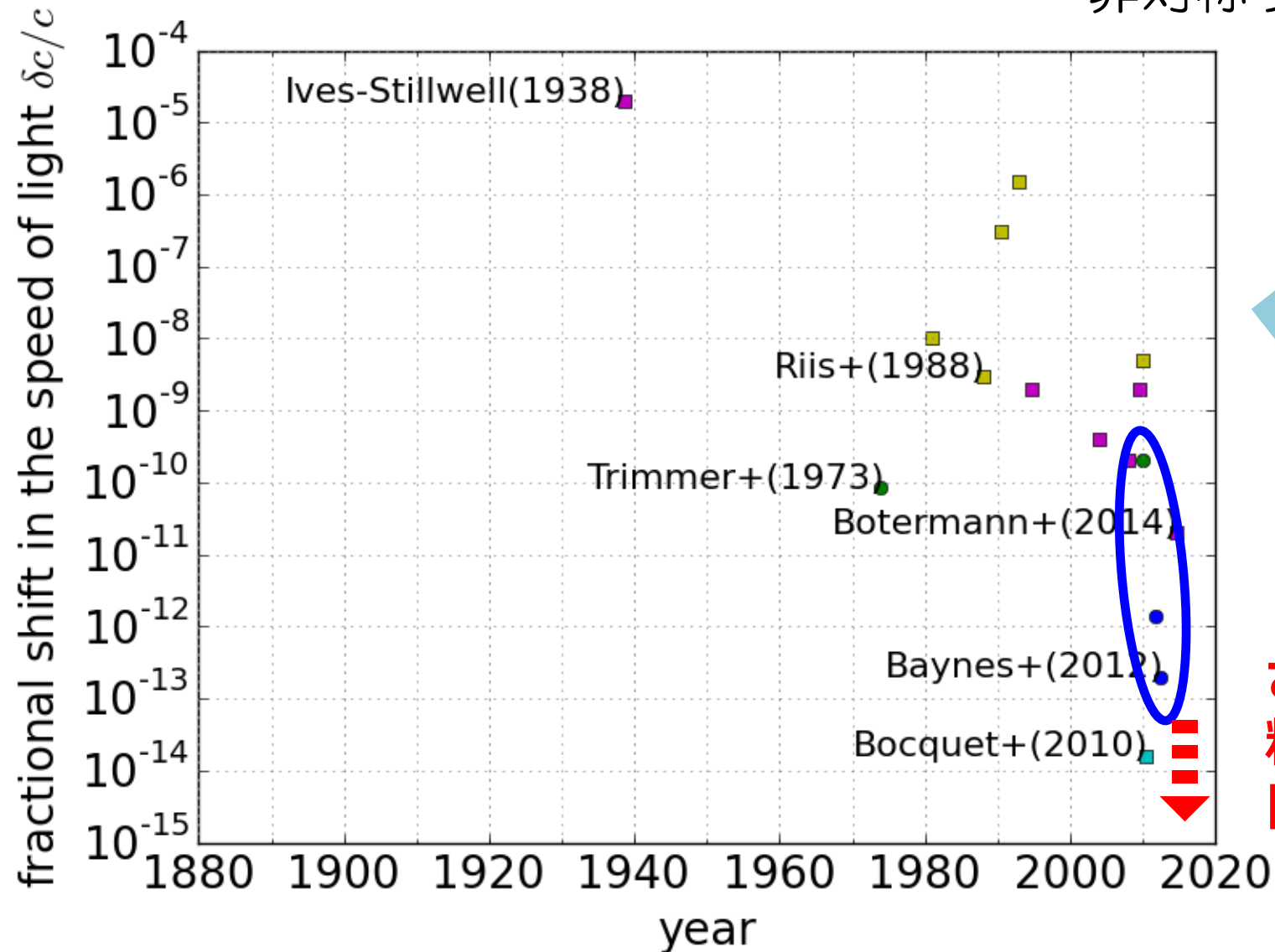
レーザー干渉計による異方性探査

- 往復に比べ、片道の検証精度は数桁悪かった
- 通常のレーザー干渉計、光共振器は往復光速の異方性にしか感度を持たない
- 媒質を入れて非対称性を作り、感度を持たせる



片道光速の異方性探査の歴史

非対称リング共振器

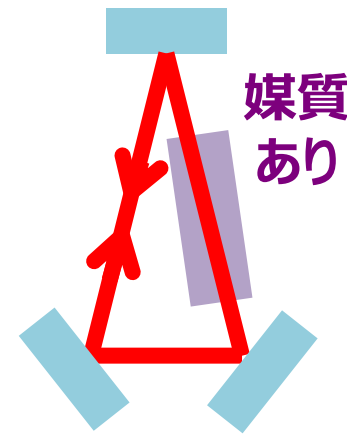
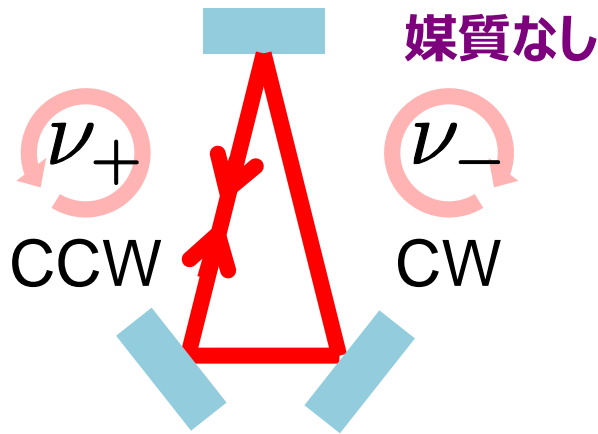


さらなる
精度向上を
目指す

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

$$\nu_+ = \nu_0$$

$$\nu_- = \nu_0$$

$$\nu_+ = \nu$$

$$\nu_- = \nu$$

Lorentz不変性
が破れている
場合

$$\nu_+ = \nu_0$$

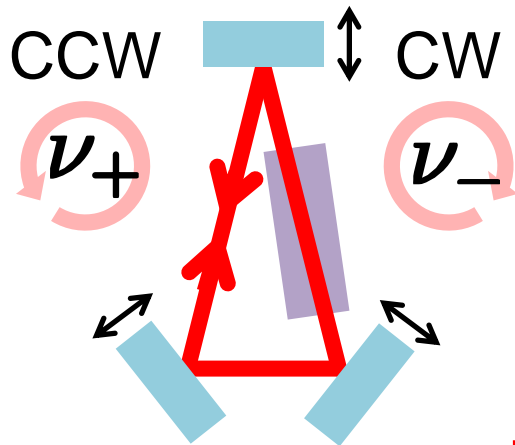
$$\nu_- = \nu_0$$

$$\nu_+ = \nu - \delta\nu_{LV}$$

$$\nu_- = \nu + \delta\nu_{LV}$$

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



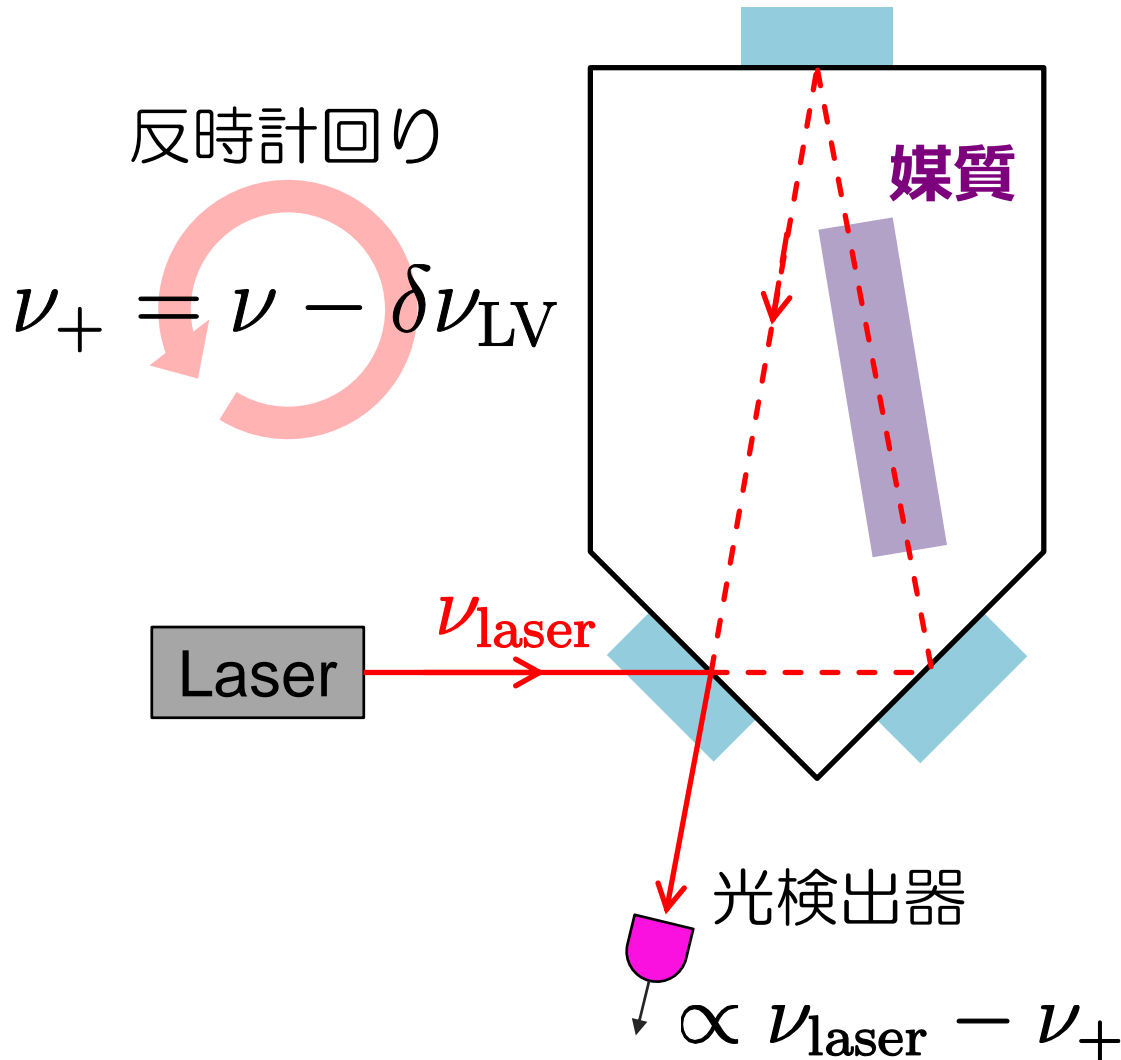
$$\begin{aligned}\nu_+ &= \nu + \delta\nu_{\text{noise}} - \delta\nu_{\text{LV}} \\ \nu_- &= \nu + \delta\nu_{\text{noise}} + \delta\nu_{\text{LV}}\end{aligned}$$

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

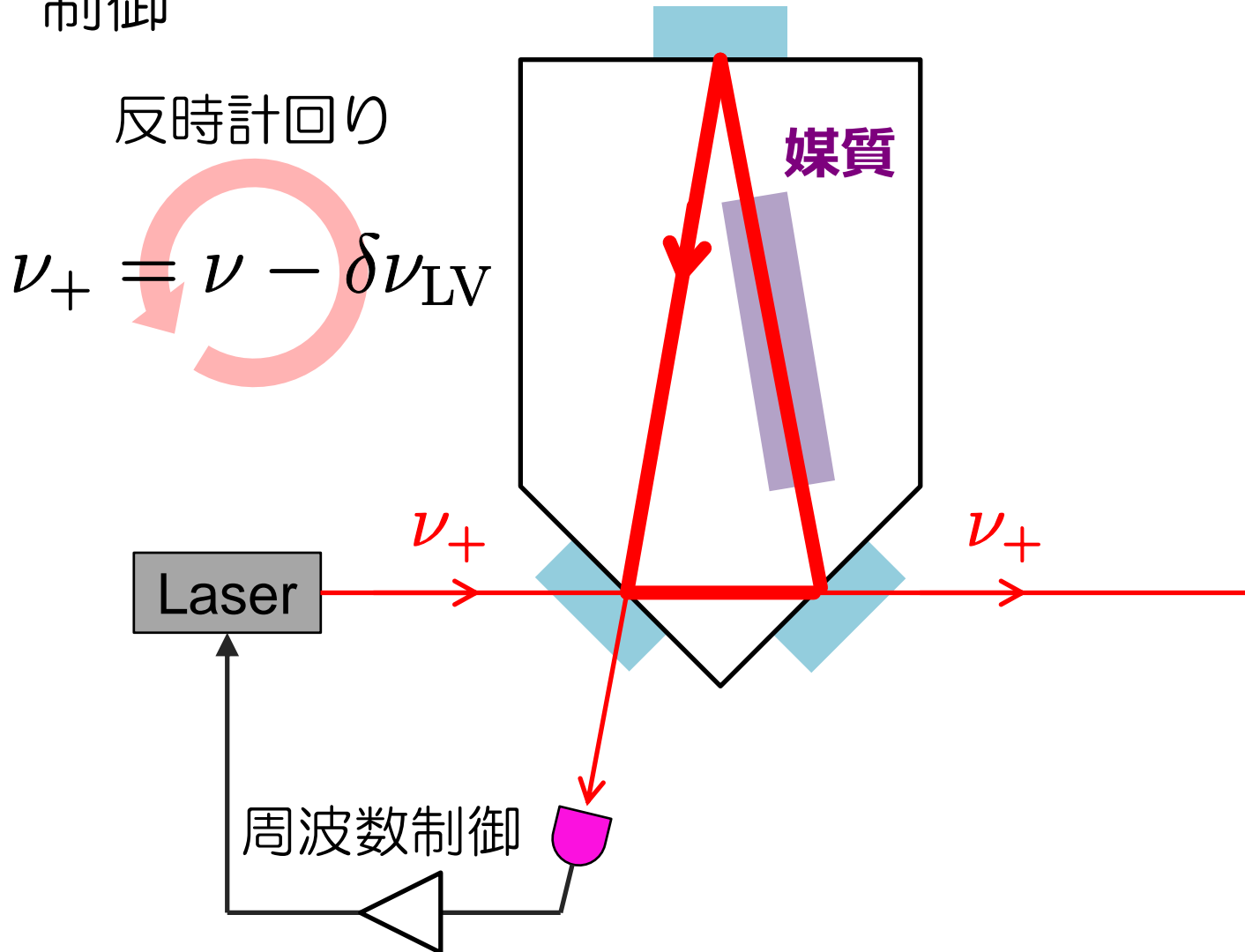
ダブルパス構成 (1/4)

- レーザー光を反時計回りに入射



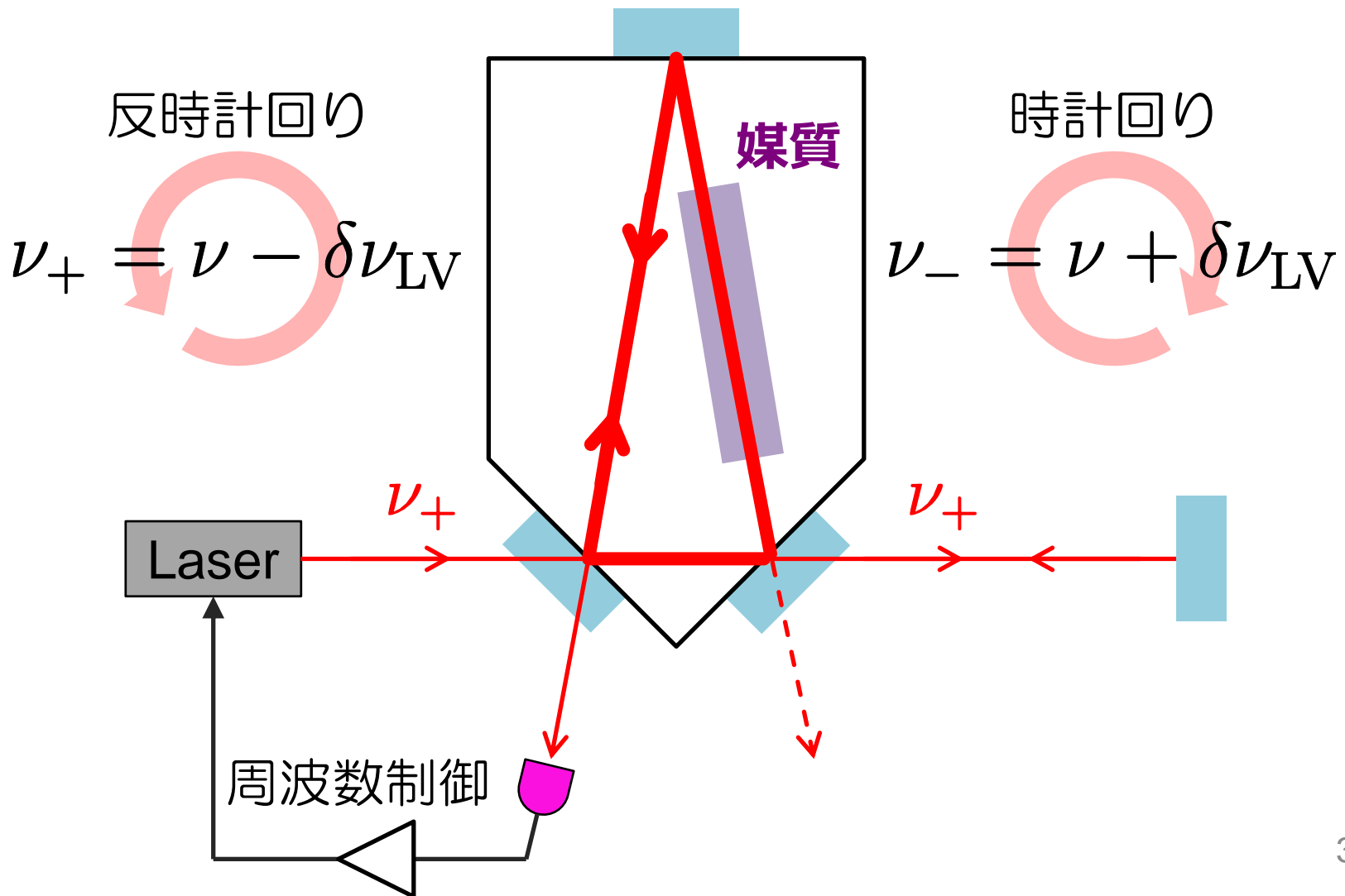
ダブルパス構成 (2/4)

- レーザー周波数を反時計回りの共振周波数(ν_+)に制御



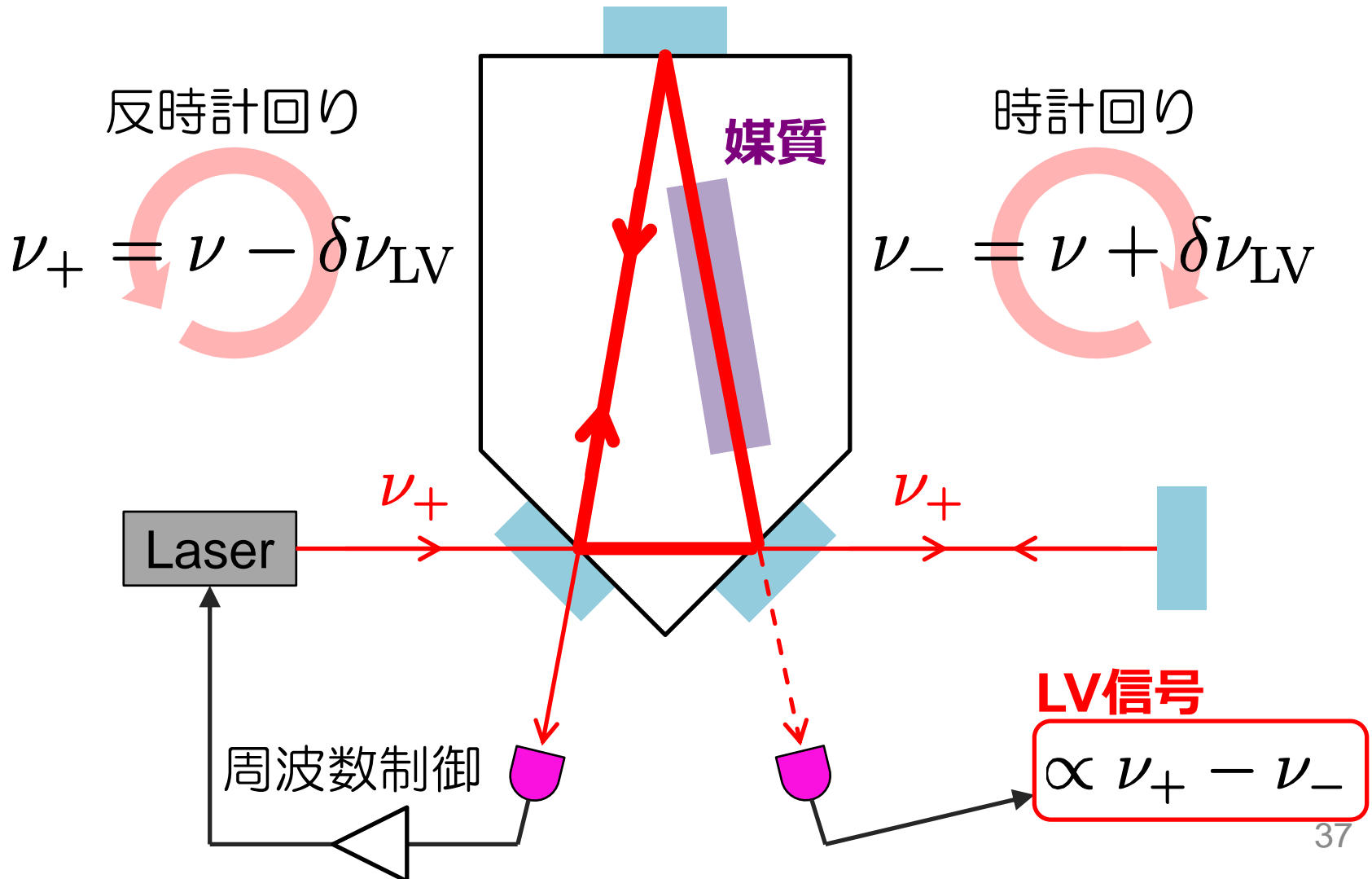
ダブルパス構成 (3/4)

- 透過光を打ち返し、時計回りに再入射



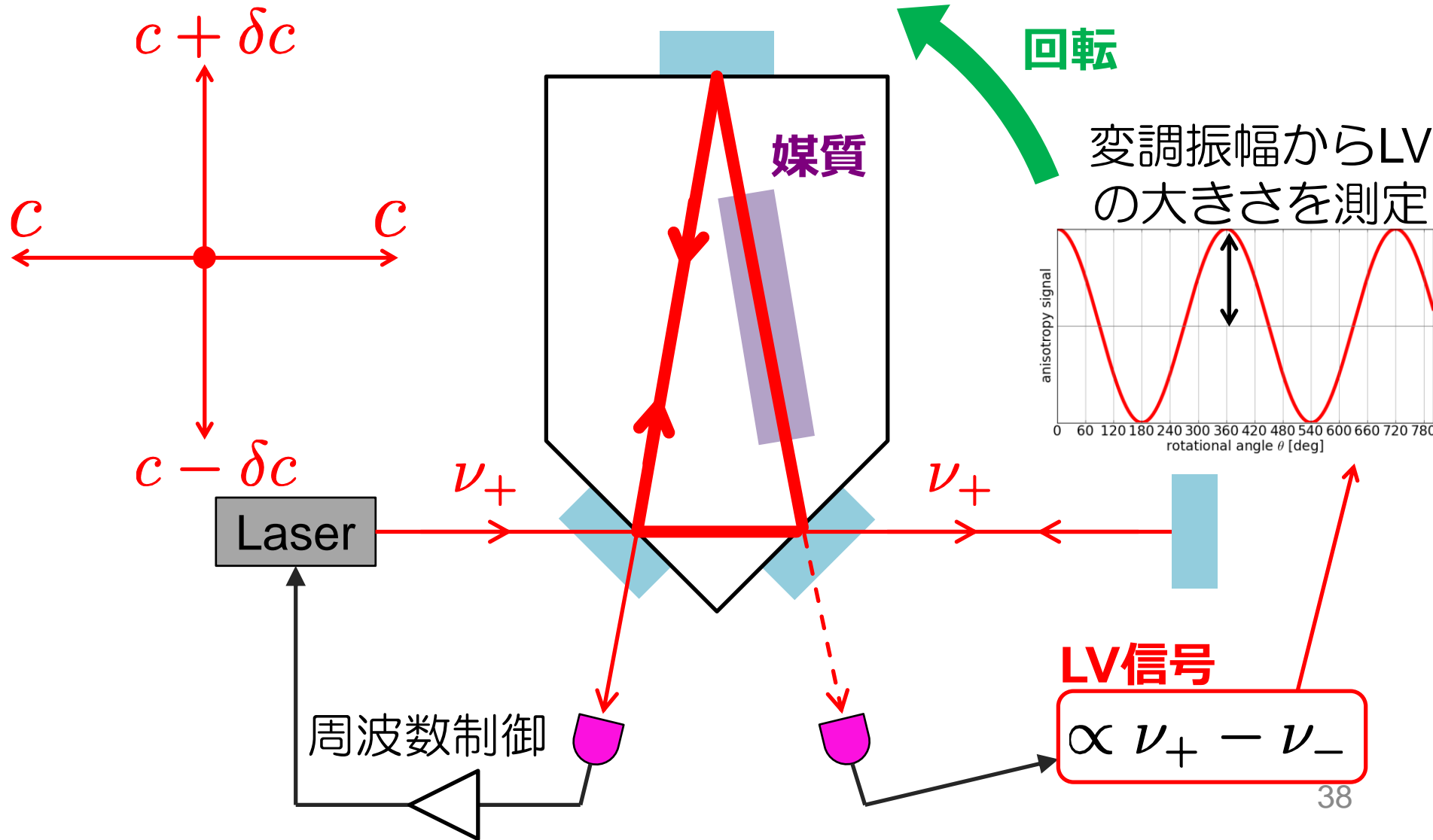
ダブルパス構成 (4/4)

- その反射光から、LV信号が得られる(**null測定**)



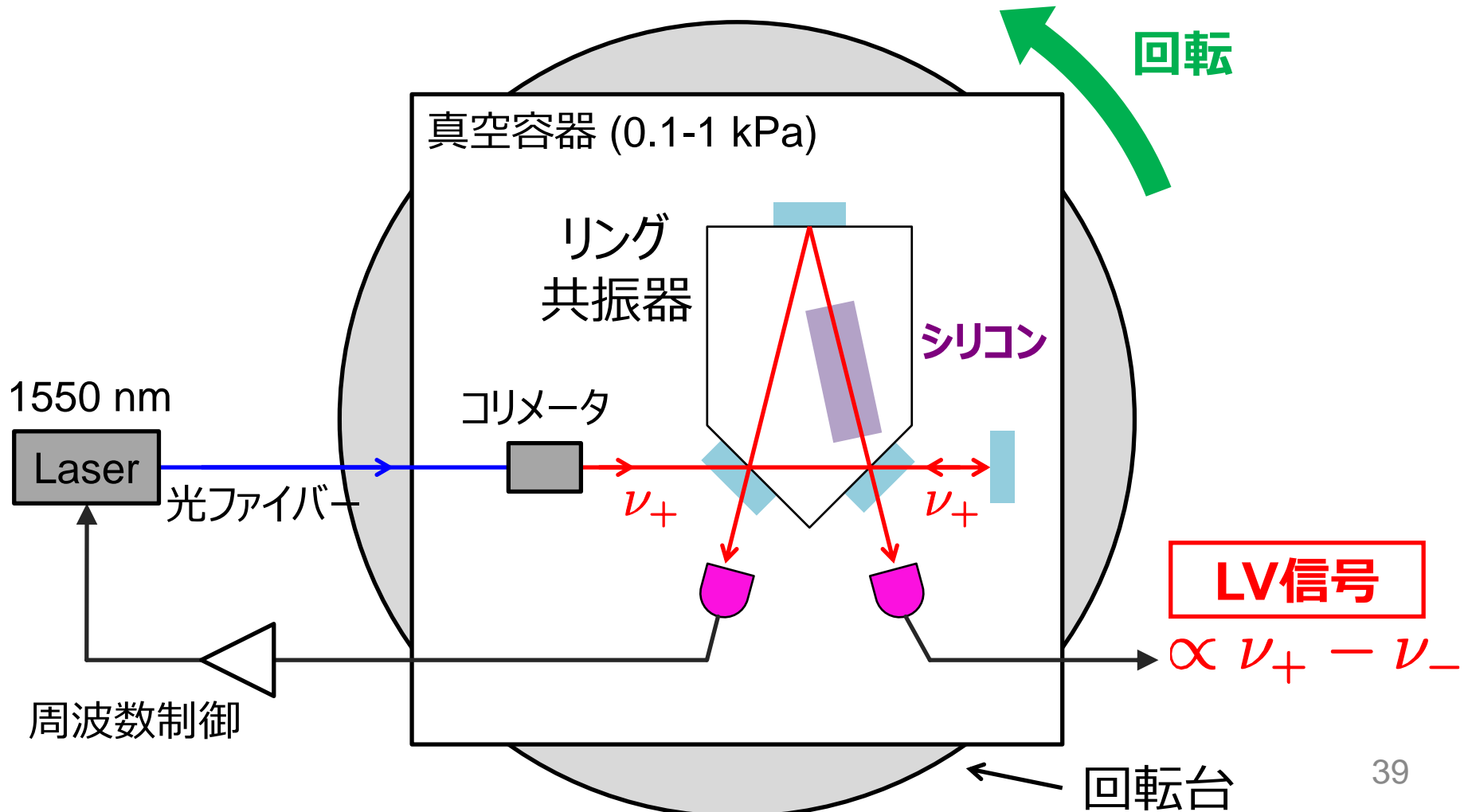
実験装置の回転

- 全体を回転させることにより、LV信号を変調

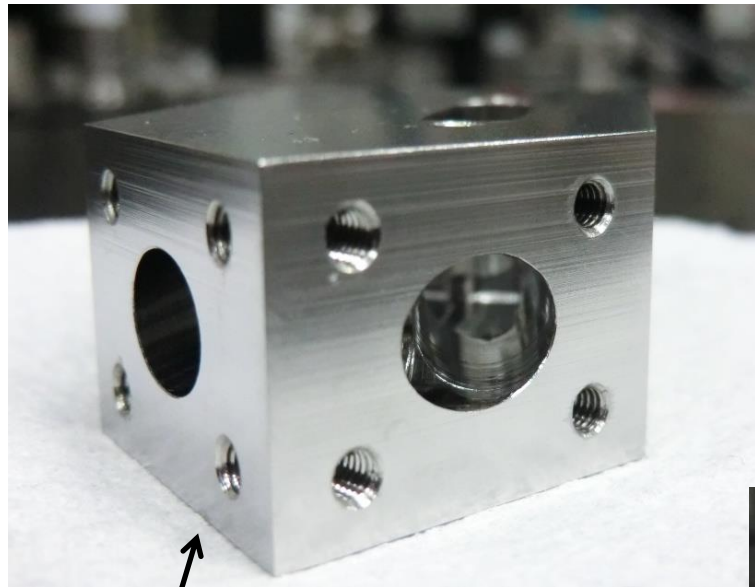


実験装置の概念図

- ダブルパス構成による共振周波数比較
- 装置回転によるLV信号の変調



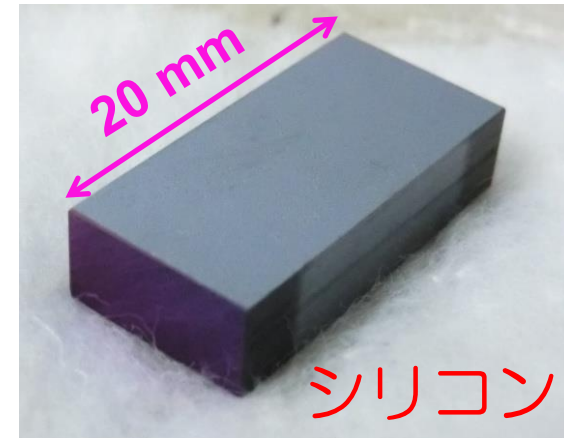
リング共振器の写真



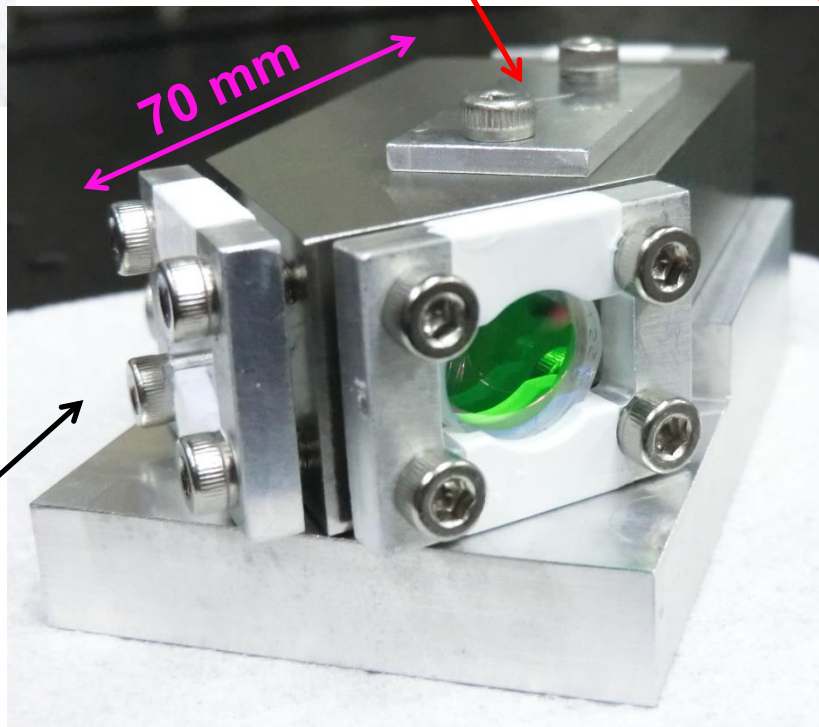
スペーサーは
スーパーインバー製
(低熱膨張合金 $10^{-7}/K$)

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

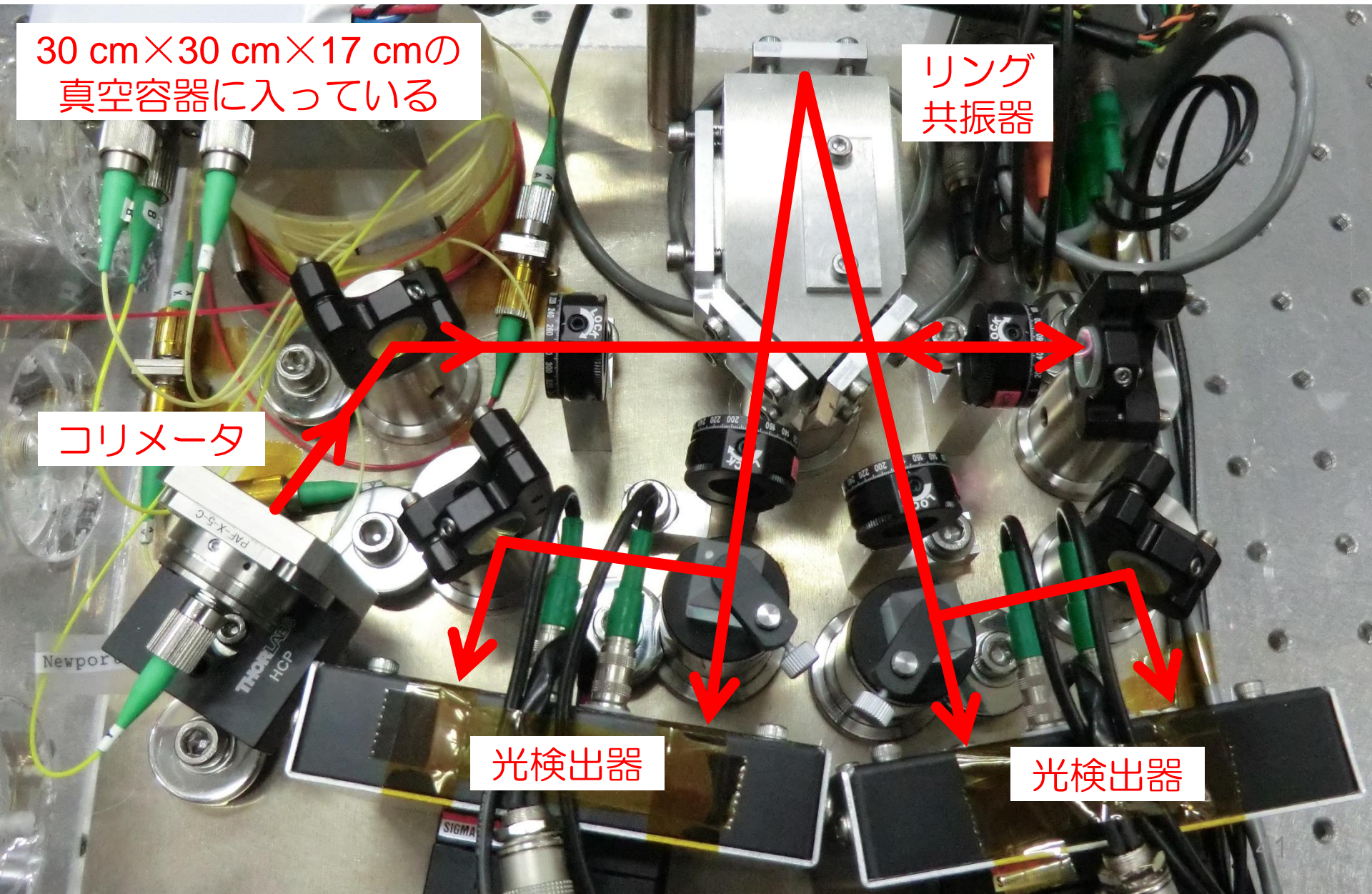
30 cm×30 cm×17 cmの
真空容器に入っている

リング
共振器

コリメータ

光検出器

光検出器



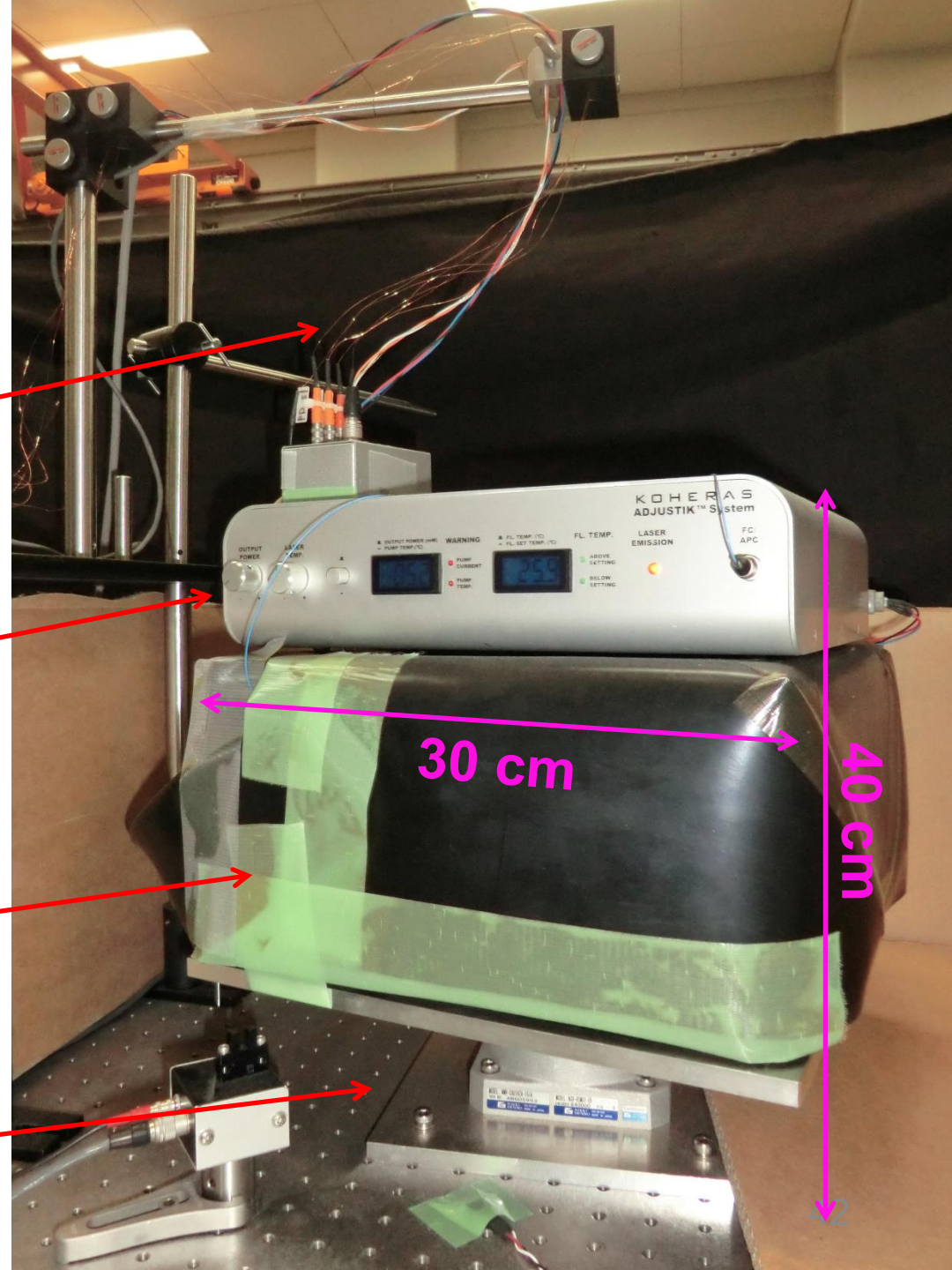
全体の写真

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



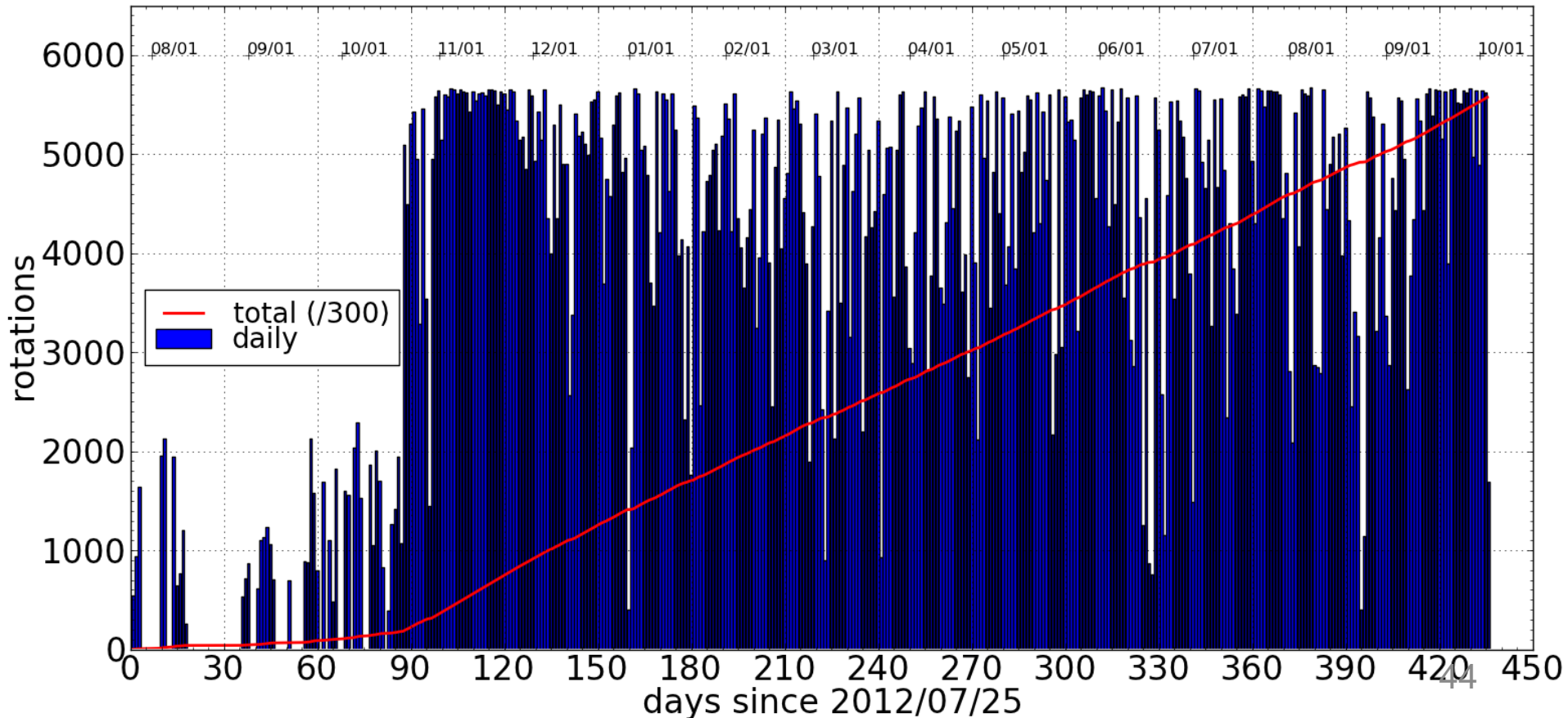
装置の回転

- 12秒で1回転、正回転と逆回転を繰り返す



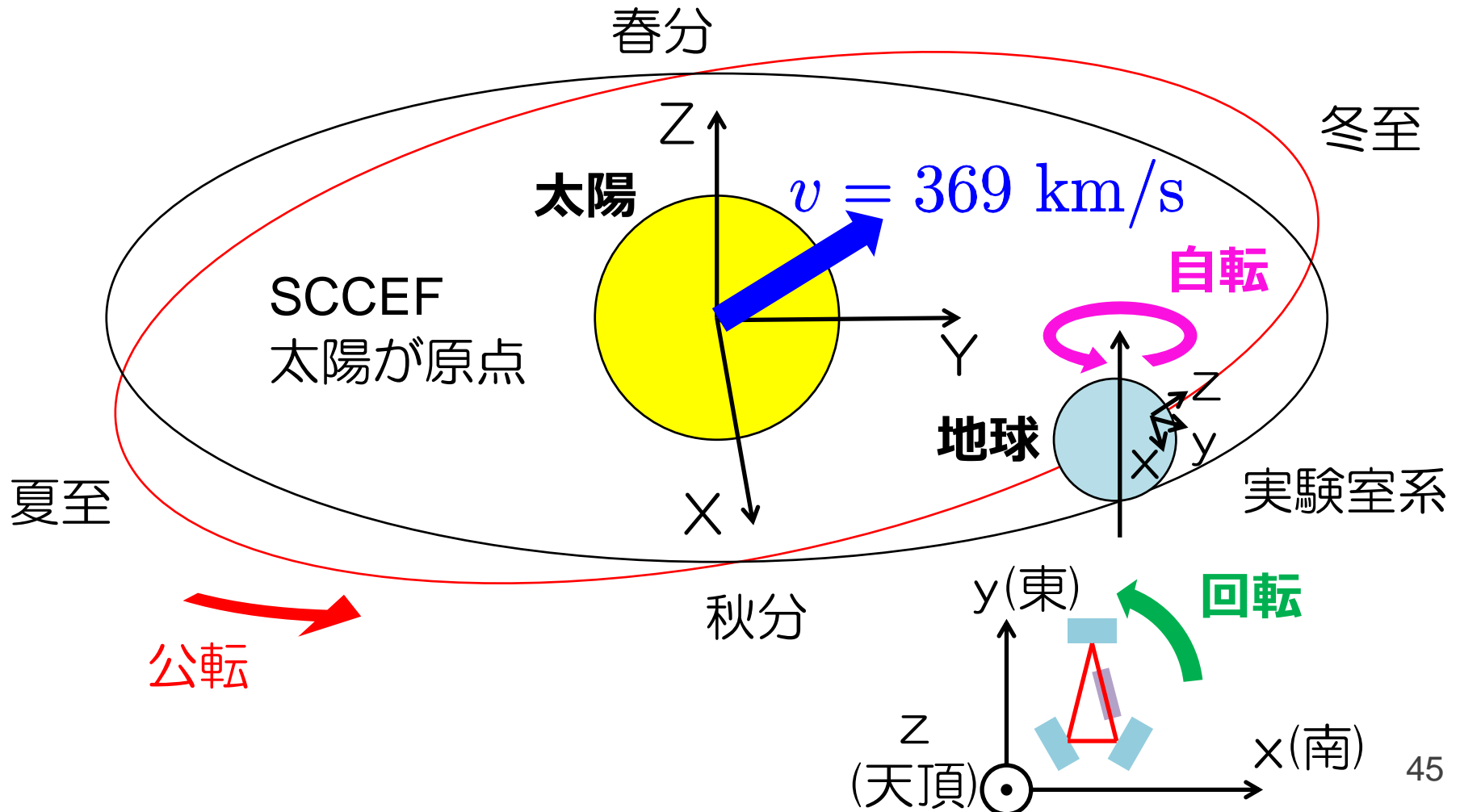
観測データ

- 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 factor: 53% (10月中旬以降は64%)



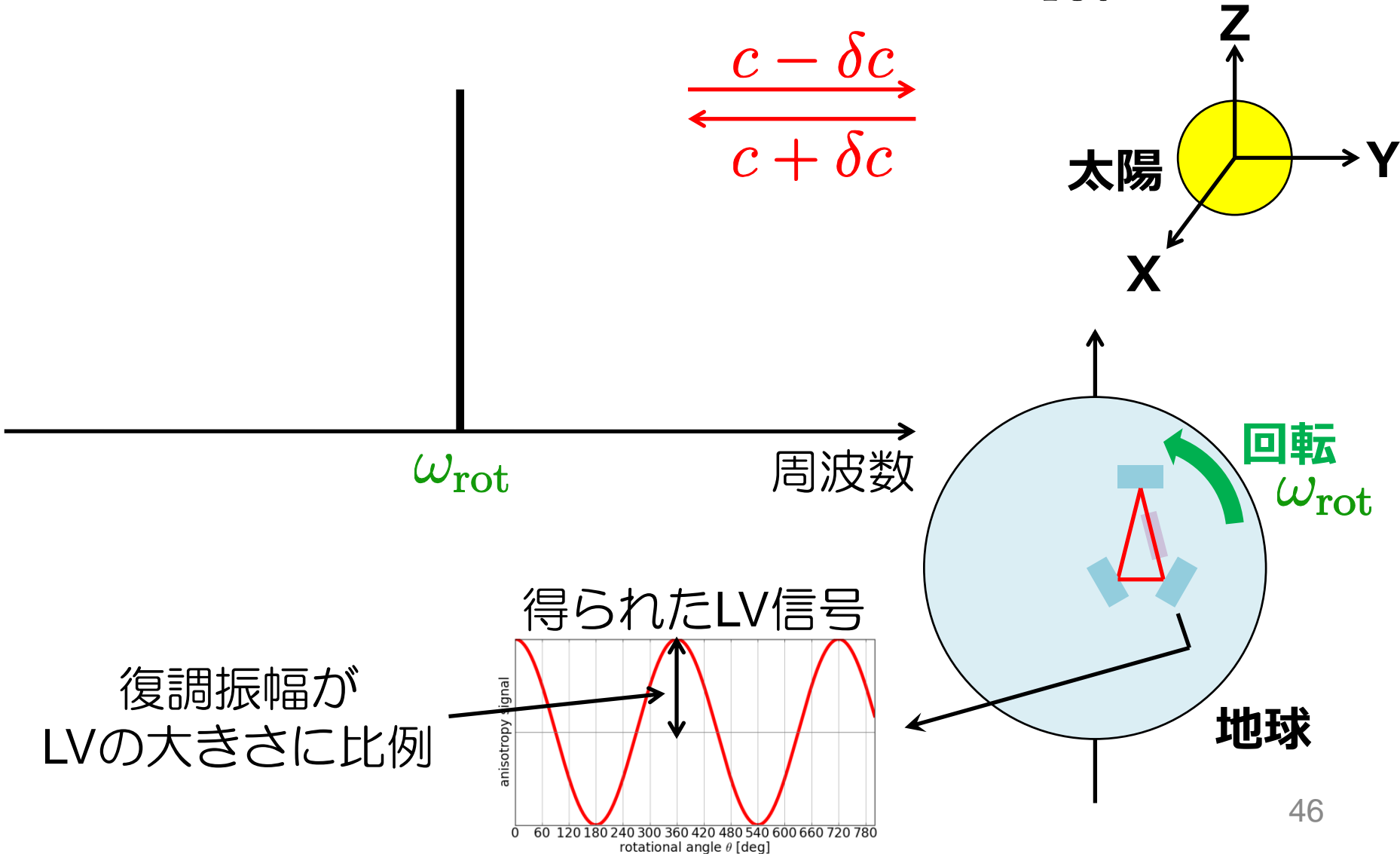
データ解析に用いる慣性系

- Sun centered celestial equatorial frame
- CMB静止系に対して(ほぼ)一定速度で運動



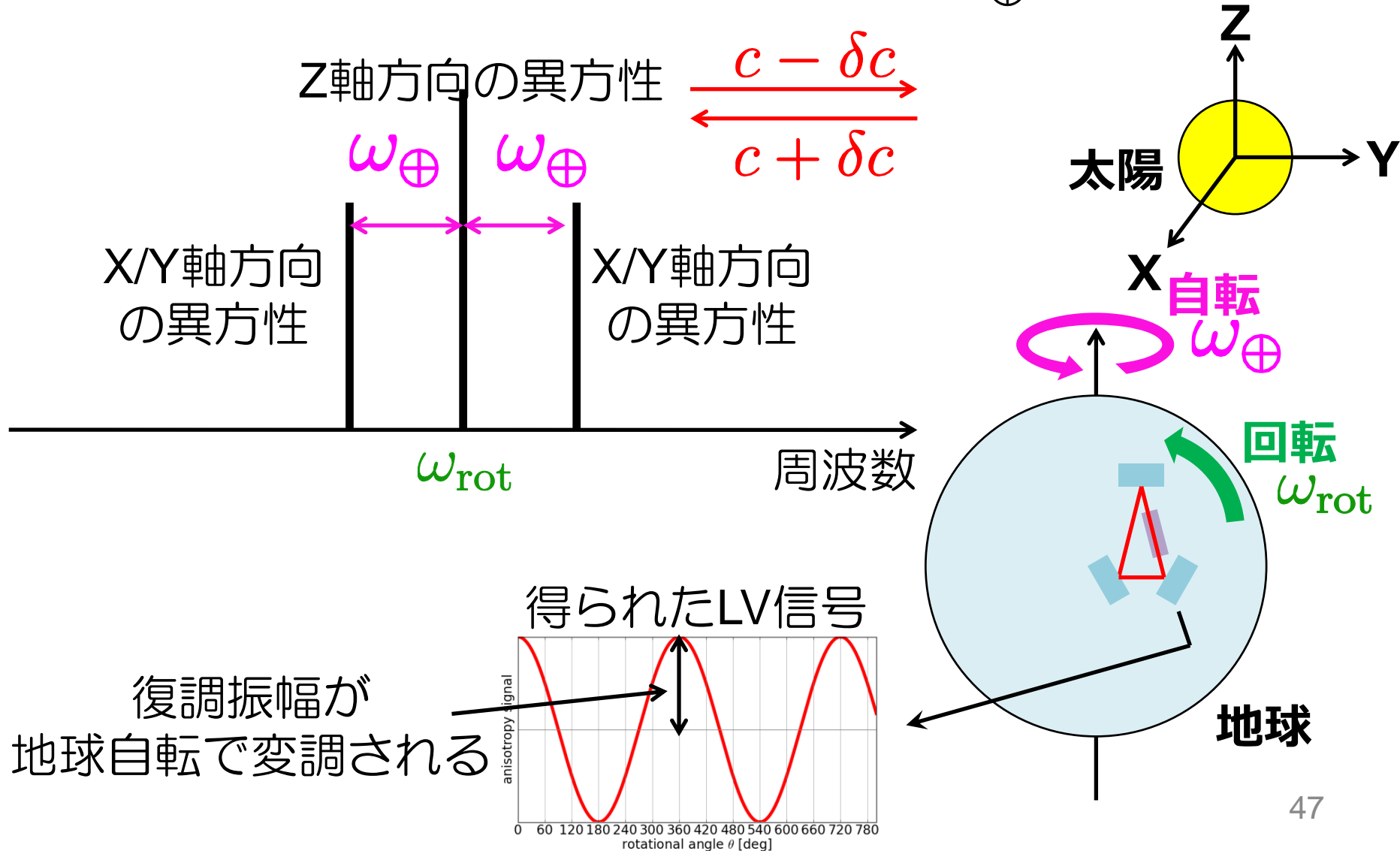
データ解析方法

- まず1回転分のデータを回転周波数 ω_{rot} で復調

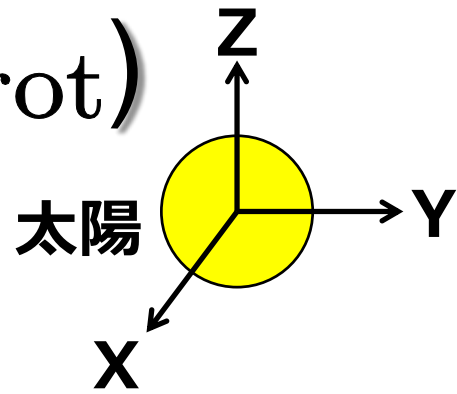


データ解析方法

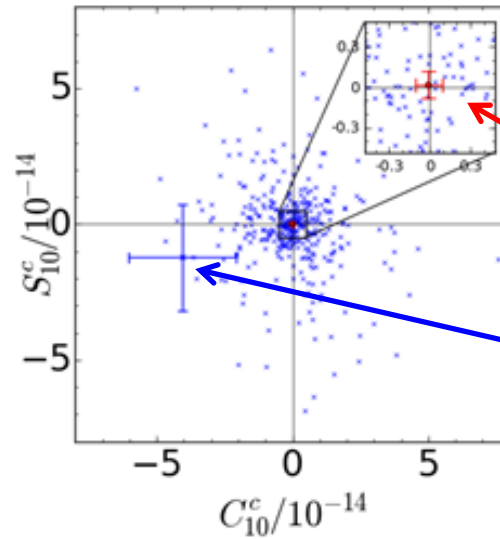
- 次に1日分のデータを自転周波数 ω_{\oplus} で復調



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



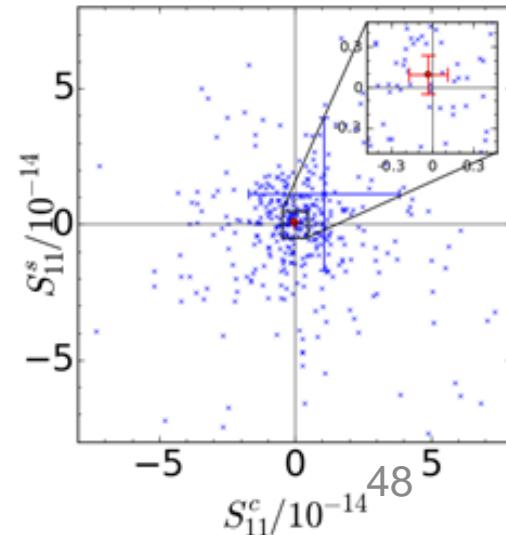
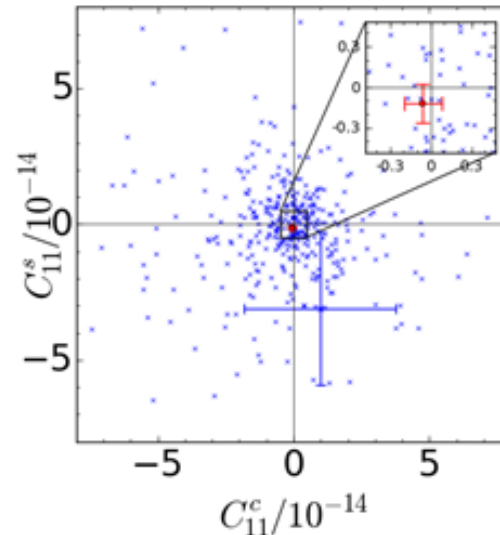
- 得られた上限値

Z $(0.4 \pm 4.4) \times 10^{-15}$

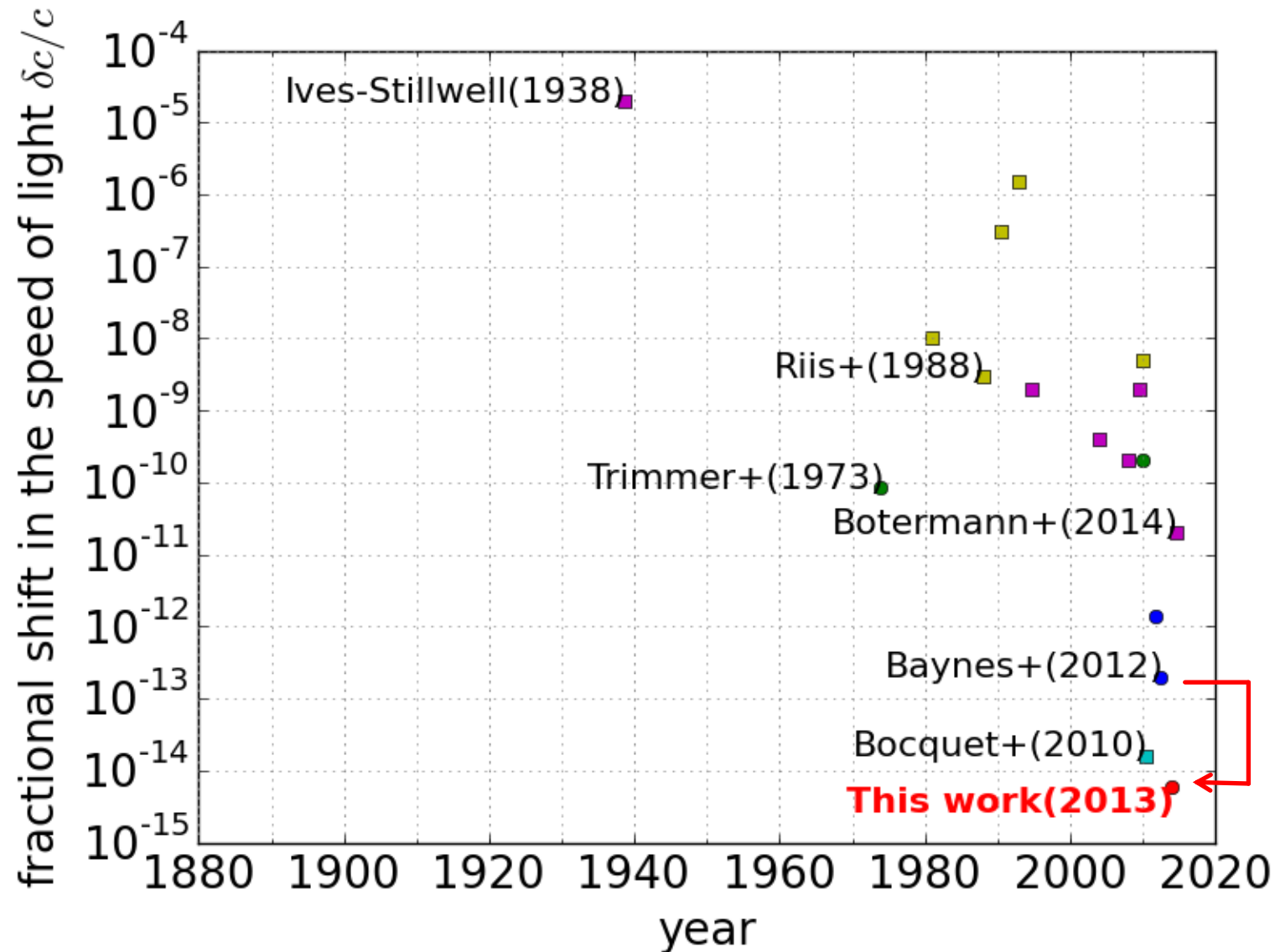
X $(-5.7 \pm 6.3) \times 10^{-15}$

Y $(-3.2 \pm 6.2) \times 10^{-15}$

世界新



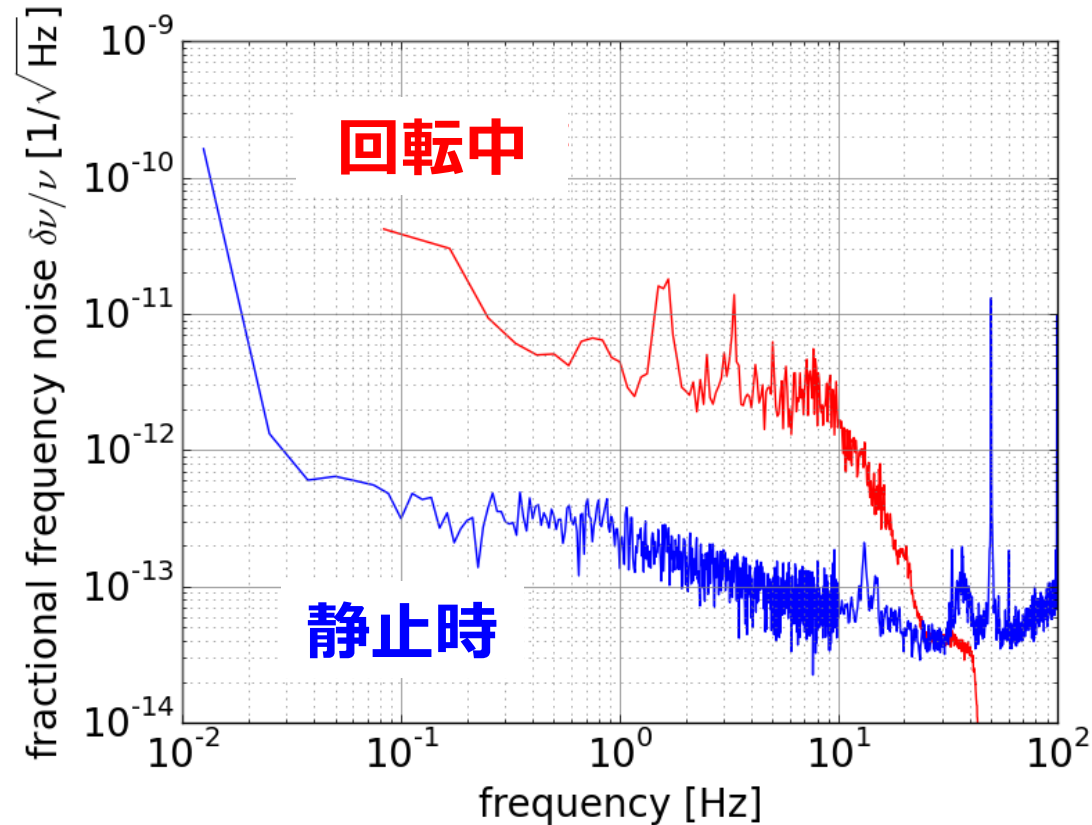
先行研究との比較



1桁以上更新

今後の展望

- 現在の精度は回転に伴う振動で制限されている
- 光学系の改良で振動感度を下げる



- 連続回転により回転安定度向上、周波数分解能向上をはかる
- 2桁の精度向上を目指す

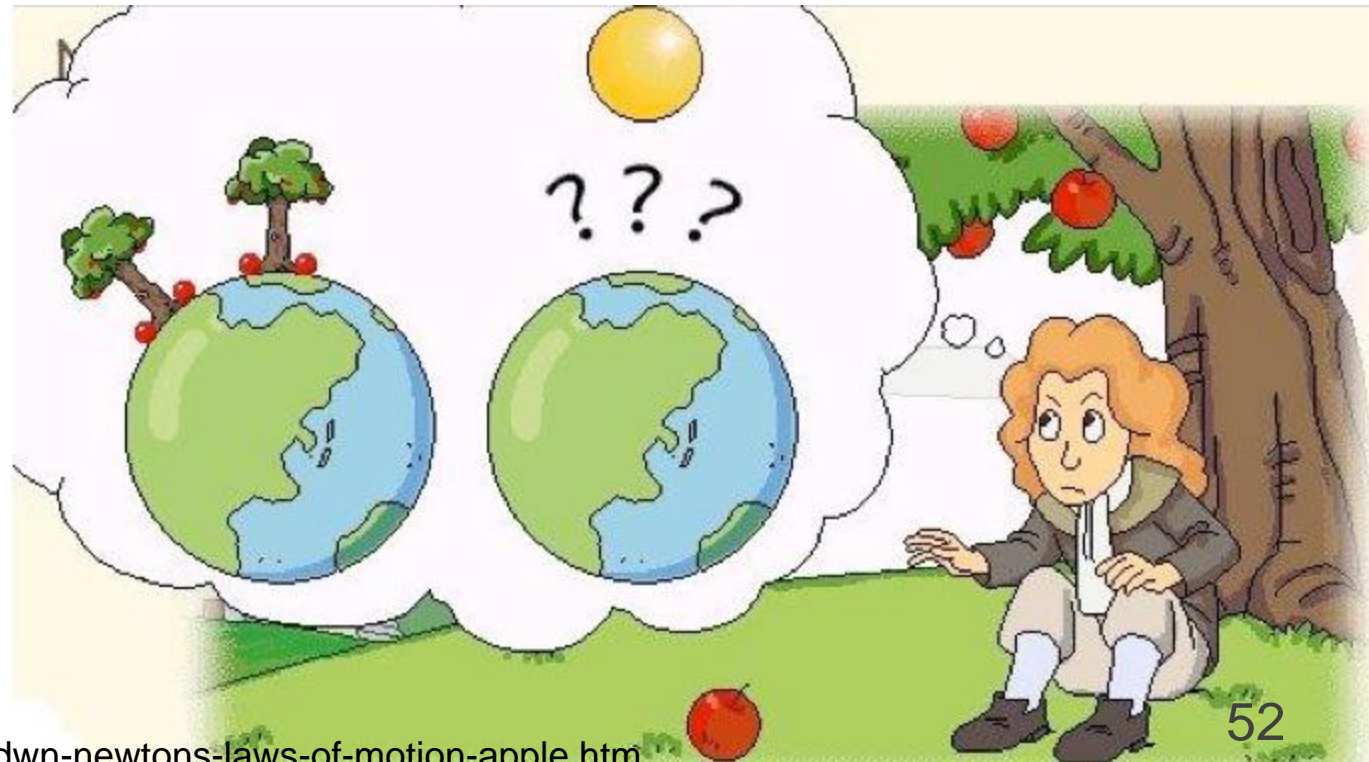
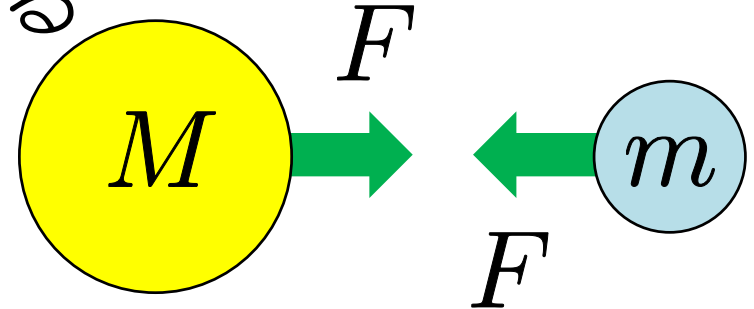
重力逆二乗則

万有引力の法則

- 重力は距離の逆2乗に比例する

$$F = G \frac{Mm}{r^2}$$

万有引力定数

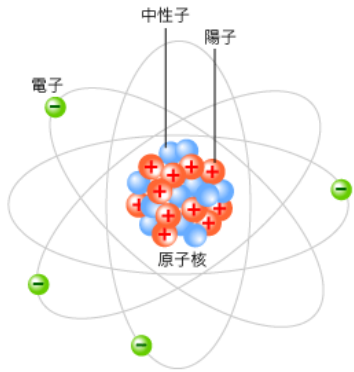


自然界の4つの相互作用

- 自然界の「力」は4つに分類できる



電磁気力



弱い力

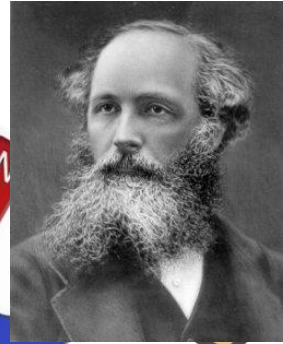
強い力



重力

力の統一

- 物理学の歴史: 力を統一的に理解していく歴史



1864 Maxwell
電気と磁気の統一

電磁気力



1967 Gashow, Salam, Weinberg
電弱理論

弱い力

大統一理論?

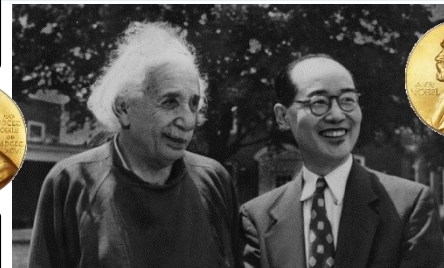
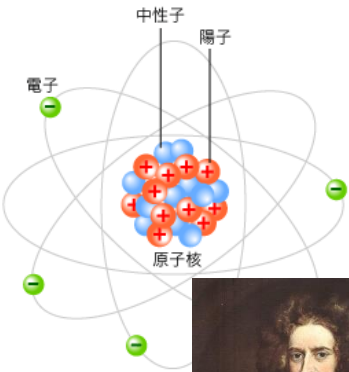
強い力

量子色力学

超ひも理論??

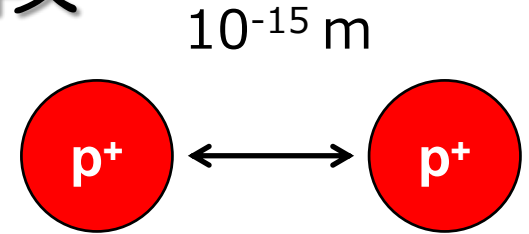
重力

量子重力



力の大きさの比較

- 重力だけ極端に小さい



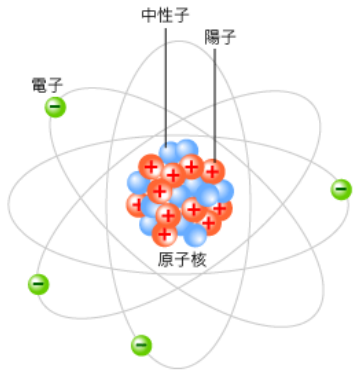
電磁気力

力の大きさの比

10^{-2}

到達可能距離

無限遠



弱い力

10^{-5}

$\sim 10^{-17} \text{ m}$

強い力

1

$\sim 10^{-15} \text{ m}$



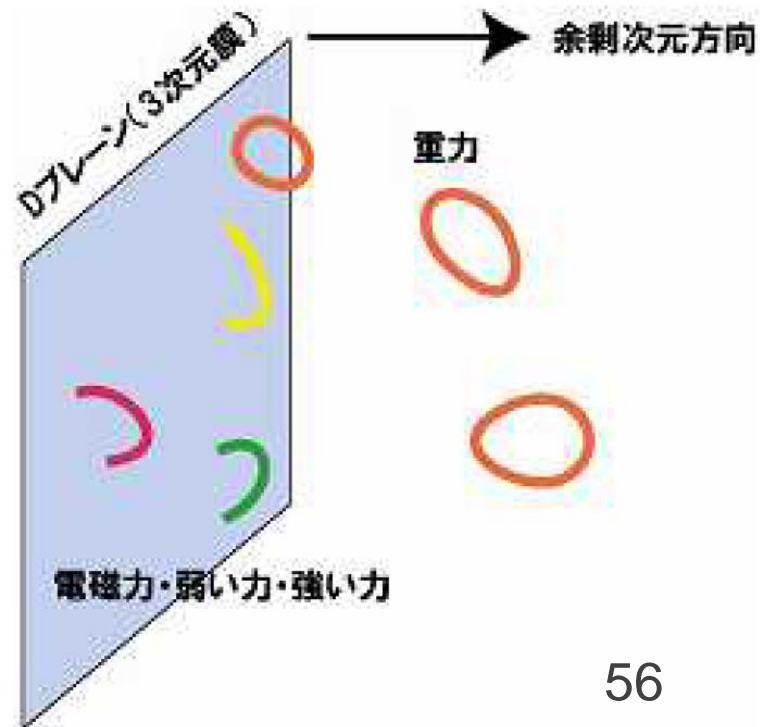
重力

10^{-38}

無限遠

余剰次元

- 超ひも理論
素粒子は点ではなく、弦
- 弦の存在する空間は3次元ではなく10次元
余剰次元は小さくなっていて見えない
- 重力は余剰次元にも
効くために、弱い



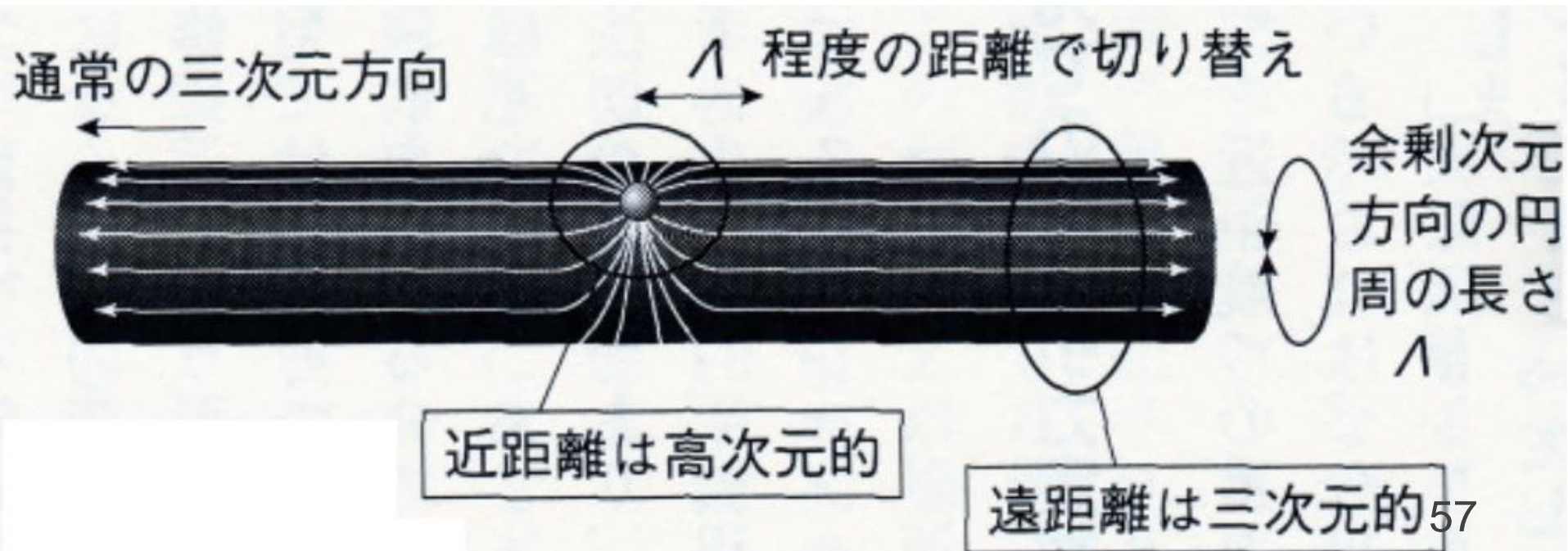
空間次元の数と逆二乗則

- 逆二乗則は3次元空間だから
- 余剰次元の数がdだったら

$$F = G \frac{Mm}{r^2}$$

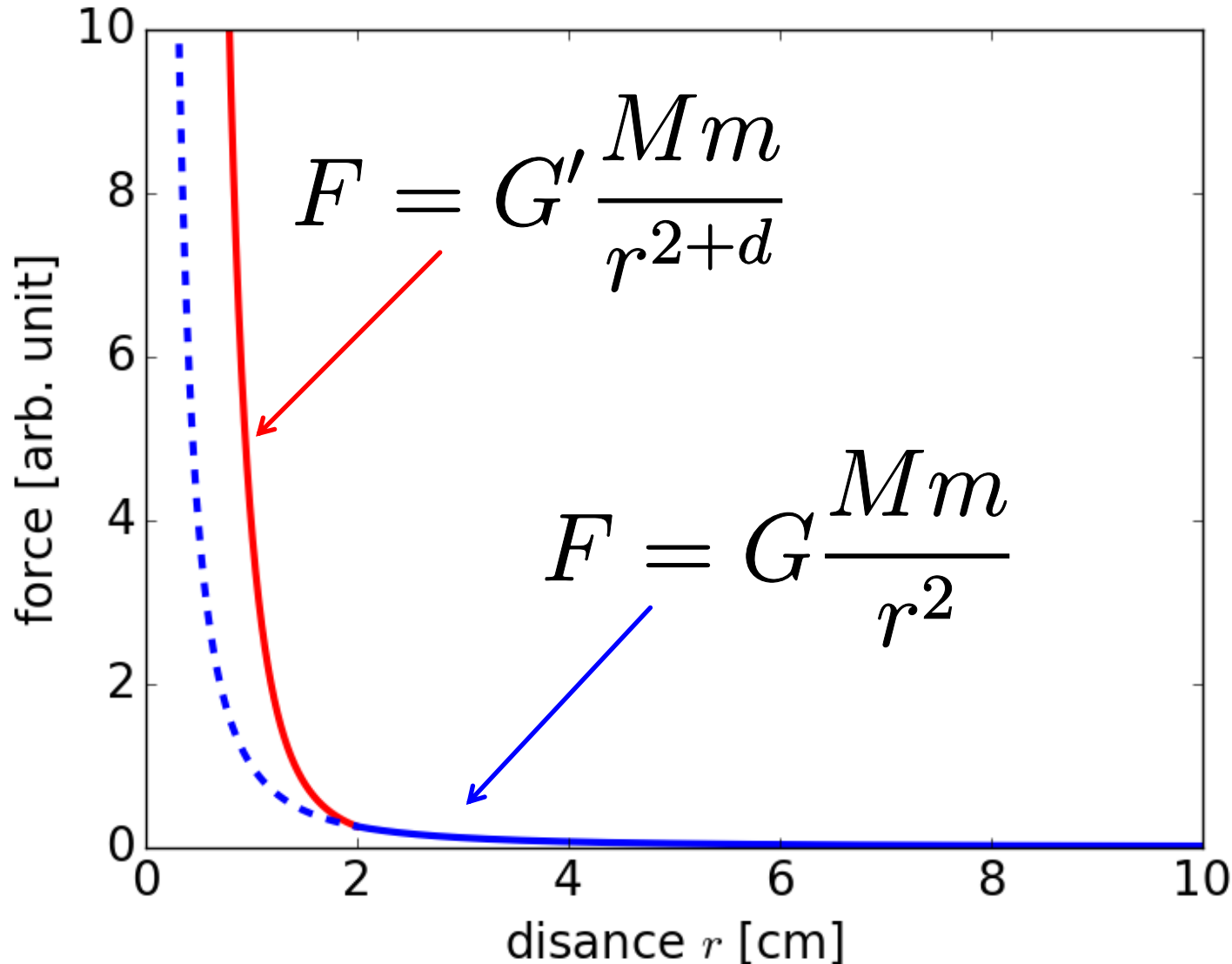
$$F = G' \frac{Mm}{r^{2+d}}$$

Λ以下の距離で



重力の距離依存性

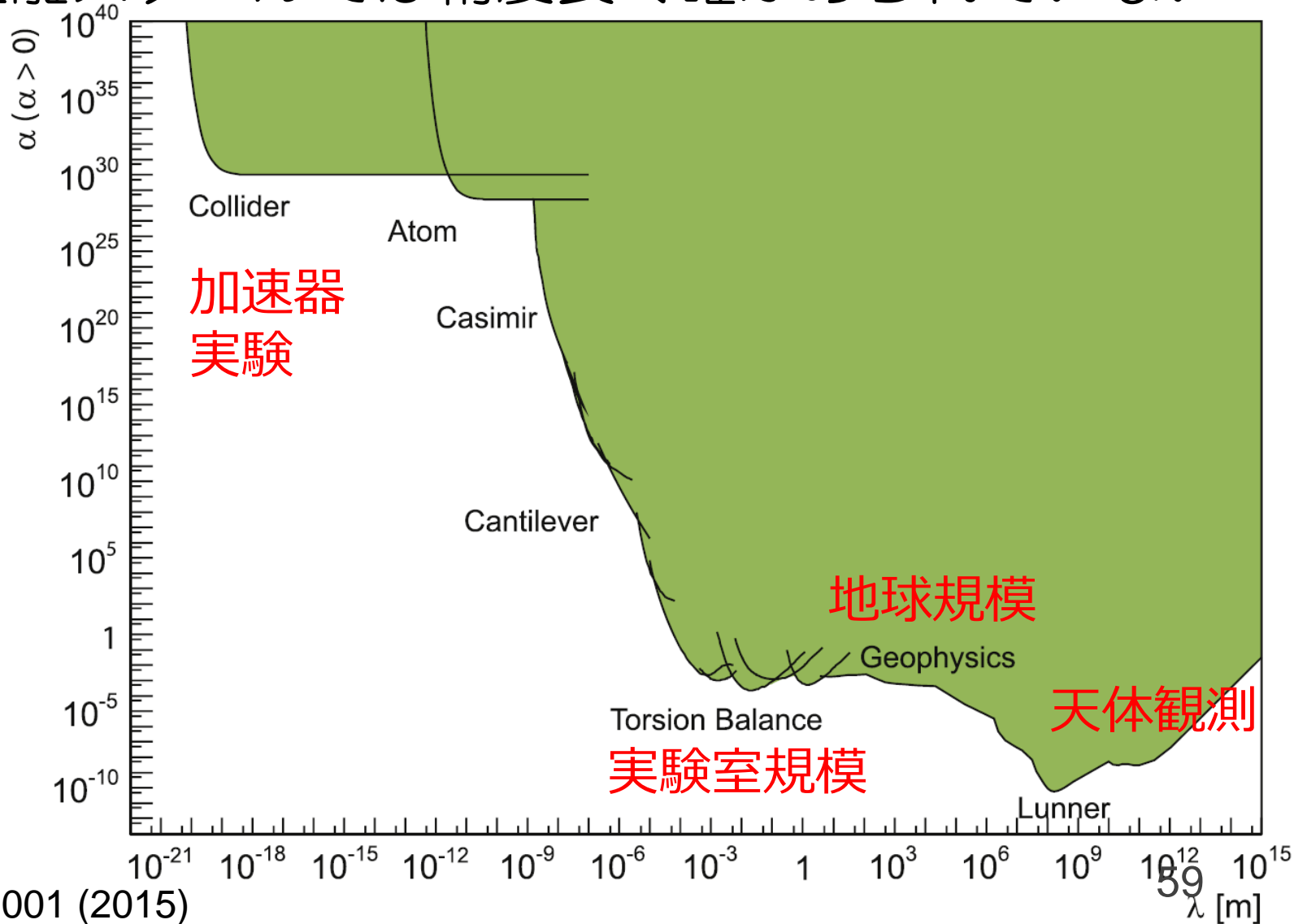
- 近距離で重力が強くなるかも？



$\Lambda = 2 \text{ cm}$
 $d = 2$
の場合

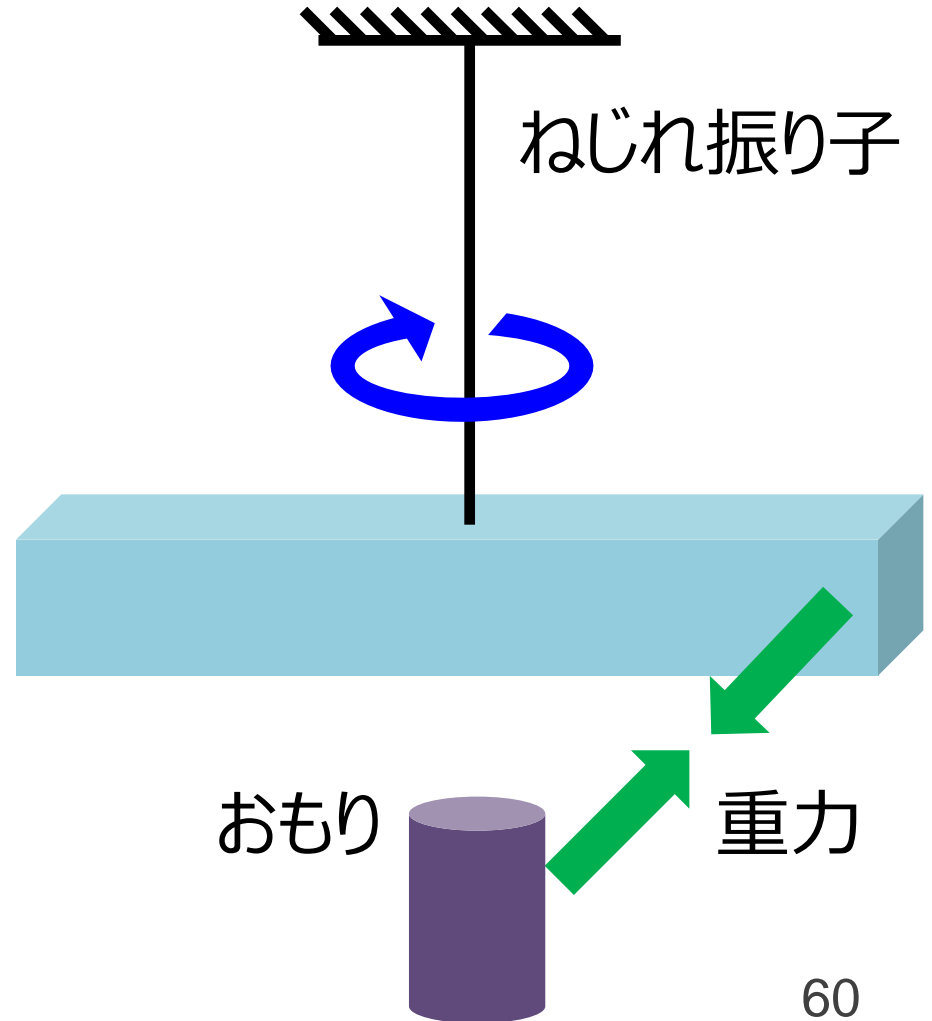
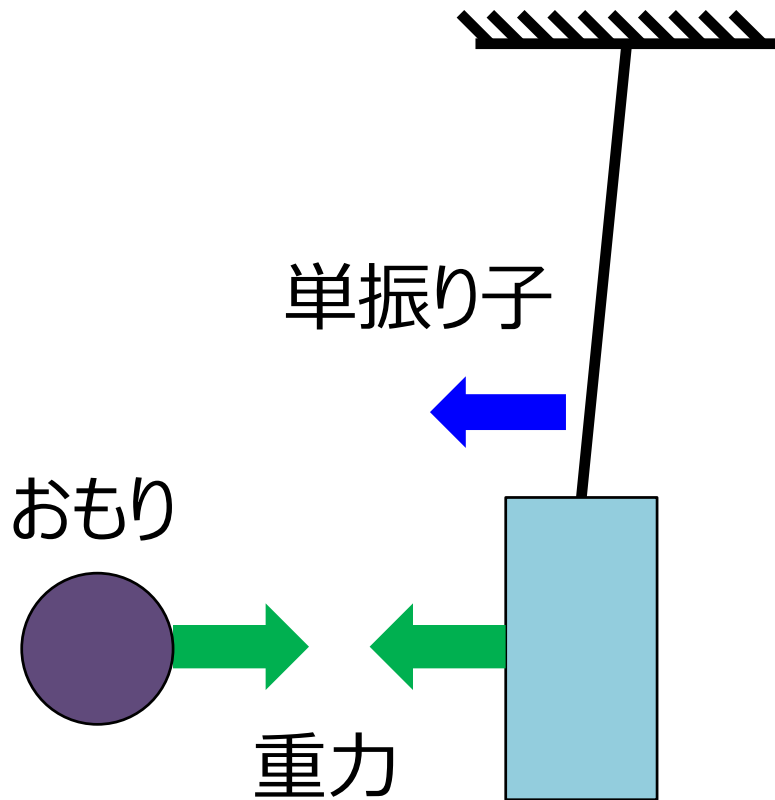
これまでの検証精度

- 近距離スケールでは精度良く確かめられていない



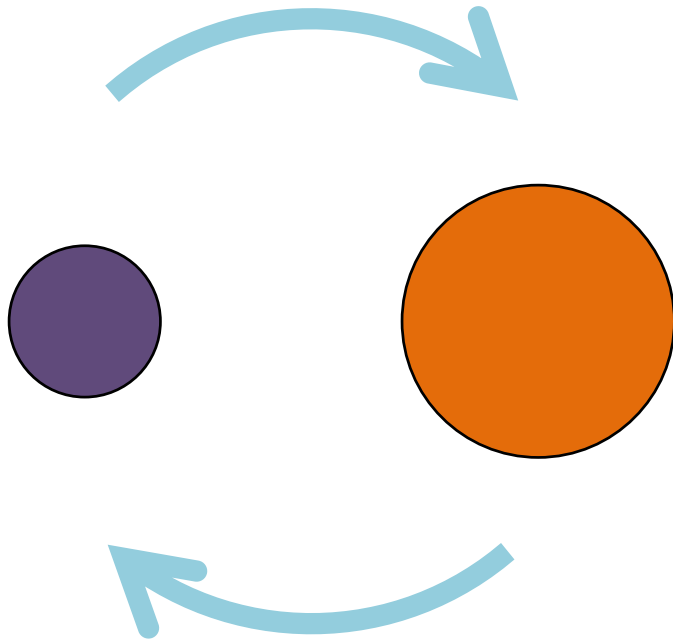
実験の原理

- 振り子におもりを近づける



新しい工夫

- 逆二乗則が成り立つなら、同じ質量の球は同じ重力場
- 成り立たない場合は違う重力場



密度が違う同じ質量の
2つの球を回す

逆二乗則が成り立つ場合は
回転周波数で
重力場が変化
成り立たない場合は
回転周波数の2倍で
重力場が変化

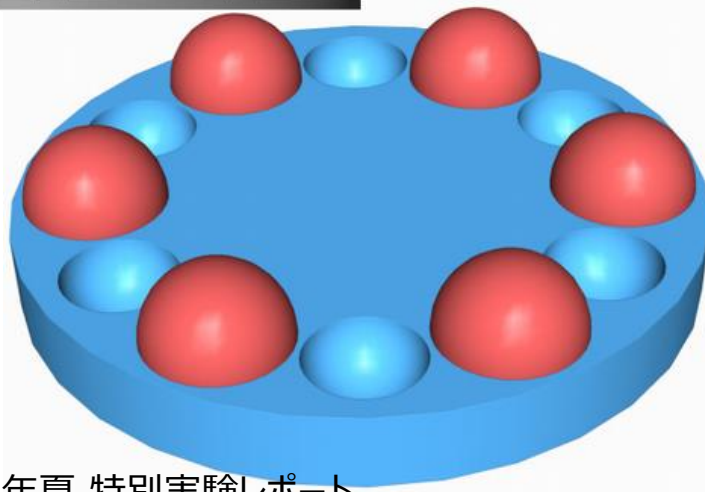
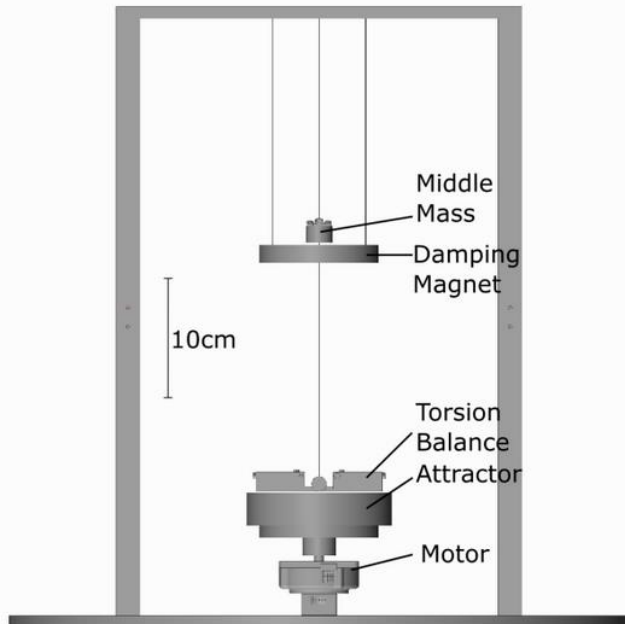
現状

- プロトタイプ実験



現状

- プロトタイプ実験



第7回まとめ

- 物理学には未解決問題がたくさんある
量子重力、力の統一、宇宙の加速膨張

<https://ja.wikipedia.org/wiki/物理学の未解決問題>

- 重力波の観測や、重力波望遠鏡の精密測定技術でこれらの謎に迫ることができる！

3日目のレポート

- 重力波観測でどのようなことがわかるかをひとつ取り上げ、簡単にまとめてください
- 名前と学籍番号、実施日を必ず書くこと！