2011年7月27日

#### レーザー 干渉計を 用いた Lorentz 不変性の 検証



#### 近況報告

- 6/30 ミーティングで光速の行き帰り宿題 [光速]
   7/1 穀山さんが三角共振器の論文を見つける
   7/2 大前さんなどの助言により偏光ロック、double passという構成で方向性が決まる。実現可能だし、行けそうと盛り上がる
- 7/5 AICレクチャー@東工大 宗宮研 [一般]
   実験室2部屋。実験装置何も無い。物理の実験室っぽくないけど、居心地は良さそう。
- 7/5-8 bLCGT ASC再計算、Amaldiのポスター作り [LCGT] g-factorを変えるとどう変わるか。pitchの計算ばかりしていたが、yawはどうか。不安定モードのピークによるRMSの増大。ロスが10ppm変わる と腕内パワーが20%くらい変わって輻射圧の大きさも変わってくる。いずれにせよnegativeの方が不安定性小さくなるのでASC的に安全だろう。
- 7/7 東芝京浜事業所見学 [LCGT] [一般] E大なコイル巻きの機械。特にクリーンルームは見れなかった(クラス1000のものを作る計画があるだけ)。単結晶引上げ装置用超電導電磁石
- 7/10-15 Amaldi 9 [LCGT] [一般]

Poster award逃す(輻射圧の森さん受賞)。城巡りがよかった。食事もケーキもおいしかった。ネットワーク環境、電源環境が悪かった。

K. Yagi, A. Nishizawa: 重力波だけでstandard sirenになるらしい(加速膨張項を使い、zの微分を見る)。

A. Suttson: デジタル的に変調の+-を入れ替えてencode、復調するときにそのキーを使ってdecodeすることにより各鏡の変位を分離することができるらしい(digitally enhanced homodyne interferometry)。

- C. Affeldt: GEOのハイパワー化は大変らしい(散乱光がローカル制御とカップル、熱レンズ、BSに20kW)。
- L. Barsotti: LCGTもスクイージング考えないわけにはいかないでしょう。スクイージングレベルよりロス減らす方が重要な印象。
- K. Somiya: 低温は究極的だが、そう簡単に高感度化に繋がらない。宗宮さんの発表だけ見るとsiliconにすればいい気がする。
- L. Piccirillo: なんか重力子がある装置を通ると光子に変化して5 GHzの重力波が検出できるらしい。まじか。
- S. Hild: ETのconceptual design study終了(July 2011 http://www.et-gw.eu/etdsdocument)。

B. Sathyaprakash: Science From ET。ETすごい。

P. McNamara: LPFがsaddle pointを通過する10^3秒間の観測でMOND(銀河の回転速度分布をダークマターを仮定しないで解決できる)が検証できるらしい(DPFは地球周回軌道なのでできない)。

C. Killow: LISAのoptical benchの話。53.4kg ! 2つのファイバを切り替えるユニット。LISAは回転しているので少し先の方向に光を打ち返すメカニズム(Point Ahead Angle Mechanism)。オウムガイのような beam dump。QPDでビームの方向を較正する装置が新しくなった(New Calibrated Quadrant Photodiode)。

M. Vallisneri: LISA is not dead。ESAは続ける(NGO=New Gravitational wave Observatory)。ESAだけの予算でできるよう縮小。NASAも宇宙GWサイエンスは推し進める。 S. Rapoport: オーストラリアのSkyMapperの話。可視光、5.7平方度。ものすごい数を一瞬で解析し、Follow-up for transient GWに最適らしい。自信満々ぶりがすごかった。

- 7/14 モノリシック三角共振器のデザイン [光速] こちら側のデザインは確定。シグマ光機に連絡。返事まだ。
- 7/21-22 デジタルセットアップ講習@柏 宮川さん/Joe [LCGT] [一般]

Joeの成長。去年よりも洗練されて、かっこよくなってる。LCGTもよりサボれるシステムにしよう。セットアップはそんなに大変じゃなさそう。 ネットワークもないし。問題は起きるだろうが、全部LCGTやaLIGOにつながる。日本で実験で使われた例はまだないので、坪野研がいいデモンス トレーションになる。簡単だよと外に示そう。Simulated plantはaLIGOより開発遅れてるが、LCGTにはまだ時間があるので是非活用を。

- 7/22-bLCGTのテストマスが直径25cm→22cm説、Sidles-Sigg不安定性計算 [LCGT] サファイア入手の都合。30kg(I=0.17kgm^2)から23kg(I=0.11kgm^2)に軽くなるので輻射圧不安定性が増すかも。計算中。あんま変わらなそう。
- 7/27 輪講 [光速]

目次1

• 理論

特殊相対性理論とLorentz不変性 Lorentz不変性の破れと拡張理論 (RMS, SME) 干渉計による検証実験の基本原理

- 過去のMichelson-Morley型実験(計画含む)
   空間の等方性検証
- MM型以外の検証実験
   SMEパラメータ
   IS型実験
- 今回の実験



- "Modern Tests of Lorentz Invariance" D. Mattingly: Living Rev. Relativity, 8 (2005) 5. http://www.livingreviews.org/lrr-2005-5
- "Special Relativity: Will It Survive the Next 101 Years?" (Lecture Notes in Physics) S. Herrmann et al.: Lect. Notes Phys. 702 (2006) 385. M. E. Tobar et al.: Lect. Notes Phys. 702 (2006) 416.
- Wikipedia

http://en.wikipedia.org/wiki/Michelson-Morley\_experiment http://en.wikipedia.org/wiki/Test\_theories\_of\_special\_relativity 充実したReferences

- 「空間の等方性検証実験」 関谷淳: 東京大学 修士論文 (2000)
- 「2台のFabry-Perot共振器を用いた空間の異方性の測定」 上田晃三: 東京大学 修士論文 (1999)



#### 特殊相対性理論

- 2つの原理
  - 真空中の光速は観測者の速度によらず一定 どの慣性系においても物理法則は不変
- Lorentz不変性はMaxwell方程式に限らず、宇宙の基本的な対称性である

# Lorentz不変性 素粒子の標準理論、一般相対性理論に不可欠しかし量子重力理論では破れる可能性も?

#### Lorentz不変性の破れ

- 量子重力理論では高いエネルギースケールで Lorentz対称性が破れてもいい
- 電弱のエネルギースケール 10<sup>4</sup>
   Planck質量 10<sup>4</sup>
   GeV
  - →10^{-17}程度のオーダーで破れてても おかしくない D. Colladay and V. Alan Kostelecký (1998)
- ・ CMBの観測から、絶対静止系がある可能性
   が示唆されている

(CMBが完全に等方的になるCMB静止系)

• 実験的に確かめよう

#### **RMS framework**

http://rmp.aps.org/abstract/RMP/v21/i3/p378\_1

http://www.springerlink.com/content/q00455526v57n113/

- Robertson(1949), Mansouri-SexI(1977)
- Lorentz不変性検証のため、Lorentz変換を拡張
   した座標変換(3つのパラメータ)
- 仮定
   宇宙には絶対静止系Σが存在
   Σでは光速は伝播方向、光源の速度によらない

#### **RMS framework**

 RMSではLorentz変換は
 2点の時計合わせにEinsteinの同期法を用いた場合。
 Einsteinの同期法では光を往復させて行い、往復で光速は 変わらないと仮定する(ここで仮定が入ってしまっている)。

$\int ct $		$a\gamma^2$	$a\gamma^2(v/c)$	0	0	$\int cT$
x	=	-b(v/c)	b	0	0	X
y		0	0	d	0	Y
$\left( \begin{array}{c} z \end{array} \right)$		0	0	0	d	$\langle z \rangle$

- 特殊相対論では  $a = \gamma^{-1} = \sqrt{1 - (v/c)^2} = 1 + \alpha (v/c)^2 + O((v/c)^4)$   $b = \gamma = 1/\sqrt{1 - (v/c)^2} = 1 + \beta (v/c)^2 + O((v/c)^4)$  $d = 1 = 1 + \delta (v/c)^2 + O((v/c)^4)$
- Lorentz不変性が破れていれば、(α, β, γ)が特殊 相対論(-1/2, 1/2, 0)からずれる→実験的に測定

#### **RMS framework**

• RMS座標変換を使うとある慣性系Sでの光速は

$$c(\theta)/c = 1 + \left(\frac{1}{2} + \delta - \beta\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{2} \sin^{2} \theta - (1 + \alpha - \beta) \left(\frac{v}{c}\right)^{2}$$
  
空間の異方性を表すパラメータ  
Michelson-Morley型実験で測定  
(今回のメイン)



光速のv依存性を表すパラメータ Kennedy-Thorndike型実験で測定

> Lorentz不変だったら どちらも0のはず

## Standard Model Extension

http://prd.aps.org/abstract/PRD/v58/i11/e116002

- D. Colladay and V. Alan Kostelecký (1998)
- RMS理論では不十分 特殊相対論に限られている 何を基準にするかと結びついていない

(セシウム時計を使った実験と、水素時計を使った実験で比較できない)

→(minimal) Standard Model Extension

- Lorentz不変性を破る項を加えた標準理論 RMS理論もその中に含む CPT対称性の破れまで含む
- ややこしいので以下では当分RMSで考える

### 干渉計によるLorentz不変性検証

- ・光速の変化を干渉縞として測定  $\frac{\Delta c}{c}$
- 空間の異方性 (Michelson-Morley type) 直交する光速の差を測る 腕の長さが等しいMichelson干渉計 または直交する2つの光共振器 回転させて、その2倍の周波数成分を検出
- 光速のv依存性 (Kennedy-Thorndike type)
   腕の長さに差をつけたMichelson干渉計
   地球の公転などによって絶対静止系に対する
   速度が変わることを利用する

#### **Michelson-Morley Experiment**

腕の長さの等しいMichelson干渉計



#### Kennedy-Thorndike Experiment

• 非対称Michelson干涉計



#### ちなみに

- RMS理論ではα, β, δの3つのパラメータで Lorentz不変性の破れを表したのに実験はMM 型とKT型の2つしかないの?

   →IS型の実験というのがある(1/2+αを測定)
   (通常、干渉計を使わないので後述)
- ・ 光速を表す式ではα, β, δの入っている係数は
   2つしかなかったけど?

→この式ではEinsteinの同期法を前提としており、往復の光速の差が等しいことが前提。干渉計を使った実験では通常、往復の光速の差を測定できないので問題ないが、このように同期法に依ってしまうところがRMS理論の弱点。(→SMEなどが必要)  $c(\theta)/c = 1 + \left(\frac{1}{2} + \delta - \beta\right) \left(\frac{v}{c}\right)^2 \sin^2 \theta - (1 + \alpha - \beta) \left(\frac{v}{c}\right)^2$  15

#### 空間の異方性を表す指標

- Robertson計量を用いた場合
  - $\left| \frac{g_2}{q_1} 1 \right| = \frac{\Delta c}{c}$  わかりやすい。 でも最近の論文ではRMSかSMEを使うよう。
- RMS framework

 $\begin{vmatrix} \frac{1}{2} + \delta - \beta \end{vmatrix} = \frac{\Delta c}{c} \left( \frac{v}{c} \right)^{-2} \quad \text{vを知らないといけない}.$ CMBの観測結果(368km/s)を用いるのが-般的。v/c~10^{-3}

 SME framework vに依存しない: $\kappa_{e-}^{XY}$ ,  $\kappa_{e-}^{XZ}$ ,  $\kappa_{e-}^{YZ}$ ,  $\kappa_{e-}^{XX} - \kappa_{e-}^{YY}$ ,  $\kappa_{e-}^{ZZ}$ Vに依存:  $\kappa_{o+}^{XY}$ ,  $\kappa_{o+}^{XZ}$ ,  $\kappa_{o+}^{YZ}$  より現代的。あらゆる実験と比較可能。 SMEのLagrangianのうち、光子の項の パラメータ。Δc/cのオーダーでevenパ 他にもいろいろ ラメータが求まる。後述。 TH $\epsilon\mu$ , c-squared,  $\chi g$  framework..... 16

#### 過去のMichelson-Morley型実験



### Michelson (1881)

- Δc/c ~ 10^{-9}
- エーテルが存在すれば0.04フリンジのずれが 見えるはずが、最大でも0.02フリンジしか見 えなかった
- プロトタイプ実験
- ・回転中に腕がたわむ。特定の方向でそれが大きい。

#### Michelson and Morley (1887)

A. A. Michelson and E. W. Morley: Am. J. Sci. **34** (1887) 333. http://en.wikisource.org/wiki/On\_the\_Relative\_Motion\_of\_the\_Earth\_and\_the\_Luminiferous\_Ether

#### • エーテルの「風速」測定



#### Michelson and Morley (1887)



### Michelson and Morley (1887)

- Δc/c ~ 10^{-10}
- エーテルが存在すれば0.4フリンジ、見えたのは<0.01フリンジ</li>
- 腕長を1.2mから11mに
- ・ 地下の石室に建設(温度安定、振動軽減)
- 水銀プールで回転しやすく
- 肉眼によって干渉縞を測定

#### MMの実験以後

- 様々な工夫、繰り返し実験
   Wikipedia参照
- ・メーザー(1954)、レーザー(1960)の発明
   →感度の飛躍的な向上
- 省略するが面白そうな実験

Roy J. Kennedy(1926)

A Refinement of the Michelson-Morley Experiment 半波長分の段差をつけた鏡を使うらしい?

T. S. Jaseja, A. Javan, J. Murray, and C. H. Townes (1964) Test of Special Relativity or of the Isotropy of Space by Use of Infrared Masers

メーザーを初めて利用、直交したメーザーの周波数を比較 C. H. Townesはメーザー、レーザーの発明をした一人 (系統的な周波数シフトでそこまで感度は出ず。Δc/c~10^{-11})<sub>23</sub>

### Brillet and Hall (1979)

http://prl.aps.org/abstract/PRL/v42/i9/p549\_1

回転するFPにロックしたレーザーと回転させないレーザーの周波数のビート



#### Brillet and Hall (1979)

- $\Delta c/c = (3\pm 5) \times 10^{-15}$
- 約100日の間に12h測定23回、24h測定4回
- これまでの記録(Jaseja et al.(1964))を3桁更新
- 2003年まで記録破られず(!)
- 回転軸の傾きによる重力伸縮が感度を制限

#### 2000年代の実験-登場人物

- Wolf (BIPM→Observatoire de Paris)
- Stanwix, Tobar (University of Western Australia)
   <u>http://www.physics.uwa.edu.au/research/frequency-standards2</u>
   Frequency Standards and Metrology Research Group
   周波数標準、マイクロ波共振器、量子計測
- Müller (Humboldt-Universität zu Berlin → Stanford)
- Herrmann (Humboldt-Universität zu Berlin) <u>http://www.physik.hu-berlin.de/qom/</u> Quantum Optics and Metrology LISAの光学系と周波数安定化、原子干渉計
- Schiller, Eisele (Heinrich-Heine-Unisersität Düsseldorf) <a href="http://www.exphy.uni-duesseldorf.de/">http://www.exphy.uni-duesseldorf.de/</a> Quantum Optics and Relativity レーザー分光、衛星搭載の光時計

## Wolf et al. (2003)

http://prl.aps.org/abstract/PRL/v90/i6/e060402

- cryogenic sapphire oscillatorとhydrogen maserの周波数を比較
- whispering gallery mode利用
- maserはセシウムとルビジウムの原子泉時計 で安定化
- ・ 非回転(地球の自転と公転を利用)
- ・約1年に渡って37日間分のデータ

#### Wolf et al. (2003)

- $\Delta c/c \sim 10^{-15}$ • RMSパラメータ  $\frac{1}{2} + \delta - \beta = (1.5 \pm 4.2) \times 10^{-9}$   $1 + \alpha - \beta = -(3.1 \pm 6.9) \times 10^{-7}$  $\kappa T パラ \times -9$
- 温度変動が感度を制限 (日中変動が0.04℃、半日変動が0.01℃)

#### Müller et al. (2003)

http://prl.aps.org/abstract/PRL/v91/i2/e020401

• 直交した低温光共振器(CORE)に共振する光 のビート レーザーのピエゾの共振を利用して 500kHzで位相変調。 その3倍の周波数で復調するPDH法。 CORE, sapphire, L=3cm, Finesse: 10<sup>5</sup> (残留強度変調の影響を減らすため) North CORE servo PD ↔ BS aser CORE 1 G PD G G Nd:YAG 4K cryöstat (λ=1064nm)  $v_x$ BS  $\nu_{v}$ to beat galvanometer to beat ser 2 (ビーム方向の servo liquid Helium 制御に使う) ά

#### Müller et al. (2003)

http://www.exphy.uni-duesseldorf.de/ResearchInst/WelcomeFP.html



### Müller et al. (2003)

- $\Delta c/c = (2.6 \pm 1.7) \times 10^{-15}$
- RMSパラメータ  $\frac{1}{2} + \delta \beta = (2.2 \pm 1.5) \times 10^{-9}$
- SMEパラメータ ~ 10^{-15} (evenのもの)
- 390日以上に渡って3461時間分(144日間分)の データ
- ・ 非回転(地球の自転利用)
- Brillet-Hallと違って同じ光共振器を2つ使うことで感度を倍にするとともに、CMRRに期待
- 何が感度を制限したかは特に議論なし

#### Stanwix et al. (2005)



#### Stanwix et al. (2005)

http://moriond.in2p3.fr/J07/trans/wednesday/tobar.pdf

• 回転機構



cryogenic dewer (6 K±mK)

0.056 Hzで回転(T=18 sec) microprocesser controlled stepper motor



#### Stanwix et al. (2005)

- Δc/c ~ 10^{-16}
- RMSパラメータ  $\frac{1}{2} + \delta \beta = (-0.9 \pm 2.0) \times 10^{-10}$
- SMEパラメータ ~ 10^{-16} (evenのもの)
- ・3ヶ月に渡って18日間分回転
- 同じ銅ブロックに2つの発振器を入れること
   で温度変動に対するCMRR
- 傾きの変動が一番効いた

#### Schiller et al. (2005)



#### Schiller et al. (2005)

一番下に回転台
 (「1/4回転し、逆回転」を10分周期で繰り返す
 Heガスラインのために連続回転できない) へ
 cryostatの高さは約1.2 m

#### http://arxiv.org/abs/physics/0510169


#### Schiller et al. (2005)

- $\Delta c/c \sim 10^{-16}$  statistical systematic
- RMS/ $^{\circ} \not \to \not > \frac{1}{2} + \delta \beta = (-0.6 \pm 2.1 \pm 1.2) \times 10^{-10}$
- SMEパラメータ $(\tilde{\kappa}_{e-})^{ZZ} = (-2.9 \pm 2.2) \times 10^{-14}$ evenパラメータのZZ成分に初めて制限
- 183時間の測定、940回転
- ・ほぼMüller(2003)と同じセットアップ(同じ COREを今度は回転させた、という感じ)
- 温度変動、傾きの変動が一番効いた

#### Eisele et al. (2009)

http://prl.aps.org/abstract/PRL/v103/i9/e090401

・ 直交する2つのFPに共振する光のビート



#### Eisele et al. (2009)

- $\Delta c/c \sim 10^{-17}$  statistical systematic
- RMS/ $^{\circ} \not \to \not \not$   $\frac{1}{2} + \delta \beta = (-1.6 \pm 6 \pm 1.2) \times 10^{-12}$
- SMEパラメータ ~ 10^{-17} (evenのもの)
- 90秒周期(~0.01Hz)で回転
- 13ヶ月にわたって、175000回転
- ・ 傾きの変動が一番効いた(2f\_rotで<0.2urad)
   </li>

#### Herrmann et al. (2009)

http://prd.aps.org/abstract/PRD/v80/i10/e105011

・ 直交する2つのFPに共振する光のビート



## Herrmann et al. (2009)

http://www.physik.hu-berlin.de/qom/research/michelson

• 回転軸の傾き制御(<1µrad)、回転周波数制御





#### Herrmann et al. (2009)

- Δc/c ~ 10^{-17}
- ・ RMSパラメータ  $\frac{1}{2} + \delta \beta = (4 \pm 8) \times 10^{-12}$
- SMEパラメータ ~ 10^{-17} (evenのもの)
- 共振器と回転台のデザインを最適化
- 2つの共振器を一体にすることで、熱膨張の
   影響をキャンセル
- •13ヶ月にわたって、130000回転
- 熱雑音が感度を制限

なかなか好感が持てる論文 webの写真もきれいだし

https://spacegrav.stanford.edu/star

- Space-Time Asymmetry Research (衛星計画)
- NASAの2008 SMEXに提案するも却下
- Δc/c ~ 10^{-18} の精度で異方性を探る Kennedy-Thorndike実験 10^{-10}の精度
   Michelson-Morley実験 10^{-12}の精度(RMSパラメータで) 10^{-17}の精度(SMEパラメータで)
- 利点: 地面振動がない
   重力による伸縮がない
   早く公転できる(KN実験的に)

http://www.stanford.edu/group/lisasymposium/LISA8\_Byer.pdf





Space-Time Asymmetry Research

A Proposed Science and Technology Small-Satellite Series of Missions

Robert L. Byer, Sasha Buchman, Dan DeBra, John Conklin, John Hall, John Lipa, Ke-Xun Sun and STAR Team

#### Abstract

The STAR mission has the dual goals of precision Kennedy-Thorndike and Michelson-Morley experiments in space and the development of precision clocks and related technologies for future science missions. The international collaboration with support from NASA AMES proposes a series of three missions to meet the science and the technology development goals.

> 8<sup>th</sup> International LISA Symposium Stanford University, June 29, 2010



1

http://www.stanford.edu/group/lisasymposium/LISA8\_Byer.pdf

45

**Optical Layout & Critical Components** 2008 STAR Proposal - Nd:YAG, Iodine Clock



http://www.stanford.edu/group/lisasymposium/LISA8\_Byer.pdf

STAR Review Summary (MOO 2008)



Science Major Strengths (5): Free flying observatory; Possibility of measuring violations in Lorentz invariance; Improved limits on violations of Lorentz invariance; Expert team; Instrument has rich heritage Science Major Weaknesses (2): Not clear 2 TAR measurements will be ahead of ground observations; no discussion of stretching of cavities by Earth's gravitational gradient

TMC Major Strength (2): Redundant science payload; excellent science team

**TMC Major Weaknesses (8):** Inadequate instrument tech development plans (three examples given); Orbit of 850 km won't decay in 25 years; Cost and workforce information inconsistent with schedule and required work; No dedicated PM; Inexperienced spacecraft team; Inadequate schedule detail



10

## 過去のMM型実験のまとめ

- Michelson干渉計→1つの共振器→2つの共振器
   →一体成型の2つの共振器 & 回転
- 熱い! すごいレベルで測定されている Δc/c~10<sup>-</sup>{-17}
- ・宇宙計画もある(STAR計画など)
- 感度を制限しているもの

熱雑音 回転軸の傾き変動(共振器が重力で伸縮) → 低温化は大変 回転に強い構成はないか

MM型以外の、<u>なんか他の測定</u>はできないか₄

#### Michelson-Morley型以外の検証実験

#### MM型以外の実験

- MM型では勝てそうにない
- MM型以外の実験で勝てそうなのはあるか?
- その前にStandard Model Extension(SME)を
   もう少し説明しておく

## SMEの電気力学

SMEにおける電磁場のLagrangian密度

$$\begin{pmatrix} D \\ H \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \epsilon_0 (1 + \kappa_{DE}) & \sqrt{\epsilon_0 / \mu_0 \kappa_{DB}} \\ \sqrt{\epsilon_0 / \mu_0 \kappa_{HE}} & \mu_0^{-1} (1 + \kappa_{HB}) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E \\ B \end{pmatrix}$$

кはそれぞれ3×3であることに注意

- $\kappa$  は  $k_F$ の要素の組み合わせで表される
- $\kappa_{DE} \geq \kappa_{HE}$  d parity even,  $\kappa_{DB} \geq \kappa_{HE}$  d odd
- 真空に媒質のような効果を与える

## SMEパラメータ

<ul> <li>さらに κの要素をparity even/odd、時間反転</li> </ul>		
_ +/-の項に分けると		even parity実験(MM型)で求まる。
$\widetilde{\kappa}_{e+} \gtrsim \widetilde{\kappa}_{o-}$	真空の複屈折を表す (10自由度)	e-は大体∆c/cのオーダーで求ま る(ZZ成分以外)。 地球の公転速度 10^{-4}c なの
$\tilde{\kappa}_{e-}$ $\longleftarrow$	ある方向の光速の行き帰り の平均(5自由度)	でo+に対する感度はe-より4桁悪 い。(even実験がboostによってようやく oddに感度を持つ、という感じ。trも求めら れるが、o+よりさらに4桁悪い)
$\tilde{\kappa}_{o+}$ $\leftarrow$	.ある方向の光速の行き帰り の差(3自由度)	odd parity実験(IS型)で求まる。 trに対する感度はo+より4桁悪い。
$\tilde{\kappa}_{tr}$ $\leftarrow$	boostによるcの平均的なずれ (スカラー)	ちなみにSMEのパラメータの上限値は下記にま とまっている
• 真空(	D複屈折、IS型実験?	V. Alan Kostelecký and Neil Russell (2011) Data Tables for Lorentz and CPT Vielation http://arxiv.org/abs/0801.0287v4

#### 真空の複屈折

- $\tilde{\kappa}_{e+}$ 、 $\tilde{\kappa}_{o-}$  を測定することは、偏光による真空中の光速の違いを測定することに相当
- Kostelecký et al. (2002) <u>http://prd.aps.org/abstract/PRD/v66/i5/e056005</u>
- gamma-ray burstからの偏光データを利用して 10^{-32}レベルで上限値を与える (2006年にはさらに10^{-37})
   → MM、KT、IS型実験(実験室レベルでの 測定)では無視する <sup>偏光を気にしなくてよいとも言えるし、それを異方性</sup> 測定に利用できないとも言える

#### Ives-Stilwell型実験

 動いている原子の前と後ろから光を吸収させ、 ドップラー効果を測定(Doppler experiment)





- 光速の行き帰りの差を測定していることに相当 (one-way speed of light experiment)
- SMEパラメータでは  $\tilde{\kappa}_{o+}$ ,  $\kappa_{tr}$  を測定していることに相当
- RMSパラメータでは  $\frac{1}{2} + \alpha$  を測定していること に相当(次ページ) 53

## RMSにおけるIS型実験

- これまで時計合わせにEinsteinの同期法を用いていたが、これは光速の行き帰りの差が等しいことを前提としている  $c(\theta)/c = 1 + \left(\frac{1}{2} + \delta - \beta\right) \left(\frac{v}{c}\right)^2 \sin^2 \theta - \left(1 + \alpha - \beta\right) \left(\frac{v}{c}\right)^2$
- Slow clock transport同期法ではその前提がな く、これを用いると光速は  $c(\theta)/c = 1 - {\binom{v}{-}}(1 + 2\alpha)\cos\theta + O((n/c)^2)$

$$c(\theta)/c = 1 - \left(\frac{v}{c}\right)\left(1 + 2\alpha\right)\cos\theta + O\left((v/c)^2\right)$$
  
IS型実験

 このISパラメータは通常の干渉計を使った実 験(MM型、KT型)では求められないが..... 54

## Tobar *et al.* (2009)

http://prd.aps.org/abstract/PRD/v71/i2/e025004 http://arxiv.org/abs/0909.2076 http://moriond.in2p3.fr/J07/trans/wednesday/tobar.pdf

- 干渉計で初のIS型実験(odd-parity)
- ・ 磁気的に非対称なMach-Zehnder 干渉計
- one-wayなので回転周波数で信号が出る



## Tobar et al. (2009)

- Δc/c ~ 10^{-11}
- ・ SMEパラメータ  $\tilde{\kappa}_{tr} = (-0.3 \pm 3) \times 10^{-7}$
- 実験室での最高記録(Reinhardt et al.(2007)、
   光原子時計を利用)よりは3.5倍悪い
- 他のIS型実験ではRMSパラメータのαにも感度を持つが、この実験はαには感度を持たないらしい(なぜだか不明)
- 振動が感度を制限

## 干渉計によるIS型実験?(1/5)

- 真空中だけを光が飛ぶ干渉計で光速の行き帰りの差は測定できないのか?
- 行き帰りの差があるとすると、光速は  $c(\theta)/c = 1 - \left(\frac{v}{c}\right)(1+2\alpha)\cos\theta + O\left((v/c)^2\right)$
- 行きと帰りでは  $c(\theta) = c(1 - \Delta)$  $c(\theta + \pi) = c(1 + \Delta)$

の形になるので、行って帰ってくると行き帰 りの光速の差はキャンセルされてしまう (αが測定できない)

## 干渉計によるIS型実験? (2/5)

 同じ経路を行って帰ってくるだけでなく、一 周して帰ってきてもキャンセル

- 一周の仕方によらない
- IS項を測定したいならループを作ったらダメ

干渉計によるIS型実験? (3/5) キャンセル • Michelson干涉計 →ダメ キャンセル • Sagnac干涉計 キャンセル →ダメ (ちなみに、MM型実験も できない) • Mach-Zehnder干涉計 キャンセル →ダメ (一見、一方向に行って干渉させる ので良さそうだが、非対称性をつけ ないとだめで、それをループの形で しか導入できない。MM型実験はできる) 59

## 干渉計によるIS型実験? (4/5)

- なんか新しい干渉計構成を考えればいい!
   →原理的に無理(たぶん)
- 干渉計は光を2つに分けて、干渉させること
   で位相差を測る装置

位相を引くのは逆行させるのと同じ (IS項的には)

→必ずループができてIS項がキャンセル







## 屈折率を途中で変えるなら良い!

・ 光が通る所が全て真空中(屈折率が同じ媒質中)
 だとIS項がループで消えてしまうが、ループの
 途中に屈折率が違う場所があると、残る



その原型(Sagnacの途中にガラス)
 W. S. N. Trimmer *et al.* (1973) "Experimental Search for Anisotropy in the Speed of Light" <u>http://prd.aps.org/abstract/PRD/v8/i10/p3321\_1</u>62

ISパラメータの測定原理

途中に屈折率の違う媒質を入れた三角共振器の
 右回りと左回りの共振周波数の差を測定する



#### 三角共振器によるIS型実験

- 途中に媒質を入れる必要はあるが
- 三角共振器なので回転軸の傾き変動、温度変動などに強いという利点(Sagnac効果以外全て(?)の変動がコモンで効く)
- MMパラメータ $\frac{1}{2} + \delta \beta$  が現在10^{-12}で測定されているのに対し、ISパラメータは現在  $|\frac{1}{2} + \alpha| < 8.4 \times 10^{-8}$  $|\chi_{EQQUST}$

Reinhardt et al. (2007) ✓

http://www.nature.com/nphys/journal/v3/n12/full/nphys778.html

Δc/cにして10^{-11}で測定できればいい!
 MM型実験だと10^{-17}必要

## ここまでのまとめ

- MM型実験ではなく、IS型実験だと勝てそう
- IS型実験は通常、干渉計を用いてはできない (これまでは原子時計を利用)
- ・途中に媒質を入れた三角共振器を使うとIS型
   実験になり、1/2 + α が測定できる
- Δc/c~10^{-11}で測定できれば世界レベル
- 下記資料で測定原理などを数式を使って簡単にまとめてあるのでご参照下さい

「光共振器を用いたLorentz不変性の検証」 <u>http://granite.phys.s.u-tokyo.ac.jp/michimura/document/noteLorentzInvariance.pdf</u>



目次2

- 目標と概要
- 実験の原理
   偏光解析法、double-pass
- セットアップ
   ファイバ光学系、制御系、固定系、回転系
- 目標感度 能動的回転vs地球自転
- ・スケジュール
- リスクと懸念事項



#### • 目標 ISパラメータの上限値を更新すること つまりビート周波数が回転周波数で変化する 振幅を10^{-11}で測定すること $\frac{\delta\nu}{\nu} = -\frac{2(n-1)d}{L+(n-1)d} \left(\frac{v}{c}\right) (1+2\alpha) \cos\theta$ 回転 10^{-3} 10^{-8} O(1) $10^{-11}$ • 測定には途中に媒質を入れた三角共振器を使う

- 三角共振器はモノリシックに作り、ファイバ光
   学系から入射
- 全体をデシケータの中に入れて、回転させる。

#### 実現方法

- 行きの光で左回りの共振周波数にレーザーをロック
- 行きの透過光を打ち返して、三角共振器に入れ直す(double pass)
- 帰りは右回りなので、光速に行き帰りの差があれば共振周波数がず れている
  - → その反射光から行き帰りの差に比例した信号が取れる





#### 偏光解析法の原理

- ・QWPは反射光側にあっても同じ
- ・ どの偏光を共振させるかは制御によって自由 に選べる(p/sによる反射率の違いを気にしなければ) →反射光側のHWPはいらない

HWP

PD2

- **つまり、右の構成で十分** 入射光をp偏光として(HWPで調整)、
   p+s偏光を共振させる。反射光は主にp-s偏光。共振時PD1とPD2に入る
   光量が等しくなるようQWPを調整。
- ・ 一応右の構成をバラック組みして エラー信号が取得できることを確認した(7/26)

QWP

PBS

PD1

#### double pass

大前さんD論(第4章)

http://iopscience.iop.org/0264-9381/19/7/379

- 一度共振器を通過しているので 綺麗なモードを使用してエラー 信号取得ができる
- きれいなモードなので偏光 解析法が向いている(EOMで 汚すのはもったいない)

QWP QWP PD2 PBS PD1
## モノリシック三角共振器



## モノリシック?

- ・ 低膨張ガラス基板の上に光学素子をシリケー
   トボンディング
- こんな感じ





ファイバ光学系と制御系



\_\_\_\_\_: fiber (polarization maintaining)
I : FC connector
I: PD (& op-amp)



デシケータ内に入るもの

- モノリシック干渉計+固定系
   8×8×6 cm程度
- peltier, transducer, IV変換回路
- ファイバ系
   isolator1本
   モノリシック干渉計についているもの1本
   \$\phi\text{9}\text{2}\text{ cm}(BSを巻きつけた円筒) が 2個
- fiber coupled PD
   3個 (9×6×2 cmの箱に2個)
- モノリシック共振器の出力光を受けるPD
   4個(強度雑音を気にしなければ2個でも可)
- 15V電源供給ボックス

デシケータ内配置



上から見た図 大きさの比率は正 しい 26×26×10 cm (デシケータの内寸) に入る





## 感度曲線(0.1Hz周辺)



80

# 感度計算と要求値

- 基本的に行きの周波数安定度を計算し、CMRRが効きそうなのは1/100 で落とすようにして計算(温度揺らぎなど)
- 地面振動はピエゾを使って10^{-12}m/rtHz@0.1Hz程度出てたというこ とから、さらにモノリシックにすることでそもそも単体でCMRR 1/10^{6}あることを期待
- Sagnac効果は行き帰りで逆相に出るので2倍(回転周波数制御がどこま でできるのか知らないが、感度に効いてきそう)
- 0.1Hzで回転させ、10日間測定することを前提とすると、 10^{-8}/rtHz@0.1Hzで測定できればよい
- 逆にこれを元に要求値を出すと、全て@0.1Hzで 温度変動: 10<sup>4</sup>7} mK/rtHz (ゼロ点制御しないなら10<sup>4</sup>} mK/rtHz) (高橋さん修論は空気中で測って1mK/rtHz) 回転軸の傾き変動: 10^{9} urad/rtHz (Herrmann et al.(2009)は <~1uradとしている) 回転速度変動(Sagnac効果): 10^{4} Hz/rtHz (目安を知らないが、 $\delta\omega/\omega=0.01$ くらい行くのでは?) → 楽勝!?

その他の雑音

レーザー強度雑音

未考慮

偏光解析法で差動を取るなら、原理的には出ない → 強度安定化は一応やる

 散乱光雑音
 共振器内で散乱光があると、行きと帰りの光がカップリング してしまう

→ それも含めて、念のためモノリシック共振器からの反射光を モニタ(refl. mon.)

電気系雑音
 回転周波数でピークが立つだろう
 (モーターの回転周波数と装置の回転周波数をずらすなどの工夫は可能)

# 地球自転を利用したら?

- 地球の自転周波数: 1.16e-5 Hz (23時間56分)
- 地球の回転速度は安定だとして、Sagnac効
   果は無視できる
- 回転に伴う電気系雑音もない
- 回転数ではなく積分時間が問題なので、低周 波になるのは問題ない(スペアナでスペクトル測定する のがいちいちめんどいくらい)
- ・感度もそんなに悪くない(10^{-11} /rtHz)
   10日間の測定で十分世界を狙えるレベル 温度揺らぎが感度を制限(次ページ参照)

低周波の雑音がこの通りかはわからないが.....

# 感度曲線(10^{-5}Hz周辺)



84

# 能動的回転vs地球自転

- 基本的に雑音は低周波の方が大きい
- ・ 能動回転だと電気系雑音、自転だと日中変動(温度 など)が問題なピークになる どっちの影響の方が大きいか?
- 回転させない方が楽は楽
- モノリシック共振器が届くまで3ヶ月はあるので、
   回転法を考えつつセットアップを組み立てていくのがよいだろう

# やること

- 以上のセットアップを組み立てる 優先順位は デシケータ内の固定系 強度安定化(ファイバ光学系) 温度安定化 平行して 回転機構
- 真空デシケータの中で感度を評価
- ・ 雑音源の特定と低減
   ある程度の感度が出たところで切り上げ、回転させる
   測定データを取ることを優先する
- 回転(または地球自転)を利用して10日間程度測定し、 RMSパラメータ $1/2 + \alpha$  に制限をつける
- 時間があればSMEパラメータ $\widetilde{\kappa}_{tr}$ にも制限をつけてみる

スケジュール

6	7	8	9	10	11	12	1	2	3
	Amalo 柏	di f2f	学会				俏	<b>診論発表</b>	ē 学会
装置	設計								
		モノリシ	ック共振	器製作	(シグマ	)			
		固定系	等製作	(試作室	)				
	7	アイバメ	七学系、	温度制	御等				
			転系の	製作					
					共振器	実験			
			解析	プログラ	4	測	定、解	沂	
				修論執	筆				

リスク等

- 回転機構は大変では?
   回転をデフォルトとし、間に合わない、うまくいかない、など あったら地球自転を利用する
- モノリシックの製作が間に合わない、性能悪いなどあったら?
   すでにピエゾ制御のモノリシックMIがあるので、それを利用して Michelson-Morley型実験は可能 (しかしMIのBSが取れてしまっていた!!)
- ノイズハンティングなど間に合うの?
   三角共振器が届くまでにできることはやっておく
   すでにあるモノリシックMIでノイズハンティングも可能
- 上限値を更新できるの?
   性能が出れば、少しの測定(例えば10日間)でも十分可能
   上限値を更新できなくても、新しい手法による測定であることは
   間違いない

#### 懸念事項

- 信号が回転周波数と同じ周波数で出てしまう
   MM型実験では2倍の周波数成分を見ればよかった
   IS型実験では回転周波数での雑音がもろに効いてくる
- シグマがモノリシック三角共振器を作るの大変そう
   モードマッチの精度はそれほどいらないが、帰りの光が共振する
   ようにアライメントを取るのはめんどくさそう
- 信号の較正をする際の誤差 帰りのエラー信号ではロックしないので、較正で大きな誤差が生 じてしまうかも(帰りの信号でもレーザー周波数をロックし、オ ープンループ伝達関数を測定することで較正はできる)

まとめ

- 今、Lorentz不変性検証実験が熱い!
- 熱すぎてMichelson-Morley型の実験はすごい ことになってる
- 途中に媒質を入れた三角共振器を使うとMM 型実験では測定できないLorentz不変性検証 パラメータを測定できる(IS型実験に相当)
- この実験で、ISパラメータの世界レベルの測
   定ができる
- これまでISパラメータは原子時計を使って測定されており、今回の実験は新しい手法