

# 重力逆二乗則とLorentz不変性

道村唯太

東京大学 大学院理学系研究科 物理学専攻

安東研究室

# 今回ご紹介する論文

- J.C. Long and V. A. Kostelecky, [arXiv:1412.8362](https://arxiv.org/abs/1412.8362)
- Search for Lorentz violation in short-range gravity

## Search for Lorentz violation in short-range gravity

J.C. Long and V. Alan Kostelecký

*Physics Department, Indiana University, Bloomington, IN 47405, U.S.A.*

(Dated: IUHET 589, December 2014)

### Abstract

A search for sidereal variations in the force between two planar tungsten oscillators separated by about  $80 \mu\text{m}$  sets the first experimental limits on Lorentz violation involving quadratic couplings of the Riemann curvature, consistent with no effect at the level of  $10^{-9} \text{ m}^2$ .

# 元となった実験装置(2003)

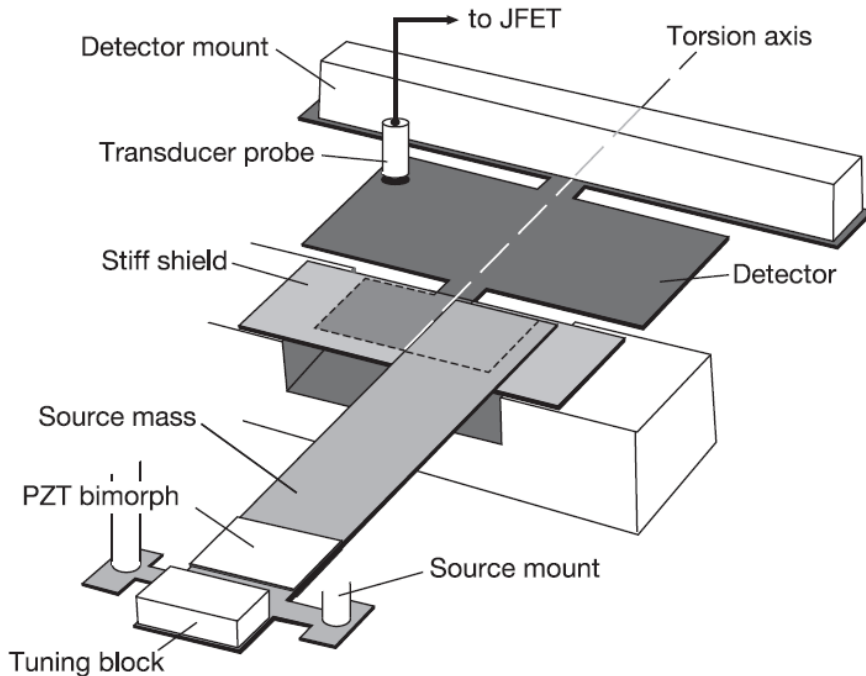
- J.C. Long+, [Nature 421, 922 \(2003\)](#)

- Univ. of Coloradoのグループ  
(現在はIndiana Univ.にセットアップがある)

## Upper limits to submillimetre-range forces from extra space-time dimensions

Joshua C. Long<sup>\*†</sup>, Hilton W. Chan<sup>\*†</sup>, Allison B. Churnside<sup>\*</sup>, Eric A. Gulbis<sup>\*</sup>, Michael C. M. Varney<sup>\*</sup> & John C. Price<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup> Physics Department, University of Colorado, UCB 390, Boulder, Colorado 80309, USA

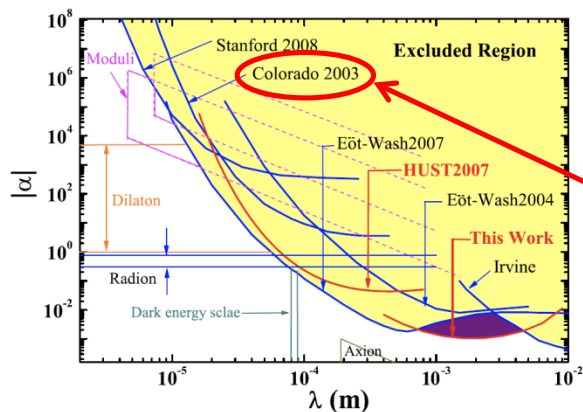


String theory is the most promising approach to the long-sought unified description of the four forces of nature and the elementary particles<sup>1</sup>, but direct evidence supporting it is lacking. The theory requires six extra spatial dimensions beyond the three that we observe; it is usually supposed that these extra dimensions are curled up into small spaces. This ‘compactification’ induces ‘moduli’ fields, which describe the size and shape of the compact dimensions at each point in space-time. These moduli fields generate forces with strengths comparable to gravity, which according to some recent predictions<sup>2–7</sup> might be detected on length scales of about 100  $\mu\text{m}$ . Here we report a search for gravitational-strength forces using planar oscillators separated by a gap of 108  $\mu\text{m}$ . No new forces are observed, ruling out a substantial portion of the previously allowed parameter space<sup>4</sup> for the strange and gluon moduli forces, and setting a new upper limit on the range of the string dilaton<sup>2,3</sup> and radion<sup>5–7</sup> forces.

**Figure 1** Major components of the apparatus. The smaller rectangle of the tungsten

# CEEM実験室見学 -2

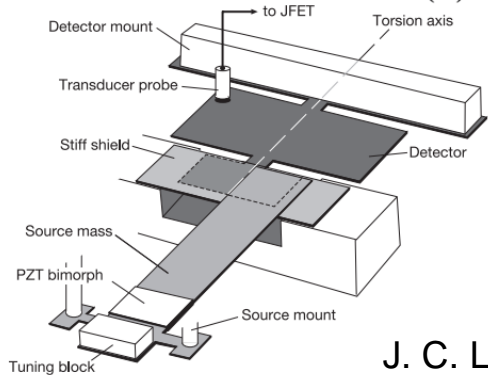
- 一方の板を振動させ、他方の板で検出(当時熱雑音リミット)
- ワシントン大に勝てないので今は10umを狙っているとか



多段防振系  
(LIGOのような  
と説明してた)

このグループ

タンガステン製の板



J. C. Long+: [Nature 421, 922 \(2003\)](#)

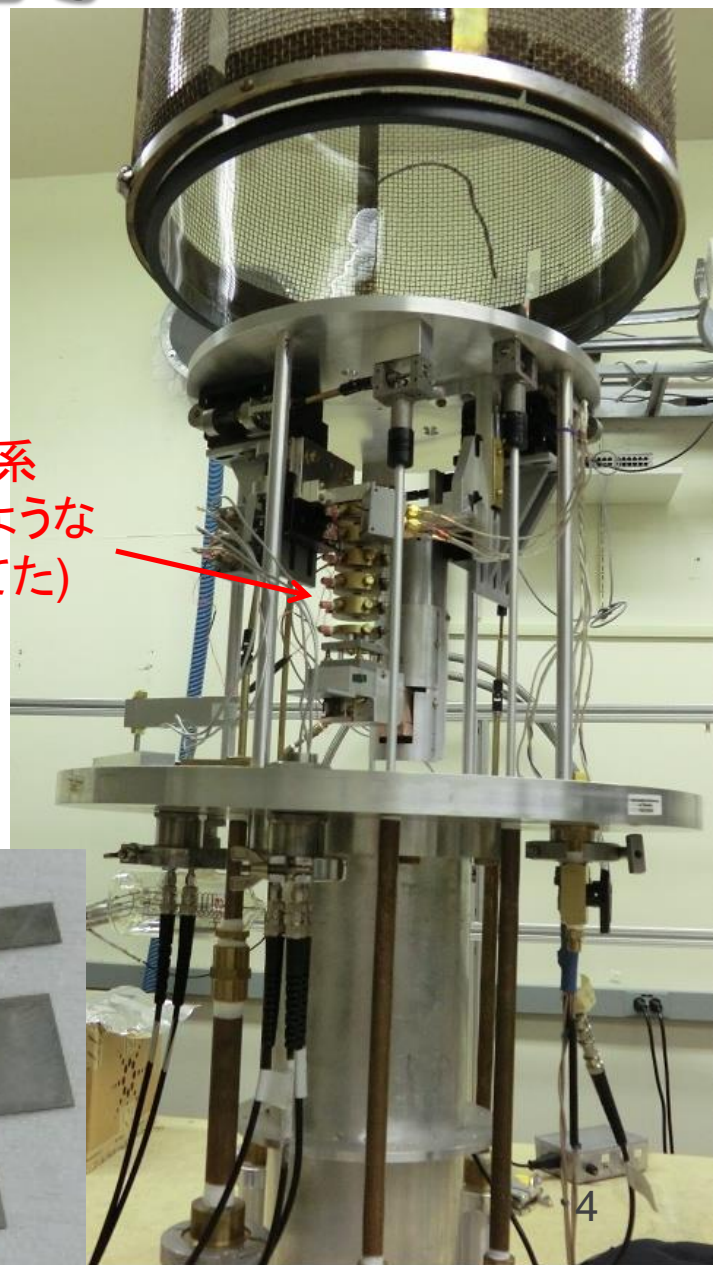


Figure 1 Major components of the apparatus. The smaller rectangle of the tungsten detector (under the shield) is 11.455 mm wide, 5.080 mm long and 195 μm thick. The

# 実験装置(2003)

- タングステン製の source mass と detector mass
- 間隙  $108 \pm 6 \text{ } \mu\text{m}$
- $Q = 2.5e4$  ( $25522 \pm 29$ )
- 温度調整 (305 K) により detector の共振周波数を安定化 ( $1173.085\text{Hz}$ )
- 5段スタックで防振 ( $-200 \text{ dB @ } 1 \text{ kHz}$ )
- 静電型のトランスデューサー

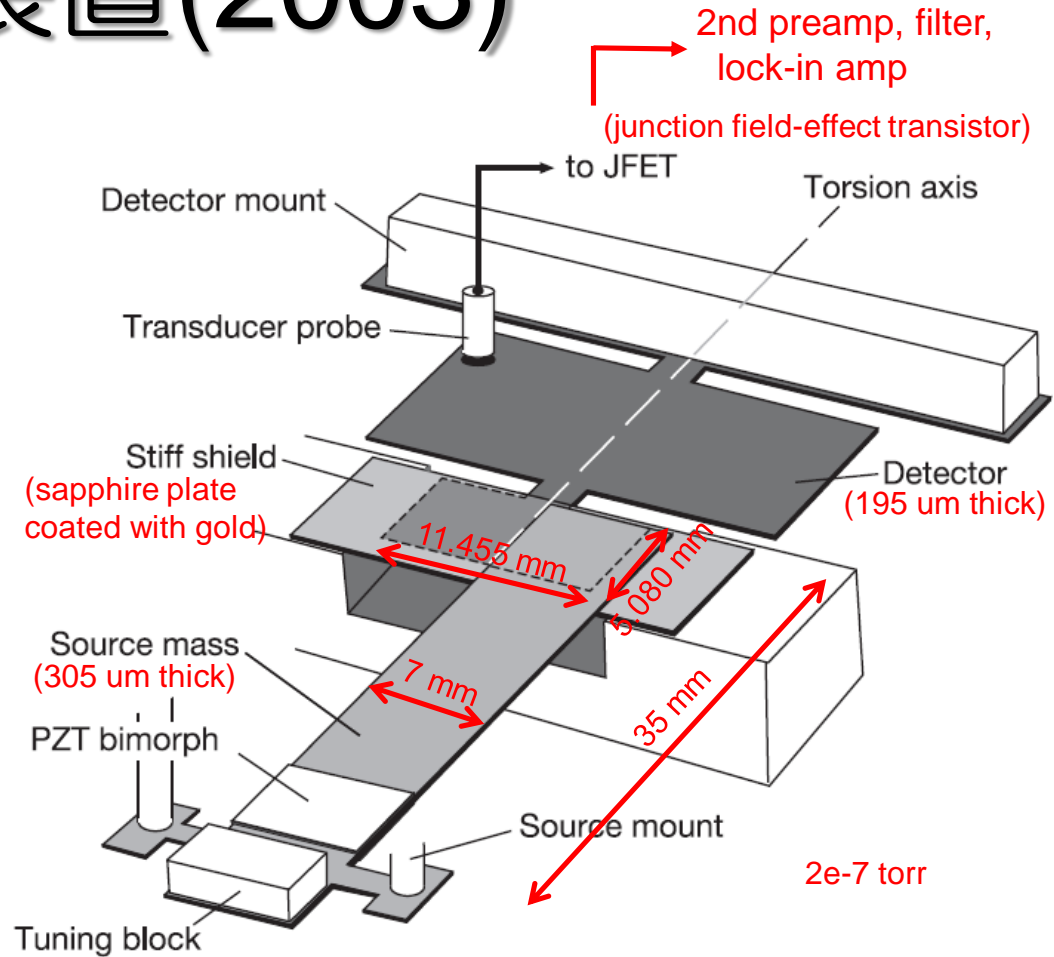


Figure 1 Major components of the apparatus. The smaller rectangle of the tungsten

# データ解析(2003)

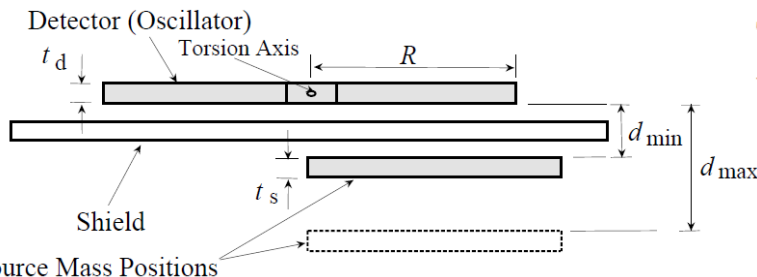
- 逆二乗則が正しければほぼnull (?)

The Yukawa force between parallel plates separated by a distance  $d(t)$  is given by:

$$F_Y(t) = 2\pi\alpha G\rho_s\rho_d A\lambda^2 \exp(-d(t)/\lambda)[1 - \exp(-t_s/\lambda)][1 - \exp(-t_d/\lambda)] \quad (5)$$

where  $\rho_s$  and  $\rho_d$  are the source and detector mass densities, and  $t_s$  and  $t_d$  are the thicknesses. This would be an exact expression if either plate had area  $A$  and the other had infinite area, but for the real geometry there are small edge corrections. Neglecting these effects, and

J. C. Long+, [Nucl. Phys. B 539, 23 \(1999\)](#)



- on-resonanceとoff-resonanceの差を見る  
offでも見えてるのはLO信号の漏れ

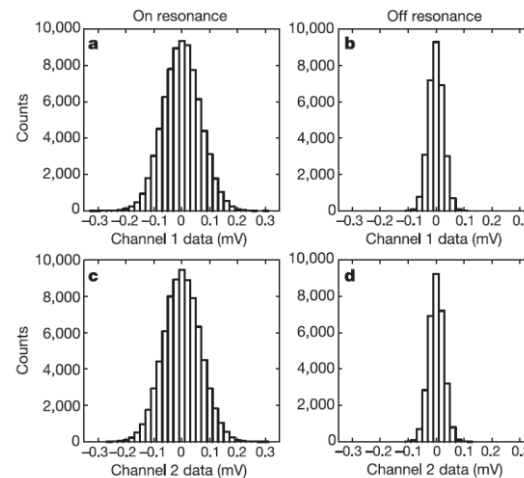


Figure 2 Distributions of data samples. Data were recorded at 1 Hz with a lock-in

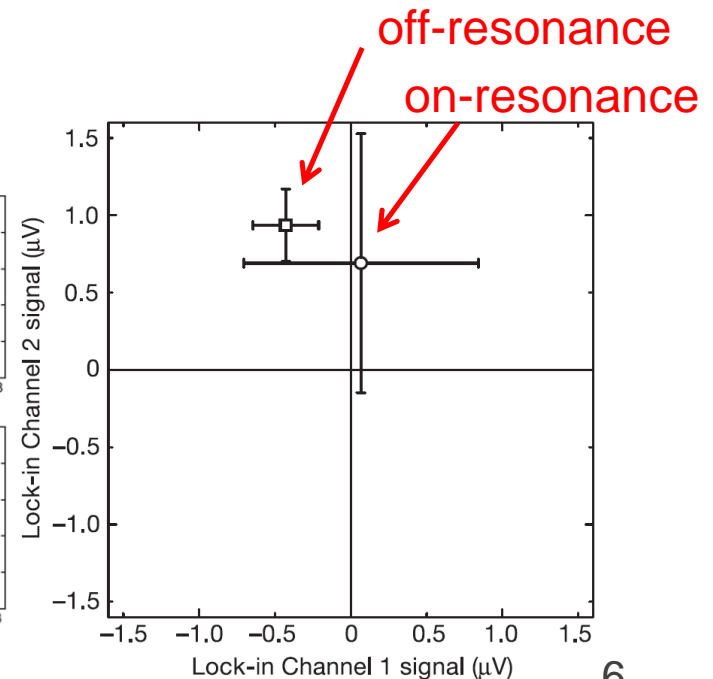


Figure 3 Means of the off- and on-resonance data samples. The circular point with the

# データの妥当性の確認(2003)

- 測定サイクル毎にシールドに変調電圧を加えて、ゲイン/共振周波数/Q値の安定性を確認
- シールドにDC電圧を加えた状態で測定を行うことで、電位差の影響が1桁下なことを確認
- 同様に磁場を加え、影響が1/5以下なことを確認
- sourceとdetectorの距離を離しても信号が出ないことを確認(磁場雑音などと未知の力がキャンセルしている可能性の排除)
- トランスデューサーのバイアス電圧を変えて、熱雑音の大きさを確認
- 熱雑音の大きさを較正に使用

# $\alpha$ - $\lambda$ 図への上限値(2003)

- 10-100  $\mu\text{m}$ で最も良い上限
- 間隙( $108 \pm 6 \mu\text{m}$ )の不確かさが最も効いた

detectorとsourceが触る  
位置からの距離  
ステージの分解能で  
精度が決まってるらしい  
([arXiv:hep-ph/0210004](https://arxiv.org/abs/hep-ph/0210004))

- パラメータ領域  
に制限  
gluon modulus  
strange modulus  
string dilaton  
radion modulus

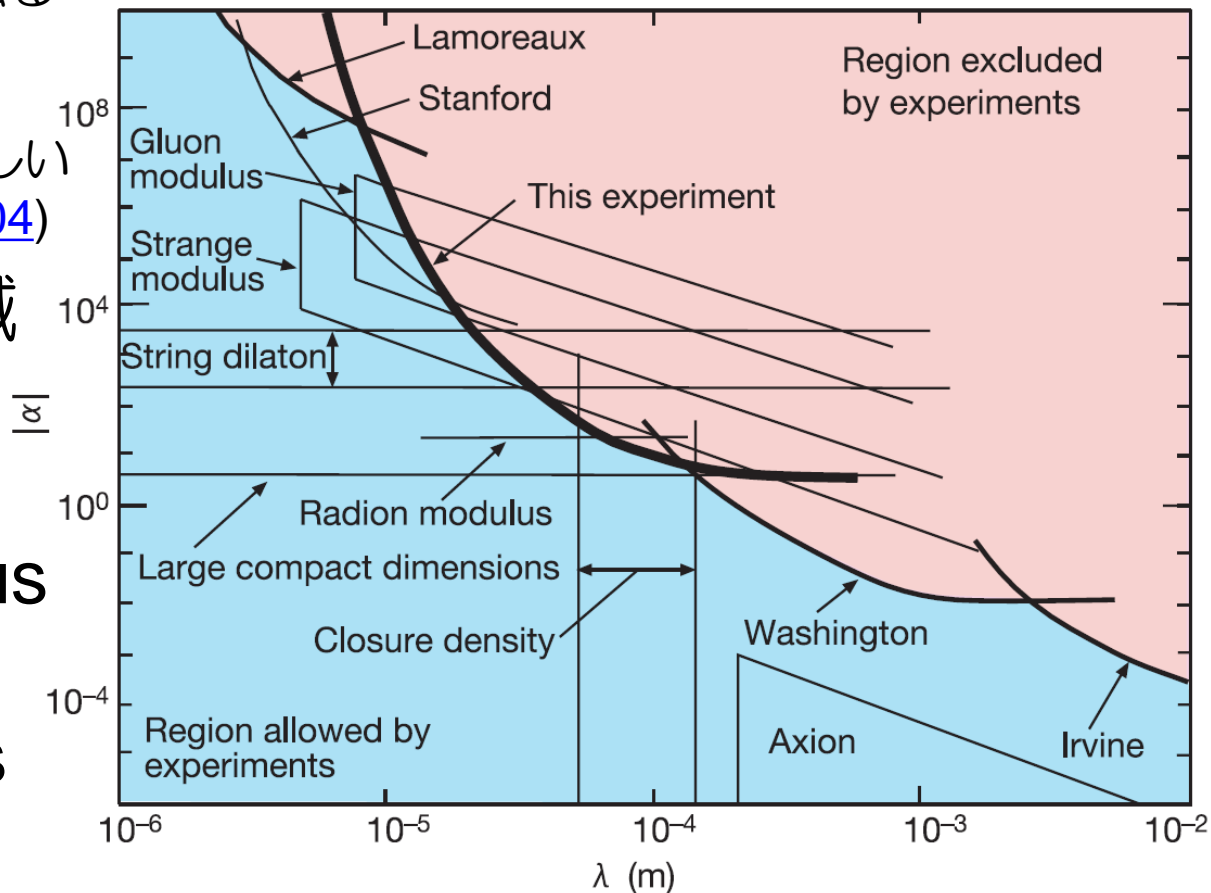


Figure 4 Current limits on new gravitational strength forces between  $1 \mu\text{m}$  and  $1 \text{cm}$ . Our



# 最新の $\alpha$ - $\lambda$ 図

- J. Murata and S. Tanaka, [CQG 32, 033001 \(2015\)](#)

- 2桁以上更新されている

- 薄い緑のは  
ADD予想  
(大きな余剰  
次元論文)の  
後の実験

- ADD後  
いち早く  
実験

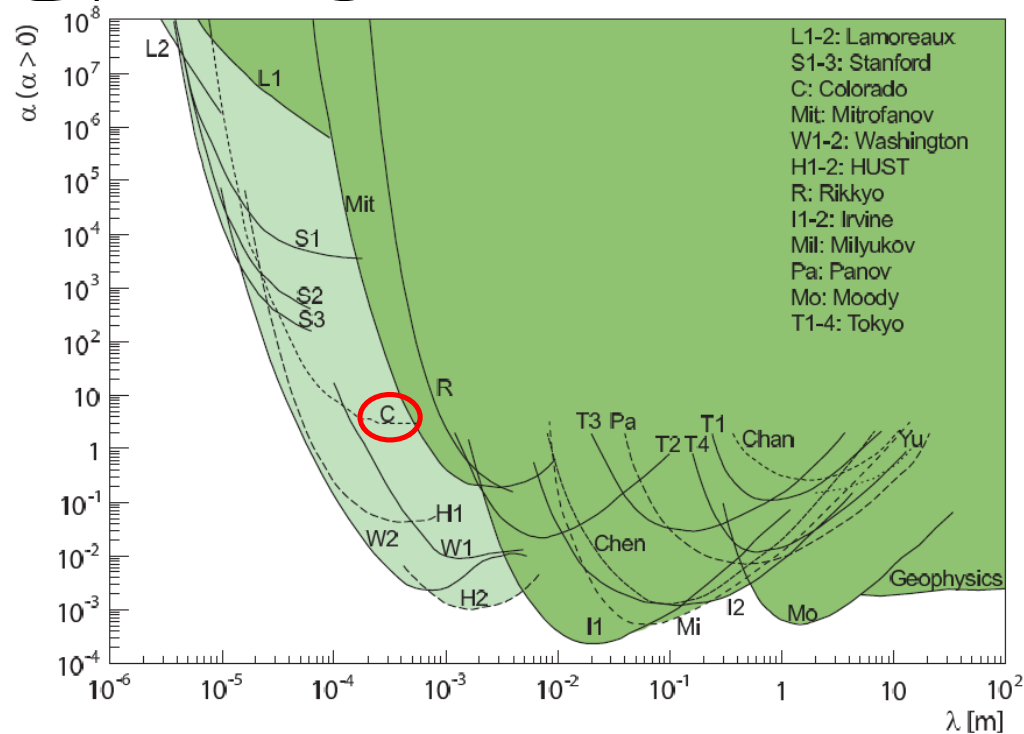


Figure 8.  $\alpha - \lambda$  plot for the laboratory scale experiments. Light shaded area correspond to constraints obtained after the ADD prediction. Milyukov (Milyukov

ADD論文

I. Antoniadis, S. Dimopoulos, and G. Dvali, [Nucl. Phys. B 516, 70 \(1998\)](#)

# 今回の実験の動機(2014)

- Lorentz不変性の破れがあると、重力法則が変わる
  - d=4の破れ → 逆二乗則だが、方向依存性
  - d>4(高次)の破れ →  $1/r^{d-2}$ で、方向依存性
- Q. G. Bailey, V. A. Kostelecky, and R. Xu, [arXiv:1410.6162](https://arxiv.org/abs/1410.6162)
- d=4は既に探査済み(下記の他に少なくとも6つ論文ある)
  - 地球-月間の距離が変動しない(Lunar Laser Ranging; [PRL 99, 241103 \(2007\)](https://arxiv.org/abs/1410.6162))
    - $10^{-6}$ から $10^{-11}$ の上限値
  - 連星パルサーのタイミングがずれない([PRL 112, 111103, \(2014\)](https://arxiv.org/abs/1410.6162))
    - $10^{-9}$ から $10^{-11}$ の上限値
- d>4は未探査かつ近距離で有利
  - 初探査を行う

$\alpha$ - $\lambda$ とは別の指標を作っただけじゃね？  
Lunarからの $\alpha$ への上限値も $10^{-11}$ 程度だし

# 解析に用いたデータ(2014)

- Indiana 2012からの約2日間、Colorado 2002からの約2日間分のデータを使用
- 2014の間隙は $77.5 \pm 20$  umで、感度5倍 (ちなみに50 umで熱雑音は達成済みらしい; [CQG 31, 205007 \(2014\)](#))  
テストマスの平面度のせいでもっと近づけられない
- $1/r^4$ の形の力を探査(d=6のLV探査に相当)  
Riemann curvatureのself interactionとして現れる  
quadratic curvature couplingがあるとこの形の出てくる

$$F^j(\mathbf{r}, T) = -G_N \int d^3 r' \rho(r') \left( \frac{\hat{R}^j}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^2} + \frac{\bar{k}^j(\hat{\mathbf{R}}, T)}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^4} \right).$$

( $\bar{k}_{\text{eff}})_{jklm}$ を探査  
j,k,l,m = X,Y,Zだが対称なので  
15個の独立なパラメータがある  
(3)

Here,  $\hat{\mathbf{R}} = (\mathbf{r} - \mathbf{r}')/|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|$ , while

Newton重力

LVからくる力

$$\begin{aligned} \bar{k}^j(\hat{\mathbf{R}}, T) = & \frac{105}{2} (\bar{k}_{\text{eff}})_{klmn} \hat{R}^j \hat{R}^k \hat{R}^l \hat{R}^m \hat{R}^n \\ & - 45 (\bar{k}_{\text{eff}})_{klmm} \hat{R}^j \hat{R}^k \hat{R}^l + \frac{9}{2} (\bar{k}_{\text{eff}})_{klkl} \hat{R}^j \\ & - 30 (\bar{k}_{\text{eff}})_{jklm} \hat{R}^k \hat{R}^l \hat{R}^m + 18 (\bar{k}_{\text{eff}})_{jkl} \hat{R}^k \end{aligned}$$

(4)

# 解析と結果(2014)

- 測定した力を、地球の自転周波数の0倍から4倍までの周波数で復調
  - 合計9個の復調振幅(DC, sinの4個, cosの4個)
- $(\bar{k}_{\text{eff}})_{jklm}$  は15個なので、1つの装置のデータから独立に決めるのは不可能
  - 15個のうち残り14個はゼロとして、測定値を算出
  - $2\sigma$ でゼロと無矛盾  
( $10^{-9}$  m<sup>2</sup>の上限值)
- 2ヶ所の装置(IndianaとColorado)使うと独立に決められる
  - $2\sigma$ でゼロと無矛盾  
( $10^{-2}$ から $10^{-7}$  m<sup>2</sup>の上限值)

# まとめ

- $1/r^4$ 型の新たな力を生じさせる、重力におけるLVを探索し、そのSMEパラメータに初の上限值をつけた論文だった
- 結局高次LVの話だった
- SMEの中にはやたらパラメータがあって、上限値がつけられていないものもやたらある
- それは現在の上限值まとめ(Data Tables for Lorentz and CPT Violation; [arXiv:0801.0287](https://arxiv.org/abs/0801.0287))を見ているだけではわからない
- 理論側の動向も探る必要がある

# おまけ

- M. Nagel et al., [arXiv:1412.6954](https://arxiv.org/abs/1412.6954)
- 往復光速の異方性への上限值が  $10^{-17}$  から  $10^{-18}$  へ更新された  
→ 電弱スケール(100 GeV)へ

(ちなみに片道の我々は  $10^{-15}$ 、  
エネルギースケールは 0.03 GeV)

- 低温サファイア  
マイクロ波共振器

Direct Terrestrial Measurement of the Spatial Isotropy of the Speed of Light to  $10^{-18}$

Moritz Nagel<sup>1</sup>, Stephen R. Parker<sup>2,\*</sup>, Evgeny V. Kovalchuk<sup>1</sup>, Paul L. Stanwix<sup>2</sup>,  
John G. Hartnett<sup>2,3</sup>, Eugene N. Ivanov<sup>2</sup>, Achim Peters<sup>1</sup>, and Michael E. Tobar

<sup>1</sup>Institute for Physics, Humboldt University of Berlin, 12489 Berlin, Germany

<sup>2</sup>School of Physics, The University of Western Australia, Crawley 6009, Australia

<sup>3</sup>Institute for Photonics and Advanced Sensing, School of Chemistry and Physics  
The University of Adelaide, Adelaide 5005, Australia

\*stephen.parker@uwa.edu.au

Laserの発明(1960)

SME提唱(1989)

SME電磁気学(2002)

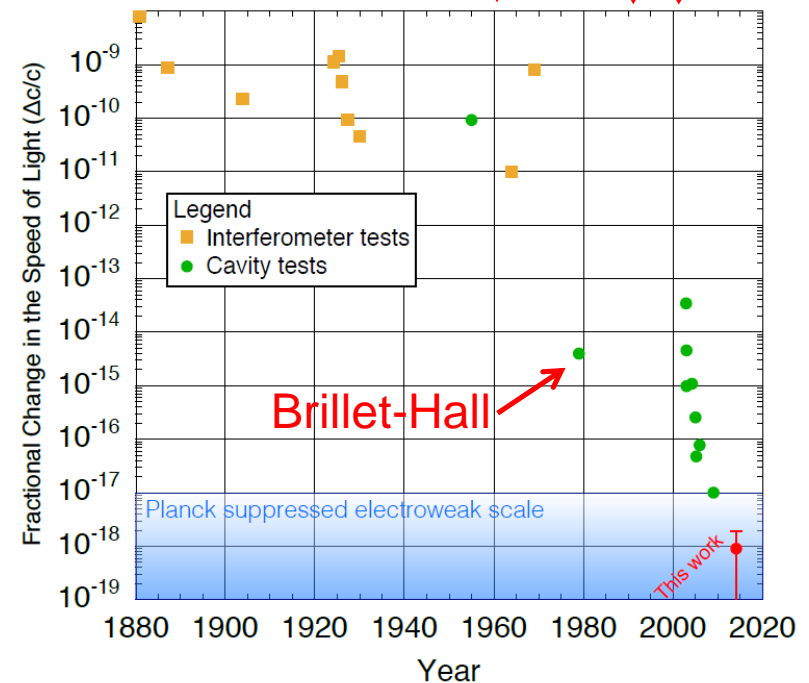


Figure 1: Historical overview of Michelson-Morley style tests of the spatial isotropy of the speed of light. Bounds are taken from original publications. A full list is appended to the end of this document, with numerical values given in Table 4.

# 何を改善したのかは謎

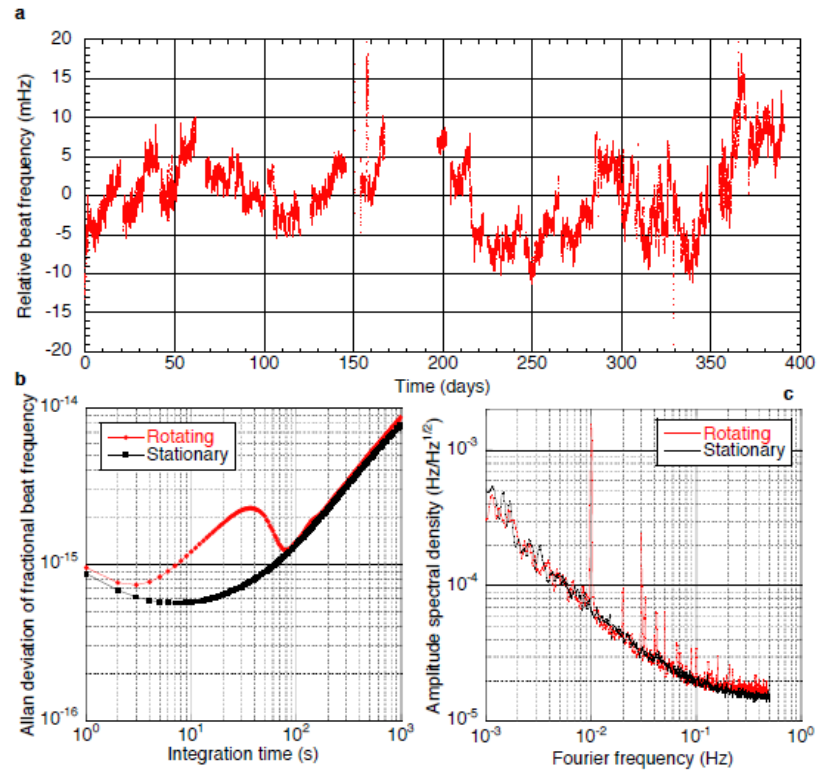
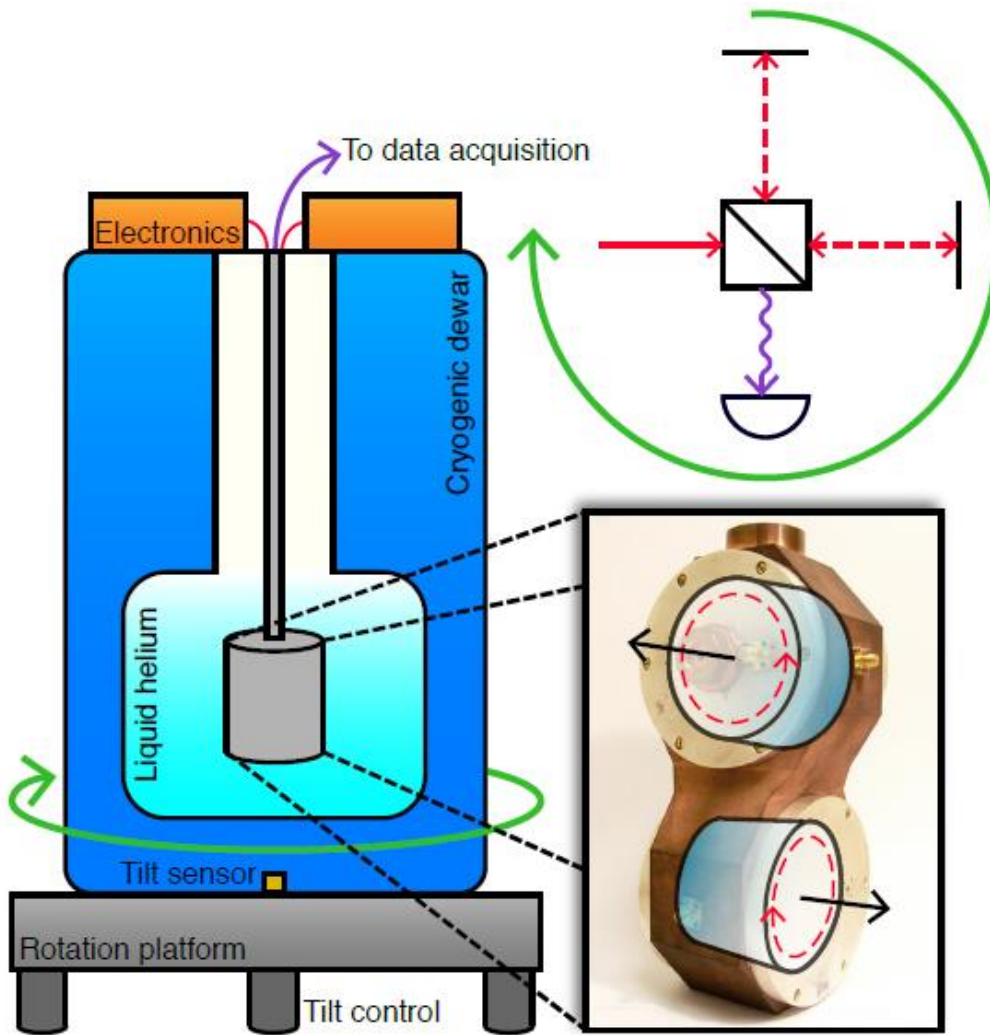


Figure 3: Beat frequency of the two cryogenic oscillators. a Sampled beat fre-

Figure 2: Schematic overview of the experimental setup. Comparison to original Michelson-Morley arrangement is presented to demonstrate experimental concept. Crystal axes and resonance mode Poynting vectors are annotated on the highlighted view of the cavities.

# Stephen Parker (Western Australia)

- Using Microwave Cavities to Test Lorentz Invariance
- cryogenic sapphire oscillatorによるMM型実験

- P. L. Stanwix+: [PRL 95, 040404 \(2005\)](#)  
(CSO)のアップグレード

- 直径を 3 cm  $\rightarrow$  4 cm
- Q値が  $2e8 \rightarrow 2e9$  ←
- 高次のWGMを用いる
- 回転台、傾き制御系を改善
- 2005年より2桁向上見込み(本当?)

共振の線幅の方。  
熱雑音について聞  
いたらわかってなさ  
そうだった。今はジ  
ッター雑音が一番  
効いているらしい



- でも回転させたら結局予定  
より2桁くらい悪くなった

2005年時点の装置  
[Lect. Notes Phys, 702 416 \(2006\)](#)  
最新版は見た目変わった