安東研輪講

2013年7月3日

CPT'13参加報告

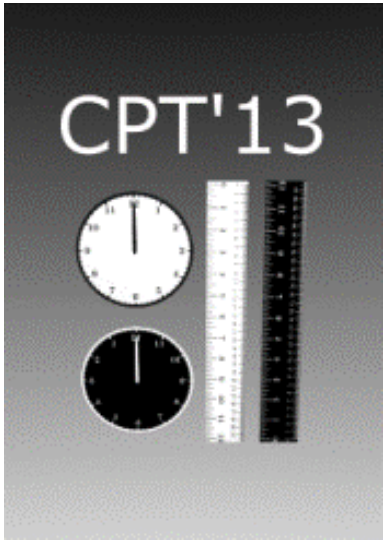
道村唯太

東京大学大学院理学系研究科物理学専攻

安東研究室 博士課程2年

概要

- 出張先: Indiana University (Bloomington, Indiana)
- 期間: 2013年6月16日-6月22日
- 目的: CPT’13への参加
  http://www.indiana.edu/~lorentz/cpt13/



- 費用負担先:
  道村
- 宿泊場所: Indiana Memorial Union Biddle Hotel

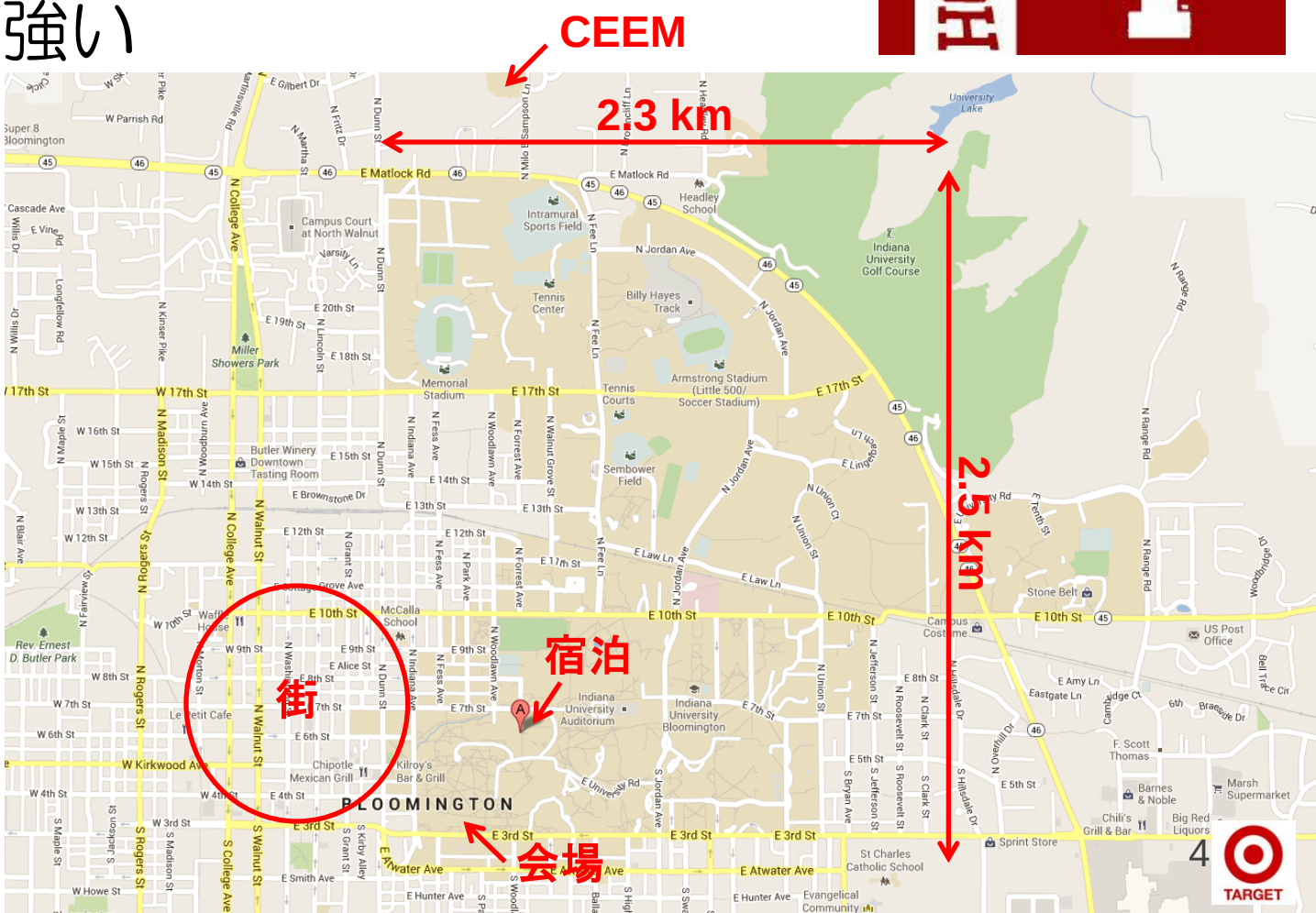
INDIANA UNIVERSITY

場所

- Narita ✈→ Chicago ✈→ Indianapolis 🚌→ Bloomington

Indiana University

- 全米最古の州立大学(1820年創立)
- The Jacobs School of Musicが有名
- バスケが強い
- 広い
- 建物がきれい



CPT'13

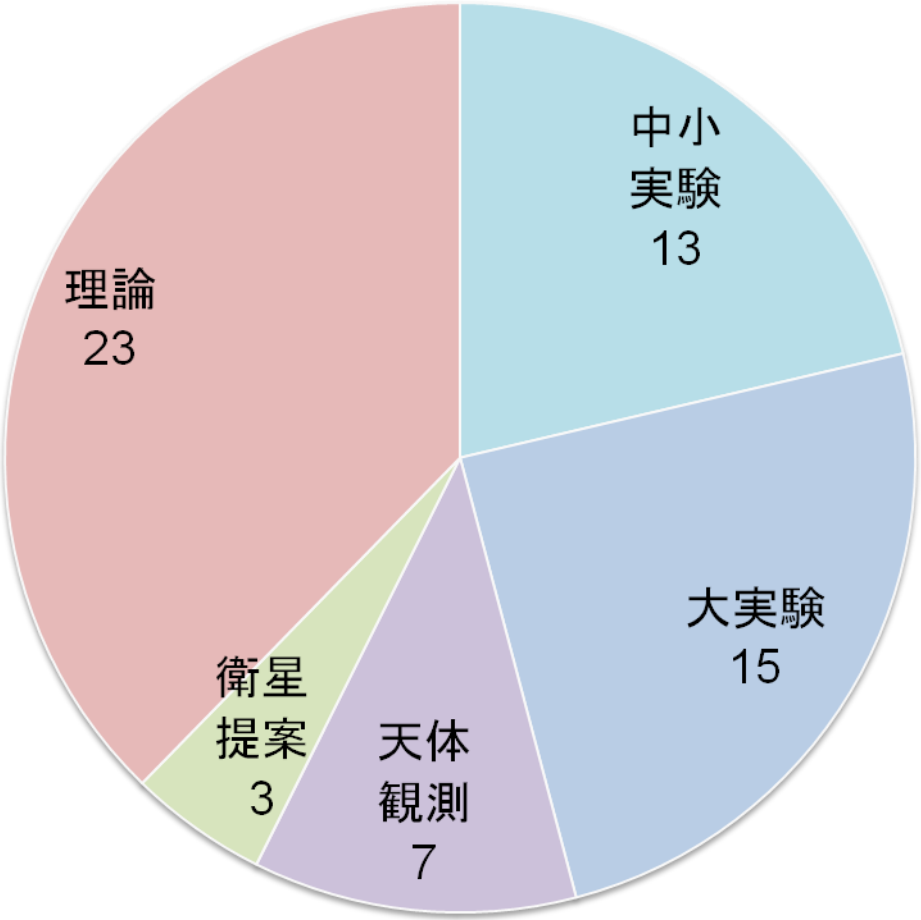
- Sixth Meeting on CPT and Lorentz Symmetry
- CPT対称性やLorentz不変性の破れに関する実験、観測、理論研究の成果を発表する場
- 1998年から3年毎の開催
- SMEのAlan Kostelecký が主催

- 期間: 2013年6月17日-21日
  9時頃から18時頃まで(最終日は12時半まで)
- 参加者: 70名程度(うち知っている人0名)
- 口頭発表数: 62(全てplenary)
- ポスター数: 17

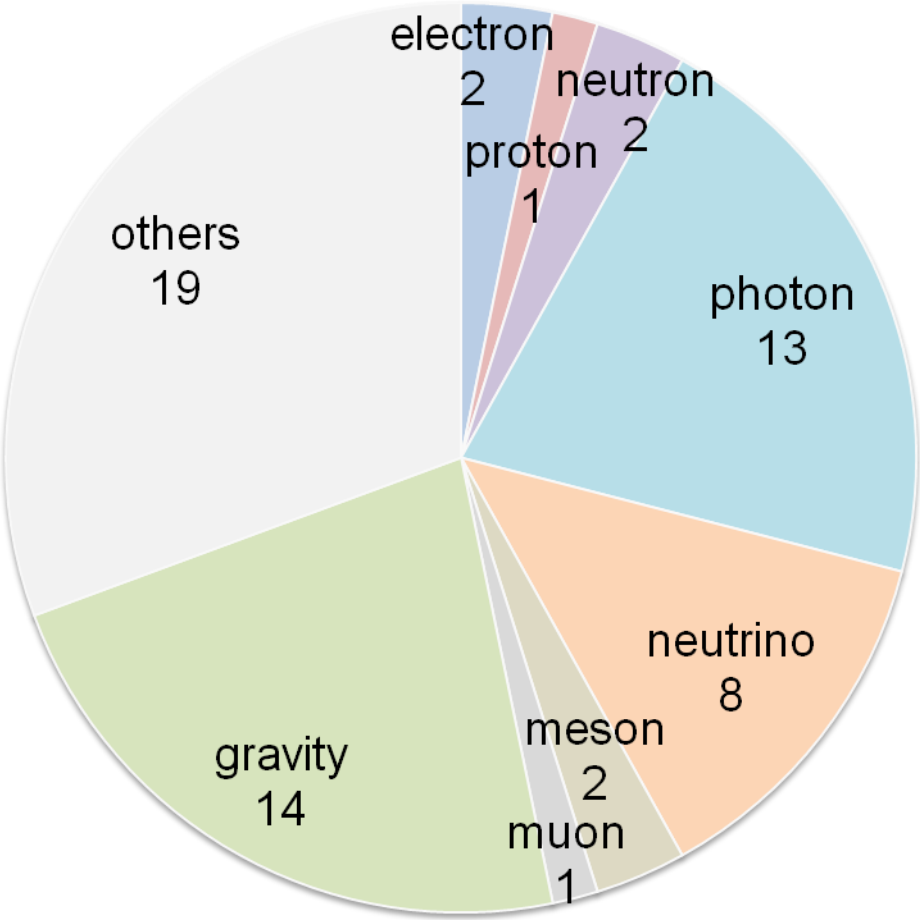
統計

- 実験が多めで、重力/光子関連が多かった

種類



扱う素粒子

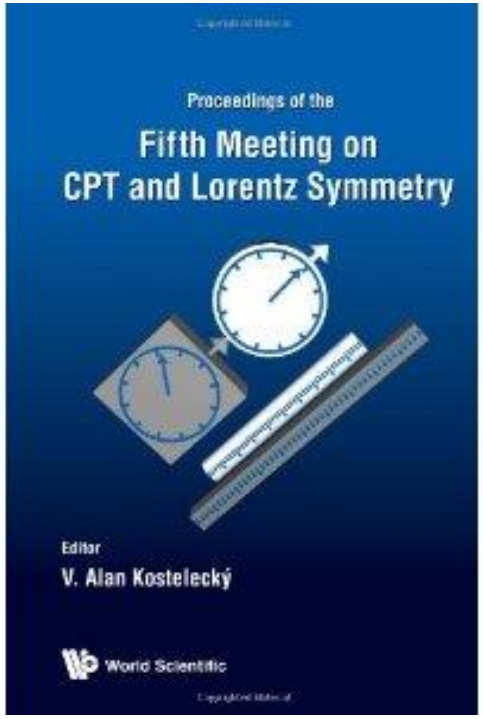


大実験は論文がXX collaborationで出るような実験(加速器など)
理論は実験提案を含む

othersは複数を扱うもの、判別しにくいものを含む

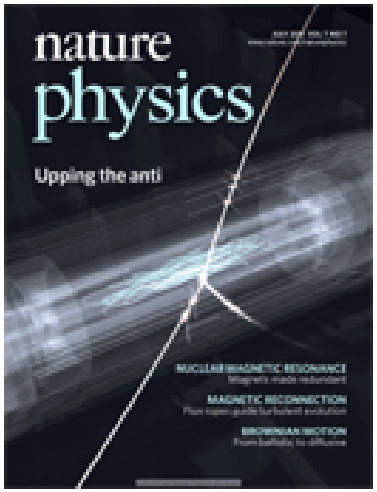
以降のスライド

- 以下、気になった発表の紹介
- 発表スライドなどは残されてません
- 全プログラムは公式サイトへ
  http://www.indiana.edu/~lorentz/cpt13/
- proceedingsがWorld Scientificから出版される予定
  (7月19日締切)
- 全部聞いたので気になるのがあればあとで質問して下さい



Makoto Fujiwara (TRIUMF) -1

- Physics with Trapped Antihydrogen
- ALPHA実験
- 反水素を1000秒トラップ
  [Nature Physics 7, 558 (2011)]
- 確かに反物質は安定だとわかった
- e^+や$\bar{p}$の数を増やすとその電磁場が邪魔になるのが難しいらしい
- CPT対称性や反物質に働く重力の検証ができる



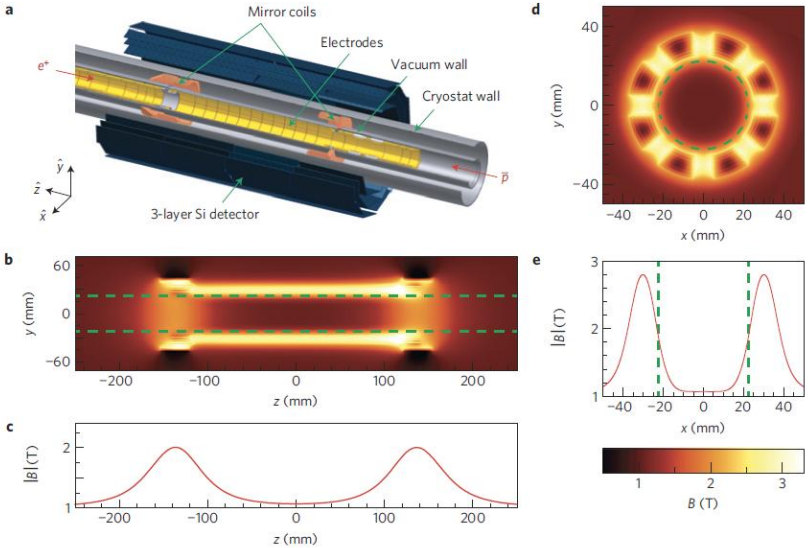
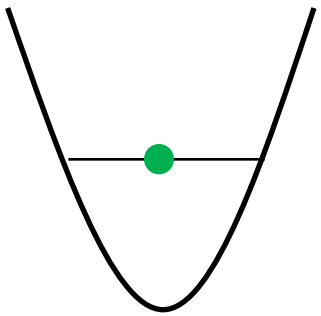


Figure 1 | The ALPHA antihydrogen trap and its magnetic-field configuration. a, A schematic view of the ALPHA trap. Radial and axial confinement of antihydrogen atoms is provided by an octupole magnet (not shown) and mirror magnets, respectively. Penning trap electrodes are held at ~9 K, and have an inner diameter of 44.5 mm. A three-layer silicon vertex detector surrounds the magnets and the cryostat. A 1 T base field is provided by an external solenoid (not shown). An antiproton beam is introduced from the right, whereas positrons from an accumulator are brought in from the left. **b**, The magnetic-field strength in the *y*–*z* plane (*z* is along the trap axis, with $z = 0$ at the centre of the magnetic trap). Green dashed lines in this and other figures depict the locations of the inner walls of the electrodes. **c**, The axial field profile, with an effective trap length of ~270 mm. **d**, The field strength in the *x*–*y* plane. **e**, The field-strength profile along the *x* axis.

Makoto Fujiwara (TRIUMF) -2

- 反水素に働く重力
  Nature Communications 4, 1785 (2013)
- トラップをなくして自由落下させ、壁にぶつかった位置(上下)の分布を測定
- $F \equiv M_g/M$とすると、$-65 < F < 110$ (5%)
  重力質量と慣性質量の比
  F=1なら下に、F=-1なら上に



- 運動エネが大きすぎる(初速の影響)
  初速の分布は温度からわかる
- 現在ALPHA-2を建設中
  - laser cooling
  - より精密なspectroscopyでCPT対称性検証

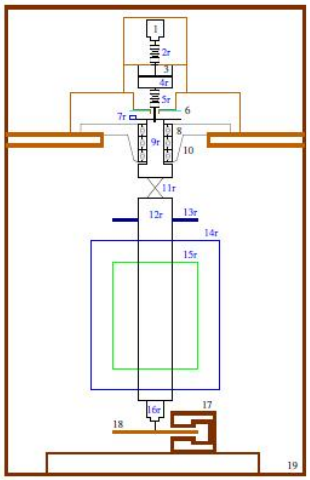
Teppei Katori (MIT)

- Testing Lorentz Symmetry with the Double Chooz Experiment
- 原子炉からのニュートリノで混合角を測定
  PRL 108, 131801 (2012)
  $$\sin^2 2\theta_{13} = 0.086 \pm 0.041(\text{stat}) \pm 0.030(\text{syst})$$
- 混合角の地球自転に伴った変化を探査→LI検証
  arXiv:1209.5810

Anna Nobili (Pisa)

- The GG and GGG Experiments
- 弱い等価原理(WEP/UFF)の検証
- Eötvösの実験の現代版
- 回転させることで熱雑音を減らす

R. Pegna+: PRL 107, 200801 (2011)



A. Nobili+: CQG 29, 184011 (2012)

FIG. 5: In order to isolate the GGG rotating accelerometer from low frequency terrain and ball bearings noise (tilts as well as horizontal accelerations) the current design (*left*) exploits the attenuation provided at low frequencies by the 2D flexible joint (labeled 11r –r refers to a rotating component) isolating the upper part of the shaft (9r) –which is subject to ground tilts and ball bearings (8) noise– from the lower part (12r) which holds the GGG balance. Thus, the isolated part of the shaft (12r) is driven by its weight closer to the direction of local gravity (which defines the vertical direction) more than its tilted top part. The picture to the right shows the experimental apparatus while opening the vacuum chamber.

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 → 4 cm
  - Q値が 2e8 → 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？)
- でも回転させたら結局予定より2桁くらい悪くなってた

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

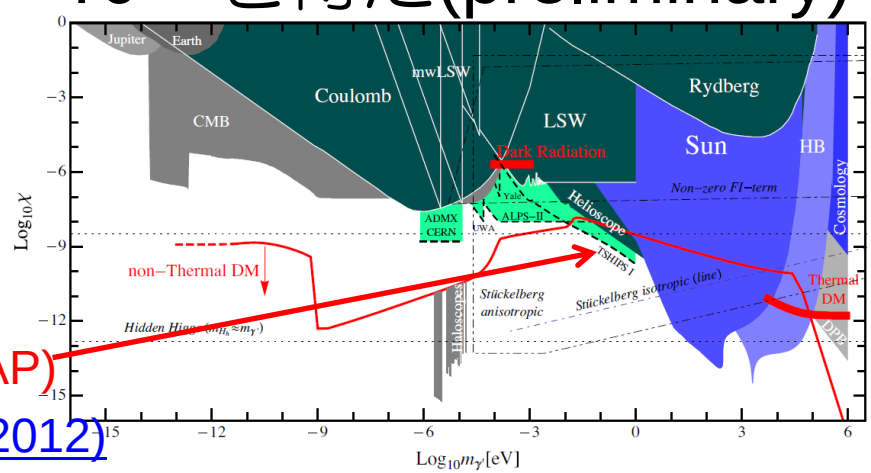
2005年時点の装置
Lect. Notes Phys, 702 416 (2006)
最新版は見た目変わってた

Michael Tobar (Western Australia)

- Testing Lorentz Invariance and Fundamental Constants with Cryogenic Sapphire Oscillators and Atomic Clocks
- UWAからの近年の成果のレビュー
- hidden sector photon search
  S. R. Perker+:
  [PRD 87, 115008 (2013)](#) (提案)
- 2ヶ月でχ~ 10^{-10}を得た(preliminary)

paraphotonとphotonの混合角

みのわ研はここら辺
T. Mizumoto+:
[arXiv:1302.1000](#) (JCAP)
[Dark Universe 1, 116 (2012)](#)



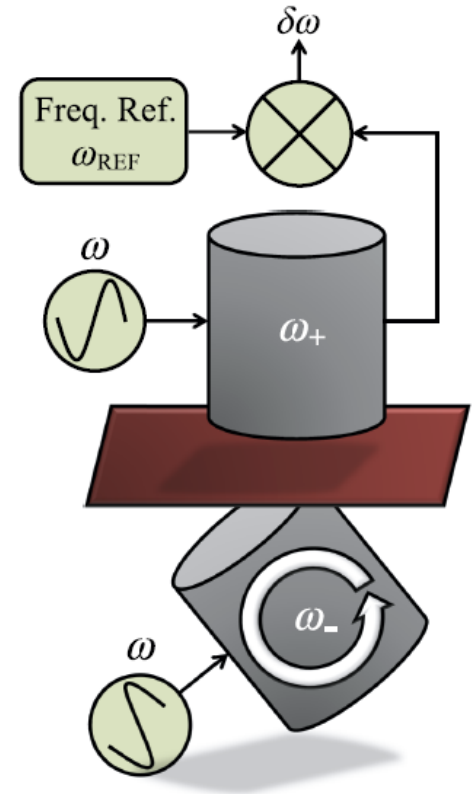


FIG. 3 (color online). Schematic of a rotating paraphoton coupled cavity experiment. The two empty cavities are separated by an impenetrable barrier (red plane) and actively driven at frequency ω, although the resonant frequencies of the cavities may be slightly detuned (ω_+ and ω_-). One cavity is rotated orthogonally to the other. The frequency of the stationary cavity is compared to a stable frequency reference (ω_{REF}) to produce the beat frequency ($\delta\omega$).

Christian Ospelkaus (Leibniz)

- A CPT test with (Anti-)Proton Magnetic Moments Based on Quantum Logic Cooling and Readout
- イオンをマイクロ波でトラップできる
  - K. R. Brown+:
    - Nature 471, 196 (2011)
  - C. Ospelkaus+:
    - Nature 476, 181 (2011)
- p と $\bar{p}$ の g-factor を比較して CPT 検証
- CERN に認められて $\bar{p}$ が使えるようになったとか

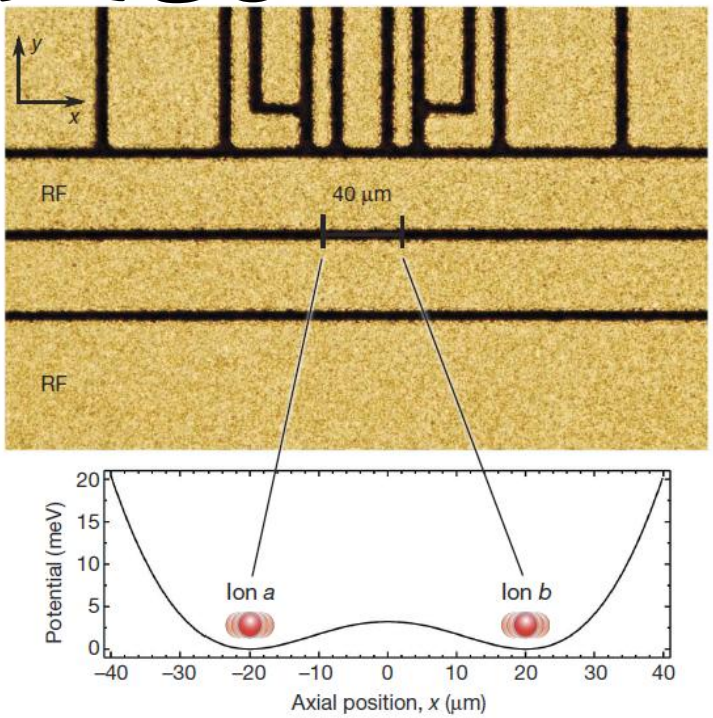


Figure 1 | Micrograph of the ion trap, showing radio-frequency (RF) and d.c. electrodes, and gaps between electrodes (darker areas). The lower part of the figure indicates the simulated potential along the trap *x* axis. Two trapping wells are separated by 40 μm, with ion positions marked by red spheres. The d.c. electrodes are sufficient to control the axial frequency and the position of each ion independently. Here both frequencies are ~4 MHz and the potential barrier between the two ions is ~3 meV.

Moritz Nagel (Humboldt)

- Ultra-Stable Cryogenic Optical Resonators for Tests of Fundamental Physics
- H. Müller+: PRL 91, 020401 (2003) (CORE)のアップグレード
  - 共振器長を 3 cm → 10 cm
  - finesse 25万 (実測~5万)
  - nodal support
  - 回転系の改善 (傾き < ~1 urad)
  - 2e-17@100sec目指す(現状は~1e-15だった)
- CSOと一緒に回してパラメータ分離、系統誤差評価

2003年時点の装置
http://www.exphy.uni-duesseldorf.de/ResearchInst/WelcomeFP.html
最新版は細長く、サポートが変わってた

PTB2012の話もあったし、コーティング頑張る(GaAs)とか言っていたのでわりと真面目っぽい。2e-17はcoating thermal limit(amorphous)。

Holger Müller (Berkeley)

- Lorentz Violation and Gravity: Experiments on Earth and in Space
- GWADWにも来たりしている原子干渉計の方
- 原子のコンプトン波長を測定して質量を4e-9の精度で測定
  S.-Y. Lan+: [Science, 339, 554 (2013)]
- プランク定数を定義にするってこと
- アボガドロ定数は4e-8の測定誤差がある

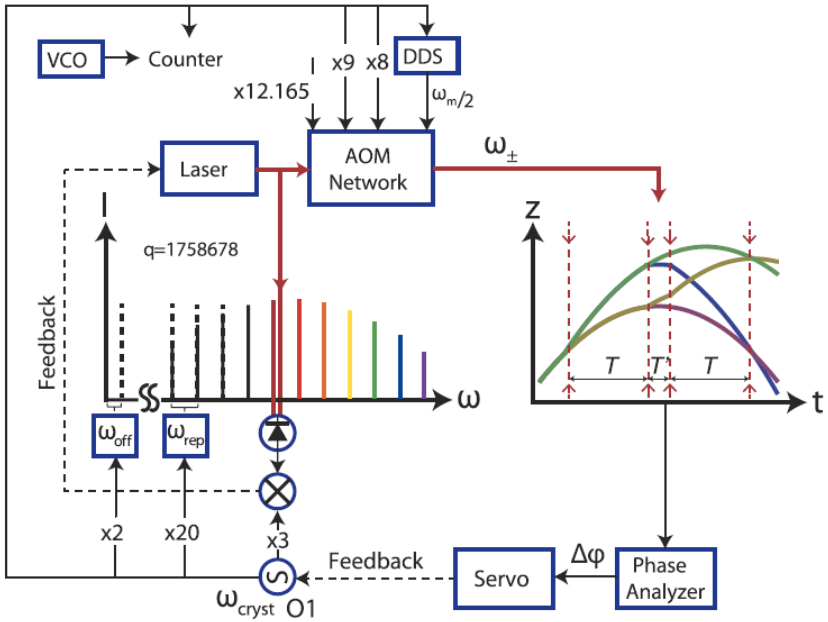


Fig. 2. Schematic. Oscillator O1 is the frequency reference for all signal generators and the optical frequency comb. The laser used to address the atom interferometer is phase-locked to the comb. Shown in the diagram is the freely falling atomic trajectories versus time for the simultaneous conjugate interferometers (the lower of which being shown in Fig. 1) used to cancel the gravity-induced phase. The phase measurement from the atom interferometer provides an error signal to O1 in order to close the feedback loop.

Matthew Mewes (Swarthmore)

- Higher-Order Lorentz Violation
- M. Mewes: PRD 85, 116012 (2012)
- 繰り込み不可な項も考えるnon-minimalSME

$$\mathcal{L}^{\text{total}}_{\text{photon}} = \underbrace{-\tfrac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu}}_{\text{SM}} \underbrace{-\tfrac{1}{4}(k_F)_{\kappa\lambda\mu\nu}F^{\kappa\lambda}F^{\mu\nu}}_{\text{mSME (CPT-even)}} \underbrace{+\tfrac{1}{2}(k_{AF})^{\kappa}\epsilon_{\kappa\lambda\mu\nu}A^{\lambda}F^{\mu\nu}}_{\text{non-mSME (CPT-odd)}}$$

- 重力は繰り込み不可なので、それが動機付け
- 無限個のLVが出てくる
- 次数dを決めれば僕の実験でも高次LVに制限付けられる(**でもd=4は無理？**)

TABLE III. Numbers of combinations of $d = 4, 6, 8$ camouflage coefficients accessible to the existing experiments discussed in this work. The second column gives the number of parity-even coefficients accessible to the Fabry-Pérot experiments of Refs. [7,8]. The third column gives the number of parity-odd coefficients for the ring resonator of Ref. [9]. For comparison, the next three columns give the number of parity-even anisotropic, parity-odd anisotropic, and isotropic camouflage coefficients.

coef.	F.-P.	ring	P-even	P-odd	iso.
$c^{(4)}_{(I)jm}$	5	0	5	3	1
$(\bar{c}^{(6)}_F)^{(0E)}_{njm}$	5	3	5	3	2
$(\bar{c}^{(8)}_F)^{(0E)}_{njm}$	13	12	19	13	3

実験例　S. R. Parker+: PRL 106, 180401 (2011)

リング共振器でd=4が難しい理由

- LVによる共振周波数のずれ

$$
\begin{aligned}
\frac{\delta\nu}{\nu} &= -\frac{1}{U}\int_V \mathrm{d}^3x \left(\sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}}\mathrm{Re}\left(\vec{E}_0^* \cdot \kappa_{DB}\vec{B}_0\right)\right) \\
&= -\frac{1}{U}\epsilon^{jkl}(\tilde{\kappa}_{o+}^{(4)})^{kl}\int_V \mathrm{d}^3x \left(\sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}}n|E_0|^2\right) \\
&= -\frac{1}{U}\epsilon^{jkl}(\tilde{\kappa}_{o+}^{(4)})^{kl}\int_V \mathrm{d}^3x \left(\sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}}\mu\mathrm{Re}\left(\vec{E}\times\vec{H}\right)\right)
\end{aligned}
$$

屈折率を変えればいけそう！

でも実際に保存するのはPoynting vector
透磁率を変えないとだめ……

- 素粒子物理学の基本はEとBだが、Poynting vectorはEとHだから
- 片道光速異方性は電場と磁場の非対角項から来ているが、その項は屈折率の影響を受けないから

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

今後どうするか

- 高次LVには制限がつけられるのでそれを目指す
- even-parityではマイクロ波共振器で制限がつけられた例はあるが、odd-parityは例がない
- さらに、光の方が圧倒的に感度よいらしい(周波数の数乗で効く)

引用関係

2005.01.07 Tobar+: PRD 71, 025004 (2005)
odd-parity実験の提案

2009.12.22 Tobar+: PRD 80, 125024 (2009)
MZ干渉計によるodd-parity実験

2011.05.03 Parker+: PRL 106, 180401 (2011)
マイクロ波CSOによる初の高次LVへの制限

2011.10.06 Baynes+: PRD 84, 081101(R) (2011)
共振器によるodd-parity実験(無回転)

2012.06.26 Baynes+: PRL 108, 260801 (2012)
共振器によるodd-parity実験

2012.06.26 Mewes: PRD 85, 116012 (2012)
共振器による高次LVの計算

2013.05.13 YM+: PRL 110, 200401 (2013)
ダブルパスによるodd-parity実験

2013.??.?? YM+: PRL??
ダブルパスによる高次LVへの制限

高次のLVパラメータ？

- 下記の表はBaynesらの共振器での係数
- 僕のでも同じように計算できるはず

TABLE II. Nonzero modulation amplitudes for the ring resonator in Ref. [9]. Camouflage coefficients up to dimension $d = 8$ are included. The numbers m and m' give the harmonics of the turntable rotation frequency and sidereal frequency, respectively. The dimension-6 amplitudes are in units of 10^{-18} GeV^2 The dimension-8 amplitudes are in units of 10^{-36} GeV^4.

dimension	m	m'	$C^C_{mm'}$	$C^S_{mm'}$	$S^C_{mm'}$	$S^S_{mm'}$
$d = 6$	1	0	$0.22(\bar{c}_F^{(6)})^{(0E)}_{110}$	0	0	0
	1	1	$-0.20\,\mathrm{Re}[(\bar{c}_F^{(6)})^{(0E)}_{111}]$	$0.20\,\mathrm{Im}[(\bar{c}_F^{(6)})^{(0E)}_{111}]$	$-0.37\,\mathrm{Im}[(\bar{c}_F^{(6)})^{(0E)}_{111}]$	$-0.37\,\mathrm{Re}[(\bar{c}_F^{(6)})^{(0E)}_{111}]$
$d = 8$	1	0	$-0.61(\bar{c}_F^{(8)})^{(0E)}_{110}$	0	0	0
			$+6.5(\bar{c}_F^{(8)})^{(0E)}_{310}$			
			$-1.5(\bar{c}_F^{(8)})^{(0E)}_{330}$			
	1	1	$0.54\,\mathrm{Re}[(\bar{c}_F^{(8)})^{(0E)}_{111}]$	$-0.54\,\mathrm{Im}[(\bar{c}_F^{(8)})^{(0E)}_{111}]$	$1.0\,\mathrm{Im}[(\bar{c}_F^{(8)})^{(0E)}_{111}]$	$1.0\,\mathrm{Re}[(\bar{c}_F^{(8)})^{(0E)}_{111}]$
			$-5.8\,\mathrm{Re}[(\bar{c}_F^{(8)})^{(0E)}_{311}]$	$+5.8\,\mathrm{Im}[(\bar{c}_F^{(8)})^{(0E)}_{311}]$	$-11\,\mathrm{Im}[(\bar{c}_F^{(8)})^{(0E)}_{311}]$	$-11\,\mathrm{Re}[(\bar{c}_F^{(8)})^{(0E)}_{311}]$
			$-9.2\,\mathrm{Re}[(\bar{c}_F^{(8)})^{(0E)}_{331}]$	$+9.2\,\mathrm{Im}[(\bar{c}_F^{(8)})^{(0E)}_{331}]$	$+1.0\,\mathrm{Im}[(\bar{c}_F^{(8)})^{(0E)}_{331}]$	$+1.0\,\mathrm{Re}[(\bar{c}_F^{(8)})^{(0E)}_{331}]$
	1	2	$-1.1\,\mathrm{Re}[(\bar{c}_F^{(8)})^{(0E)}_{332}]$	$1.1\,\mathrm{Im}[(\bar{c}_F^{(8)})^{(0E)}_{332}]$	$7.2\,\mathrm{Im}[(\bar{c}_F^{(8)})^{(0E)}_{332}]$	$7.2\,\mathrm{Re}[(\bar{c}_F^{(8)})^{(0E)}_{332}]$
	1	3	$3.8\,\mathrm{Re}[(\bar{c}_F^{(8)})^{(0E)}_{333}]$	$-3.8\,\mathrm{Im}[(\bar{c}_F^{(8)})^{(0E)}_{333}]$	$7.1\,\mathrm{Im}[(\bar{c}_F^{(8)})^{(0E)}_{333}]$	$7.1\,\mathrm{Re}[(\bar{c}_F^{(8)})^{(0E)}_{333}]$
	3	0	$2.5\,\mathrm{Re}[(\bar{c}_F^{(8)})^{(0E)}_{330}]$	0	0	0
	3	1	$-2.7\,\mathrm{Re}[(\bar{c}_F^{(8)})^{(0E)}_{331}]$	$2.7\,\mathrm{Im}[(\bar{c}_F^{(8)})^{(0E)}_{331}]$	$-5.0\,\mathrm{Im}[(\bar{c}_F^{(8)})^{(0E)}_{331}]$	$-5.0\,\mathrm{Re}[(\bar{c}_F^{(8)})^{(0E)}_{331}]$
	3	2	$4.8\,\mathrm{Re}[(\bar{c}_F^{(8)})^{(0E)}_{332}]$	$-4.8\,\mathrm{Im}[(\bar{c}_F^{(8)})^{(0E)}_{332}]$	$4.0\,\mathrm{Im}[(\bar{c}_F^{(8)})^{(0E)}_{332}]$	$4.0\,\mathrm{Re}[(\bar{c}_F^{(8)})^{(0E)}_{332}]$
	3	3	$-3.2\,\mathrm{Re}[(\bar{c}_F^{(8)})^{(0E)}_{333}]$	$3.2\,\mathrm{Im}[(\bar{c}_F^{(8)})^{(0E)}_{333}]$	$-3.3\,\mathrm{Im}[(\bar{c}_F^{(8)})^{(0E)}_{333}]$	$-3.3\,\mathrm{Re}[(\bar{c}_F^{(8)})^{(0E)}_{333}]$

Gerald Gwinner (Manitoba)

- Laser-Spectroscopic Test of Time Dilation with Fast Ions in Storage Rings: a Final Report
- RMS検証理論でαの世界記録を持っているグループ
  S. Reinhardt+: Nature Physics 3, 861 (2007)

$$\hat{\alpha} = (-4.8 \pm 8.4) \times 10^{-8}$$
$$\tilde{\kappa}_{\mathrm{tr}} \lesssim 8.4 \times 10^{-8}$$

- 2007年から進展はなさそうだった
- 今はP対称性検証の別の実験をしているらしい

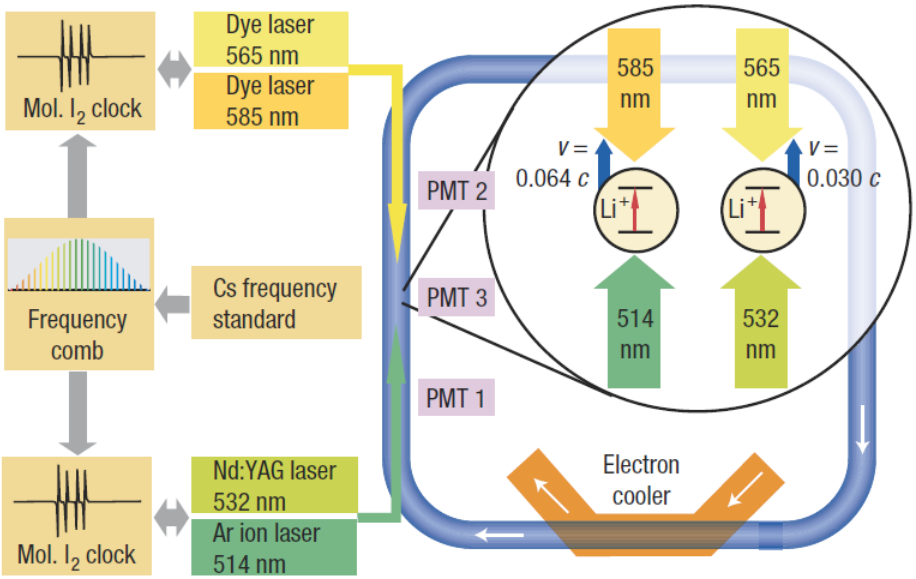


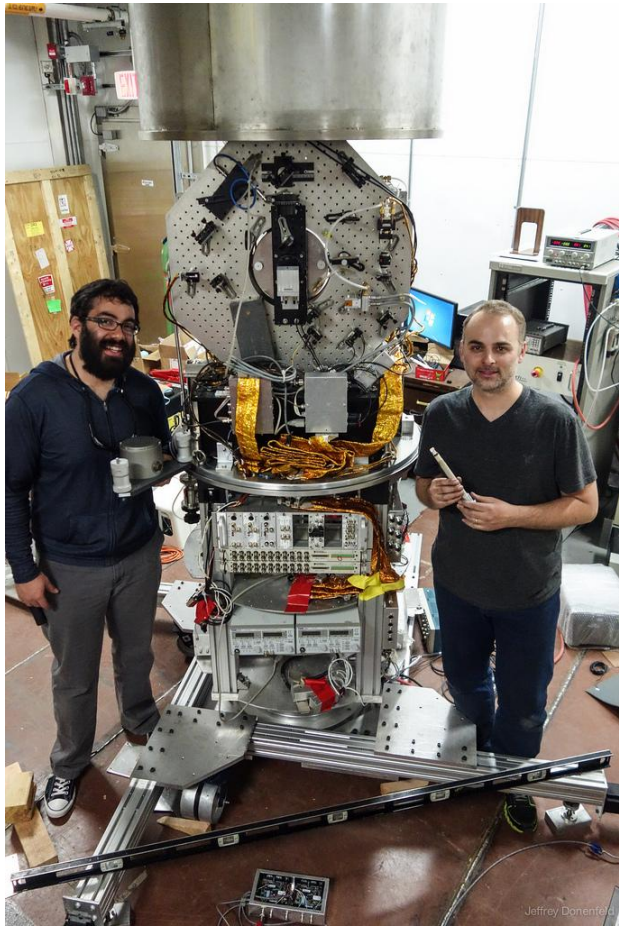
Figure 1 Schematic diagram of the TSR. Li^+ ions circulate in the 55-m-circumference ring. In the electron cooler, cold electrons are overlapped with the ions and provide cooling. The measurements at the two different velocities are carried out sequentially. In the experiment, the two lasers are coupled into the ring from the same side and are retro-reflected.

Marc Smiciklas (Princeton)

- Test of Lorentz Invariance with Rb-21Ne Co-magnetometer at the South Pole
- スピン結合の異方性を測定(?)
- 南極で回転させた方が感度がいい
- Princetonでやっていた時(下論文)より1桁よい

  J. M. Brown+:

  PRL 105, 151604 (2010)



http://youtu.be/ehaMP6P7-fE
http://www.southpolestation.com/1213/13photos1.html
http://jeffreydonenfeld.com/blog/tag/marc-smiciklas/

Yuta Michimura (Tokyo)

- うまく発表できなかったが、質問はたくさん出た
- FFTを使わないと2倍得できるはず (A. Nobili)
- 吊るして回転させると傾きを抑えることができる (A. Nobili)
- Sagnac効果の影響は？
- demodulated amplitude から κ への変換係数は？
- magneticじゃないとダメでは？
- PDを2つ使っている理由は？ (S. Schiller)
- シリコンを使う理由は？　どれだけ得しているのか？
- シリコンのロスは？
- なぜ1年観測してから論文にしなかったの？
- なぜcavityにしたのか？ (S. Kopeikin)
- なぜ我々の論文を引用しないのか (R. Lehnert)
- わかりやすかった。実験の発表なのについていけた (Y. Bonder)
- 重力波が見つかったら教えて下さい

その他 -1

- Joel Weisberg (Carleton)
  Testing Lorentz Symmetry Using Binary Pulsars
  pulsar timingでLorentz不変性検証。
  Bailey & Kostelecký: PRD 74, 045001 (2006)

- Ralf Lehnert (IUCSS)
  Causality and Stability in Lorentz-Violating Quantum Field Theory
  超光速があっても理論的に因果律は破れないようにできる。

- James D. Phillips (Harvard-Smithsonian)
  Testing the Equivalence Principle 10,000 Times Better on a Sounding Rocket
  SR-POEMというWEP検証計画。
  Reasenberg+: CQG 29, 184013 (2012)
  (STE-QUEST計画からの発表もあった)

その他 -2

- Robert Wagner (MPI Munich)
  Recent Results from MAGIC Gamma-Ray Observations and Relevance and Prospects for Lorentz Symmetry Tests
  到達時刻のエネルギー依存性を測定。
  The MAGIC Collaboration: Science 322, 1221 (2008)
  (VERITASなども同様で、その発表もあった)

- Oleg Perevozchikov (LSU)
  Neutrino Time of Flight Study with T2K Detectors
  ニュートリノ速度測定
  (MINOSからの発表もあった)

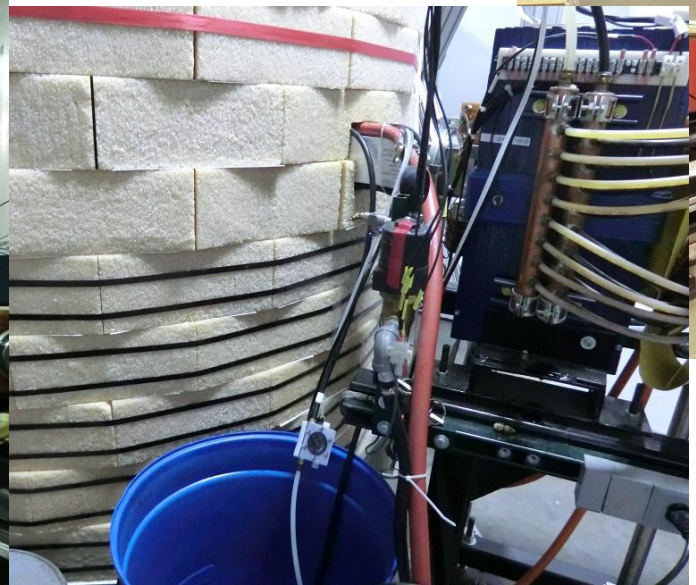
- Sergei Kopeikin (Missouri-Columbia)
  Equivalence Principle in Cosmology
  膨張宇宙での光速を考えると$c=1\pm H\tau$。
  ループを閉じると光速のずれはキャンセルされてしまうので、
  僕の実験に興味を持っていた。
  因果律と関係あるらしい？

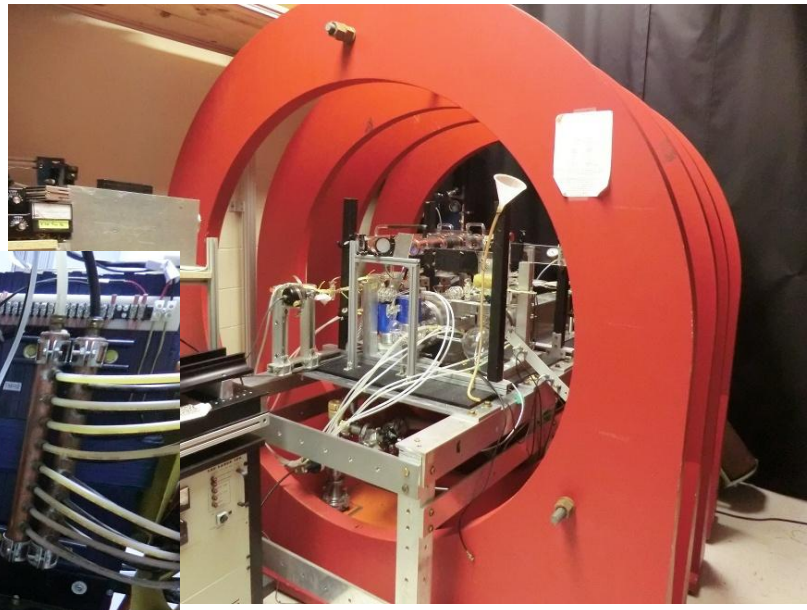
CEEM実験室見学 -1

- Center for Exploration of Energy and Matter
- LENSや電子EDM測定実験などいくつか回ったが、その中に元コロラド大の逆二乗検証実験があった

  J. C. Long+: Nature 421, 922 (2003)

LENS

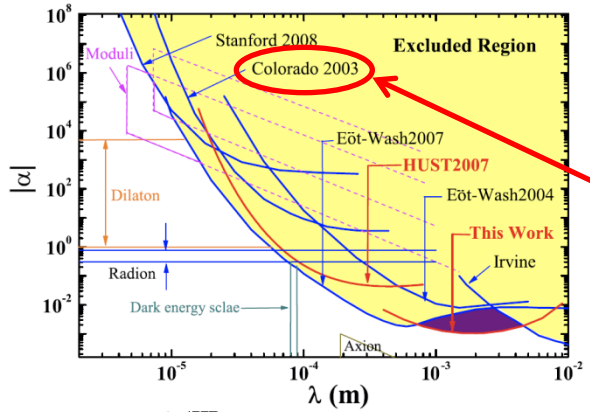




なんかスピン関係の実験

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



このグループ

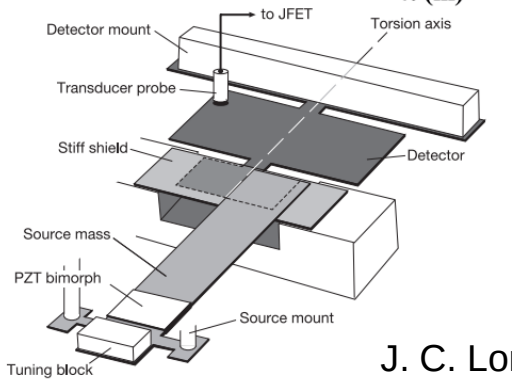


Figure 1 Major components of the apparatus. The smaller rectangle of the tungsten detector (under the shield) is 11.455 mm wide, 5.080 mm long and 195 μm thick. The

J. C. Long+: Nature 421, 922 (2003)

タングステン製の板

多段防振系
(LIGOのような
と説明してた)

まとめ

- ショッキングな事実を知った
- 知らないことが多かった
- 僕の実験を知っていて、興味を持ってくれる人が結構いた
- SMEの中の人と知り合えた
- 論文でよく見る名前の人がたくさんいてよかった
- SMEに重力項を入れるのは単純ではないらしい。理論/実験の重力関連の発表が多かった
- ニュートリノ関連も速度測定や混合角測定など多かった