

論文の内容の要旨

論文題目

Tests of Lorentz Invariance
with an Optical Ring Cavity
(光リング共振器を用いたローレンツ不変性の検証)

氏名 道村唯太

概要

非対称な光リング共振器を用いた新手法の装置を開発し、1年に渡る光速の異方性探査を行った。その結果、異方性に対し最も厳しい上限値を与え、光子の Lorentz 不変性の破れのうち、これまで探査されていなかった成分へ世界初の上限値をつけた。

光速の異方性探査による Lorentz 不変性の検証

Einstein の特殊相対性理論は、Lorentz 不変性が宇宙の基本的な対称性であるということを明らかにした。特殊相対性理論の発表から 100 年以上が経ち、様々な実験的検証が行われてきたが、その破れは未だ見つかっていない。その結果、Lorentz 不変性は素粒子の標準模型や一般相対論といった、基本相互作用に関する全ての理論の基礎となっている。

一方、基本相互作用の統一理論へ向けた理論的研究により、あるエネルギースケールでは Lorentz 不変性が破れている可能性が示唆されている。また、観測された宇宙マイクロ波背景放射の異方性は、絶対静止系の存在の可能性を示した。これらの示唆が動機となり、よりよい精度での Lorentz 不変性の破れの探査が、世界中で行われている。

Lorentz 不変性の検証実験の中で、古くから行われている種類に、光速の異方性探査実験がある。光速の異方性は、光速の角度依存性 $c(\theta, \phi)$ を球面調和関数 $Y_l^m(\theta, \phi)$ によって展開することで、各成分に分解することができる。これらのどの成分を測定することができるかによって、光速の異方性探査実験は 2 種類に分けることができる。双極子成分 ($l = 1$) や六重極成分 ($l = 3$) のような、 l が奇数の成分を探査する奇パリティ実験と、四重極成分 ($l = 2$) や八重極成分 ($l = 4$) のような、 l が偶数の成分を探査する偶パリティ実験である。

偶パリティ実験は、Michelson-Morley の実験に始まり、近年では直交させた 2 つの Fabry-Perot 共振器を用いて、 10^{-17} という高い精度で行われてきた。一方で、奇パリティ実験は通常の光干渉計を用いて行うことができないため、あまり行われてこなかった。しかし

近年、光リング共振器の中に媒質を入れることで非対称性を与え、奇パリティ成分に感度を持たせることが提案され、Baynes らによって実験が行われた。これにより、双極子成分に 10^{-13} レベルでの上限値がつけられた。

我々は光リング共振器を用いた奇パリティ実験をさらに高感度化させることで、より高い精度での異方性探査を行った。また、これまで上限値のつけられていなかった六重極成分の初探査を行った。これは、拡張標準理論と呼ばれる検証理論の枠組みでは、光子の高次の Lorentz 不変性の破れ探査を行うことに相当している。

拡張標準理論では、光子の Lagrangian 密度に Lorentz 不変性を破る項を追加する。破れ項を光子の運動量依存性によって展開したときに、運動量依存性のある項を高次の Lorentz 不変性の破れと呼んでおり、依存性の次数 ($d-4$) が高いほど、大きな l の異方性を生むことがわかっている。

光リング共振器による異方性探査

光速の異方性の双極子成分は、光速の行き帰りの差を生むが、行きが通常より δc だけ速ければ、帰りは δc だけ遅いといった形になるため、光を往復（一周）させた時に生じる位相を調べるだけでは、それらの効果が相殺されてしまう。そのため、これまで行われてきたような Michelson-Morley 型の実験では、双極子成分を探査することはできない。

しかし、光が共振器内を一周する光リング共振器の光路の一部に媒質を入れると、完全な相殺が起こらなくなる。そのため、光を一周させた時に生じる位相が、Lorentz 不変性が破れている場合と破れていない場合で異なることになる。この位相のずれは、光を反時計回りに一周させるか、時計回りに一周させるかで、逆符号となる。したがって、この光リング共振器の反時計回りの共振周波数と、時計回りの共振周波数の差を測定することで、Lorentz 不変性の破れを null 測定することができる。また、共振器長変動は両回りの共振周波数を同相で変化させるため、差動測定することにより、環境変動に伴う共振器長変動に対して高い同相雑音除去を期待することができる。

実験装置の特徴

我々の実験装置は図 1 のようになっており、主に 3 つの特徴がある。まず、光リング共振器に非対称性を導入するための媒質として、屈折率の高いシリコン（波長 $\lambda = 1550$ nm に対し $n = 3.69$ ）を用いたことである。これにより、先行研究のように熔融石英（ $n = 1.45$ ）を用いる場合に比べ、異方性に対して 4 倍程度感度を向上させている。

また、両回りの共振周波数差は、ダブルパスと呼ばれる光学系構成で測定した。レーザー光の周波数は共振器の反時計回りの共振周波数に安定化される。共振器の透過光は全反射鏡（図 1 の mirror 4）を用いて打ち返し、時計回りに再入射させる。このとき、その反射光から両回りの共振周波数差に比例した信号を得ることができ、この信号を用いて Lorentz 不変性の破れ探査を行った。このダブルパス構成により、先行研究に比べてシンプルな構成で、null 測定による共振周波数比較を実現した。

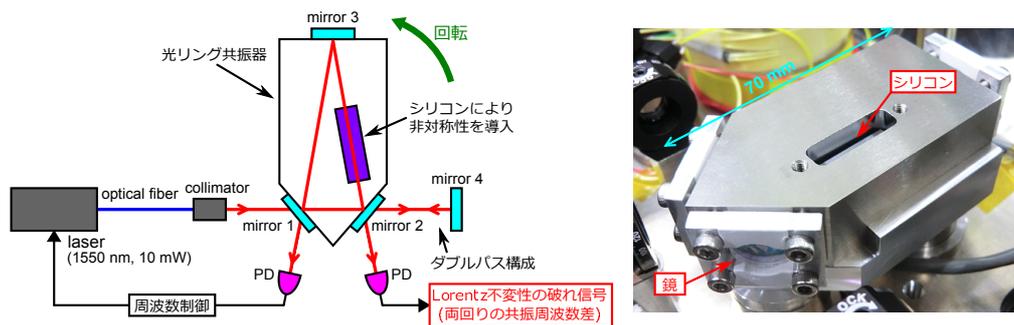


図 1: 左図: 本実験装置の概念図。右図: 非対称光リング共振器。3 枚の鏡がスペーサーに固定されており、光路の一部にシリコンブロックが入っている。

さらに、光リング共振器は Lorentz 不変性の破れ信号を変調させるために $\omega_{\text{rot}} = 30^\circ/\text{sec}$ の速度で回転させた。そのために、光学系の入った封じ切りの簡易真空容器 (30×30×17 cm) とレーザー光源は回転台の上に固定されている。一般的に、地球自転による変調のみを利用する場合に比べ、破れ信号を高い周波数に変調させると、雑音を下げることができる。また、地球自転のみでは自転軸に対称な異方性成分を探索することはできないが、回転台による回転により異方性の全ての奇パリティ成分に感度を持たせることができる。

データ解析とその結果

解析に用いたデータは 2012 年 7 月から 2013 年 10 月の間の 393 日に渡って取得されたものであり、光リング共振器の約 170 万回転分のデータである。このとき、データ取得用ケーブルのねじれを防ぐため、左回転と右回転が交互に繰り返された。ただし、データ解析には Sagnac 効果による影響を避けるため、回転反転時のデータは用いず、回転速度が一定である部分だけを用いた。

測定データはまず、1 回転分ずつのデータに区切り、回転台の回転周波数の整数倍の周波数 $m_r \omega_{\text{rot}}$ で復調した。次に、復調により得られた直交位相振幅のデータを 1 日分ずつのデータに区切り、地球自転周波数の整数倍の周波数 $m_\oplus \omega_\oplus$ で復調した。異方性の双極子成分と六重極成分を探索するため、 $m_r = 1, 3$ 、 $m_\oplus = 0, 1, 2, 3$ とした。

こうして得られた 393 日分の復調振幅の平均をそれぞれ取ることにより、28 個の復調振幅とその統計的不確かさを得た。その結果、ゼロからの 2σ 以上のずれは見つからず、 10^{-15} レベルで有意な異方性はないと結論づけた。なお、見積もられた系統的不確かさは統計的不確かさの 12% 以下であり、回転台の傾きに由来する影響が最も大きかった。

この復調振幅は、異方性の 3 つの双極子成分と 7 つの六重極成分の大きさと結びつけることができる。この関係を用いて、双極子成分と六重極成分の全 10 個の振幅 \bar{y}_i^m に独立な上限値をつけた。双極子成分に対しては $\sim 6 \times 10^{-15}$ 、六重極成分に対しては $\sim 2 \times 10^{-15}$ レベルの上限値であった。双極子成分への上限値はこれまでの上限値と比べて 1 桁厳しいものであり、六重極成分への上限値は初のものであった (表 1)。

表 1: 先行研究と本研究による上限値。上段が $\delta c/c$ に対する上限値であり、下段が拡張標準理論のカモフラージュ係数 $(\bar{c}_F^{(d)})_{jlm}^{(0E)}$ に対する上限値である。Bocquet らによる値は 95% C.L. で、それ以外は 1σ での上限値である。また、Bocquet らによる上限値のみはコンプトン散乱実験による上限値であり、全ての成分に独立な上限値をつけられてはいない。

$l =$	1	2	3	4
	双極子	四重極	六重極	八重極
Eisele+(2009)	測定不可	9×10^{-18}	測定不可	解析なし
Parker+(2011)	測定不可	$\sim 10^{-16}$	測定不可	$\sim 10^{-16}$
Baynes+(2012)	2×10^{-13}	測定不可	解析なし	測定不可
Bocquet+(2010)	1.6×10^{-14} (*)	測定不可	解析なし	測定不可
本研究	$\sim 6 \times 10^{-15}$	測定不可	$\sim 2 \times 10^{-15}$	測定不可
Parker+ (2011)	$d = 6$	測定不可	$\sim 10^8 \text{ GeV}^{-2}$	-
	$d = 8$	測定不可	$\sim 10^{36} \text{ GeV}^{-4}$	測定不可
本研究	$d = 6$	10^3 GeV^{-2}	測定不可	-
	$d = 8$	10^{19} GeV^{-4}	測定不可	10^{19} GeV^{-4}

また同様に、拡張標準理論の枠組みでも解析を行った。復調振幅は拡張標準理論のカモフラージュ係数 $(\bar{c}_F^{(d)})_{jlm}^{(0E)}$ と結びつけることができる。カモフラージュ係数は光子の Lagrangian 密度に追加した Lorentz 不変性の破れ項の係数であり、 d は質量次元を表す。 $d - 4$ が光子の運動量依存性の次数と一致する。有限な、 $d = 6$ のカモフラージュ係数は四重極まで、 $d = 8$ の係数は八重極までの異方性を生じさせる。我々は $d = 6$ の係数に $\sim 1 \times 10^3 \text{ GeV}^{-2}$ 、 $d = 8$ の係数に $\sim 2 \times 10^{19} \text{ GeV}^{-4}$ の上限値をつけた。これらは奇パリティ成分に対する初の上限値であり、これまでの偶パリティ成分への上限値に比べ、それぞれ 6 桁、14 桁更新するものであった。この結果は、Lorentz 不変性の破れが生じるエネルギースケールが $\sim 0.03 \text{ GeV}$ 以上であることを示唆している。

まとめと今後の展望

光路の一部にシリコンを入れた非対称な光リング共振器の両回りの共振周波数を比較することで、光速の行き帰りの差を測定することができる新しいタイプの装置を開発した。この装置を用いて光速の異方性探査を 1 年に渡って行った結果、 $\delta c/c \lesssim 10^{-15}$ のレベルで有意な光速の異方性は見つからなかった。その結果、異方性の双極子成分に対して、最も厳しい上限値を得た。また、六重極成分の初の探査を行い、初の上限値を得た。さらに、光子の高次の Lorentz 不変性の破れのうち、奇パリティ成分に初の上限値をつけた。

現在、実験装置の感度は回転台の振動による雑音で制限されている。回転台の静止時の雑音に比べ、回転時の雑音が 2 桁大きいことから、十分な防振や振動感度の低減によって 2 桁の感度向上が見込める。これにより、 10^{-17} レベルでの異方性探査が可能になるであろう。また、衛星搭載や信号取得の無線化による連続回転の実現により、さらに数桁の感度向上が期待できる。