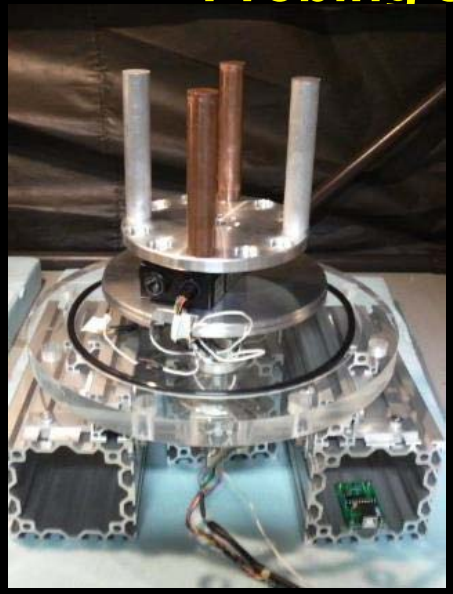
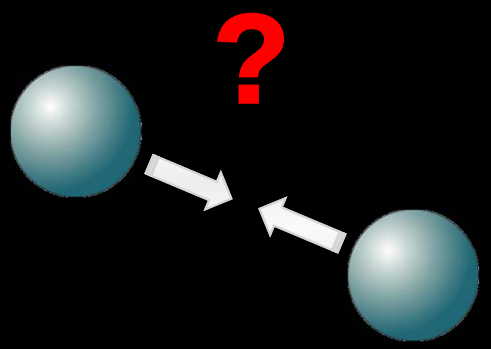
TRIUMF

Probing strong gravity using geodetic precession in nuclear scale

- Laboratory tests, wide range Review –

as tests of Inverse Square Law





Jiro Murata

Rikkyo University

Workshop on Gravitational physics with particle accelerators 2017

Nov.30, 2017

1. **Our Tabletop & Nuclear exp.**
2. **Interpretation of LHC & Atomic system**

ATLAS

Test of Weak Equivalence Principle at the shortest scale

Ninomiya-Murata, Class. Quantum Grav. 34 (2017) 185005

Modern "Galileo's Leaning Tower of Pisa experiment"

PR Wire 共同通信 PRワイヤー

会員ログイン　パートナー

トップ　Search News Releases

テーマ別　リリース画像一覧　動画リリース

トップ > 「現代のピサの斜塔の実験」に成功 ミリメートル規模での自由落下の一様性を初確認

Like 1　Share 1　Tweet　チェック　Share　Social News　B!

2017年8月8日

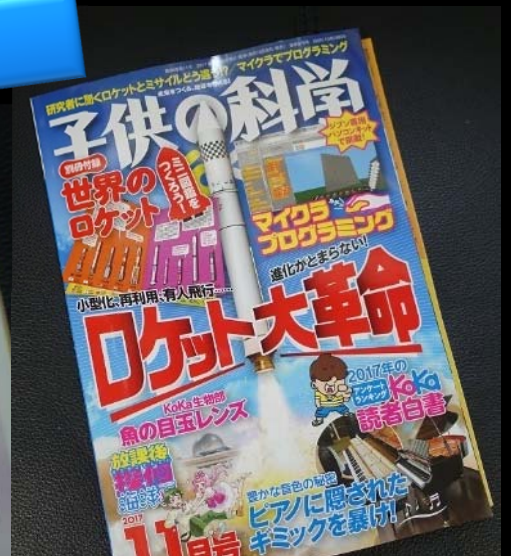
立教学院

「現代のピサの斜塔の実験」に成功 ミリメートル規模での自由落下の一様性を初確認

PDF

「現代のピサの斜塔の実験」に成功
ミリメートル規模での自由落下の一様性を初確認

全ての物体は重力によって同じ加速度で落下するという、ガリレオのピサの斜塔の実験で有名な自由落下の
インシュタインが一般相対性理論を構築する際の発想の原点となった、等価原理とも呼ばれる物理学にお
な原理の一つです。これまで等価原理は地球からの重力による実験においては極めて高い精度で成り立つ
ていましたが、実験室内のミリメートル規模の小物体による重力でも成り立つかどうかは確認されていま
の様な小物体の引き起こす重力は、地球の場合に比べて1億倍程度も弱く重力を検出すること自体が極めて
す。
研究チームは、ねじれ秤と呼ばれる装置と画像処理技術を組み合わせた独自の計測装置を開発し、ミリメ
チメートル規模の小物体間の重力の検出と、その物質による違いの有無を検証しました。表面近接距離は
迫る計測で、タングステンの小物体が銅とアルミの異なる重力源に対して感じる重力場の強さは、数%程
内で一致する事が初めて明らかとなりました。
この研究成果は、重力の物理学において最も権威ある専門的学術雑誌の一つである『Classical and Quan
(古典および量子重力)』に掲載されます。

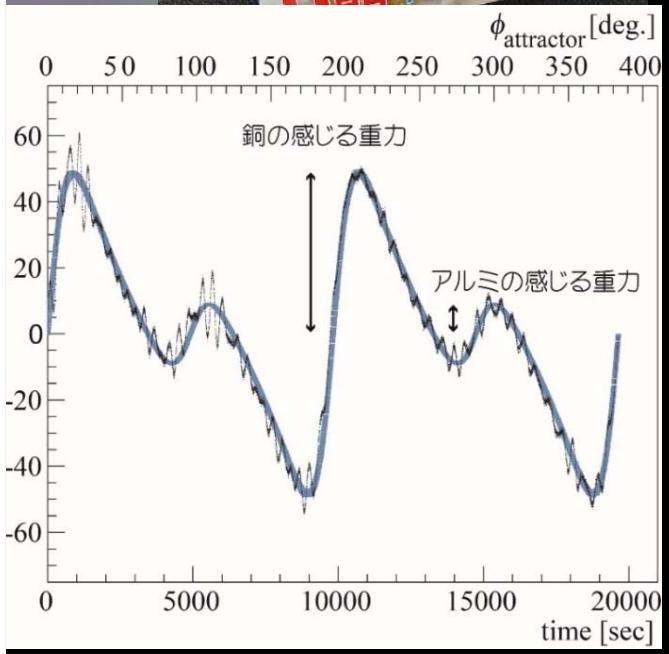


大学ジャーナルオンライン
8月16日 ·

現代版ピサの斜塔実験、自由落下の一様性をミリメートル規模で初確認　立教大学
http://univ-journal.jp/15327/

現代版ピサの斜塔実験、自由落下の一様性をミリメートル規模で初確認　立教大学 | 大学ジャーナルオンライン
...
UNIV-JOURNAL.JP

いいね！　コメントする　シェアする



Equivalence Principle ~ Lorentz Invariance ~ Quantum Gravity

FAQ on Gravity

Where is the minimum scale, at which gravity is tested?

Expected answer: 100 micron

My answer: the LHC scale (10^{-20}m)

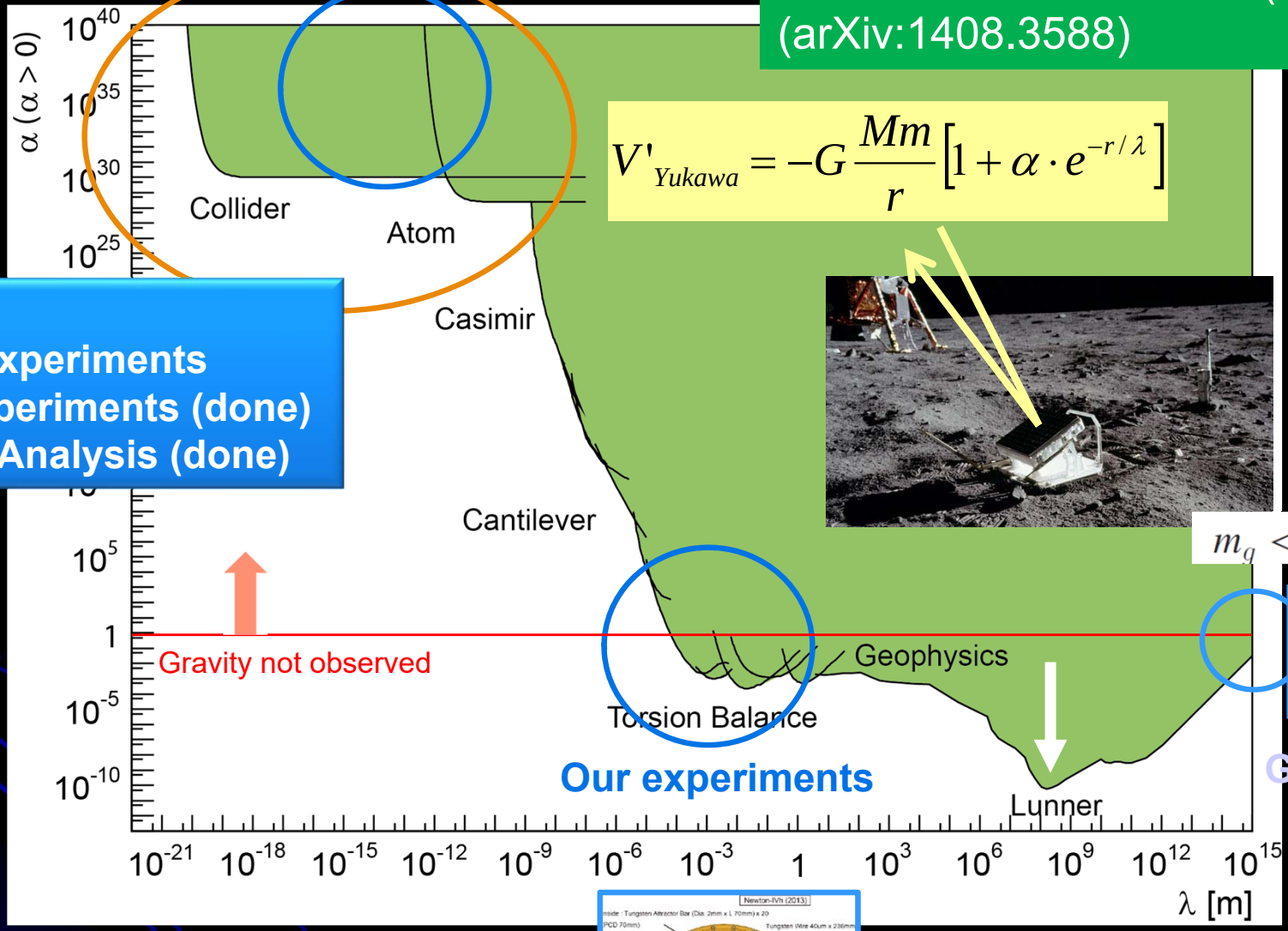
Experimental Constraints on Gravitational Inverse Square Law

Our analysis

Murata-Tanaka CQG 32 (2015) 033001 (arXiv:1408.3588)

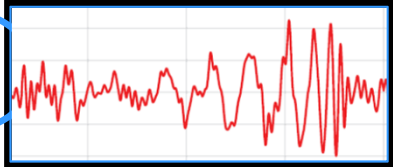
$$V'_{Yukawa} = -G\frac{Mm}{r}\left[1+\alpha\cdot e^{-r/\lambda}\right]$$

Our work
1. Table top experiments
2. Nuclear experiments (done)
3. Reviewing Analysis (done)

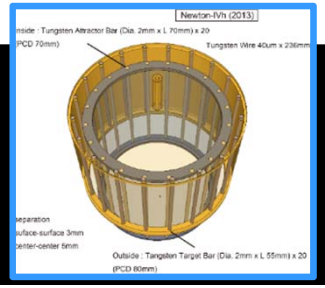


Apollo-11

$m_g < 1.2 \times 10^{-22}\ \mathrm{eV}/c^2$



Gravitational Wave



Yukawa parametrization
Boson exchange / 1st KK excitation

Graviton mass – Freq. dep. on v ~
Wave form deformation

Important points to think about experimental gravity

Be quantitative. Think S/N ratio.

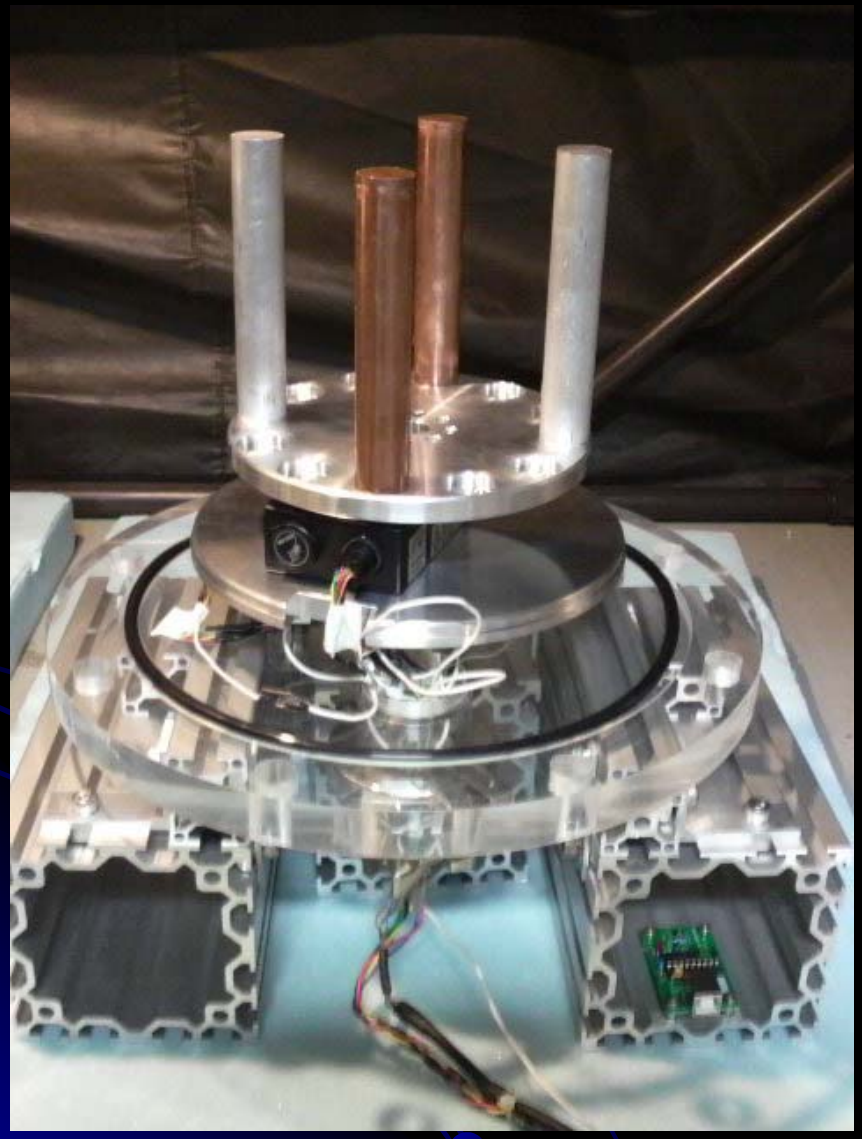
Gravity can be probed by many tools, in principle.

The backgrounds are 10^{30} times stronger forces.

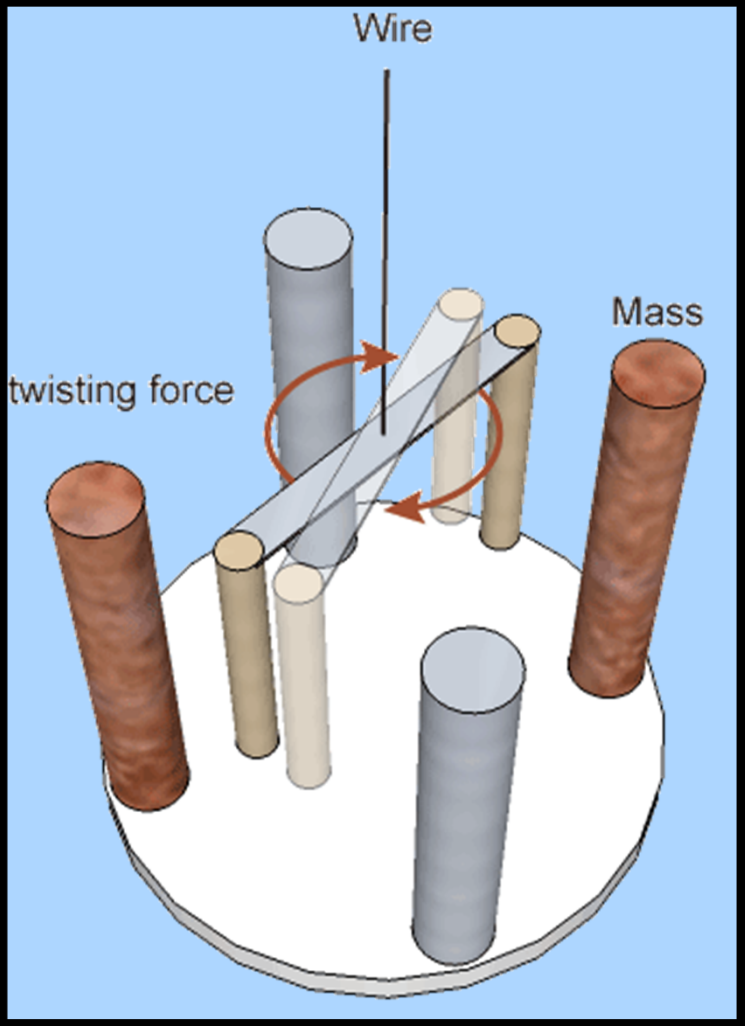
1. **shielding (or natural cancellation)**
2. ***extreeeeeeme* precision on background estimation**
3. **extreme short distance**

is necessary

Small Scale, Legacy, but unique and powerful tool:
Torsion Balance Bar

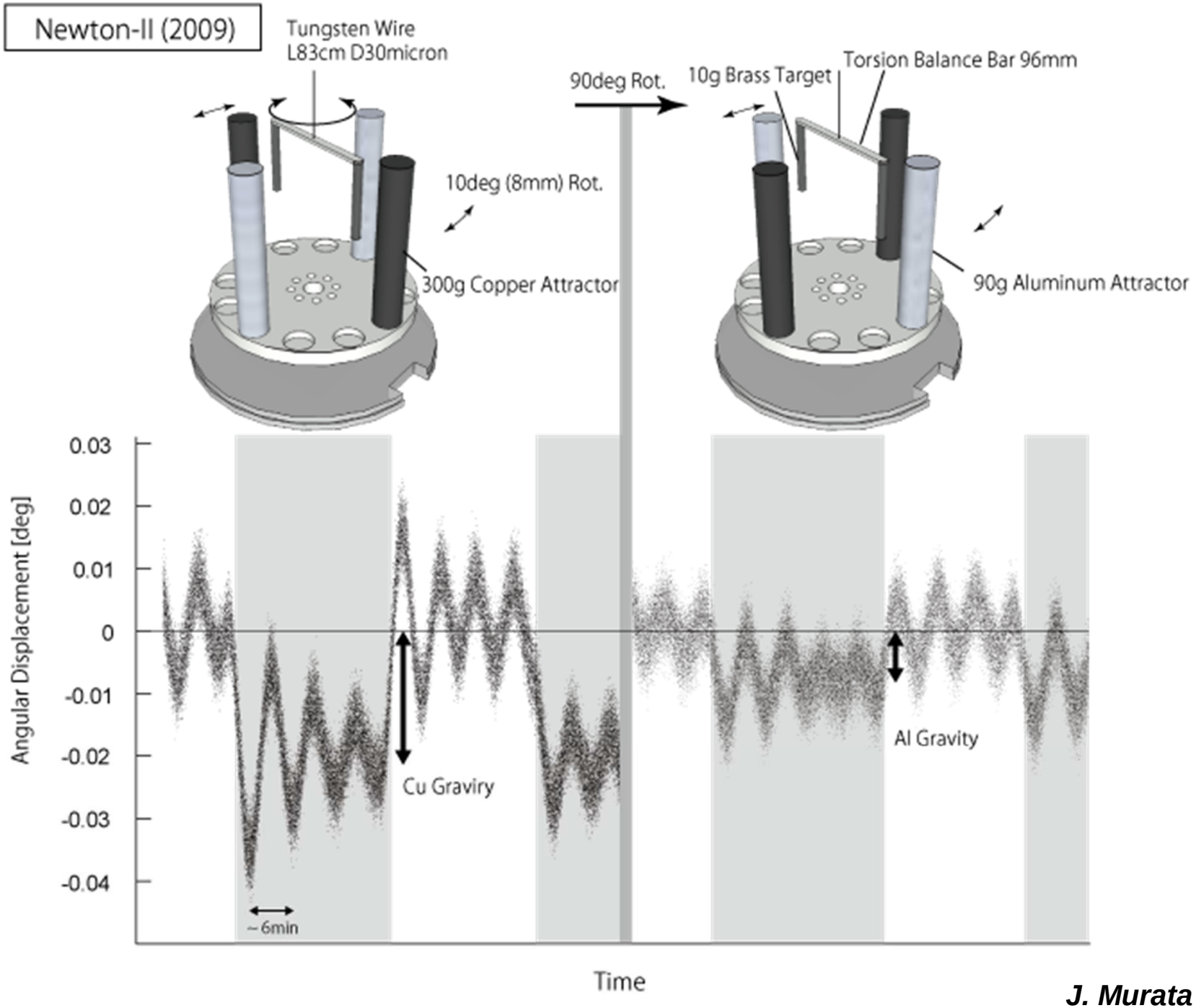


Newton-II Experiment (2009)

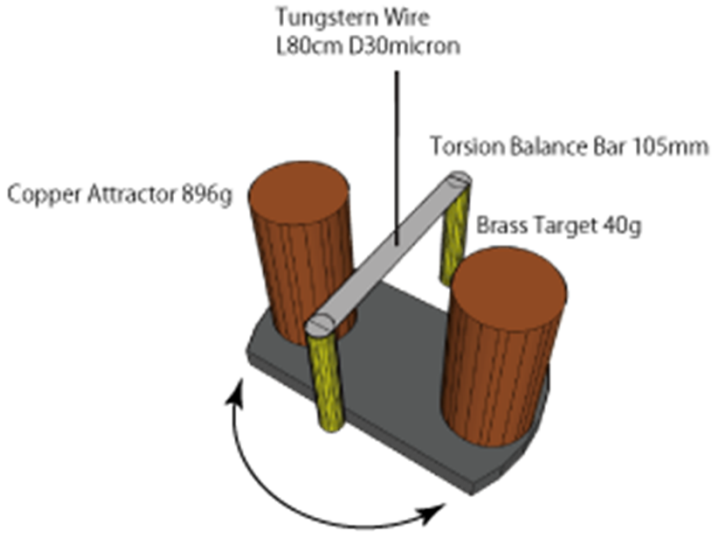


Ninomiya, J. Phys. CS453 (2013) 012007

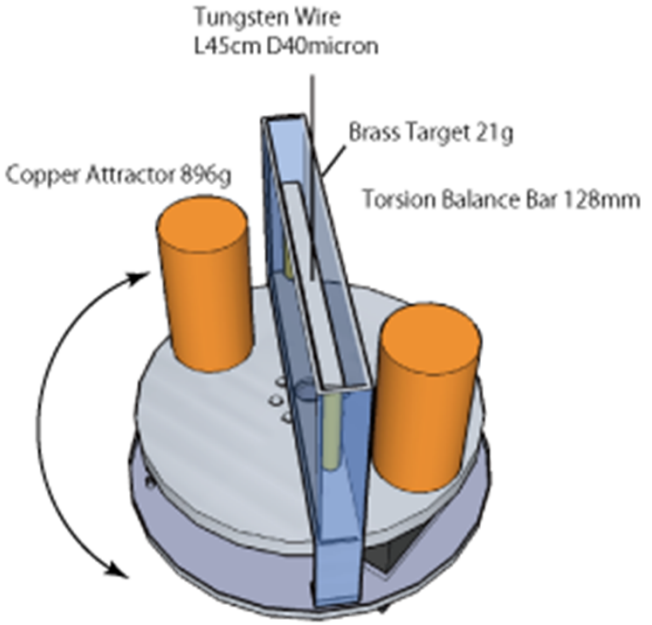
F ~ 100pN **weight of 10um water cubic**



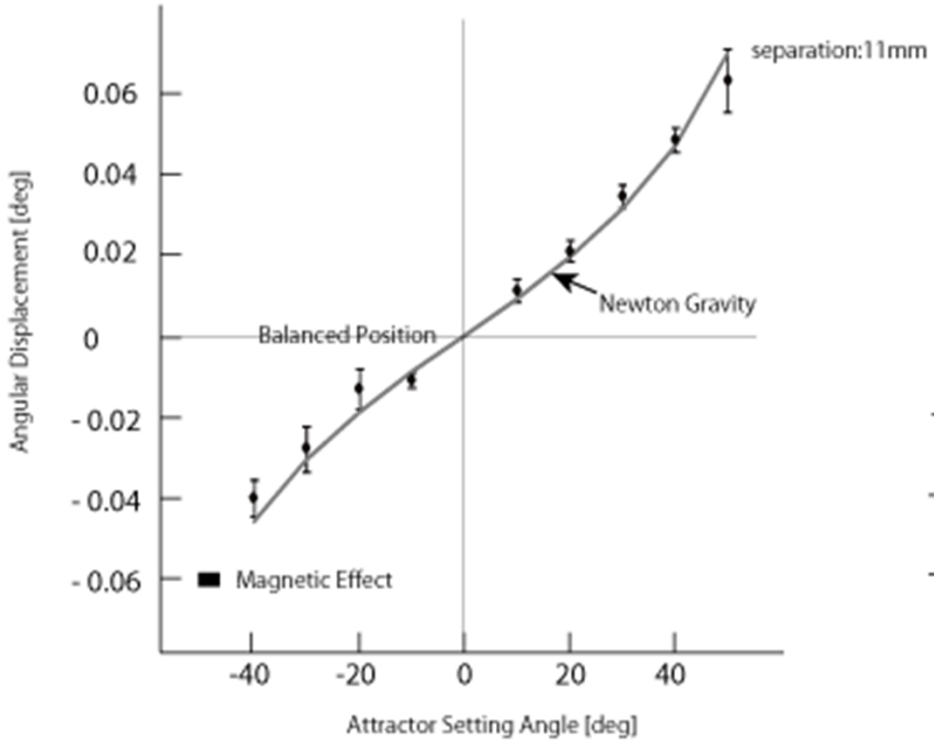
J. Murata 2011

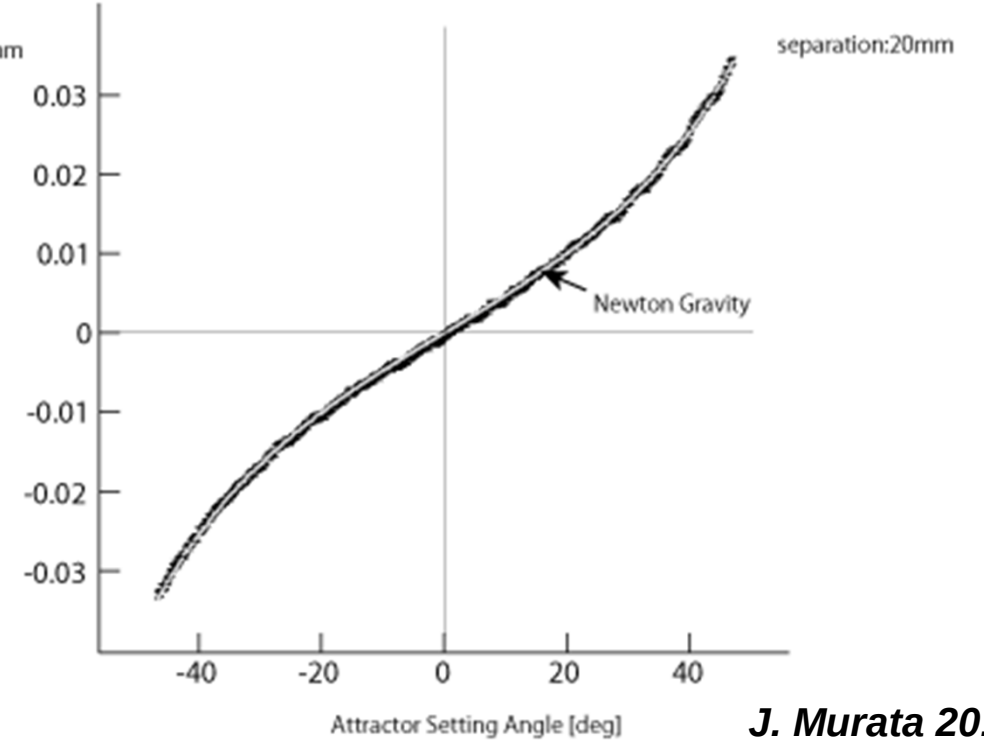


Newton-I (2006)

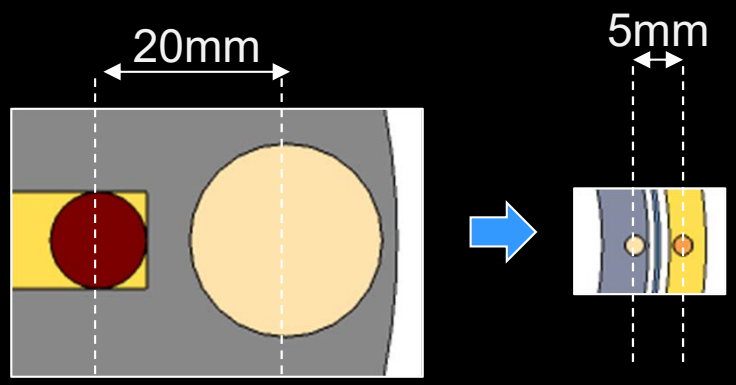


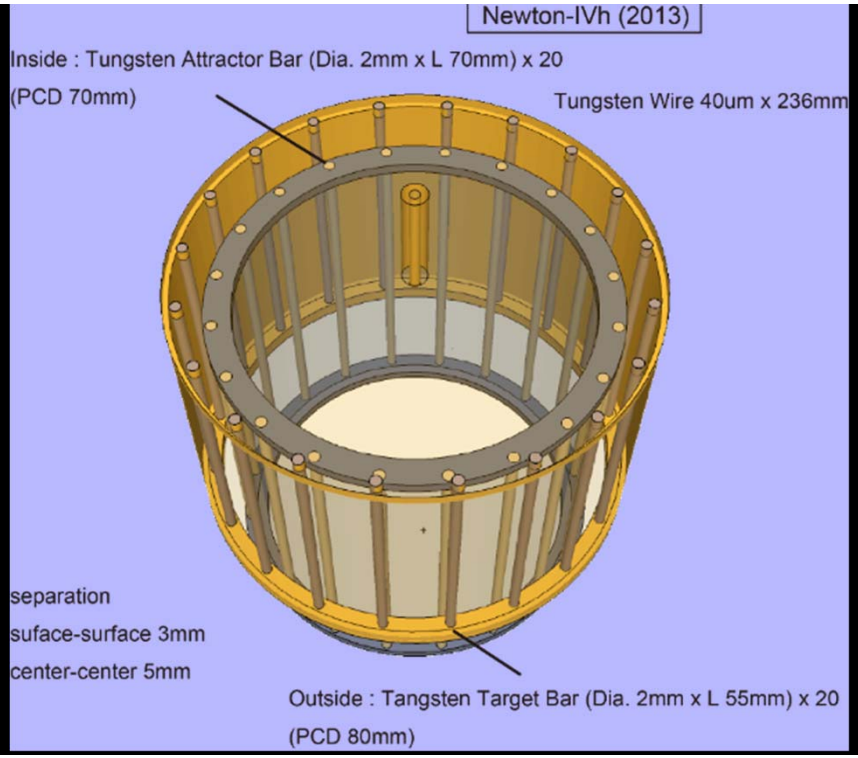
Newton-SC (2009)

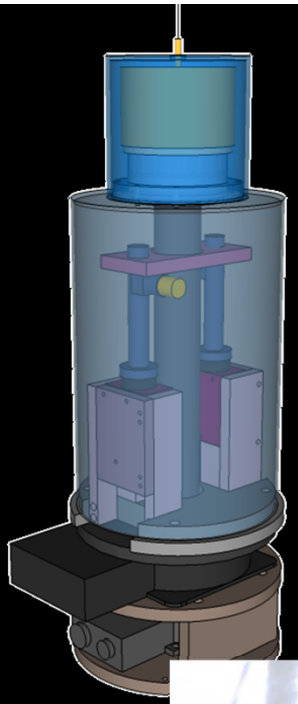




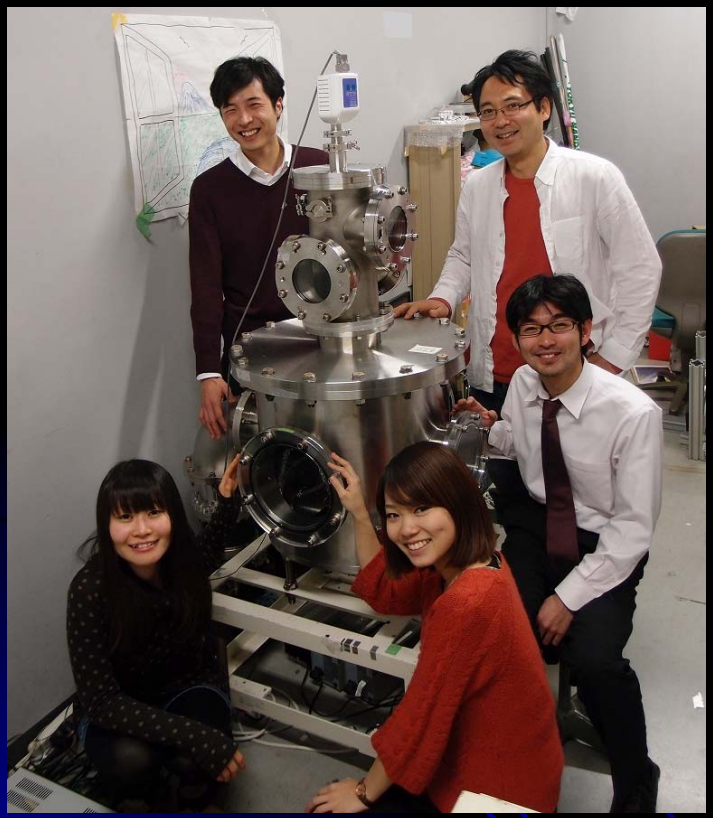
J. Murata 2011

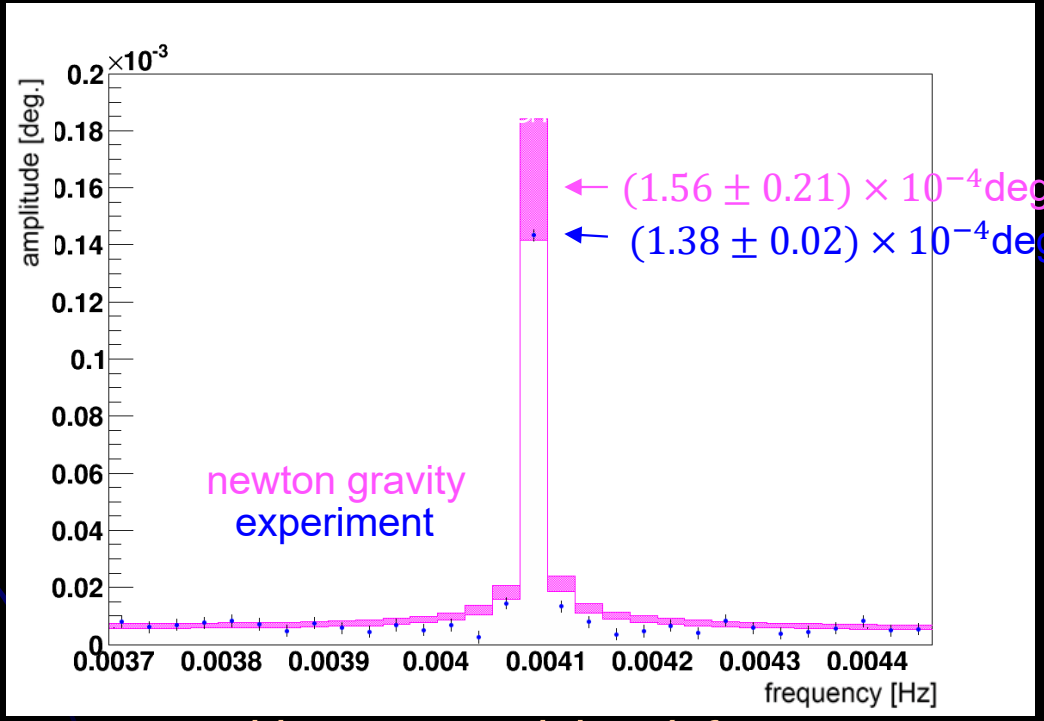






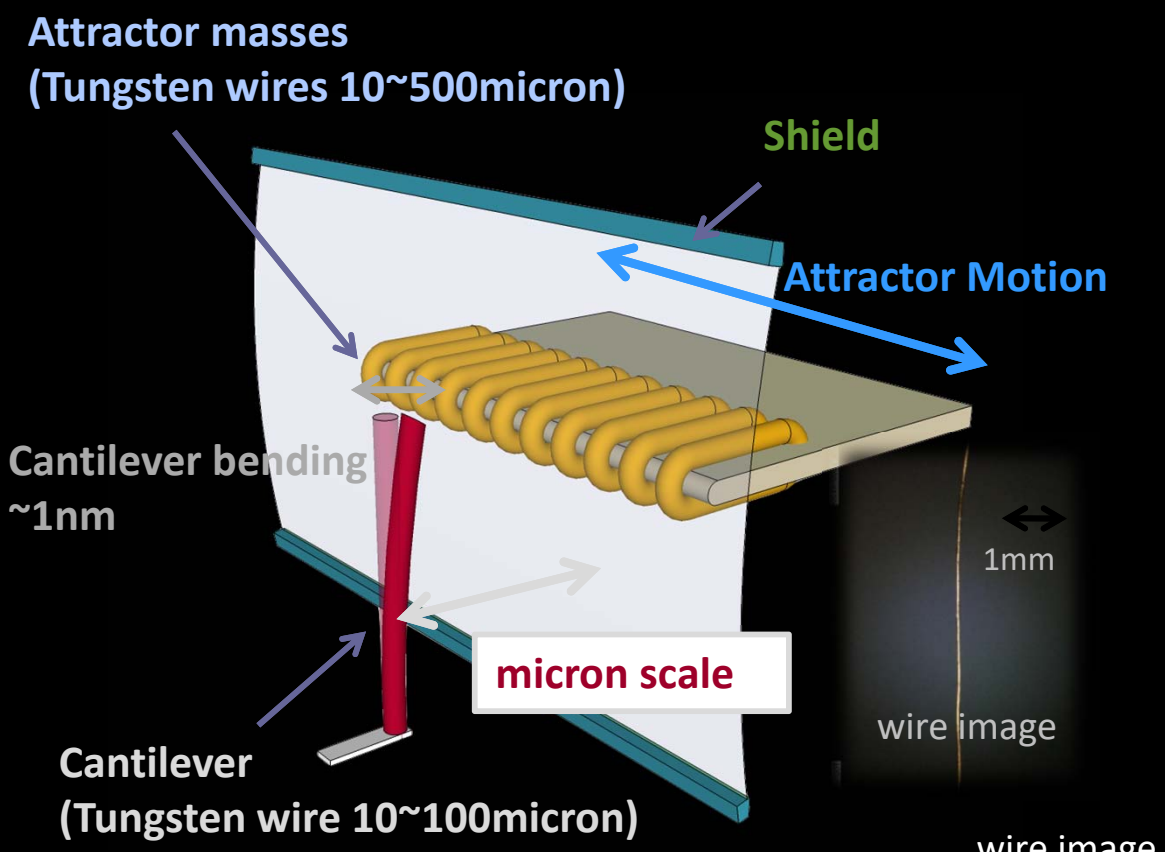
Target



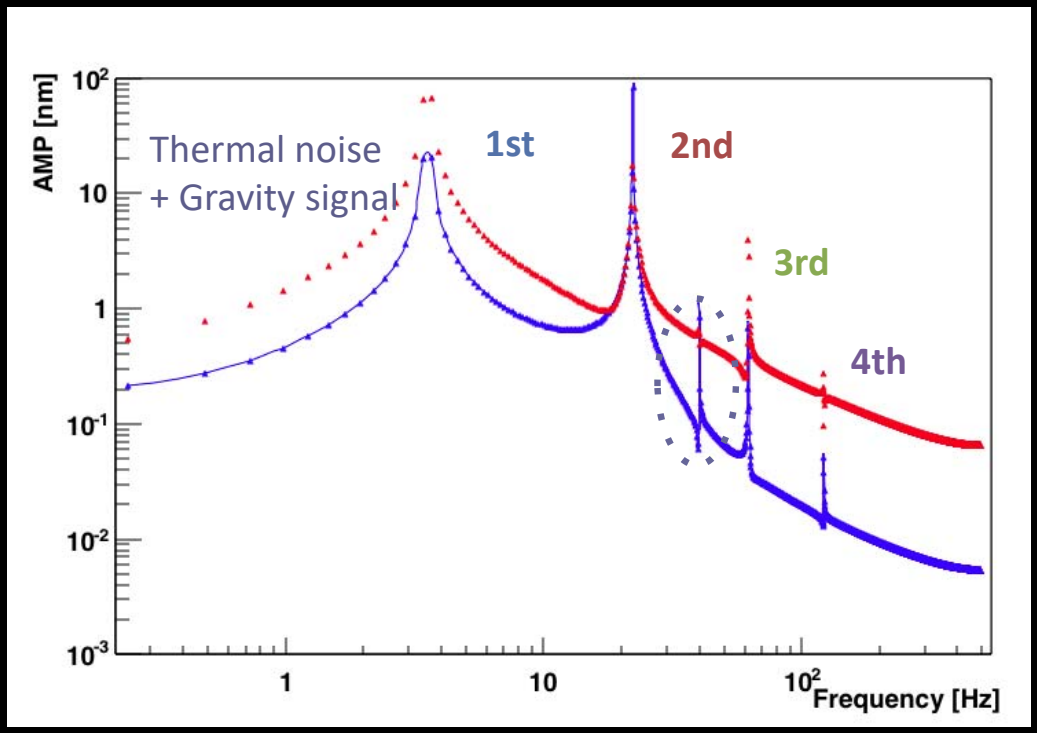


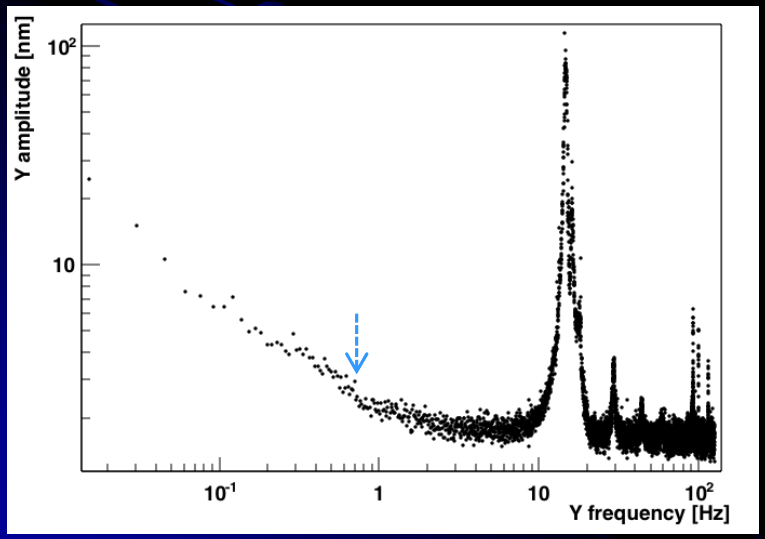
Attractor

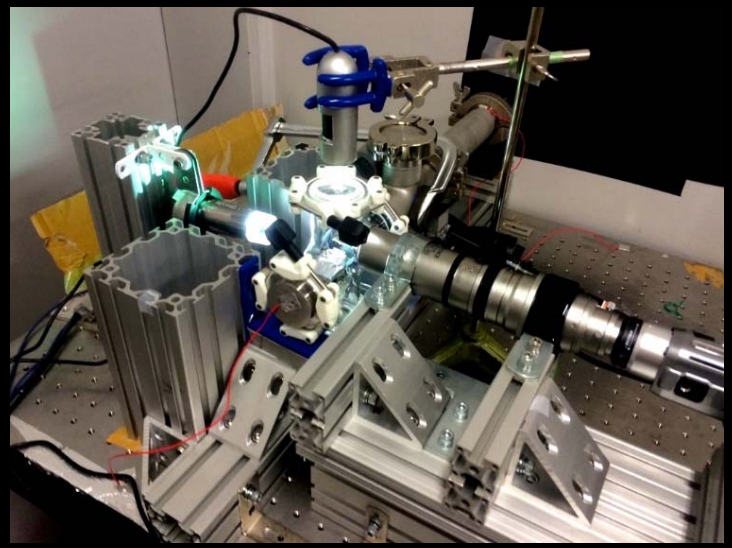
Confirmation of Newton Gravity at mm with 10% precision (after UW, HUST) *H. Murakami (2014)*



Suppression of High Frequency Thermal Noise by Image Analysis due to space smearing





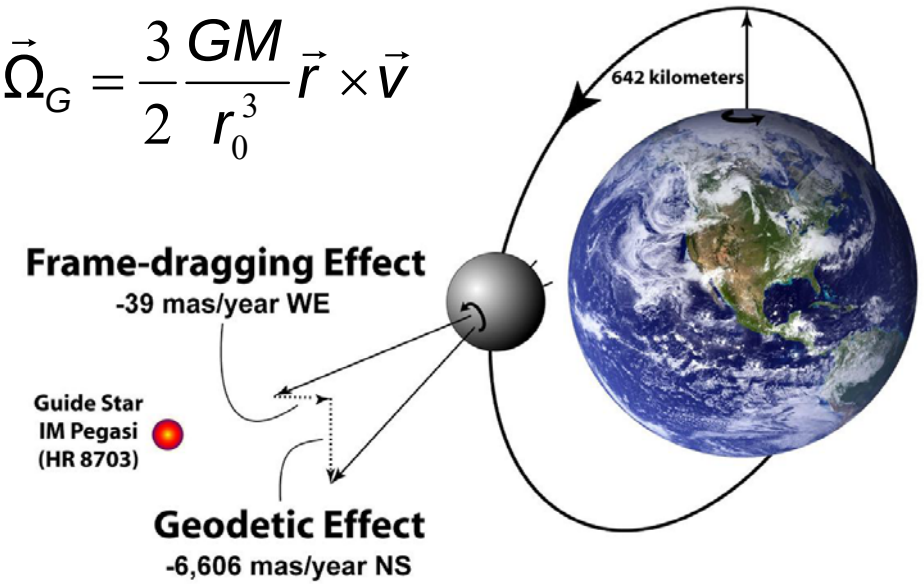


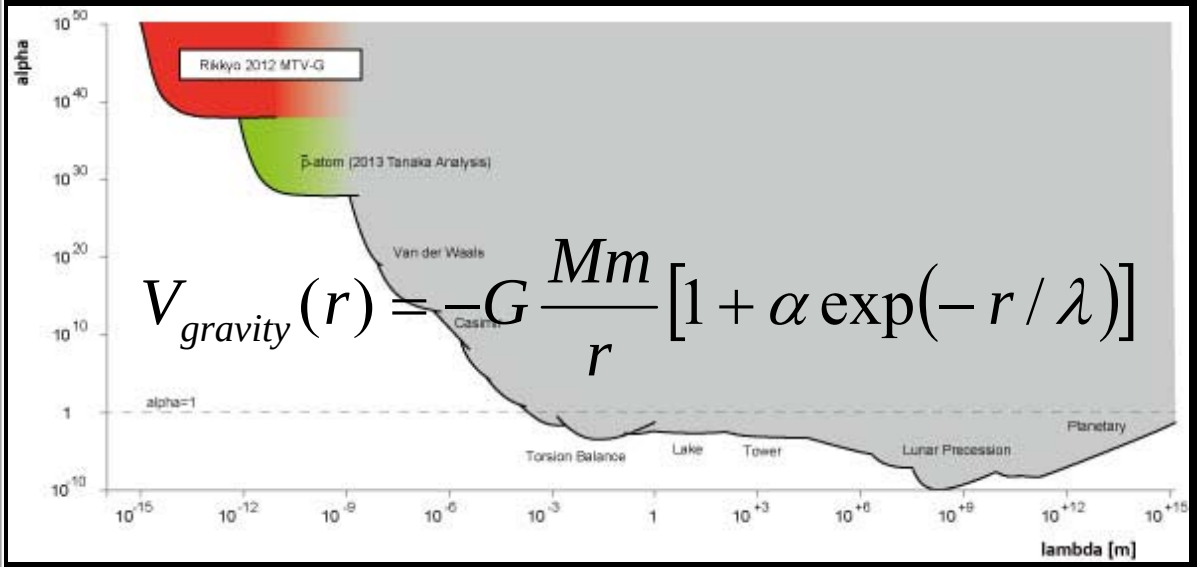
Newton-V test setup & result
(S. Saiba 2015)

MTV-G : Gravity Experiment

Test of Gravitational inverse square law at nuclear scale,
to search large extra-dimension

$$\vec{\Omega}_G = \frac{3}{2}\frac{GM}{r_0^3}\vec{r}\times\vec{v}$$

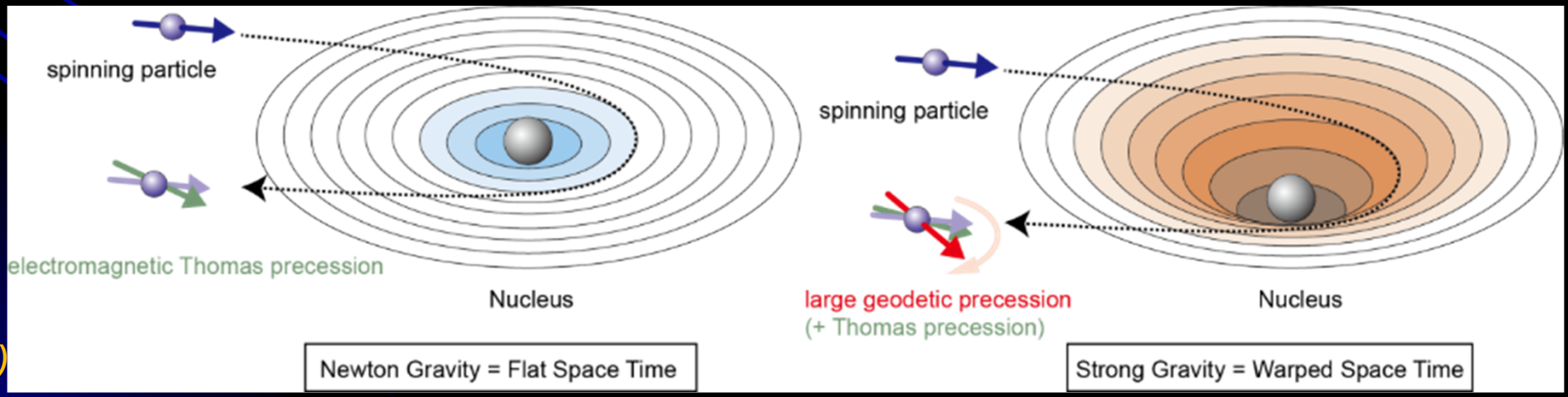




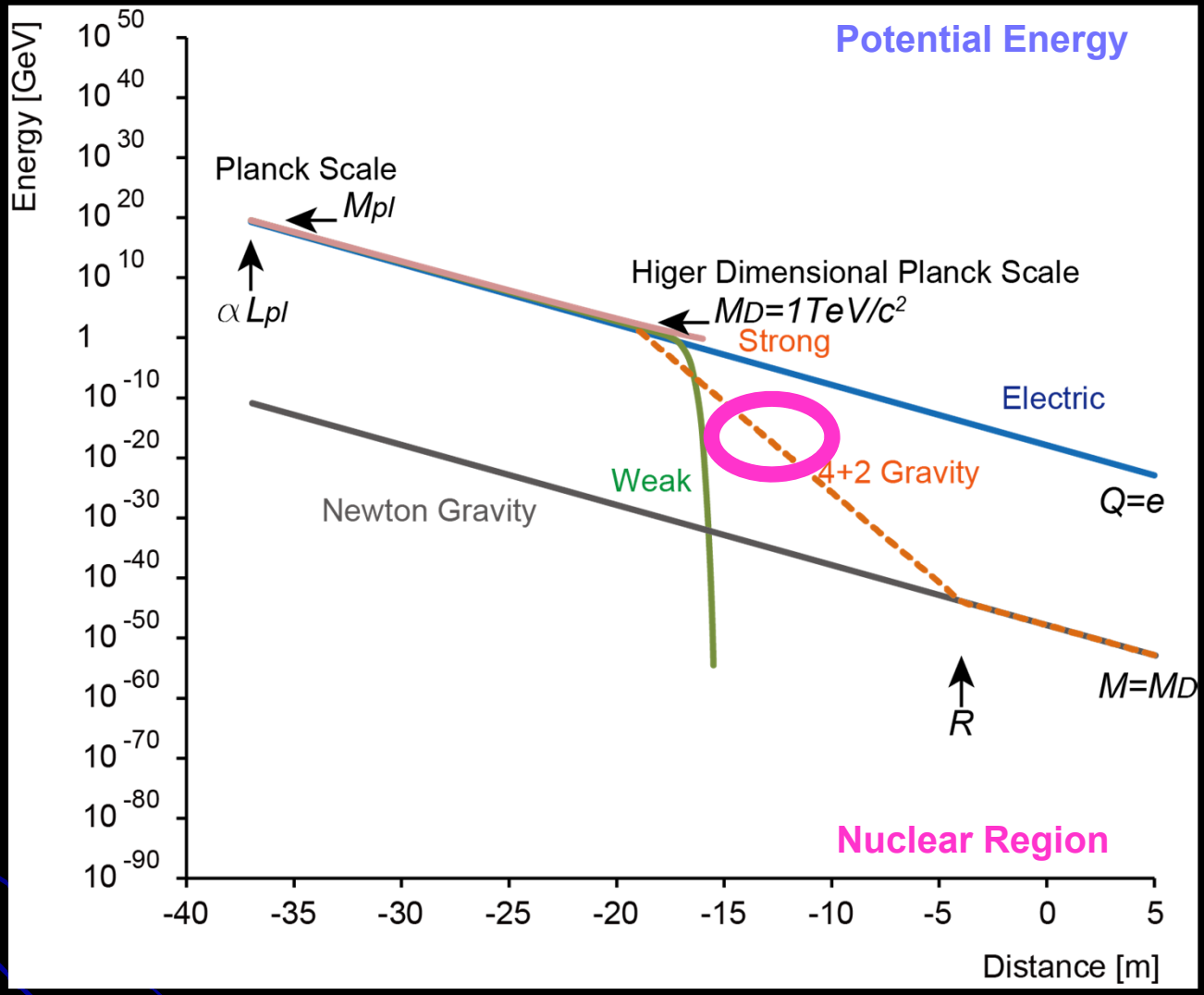
$$V_{gravity}(r) = -G\frac{Mm}{r}\left[1+\alpha\exp\left(-r/\lambda\right)\right]$$

Gravity Probe B (May 2011)

Geodetic precession in a warped scape-time



S. Tanaka (2014)



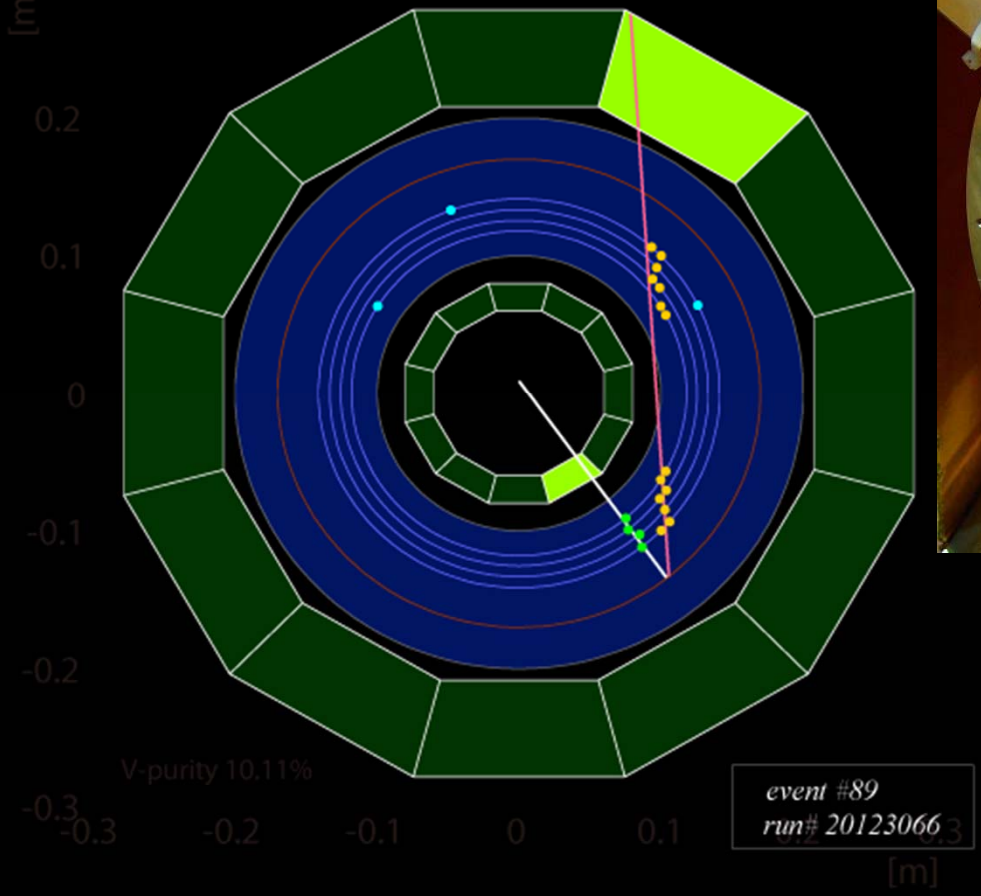
Force between quarks with *Q=e* & *M=1TeV*

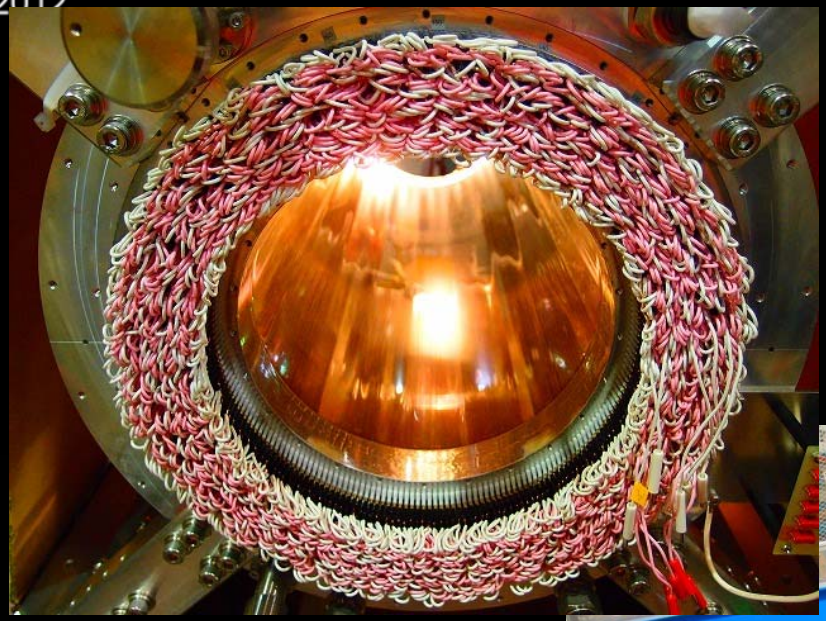
Fundamental charge : quark color charge, e, MD

MTV exp. = searching T-Violation

MTV
Mott polarimetry for T-Violation exp.

Run-IV 2012

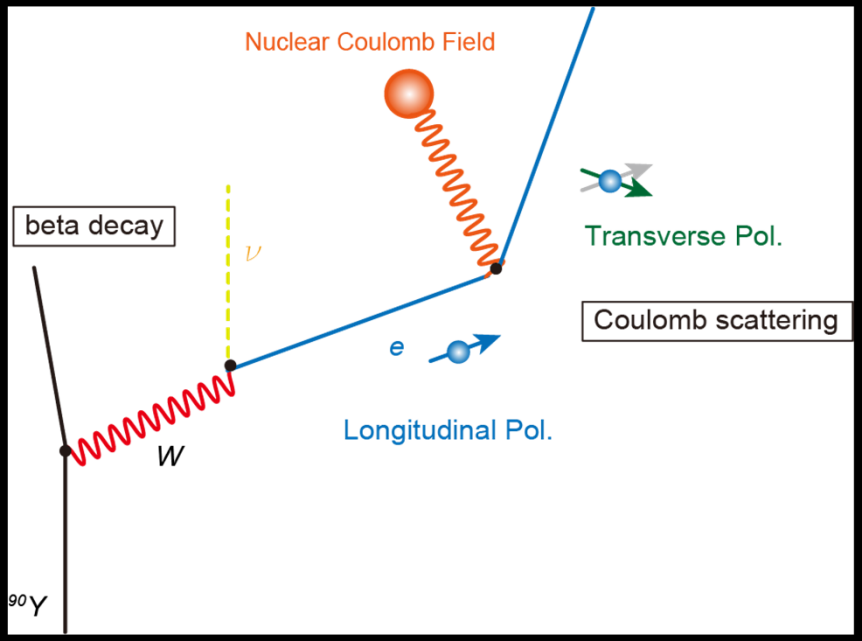


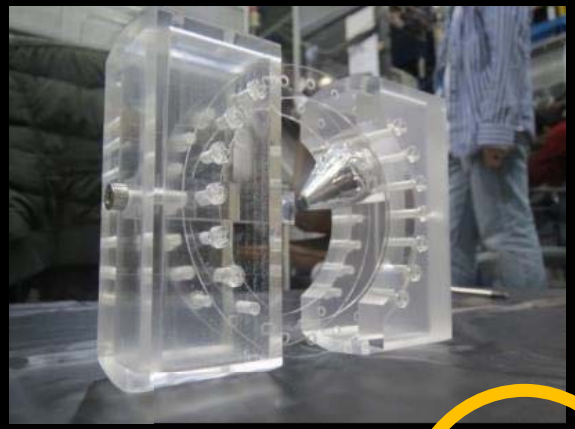


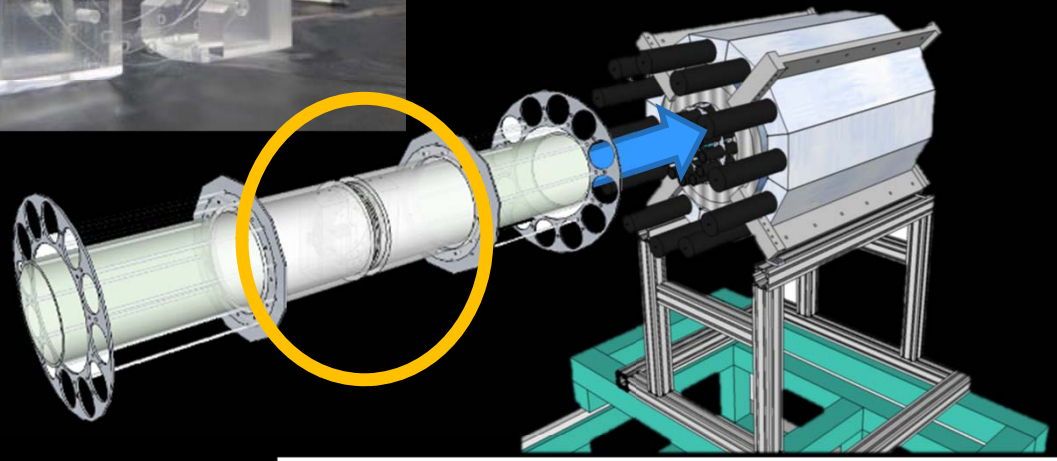
T-Violating Electron Polarimetry

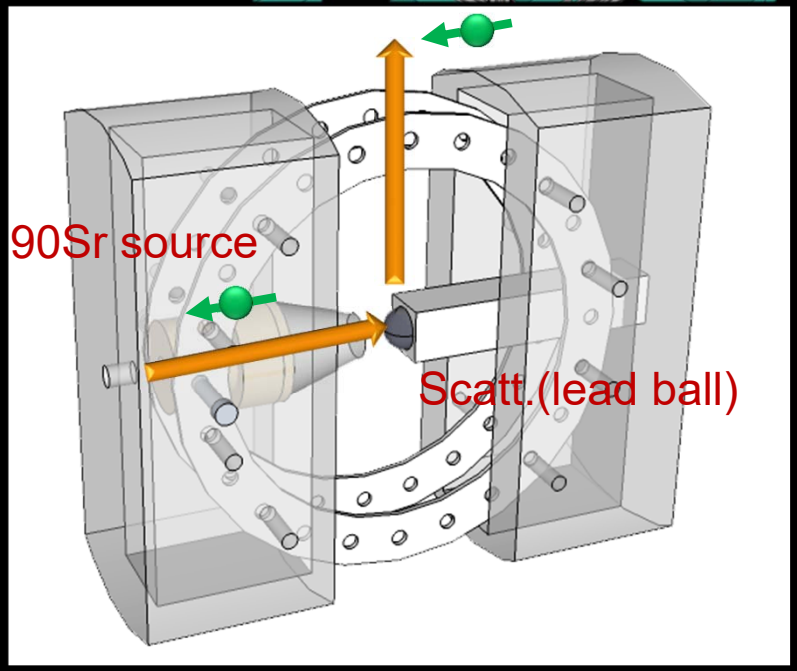
Searching Large Gravitational Precession

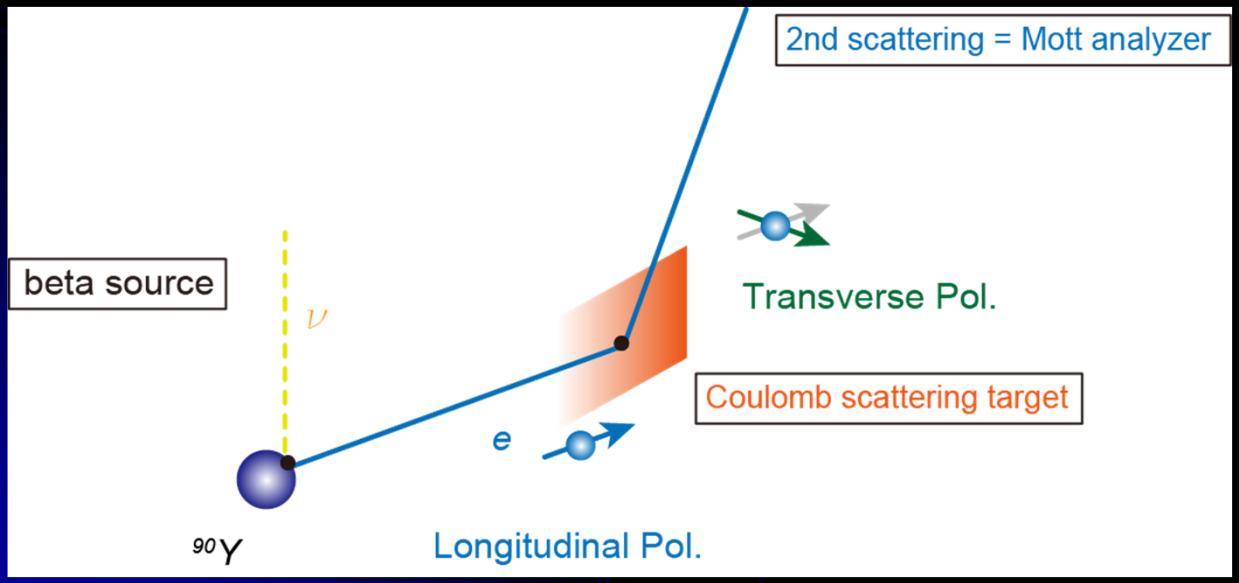
MTV-G exp.



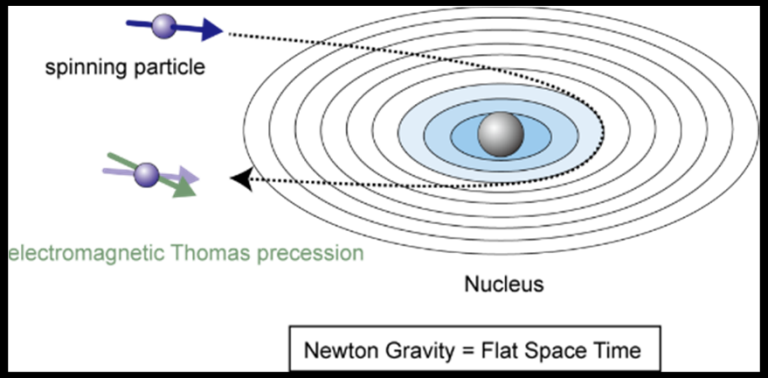






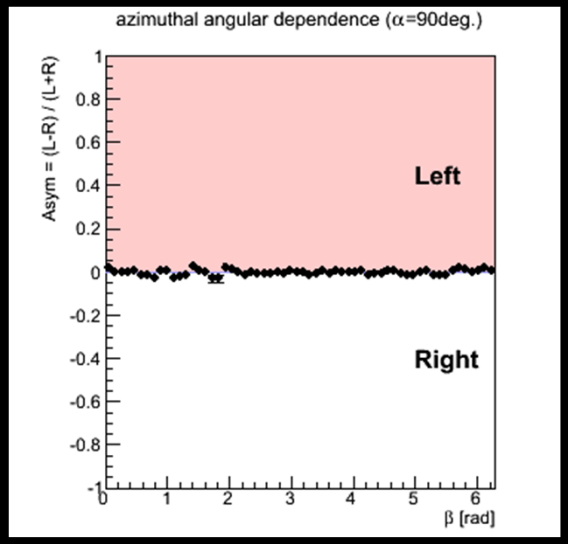


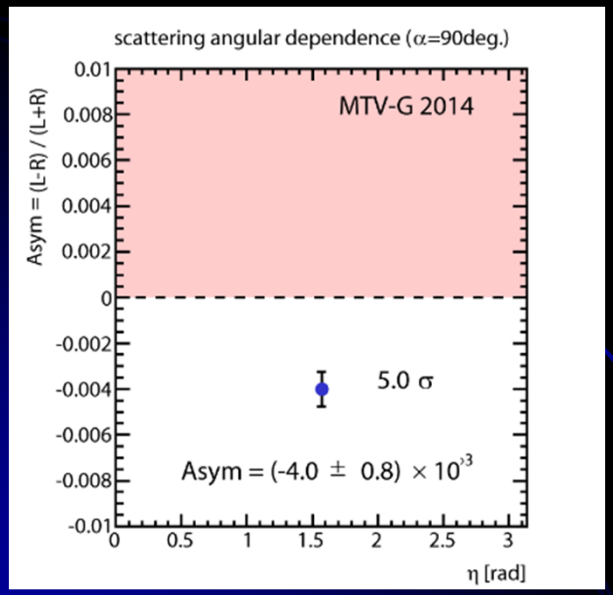
S. Tanaka (2014)

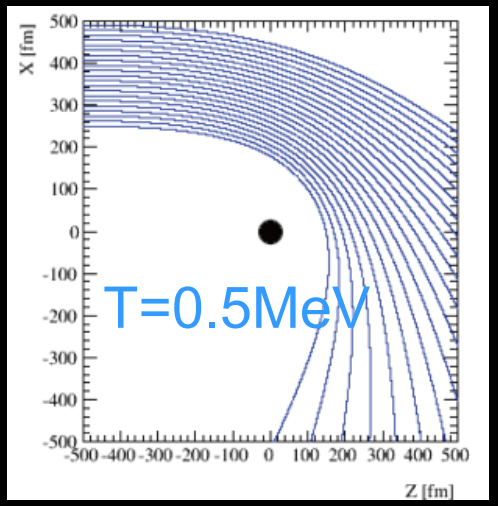


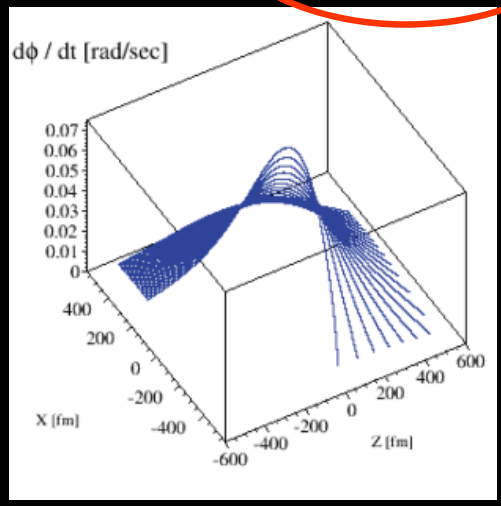
Thomas precession at $B = 0$

$$\left.\frac{d\vec{s}}{dt}\right|_{Lab} = \frac{e}{mc}\vec{s} \times \left[\left(\frac{g}{2} - 1 + \frac{1}{\gamma}\right)\vec{B} - \left(\frac{g}{2} - 1\right)\frac{\gamma}{\gamma+1}\left(\vec{\beta}\cdot\vec{B}\right)\vec{\beta} - \left(\frac{g}{2} - \frac{\gamma}{\gamma+1}\right)\vec{\beta} \times \vec{E}\right]$$





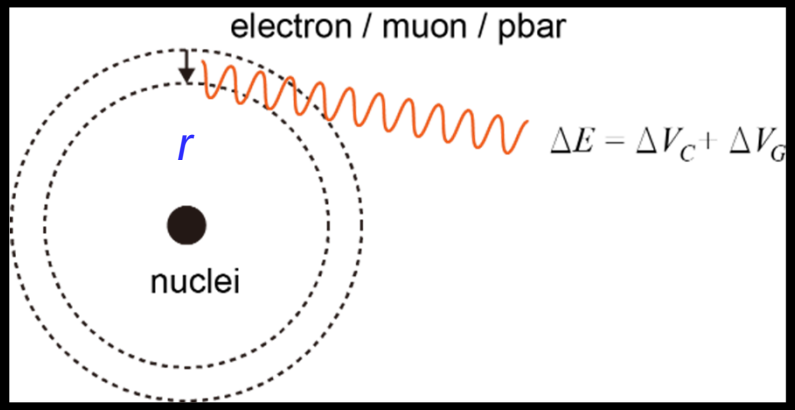




Relativistic Simulation (classical electromagnetism)

Spin Precession Observed !
Factor x 2 disagreed with simulation ..
Set upper limit on large geodetic precession (G at fm scale)

S. Tanaka (2014)

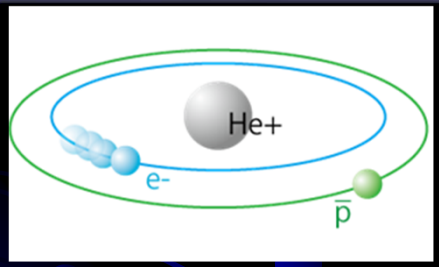


Constraint maximum allowed gravitational strength *G(r)* at measuring scale *r*

$$\frac{G(r)}{G_N} < \left(\frac{\alpha_F \hbar c \frac{Z}{r^2}}{G_N \frac{Mm}{r^2}} \right) \times \left(\frac{\sigma(F_C)}{F_C} \right)$$

$$\left(\frac{\sigma(F_C)}{F_C} \right)^2 = \left(\frac{\sigma^{measure}(F_C)}{F^{measure}{}_C} \right)^2 + \left(\frac{\sigma^{theory}(F_C)}{F^{theory}{}_C} \right)^2$$

pbar He atom (32-31) ASAKUSA PRL 96, 243401 (2006)



$$\frac{G(r)}{G_N} < 3 \times 10^{28}$$

SM / Gravity = 6 x 10^{35}

r = 10 pm Experiment (transition frequency) 1 x 10^{-8}

Model (Planck const.) 4 x 10^{-8}

Hydrogen atom (1S-2S) CODATA 2010

$$\frac{G(r)}{G_N} < 1 \times 10^{32}$$

SM / Gravity = 2 x 10^{39}

r = 50 pm Experiment (transition frequency) 1 x 10^{-14}

Model (Planck const.) 4 x 10^{-8}

LHC monojet etc.

$$\frac{G(r)}{G_N} < 1 \times 10^{30}$$

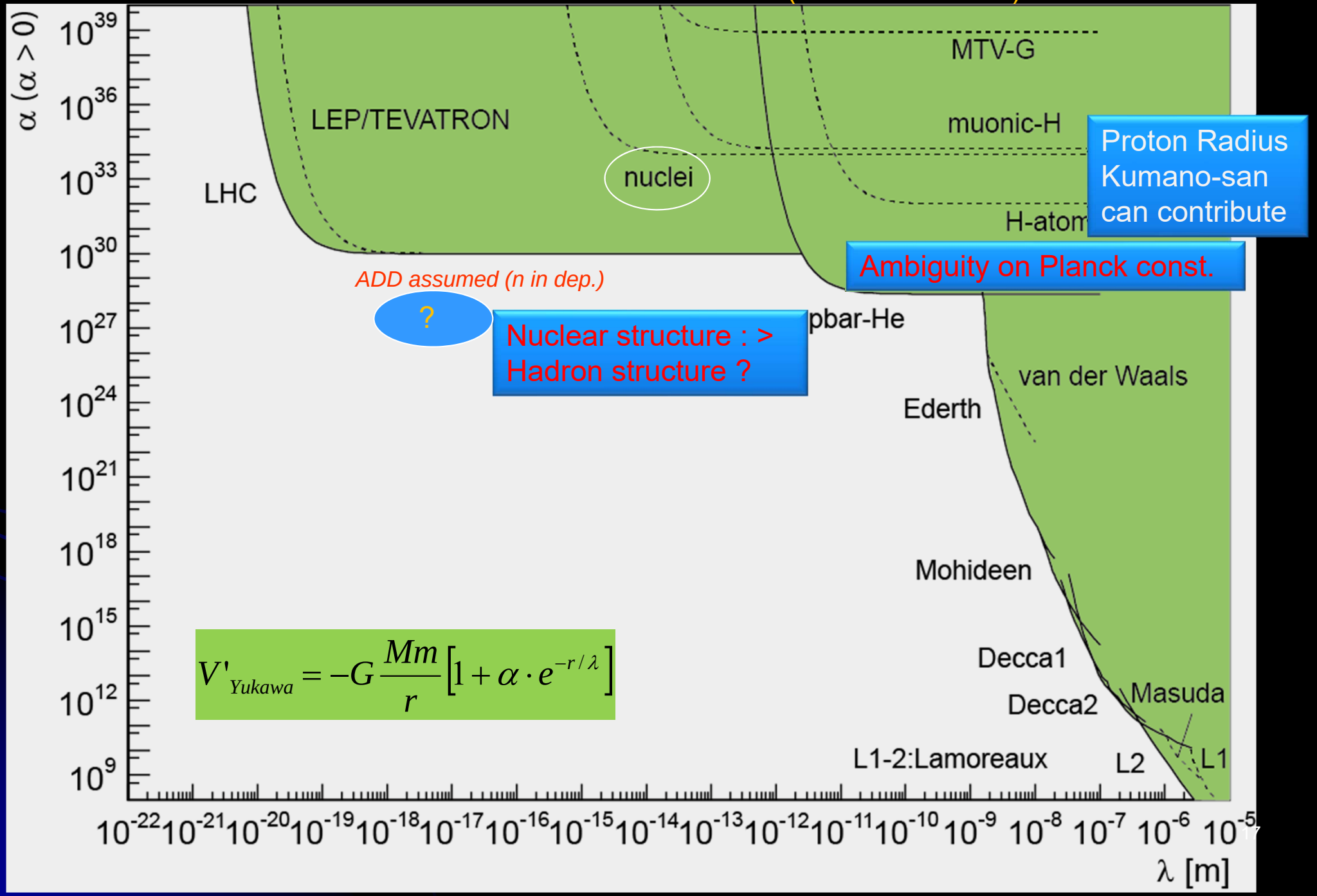
r = 2 x 10^{-19} m

Muonic hydrogen atom

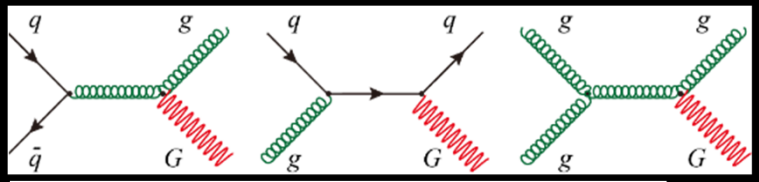
r = 250 fm

$$\frac{G(r)}{G_N} < 1 \times 10^{34}$$

Murata-Tanaka CQG 32 (2015) 033001
(arXiv:1408.3588)



ATLAS PRL 110, 011802 (2013)
Searching graviton emission



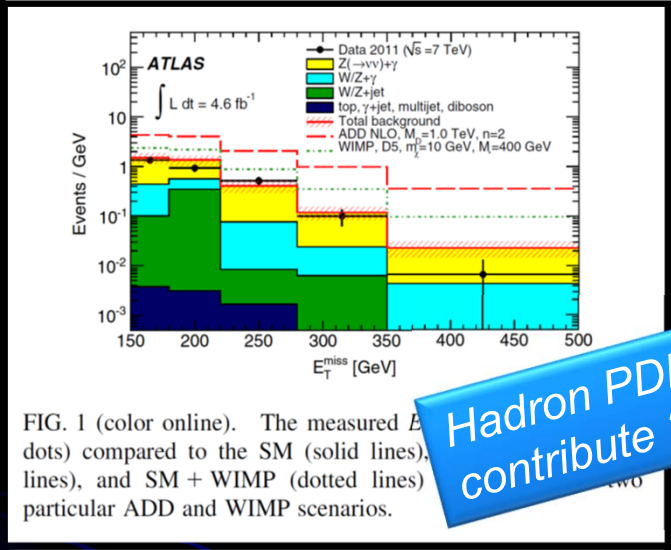


FIG. 1 (color online). The measured E dots) compared to the SM (solid lines), lines), and SM + WIMP (dotted lines) particular ADD and WIMP scenarios.

Hadron PDF can contribute ?

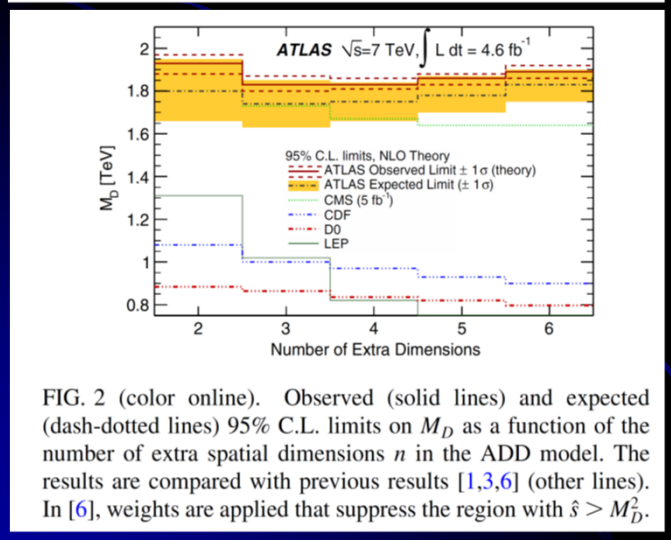
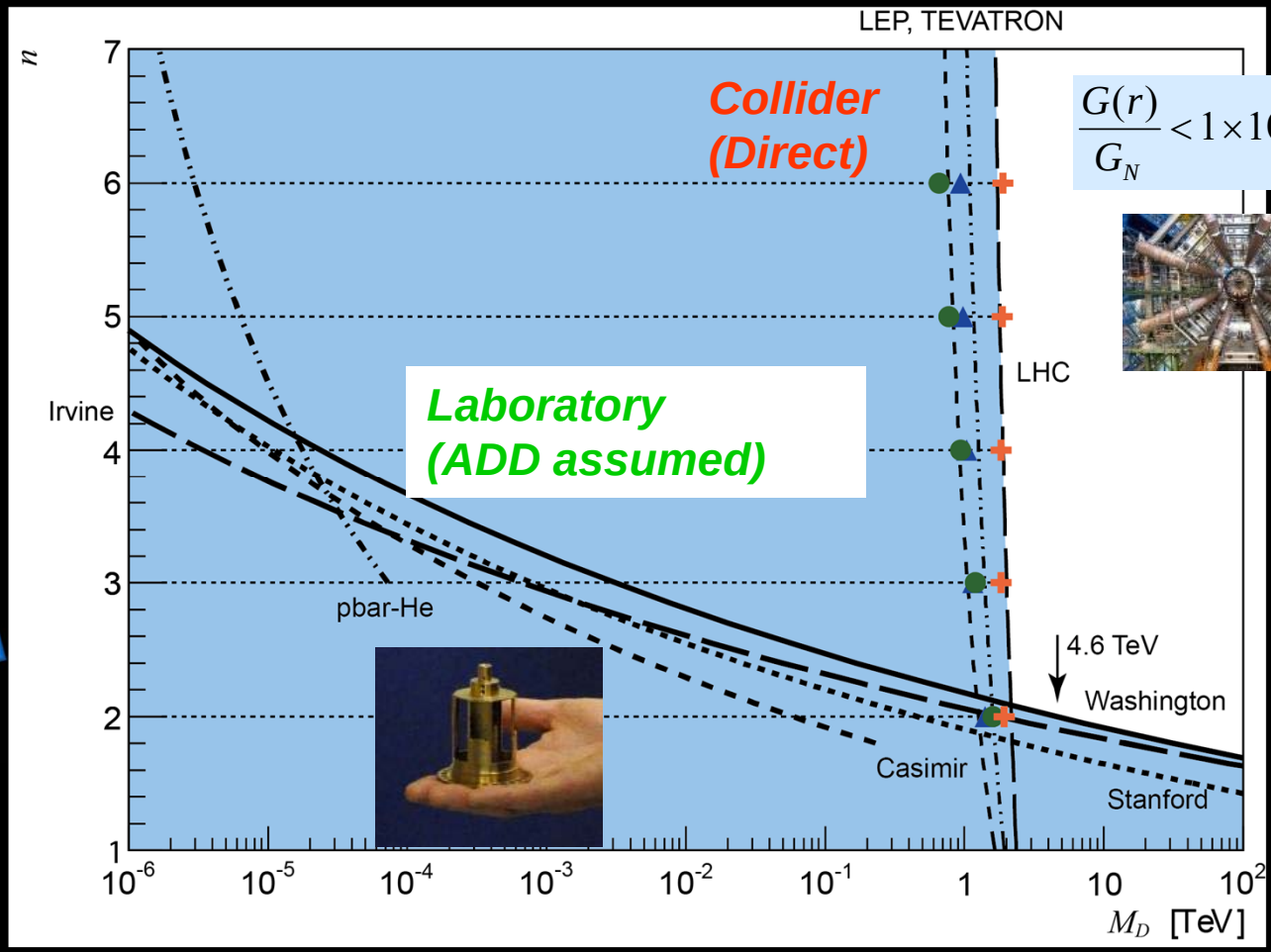


FIG. 2 (color online). Observed (solid lines) and expected (dash-dotted lines) 95% C.L. limits on M_D as a function of the number of extra spatial dimensions n in the ADD model. The results are compared with previous results [1,3,6] (other lines). In [6], weights are applied that suppress the region with $\hat{s} > M_D^2$.

# of extra dimension

Murata-Tanaka CQG 32 (2015) 033001
(arXiv:1408.3588)



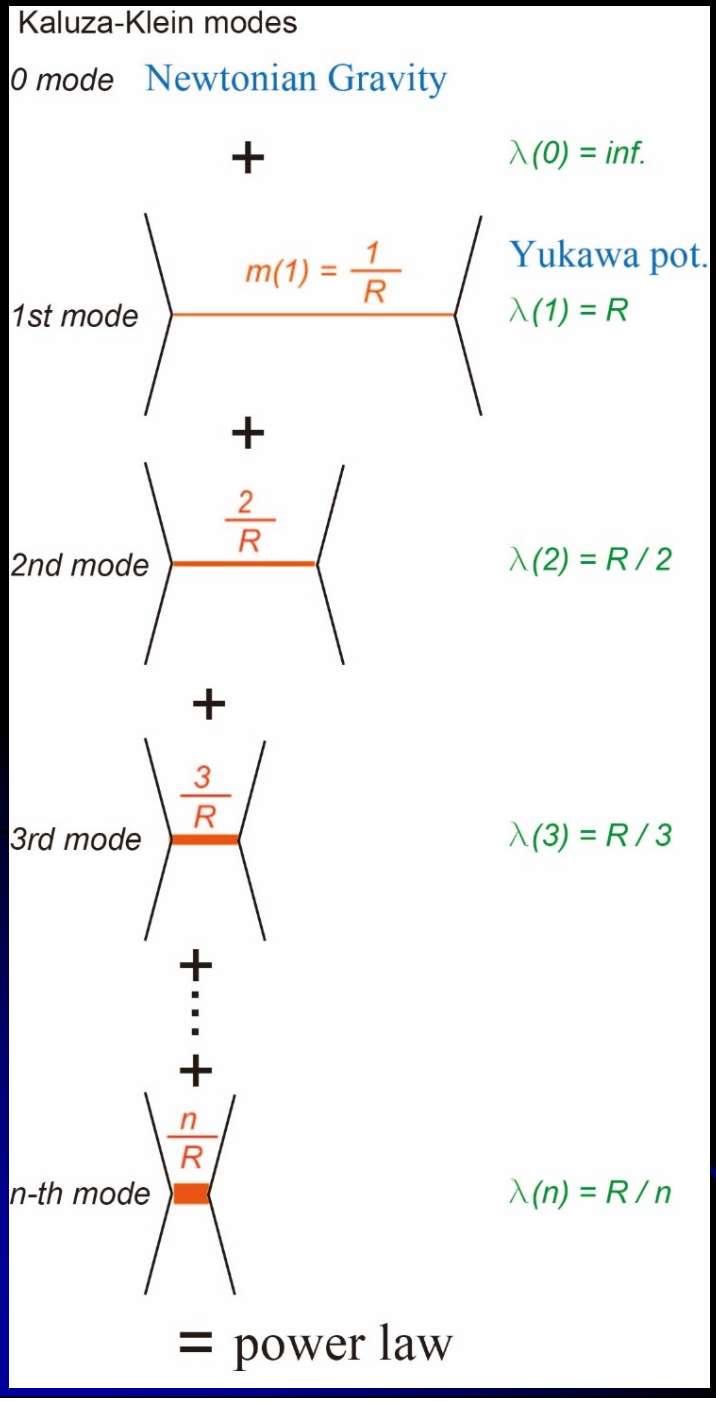
$$\lambda \equiv \frac{\left(M_{pl}/\sqrt{8\pi}\right)^{2/n}}{M_D^{1+2/n}} \frac{\hbar}{c}$$

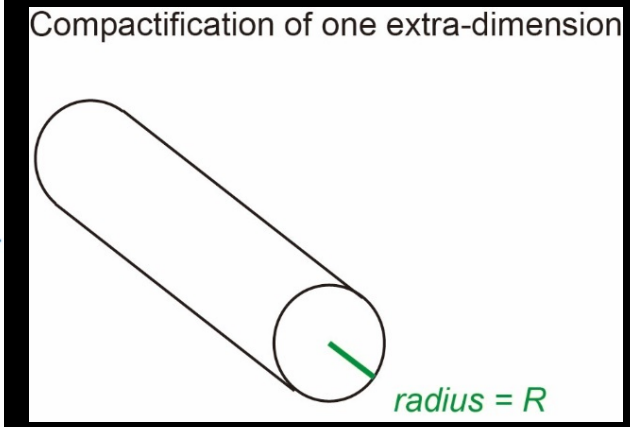
ADD interpretation

$$M_{pl}{}^2 = M_D{}^{2+n} \lambda^n (c/\hbar)^n$$

Short Range : Data > Power Law Parametrization > (ADD) > MD
Collider : Data > MD > (ADD) > Power Law Parametrization > alpha-lambda

Extra Dimension : Power Law type (e.g. Donoghue post-Newtonian, quantum correction)





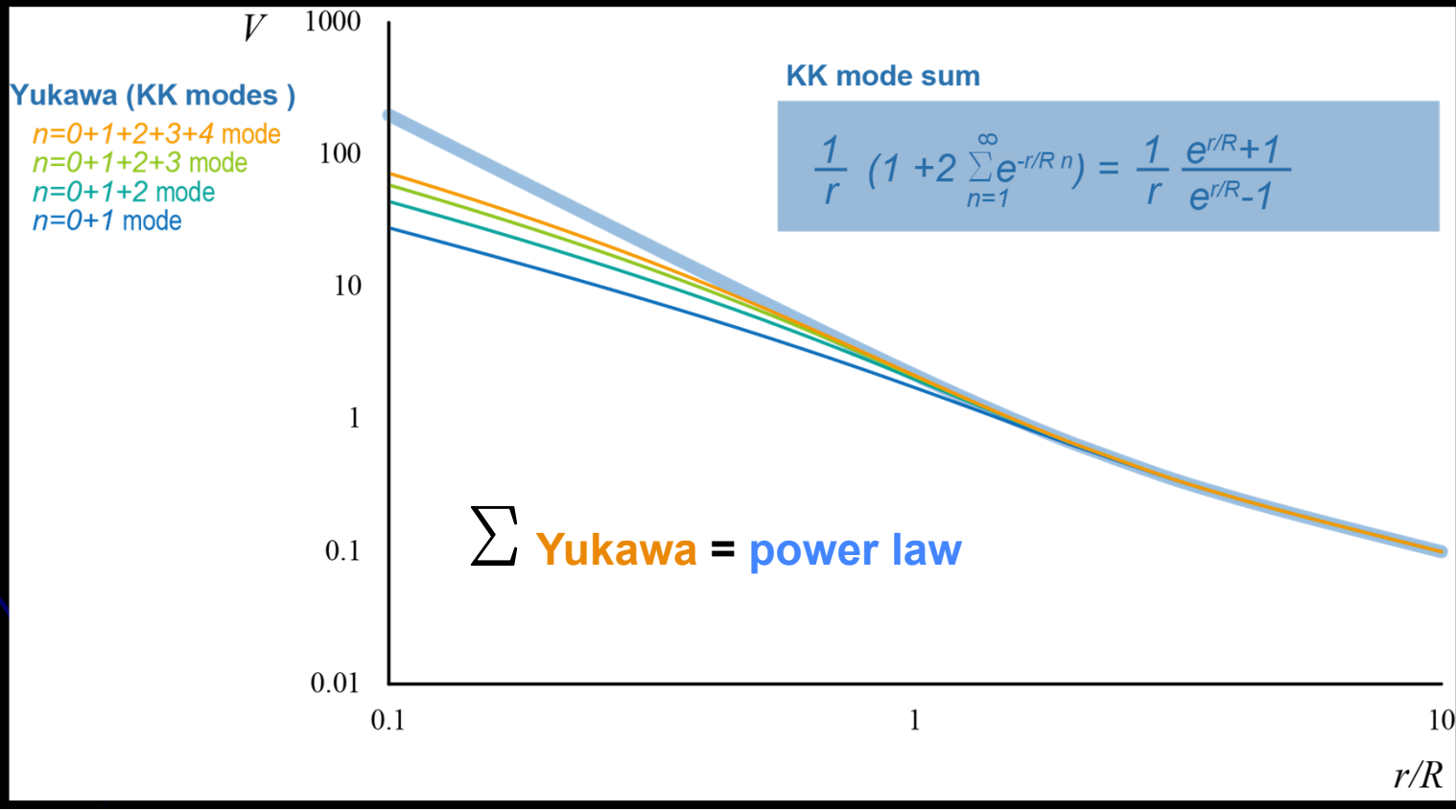
Compactification of extradimension

⬇

Quantification of extradimensional momentum

⬇

seen as discrete graviton "**mass**" in 4d world



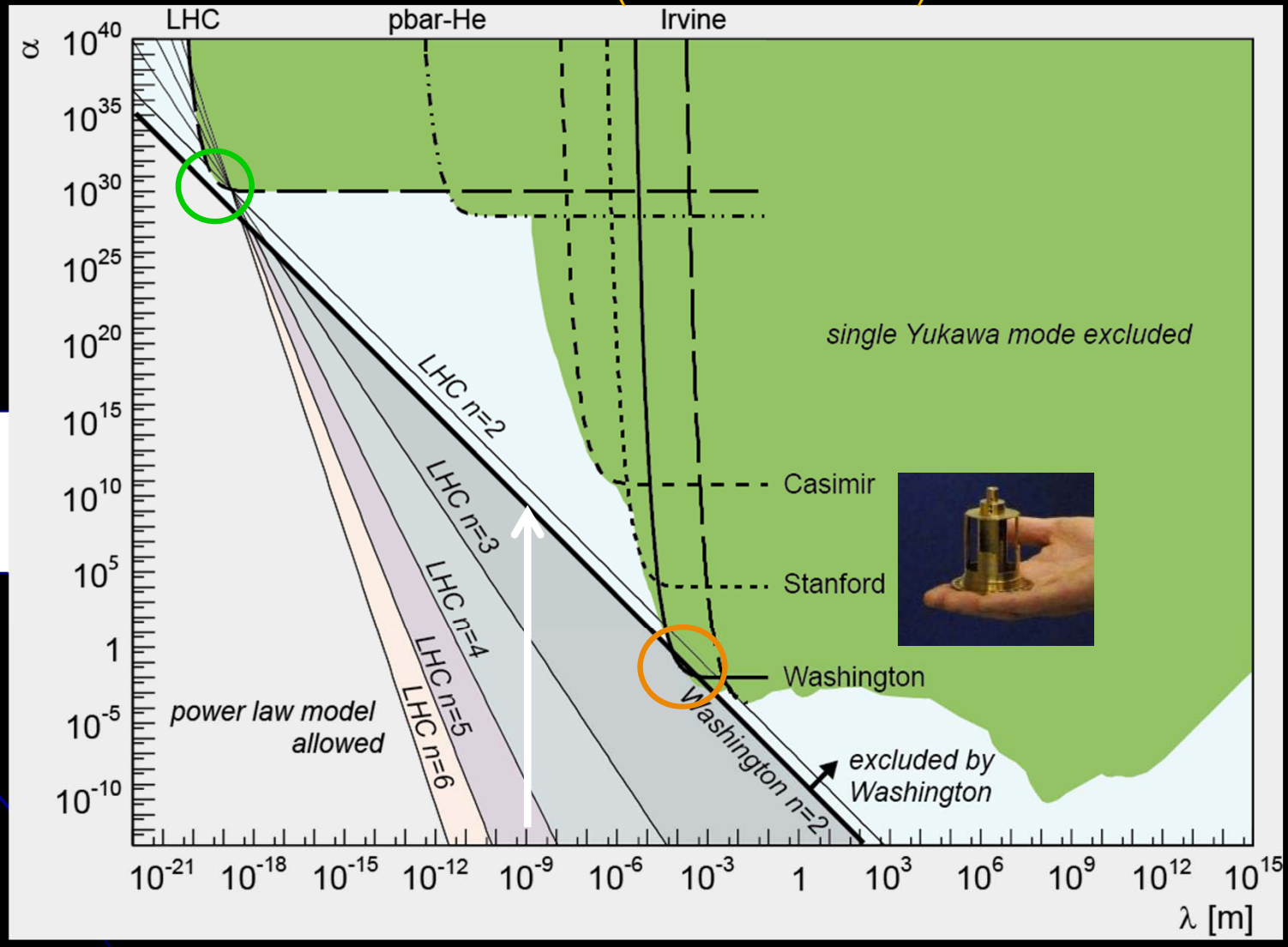
ADD line (power law) in Yukawa alpha-lambda

Alpha is not constant, but enhanced in power law

Murata-Tanaka CQG 32 (2015) 033001 (arXiv:1408.3588)

$$\alpha'(\lambda) = \frac{(1+n)\left(\frac{\lambda}{r}\right)^n}{(1+\frac{r}{\lambda})e^{-r/\lambda}}$$

Corrected alpha:
Physics = power law
Parametrization = Yukawa



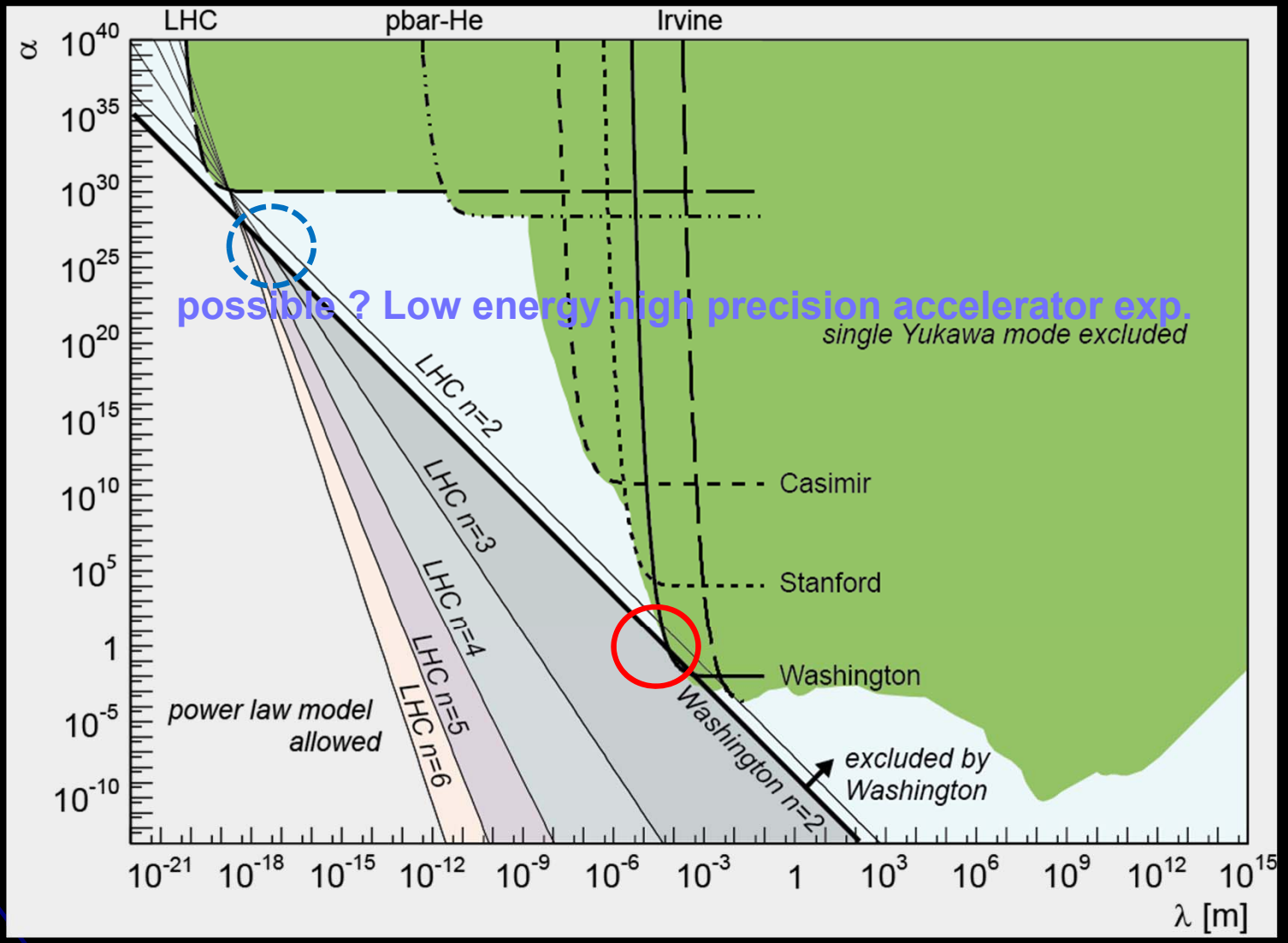
LHC is the only sensitive tool for n > 2

mm is the best place for n = 2

@ 10% precision

Smaller scale around above Casimir region

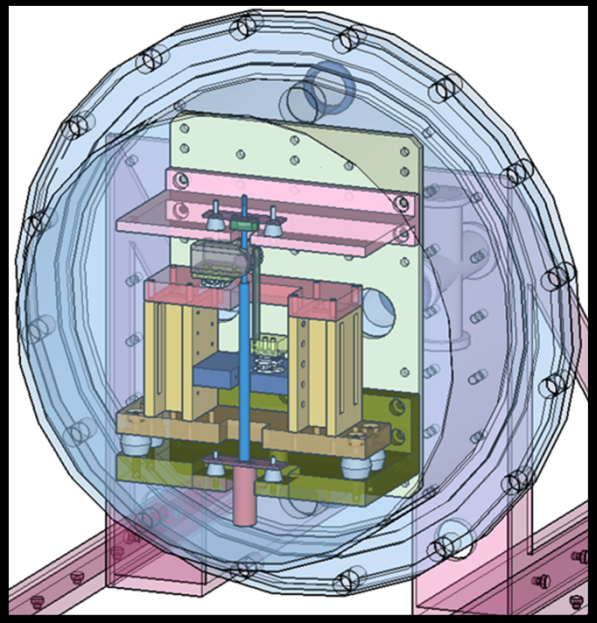
Murata-Tanaka CQG 32 (2015) 033001
(arXiv:1408.3588)

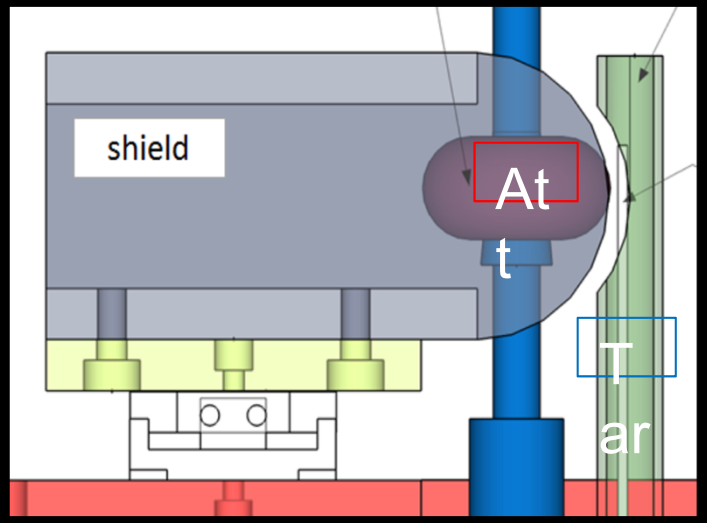


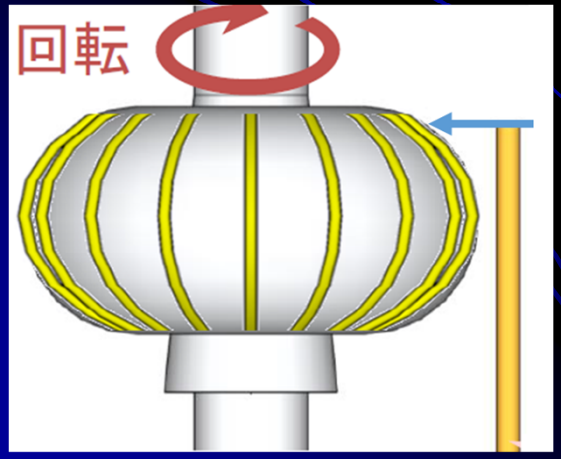
High-end digital microscope & wire cantilever

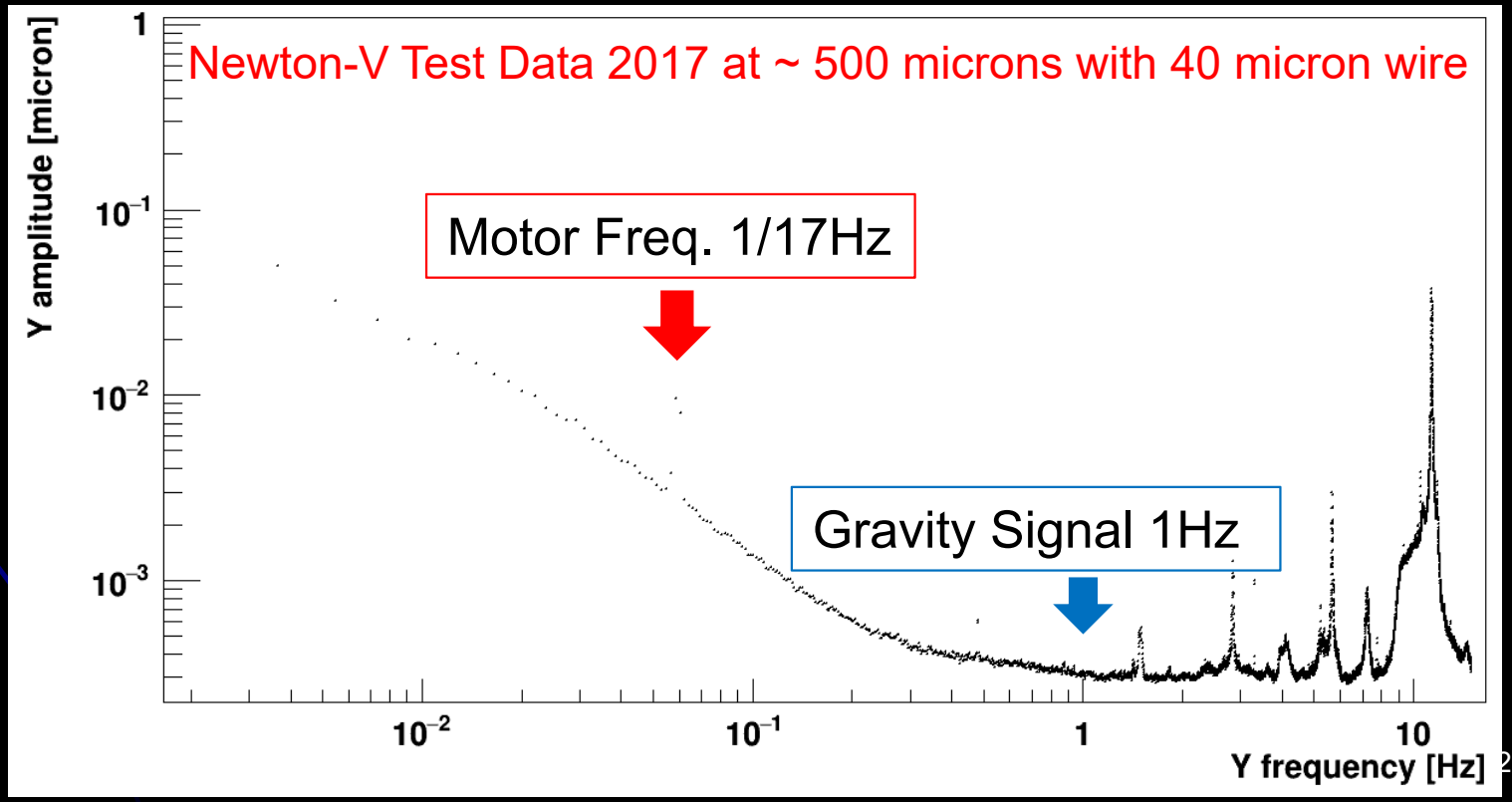
Reduction of thermal noise by wide range video imaging (space smearing effect).

Newton-V status









Murata-Tanaka CQG 32 (2015) 033001
(arXiv:1408.3588)

IOP Publishing

Classical and Quantum Gravity

Class. Quantum Grav. **32** (2015) 033001 (32pp)

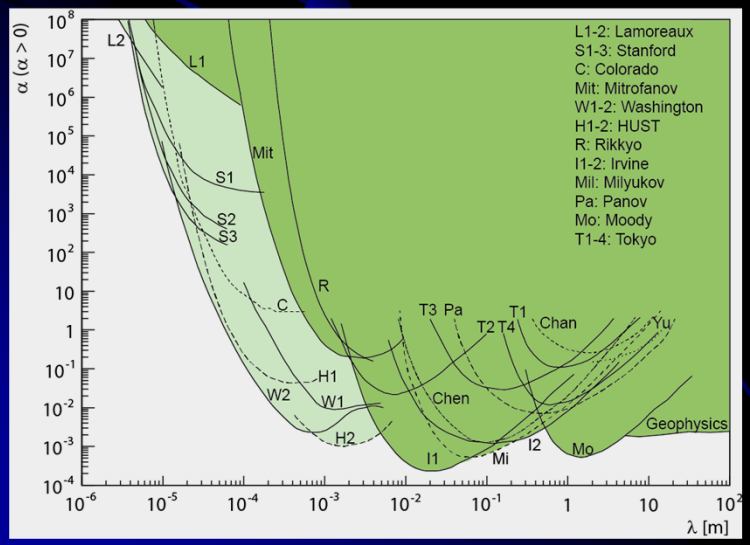
doi:10.1088/0264-9381/32/3/033001

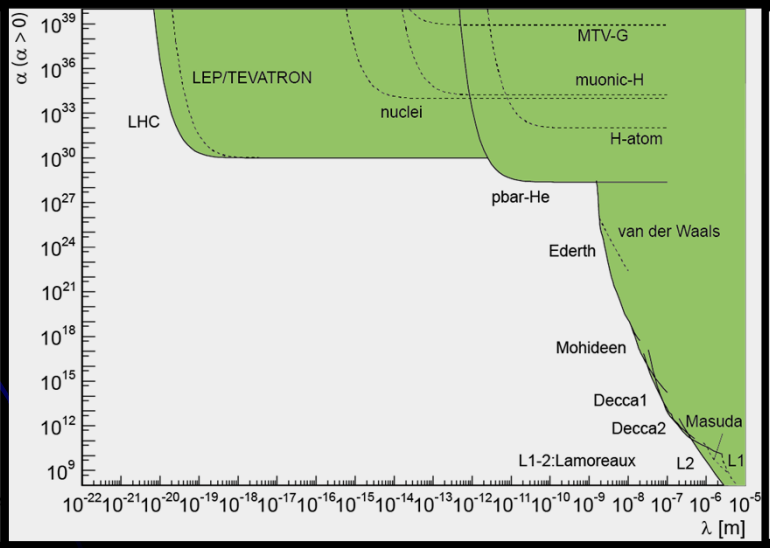
Topical Review

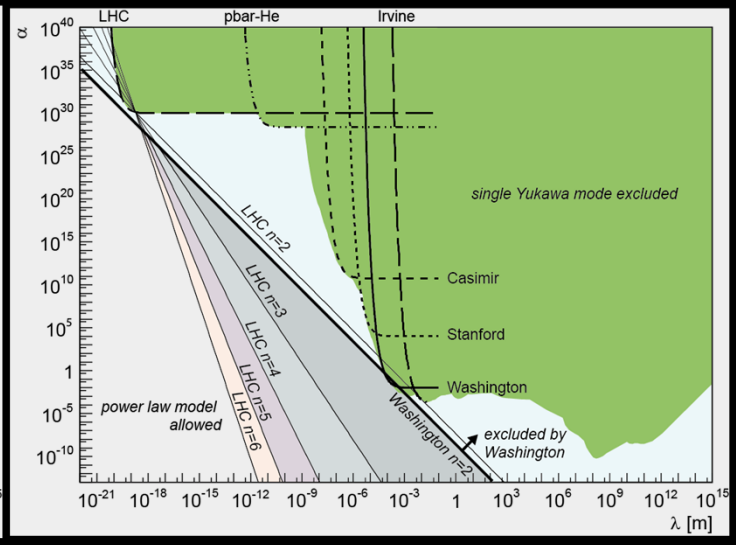
A review of short-range gravity experiments in the LHC era

Jiro Murata and Saki Tanaka

Department of Physics, Rikkyo University, 3-34-1 Nishi-Ikebukuro, Tokyo 171-8501, Japan







Ninomiya-Murata CQG 34 (2017) 185005 (arXiv:1708.01482)

IOP Publishing Classical and Quantum Gravity

Class. Quantum Grav. **34** (2017) 185005 (15pp) https://doi.org/10.1088/1361-6382/aa837f

Short-range test of the universality of gravitational constant *G* at the millimeter scale using a digital image sensor

K Ninomiya[1], T Akiyama, M Hata, M Hatori, T Iguri, Y Ikeda, S Inaba, H Kawamura, R Kishi, H Murakami, Y Nakaya, H Nishio, N Ogawa, J Onishi, S Saiba, T Sakuta, S Tanaka, R Tanuma, Y Totsuka, R Tsutsui, K Watanabe and J Murata

Department of Physics, Rikkyo University, 3-34-1 Nishi-Ikebukuro, Tokyo 171-8501 Japan

WEP Violation Parameter

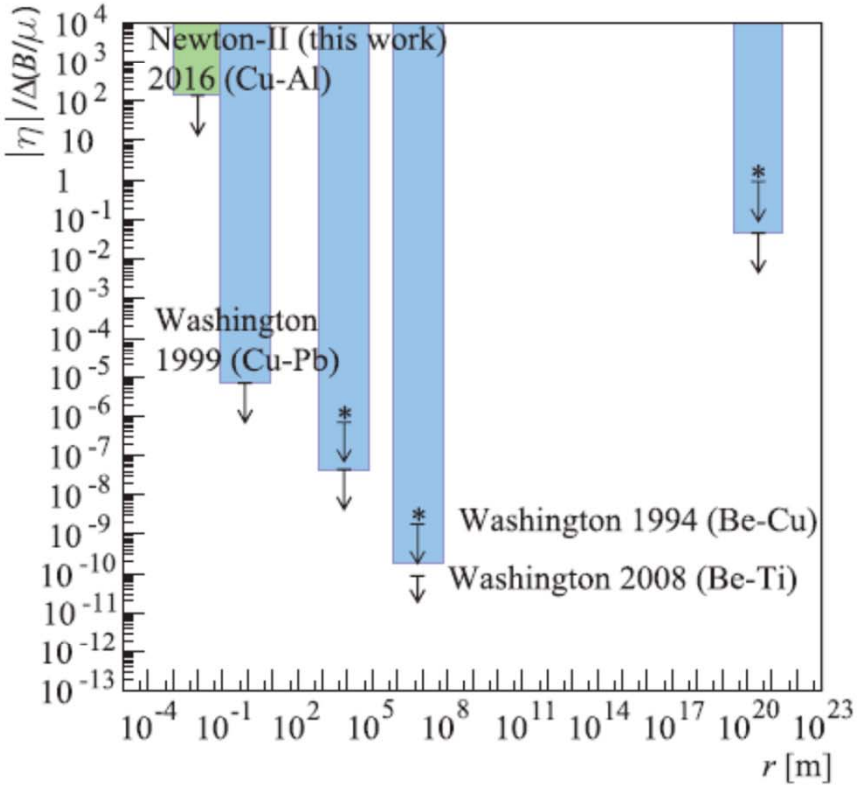


Figure 7. Constraints on the 'reduced' WEP violation parameter $\eta/\Delta(B/\mu)$, plotted as a function of measuring distance. The result of this study is shown as Newton-II 2016. References are same as figure 6.

■研究紹介

余剰次元探索を目指した近距離重力実験

立教大学理学部
村 田 次 郎
jiro@rikkyo.ac.jp

田 中 佐 季，二 宮 一 史，村 上 遥 菜

2014 年 2 月 12 日

解説

日本物理学会誌「解説」 重力逆二乗則の実験検証

村田次郎
立教大学理学部
jirotrikkyo.ac.jp

万有引力の法則は近代科学の出発点に位置する物理学の金字塔であり、一般相対論による修正が有効となる極端な状況を除いて、現在でも観測と一致し続ける理論である。

重力の逆二乗則はこの「リードページ」は、専門外の読者からも読みやすい記事にすることを目的とし、従来のアブストラクトに代えて設けたものです。

ここでは「ある研究分野でどういうことが問題になっているか」が伝わるイントロダクションに続けて，記事内容のアブストラクトを結論まで含めて記載し，1ページの独立した読み物として成立することを目指して下さい。Nature 誌の Summary paragraph の構成は参考になるでしょう。リードページでは，非専門家からの感想を重視し分量を厳守するため、記事の担当編集委員からの強いコミットがあることをご了承下さい。

記事の2ページ以降は，専門家向けのイントロダクションに続けて記事をご執筆下さい。

リードページの文字数の目安は，著者が3人以下の場合は 1,400 文字程度以内，著者が4人の場合は 1,200 文字程度以内です。

なお，リードページは原則として学会 HP 上で一般公開される予定ですので、あらかじめご了承下さい。

高エネルギーニュース Vol.32 No. 4 (233) 2014

高エネルギーニュース　HIGH ENERGY NEWS　第 32 巻 4 号　2014 年 1/2/3 月

目　次

研究紹介
KamLAND におけるステライルニュートリノ探索実験　東北大 清水 格 ——— 223
余剰次元探索を目指した近距離重力実験　立教大 村田次郎，田中佐季，二宮一史，村上遥菜 ——— 233
Belle II CDC KEK 素 谷口七重 ——— 241
ILC の物理　東大 田辺友彦 ——— 247
T2K 実験 ν_e 消失モードの最新解析結果　東大宇 亀田 純，京大 南野彰宏 ——— 255
T2K 実験の将来感度　東大宇 池田一得，京大 市川温子，KEK 素 Megan Friend ——— 260
会議報告
RICH2013 会議報告　KEK 素 西田昌平 ——— 268
Hadron2013 報告　名大 飯嶋 徹，阪大核 鎌野寛之，野海博之，KEK 素 堺井義秀，東北大 佐々木勝一，奈良女大 宮林謙吉，東工大 安井繁宏，理化研 四日市 悟 ——— 270
J-PARC Program Advisory Committee for the Nuclear and Particle Physics Experiments at the J-PARC Main Ring ——— 275
JAHEP
第 284 回 高エネルギー委員会(8/24) 議事録 ——— 286
高エネルギー物理学研究者会議総会(9/21) 議事録 ——— 288
第 285 回 高エネルギー委員会(9/22) 議事録 ——— 290
第 15 回(2013 年度)高エネルギー物理学奨励賞選考委員会報告 高エネルギー物理学奨励賞選考委員会 ——— 291
第 286 回 高エネルギー委員会，将来計画委員会合同会議(10/19) 議事録 ——— 293
第 287 回 高エネルギー委員会(12/14) 議事録 ——— 295
第 288 回 高エネルギー委員会(2/1) 議事録 ——— 297
第 16 回(2014 年度) 高エネルギー物理学奨励賞 (2015 年物理学会賞) 推薦および応募のお知らせ ——— 299

発 行 者
高エネルギー物理学研究者会議　Japan Association of High Energy Physicists, JAHEP　http://jahep.org
事務局代表　堀井泰之
〒464-8602　名古屋市千種区不老町 名古屋大学 大学院理学研究科 素粒子宇宙物理学専攻 高エネルギー素粒子物理学研究室（N 研）
TEL. 052-789-2902　FAX 052-782-5752　E-mail hec-sec@jahep.org
発行人・編集委員長　名大理 戸本 誠 makoto@hepl.phys.nagoya-u.ac.jp
編集委員　東北大理 佐貫智行 sanuki@exp.phys.tohoku.ac.jp
KEK 素 西田昌平 shohei.nishida@kek.jp
KEK 素 野村 正 tadashi.nomura@kek.jp
KEK 加 江川一美 kazumi.egawa@kek.jp
KEK 加 奥木敏行 toshiyuki.okugi@kek.jp
KEK 加 佐伯学行 takayuki.saeki@kek.jp
KEK 加 武藤健一 kenichi.muto@kek.jp
東大理 横山将志 masashi@phys.s.u-tokyo.ac.jp
東工大理工 陣内 修 jinnouchi@phys.titech.ac.jp
神戸大理 山崎祐司 yamazaki@phys.sci.kobe-u.ac.jp
九大理 吉岡瑞樹 yoshioka@phys.kyushu-u.ac.jp
高エネルギーニュース 研究紹介 オンライン版 http://jahep.org/hepnews
ご意見・ご要望はお近くの編集委員まで

表　紙

Belle と Belle II の中央飛跡検出器（CDC）

日本物理学会誌　解説：まもなく脱稿(今日が締切)。。。

別冊日経サイエンス SCIENTIFIC AMERICAN 日本版

ヒッグスを超えて

ポスト標準理論の素粒子物理学

日経サイエンス編集部 編

最強加速器で7月革命

質量とは何か

陽子サイズがおかしい

ミュー粒子に表れた矛盾

ニュートリノで探る物質の起源

CPの破れとマヨラナ

崖っぷちの超対称性理論

超弦理論が明かす宇宙の起源

クォークの中の素粒子

余剰次元を探る

日経サイエンス社

定価：本体2000円＋税

写真：安友康博 / Newton Press

特別インタビュー 1

空間が5次元なら，LHCより先に余剰次元をみつけられる

史上最強の加速器「LHC」に対して，小さな実験装置で戦いをいどむ研究者がいる。ごく近距離における重力の強さを測定することで，余剰次元の証拠さがしをつづける立教大学の村田次郎博士だ。すでに1ミリメートル程度の距離での重力測定を終えた村田博士は，その10分の1～100分の1に距離をちぢめ，余剰次元の“しっぽ”をつかもうとしている。余剰次元探索の意義や，現在開発中の新型実験装置などについて話を聞いた。

村田次郎（むらた じろう）
立教大学理学部教授

1970年生まれ。神奈川県出身。博士（理学）。専門は重力実験，原子核・素粒子物理学実験。余剰次元探索のための近距離重力実験のほか，カナダ・トライアムフ国立研究所での時間反転対称性の破れの研究を進めている。

3次元だと決めつけていたことを反省すべき

Newton ―― 余剰次元の存在は，何度聞いてもなかなか信じがたいのですが，ほんとうにあるのでしょうか？

村田 ―― まだ確認されてはいませんが，質問の答えは「余剰次元がない理由はない」ということになりますね。

ずっと空間は3次元だと信じてきたのに，なぜ余剰次元などという，へんなものを考えるんだと思うのが自然だと思います。でも逆に「なぜ3次元だと信じてきたんだろう」と考えてみてください。その問いにちゃんと答えるのはとてもむずかしいのです。

空間が3次元である理由がないのであれば，もっと高次元を考えるほうが科学的には自然だと思います。

Newton ―― 3次元である理由がない，とわかったのは，いつでしょうか？

村田 ―― それはやはり，アルカニハメドたちが提唱した大きな余剰次元モデルの論文[※1]だと思います。3次元空間であることを示す万有引力の法則が近距離では確認されていない，つまり3次元だと思っていた根拠がそれほど強くなると「何をいってるんだ」といった意見もまだ多かったですね。その後，余剰次元のあつかいが変わってきて，まともに議論されるようになりました。

人類が見たことのない領域の重力観測に挑戦

Newton ―― 近距離の重力を測定する実験をつづけていらっしゃいますね？

村田 ―― 10年ほど前からキャベンディッシュ型の実験というものをやってきました。ねじれ秤という装置を使って，おもりどうしが接近するときの重力の強さをはかる実験です（右上のイラスト参照）。実験の目標は，1ミリメートルはなれた距離での重力の強さを調べることでした。

Newton ―― 結果はどうでしたか？

村田 ―― 1ミリメートルでは，距離の2乗に反比例して重力が弱まる「逆2乗則」にしたがう，という結論に到達できました[※2]。余剰次元はみつからなかったということです。

1ミリメートルでの検証は一番乗りではなく，アメリカと中国のグループが先に実験を行っていました。きちんと同じ結論を出すことができたので，確認実験という意味では成功でした。その結論にたどりつくまでに，観測のノウハウなどをいろいろ学んだので，今はミリメートル以下のマイクロメートルの距離に挑戦しているところです。

近距離の重力をきちんと観測するのは非常にむずかしくて，10マイクロメートル（0.01ミリメートル）より小さい距離では，これまでだれも観測できていません。

まずは10～100マイクロメートルの距離できちんと重力が観測できる条件のもとで，観測距離をちぢめていくのが今の目標です。もしこの近距離で重力が逆2乗則をこえて強くなっていることがわかれば，余剰次元の存在を示す強い証拠になると思います。

Newton ―― 重力の観測装置は従来と同じものですか？

村田 ―― 10～100マイクロメートルだとキャベンディッシュ型では測定ができないので，新しい装置をつくっています。従来型だと，装置が小さすぎて製作できないのです。

開発中の新型は，端を固定して垂直に立てた細いワイヤー（金属線）に，別のワイヤーを10～100マイクロメートルの距離まで近づけていき，細いワイヤーがどう動くかを見ることで重力の強さを測定する方式です。垂直に立てた細いワイヤーが重力検出用で，近づけるほうのワイヤーが重力源です（次ページにイラスト）。

Newton ―― どうしてワイヤーを使うのですか？

村田 ―― 検出用に細いワイヤーを使うのは，やわらかくて動きやすいので，重力の影響を検出しやすいからです。重力源のワイヤーは極っかにして近づけます。これは検出用のワイヤーに近づいて重力をおよぼす部分を限定するためです。広い範囲で近づくと，どこが重力をおよぼしているのかわかりにくくなるので，どちらのワイヤーもこの形である必要はないので，今は試行錯誤している段階です。

※1：1998年発表の「ADD理論」の論文。かくれた余剰次元のおおきさが1ミリメートルほどもある可能性を示唆した。くわしくは50ページ。

※2：古典力学の重力理論である万有引力の法則（逆2乗則）とずれがないと観測された。10次元時空（空間9次元＋時間1次元）のとき，ずれがない理論となる。くわしくは40ページ。

※3：大きさ1ミリメートルの物体どうしを1ミリメートルの距離に置き，重力の強さを測定した結果，万有引力の法則（逆2乗則）からのずれの幅と10%の精度で合致がなかった。

冥王星 特大カレンダー付き

Newton

GRAPHIC SCIENCE MAGAZINE ニュートン

LHCの衝突実験でヒッグス粒子に続いて発見が期待される

特集 高次元

世界から集まった総勢400人の高次元などの探索グループを率いる東京大学の寺師弘二博士は，「LHCは，今後10年が最もエキサイティングで面白い」と語る

大型連載「感覚のふしぎ」

嗅覚と味覚のしくみ

分子の形を瞬時に識別する高性能センサー

梶田隆章博士 特別インタビュー

最初は認められなかった「ニュートリノ振動」の発見

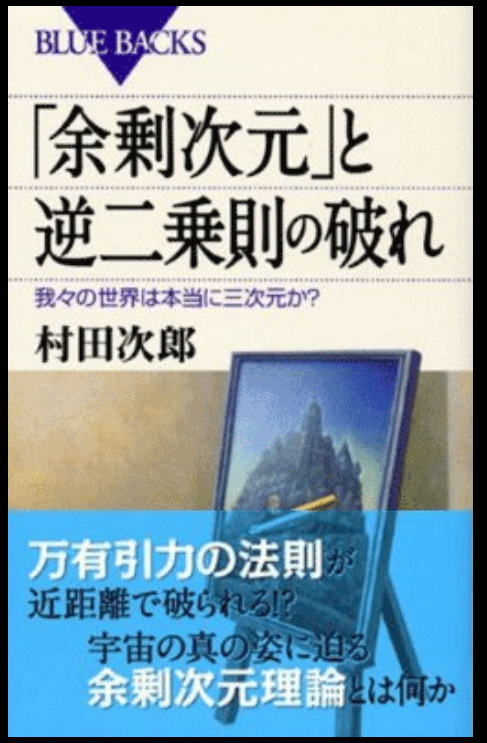
ハッブル宇宙望遠鏡 最新画像

アルツハイマー病の早期発見に挑む！

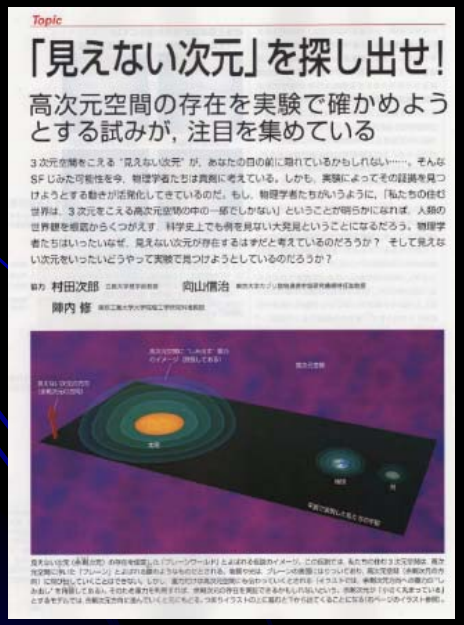
1
2016

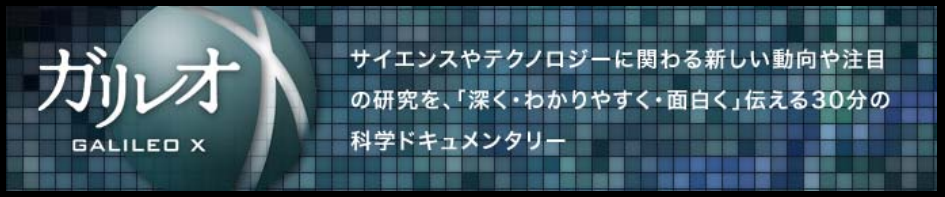
¥1000（本体価格）

Scientific American JAPANESE edition. 2013

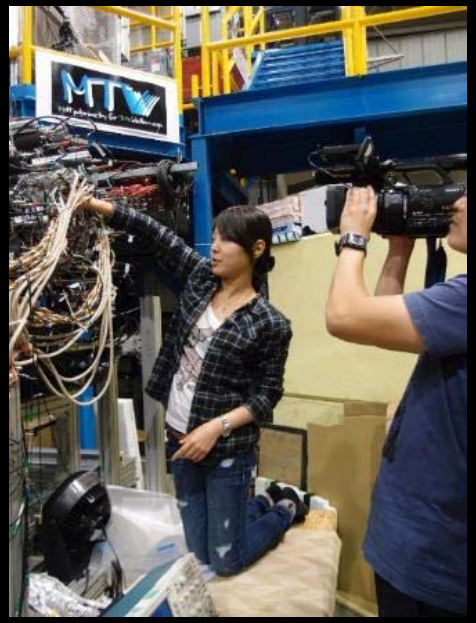


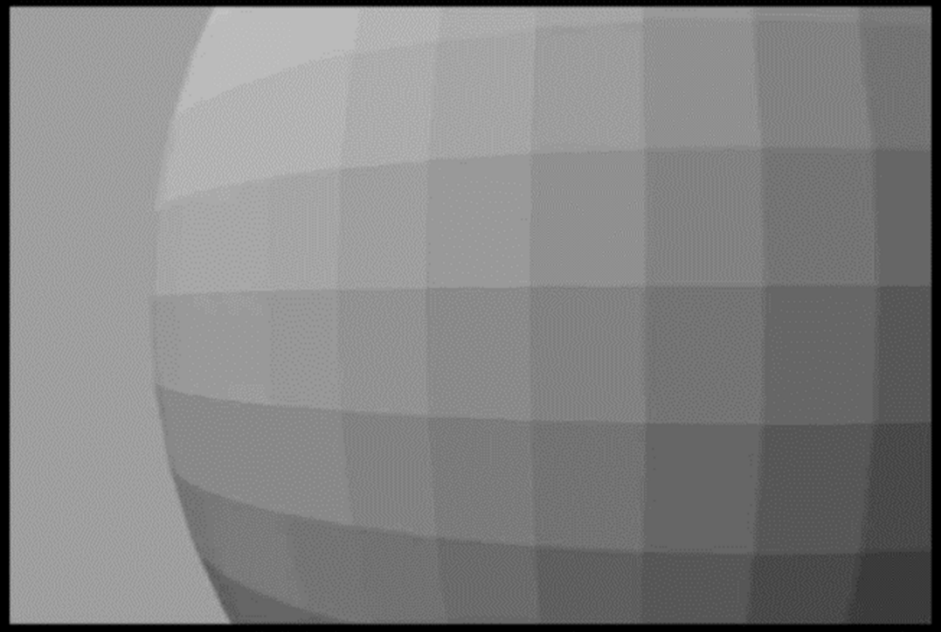
Book for young readers (blue backs) 2011



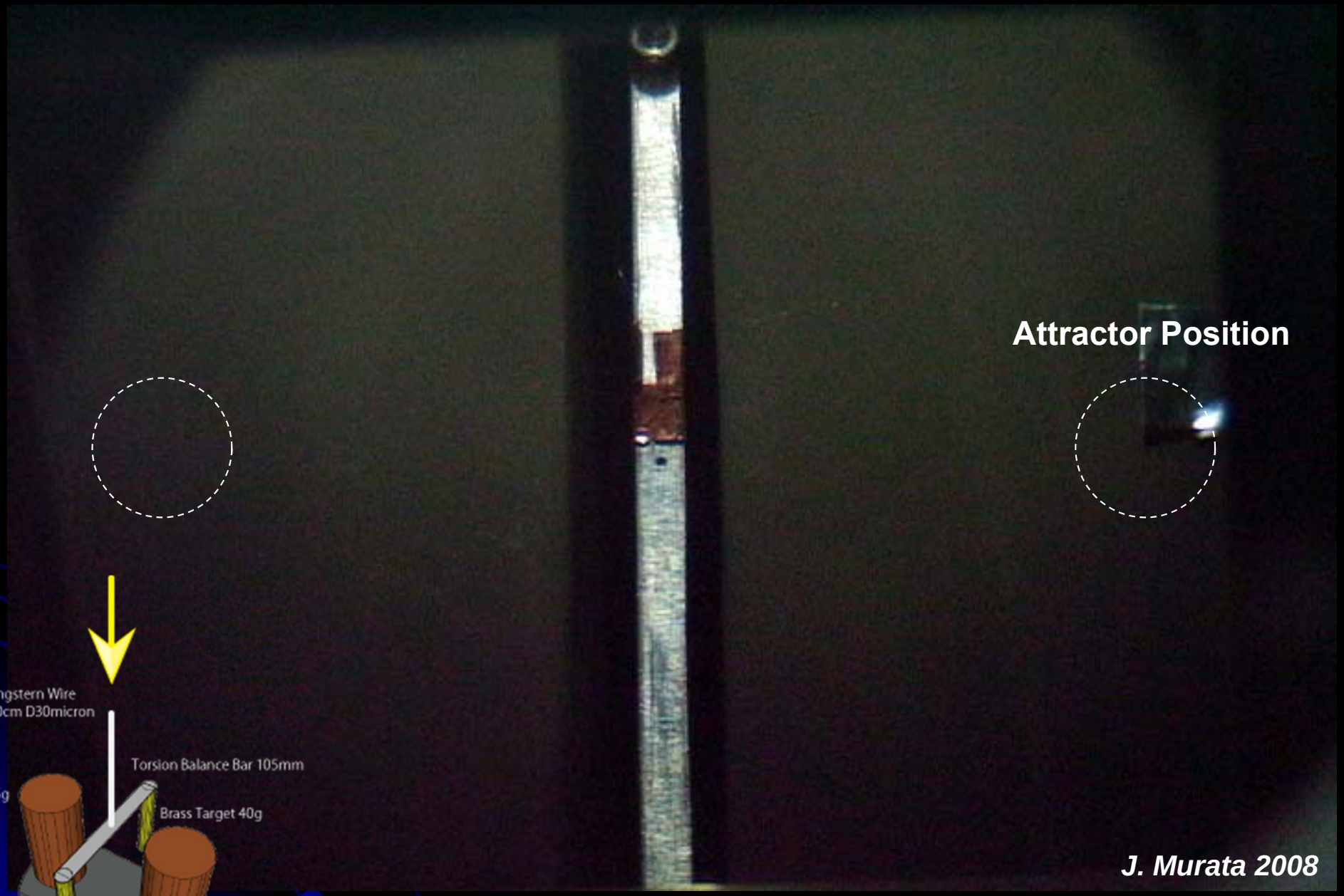


BS Fuji Galileo-X, Nov 2013





NHK BS Cosmic Front, Nov 2014

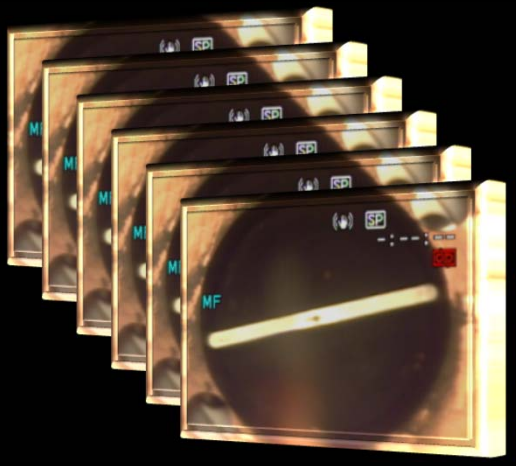


Top View of the Torsion Balance Bar

Top View of the Torsion Balance Bar

backup

Movie File



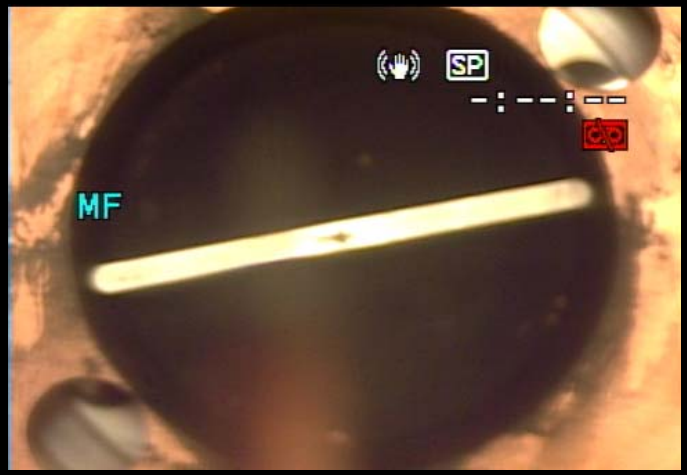
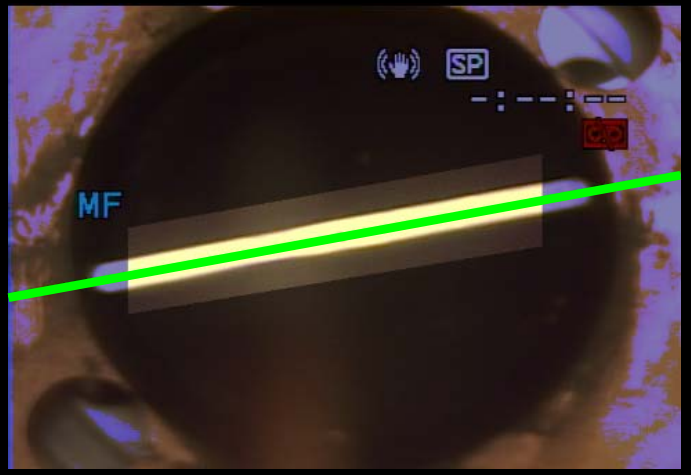
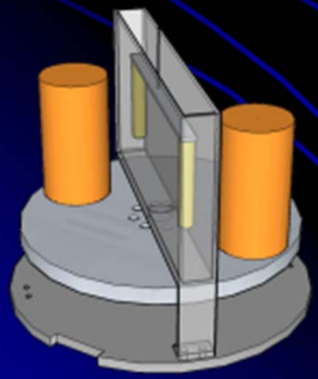


Image Analysis

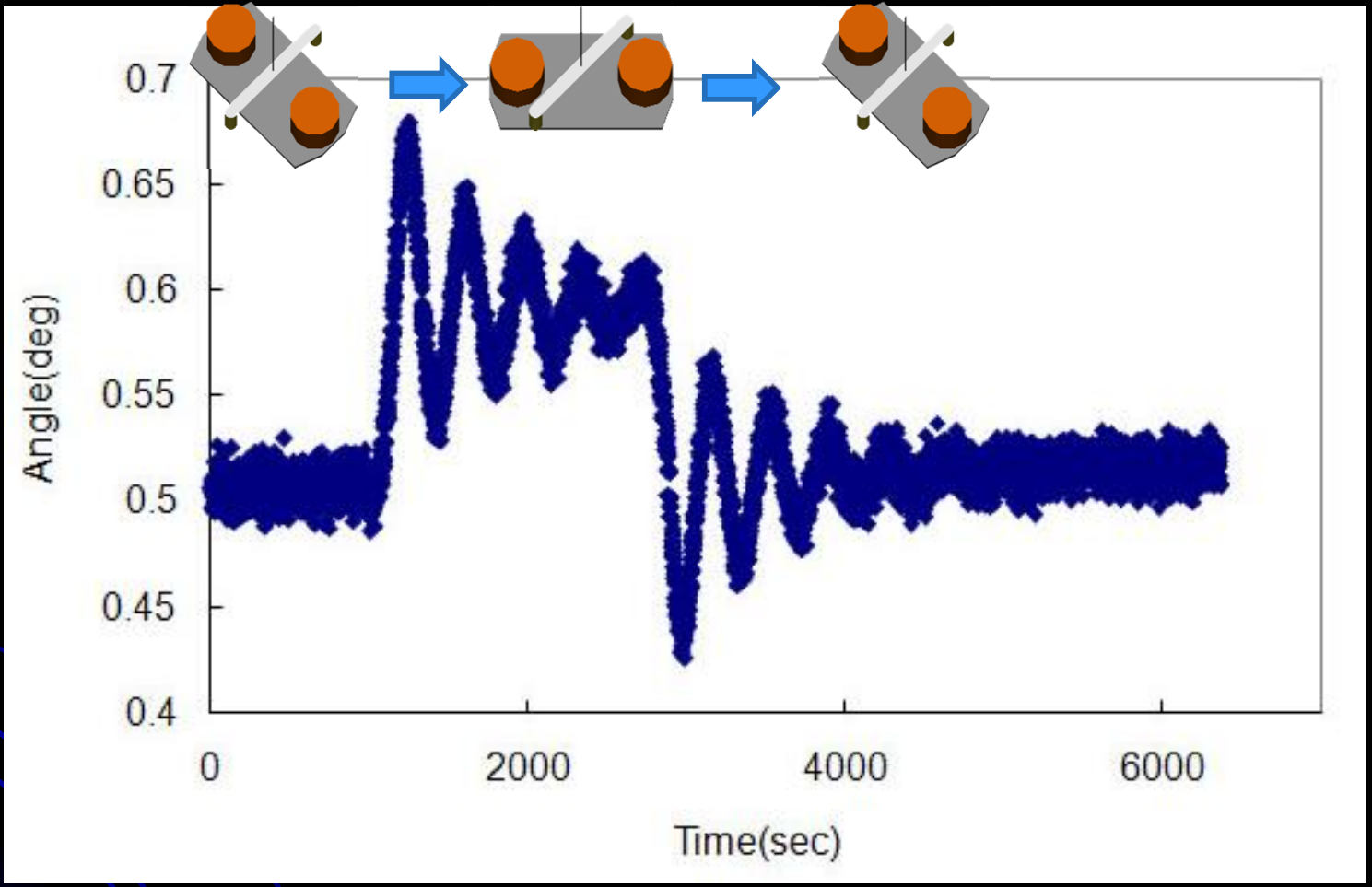
resolution ~ 1micro degree





Ninomiya, J. Phys. CS189 (2009) 012026

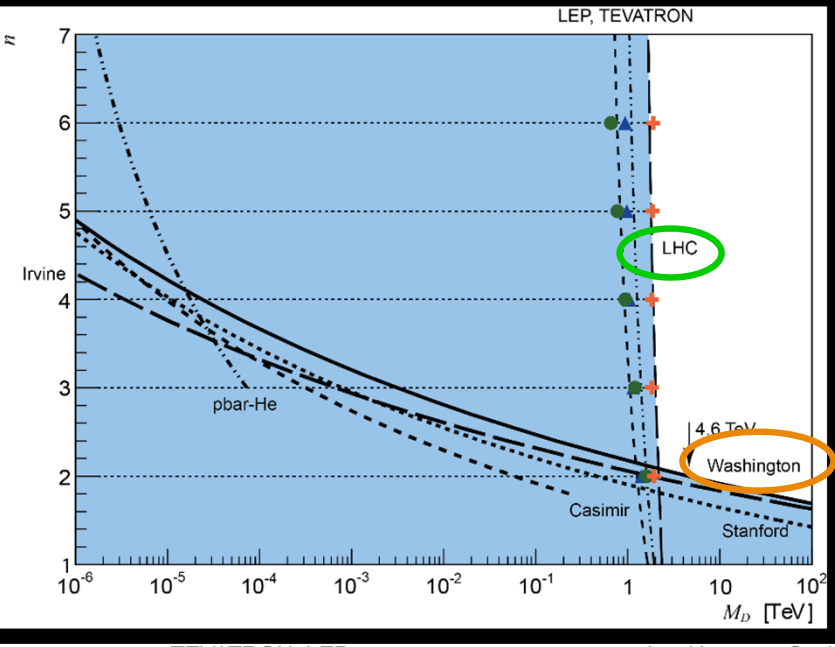
2nd year of Newton-I 2006



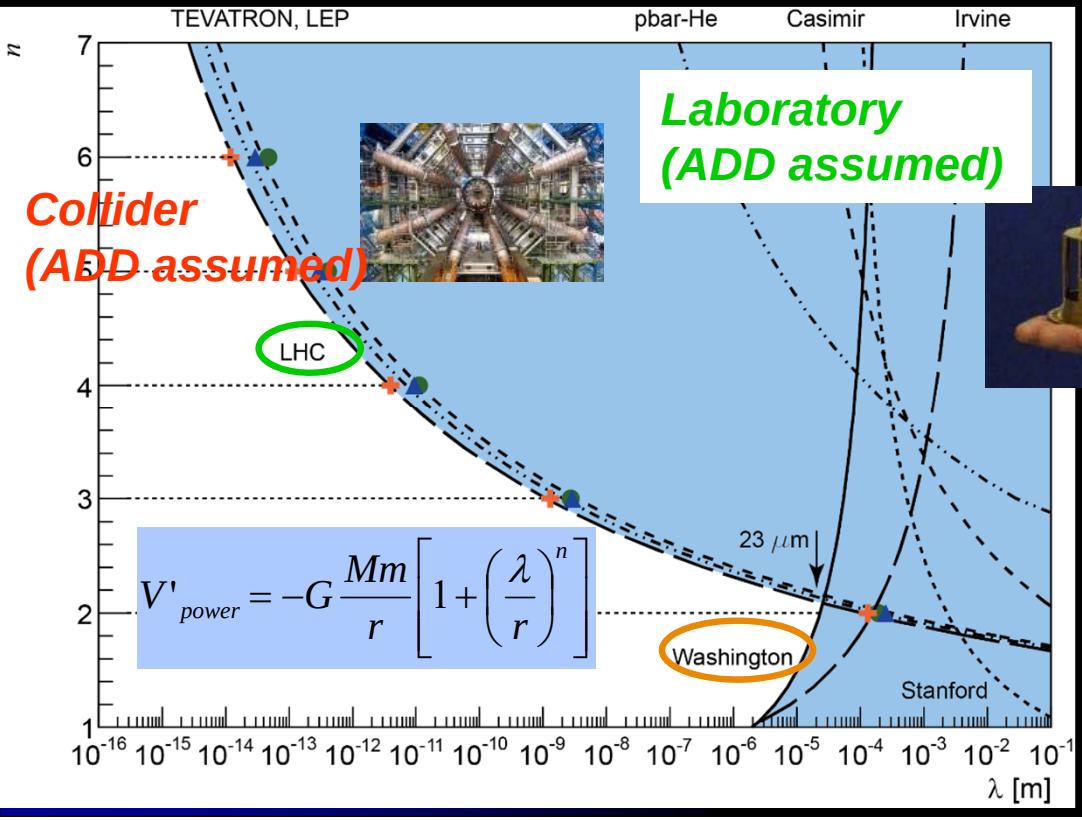
Yazawa, Sato 2005

Hata, J. Phys. CS189 (2009) 012019

Murata-Tanaka CQG 32 (2015) 033001 (arXiv:1408.3588)

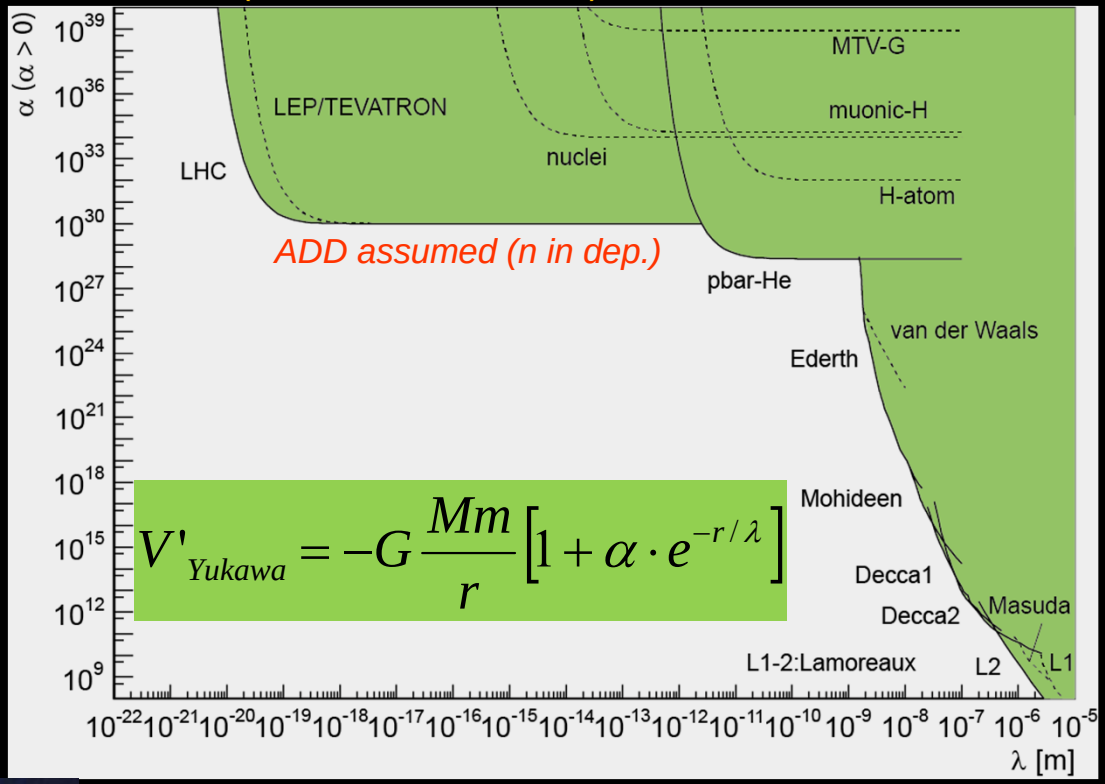


ADD



Laboratory (ADD assumed)

Collider (ADD assumed)



$$V'_{Yukawa} = -G\frac{Mm}{r}\left[1+\alpha\cdot e^{-r/\lambda}\right]$$

$$V'_{power} = -G\frac{Mm}{r}\left[1+\left(\frac{\lambda}{r}\right)^{n}\right]$$

ADD n=2

Short Range Exp. (UW) $\lambda < 23\mu m$ $M_D > 4.6TeV$

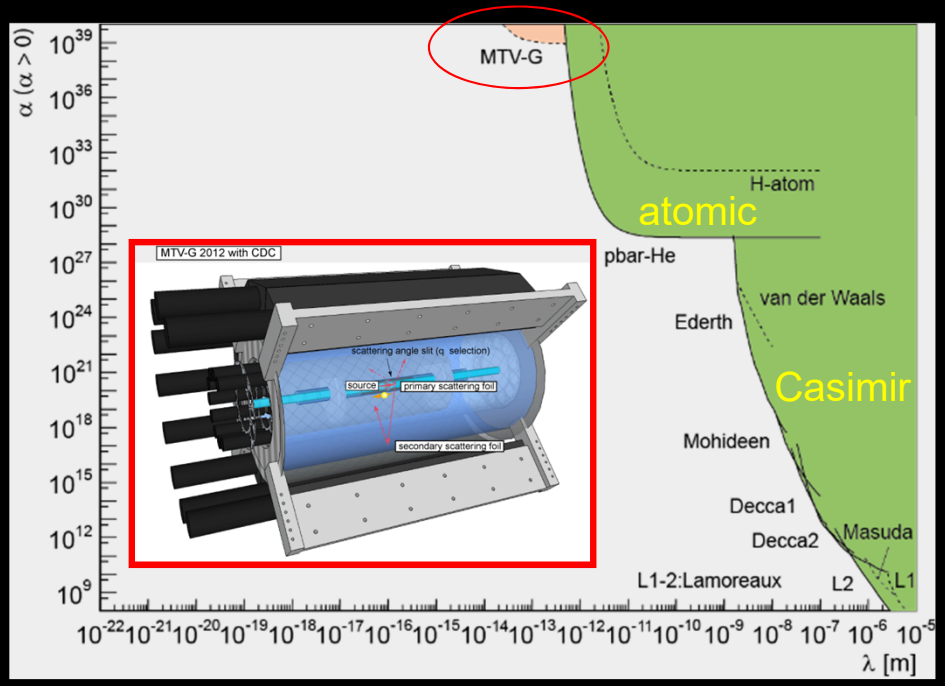
Collider Exp. (LHC) $\lambda < 130\mu m$ $M_D > 1.9TeV$

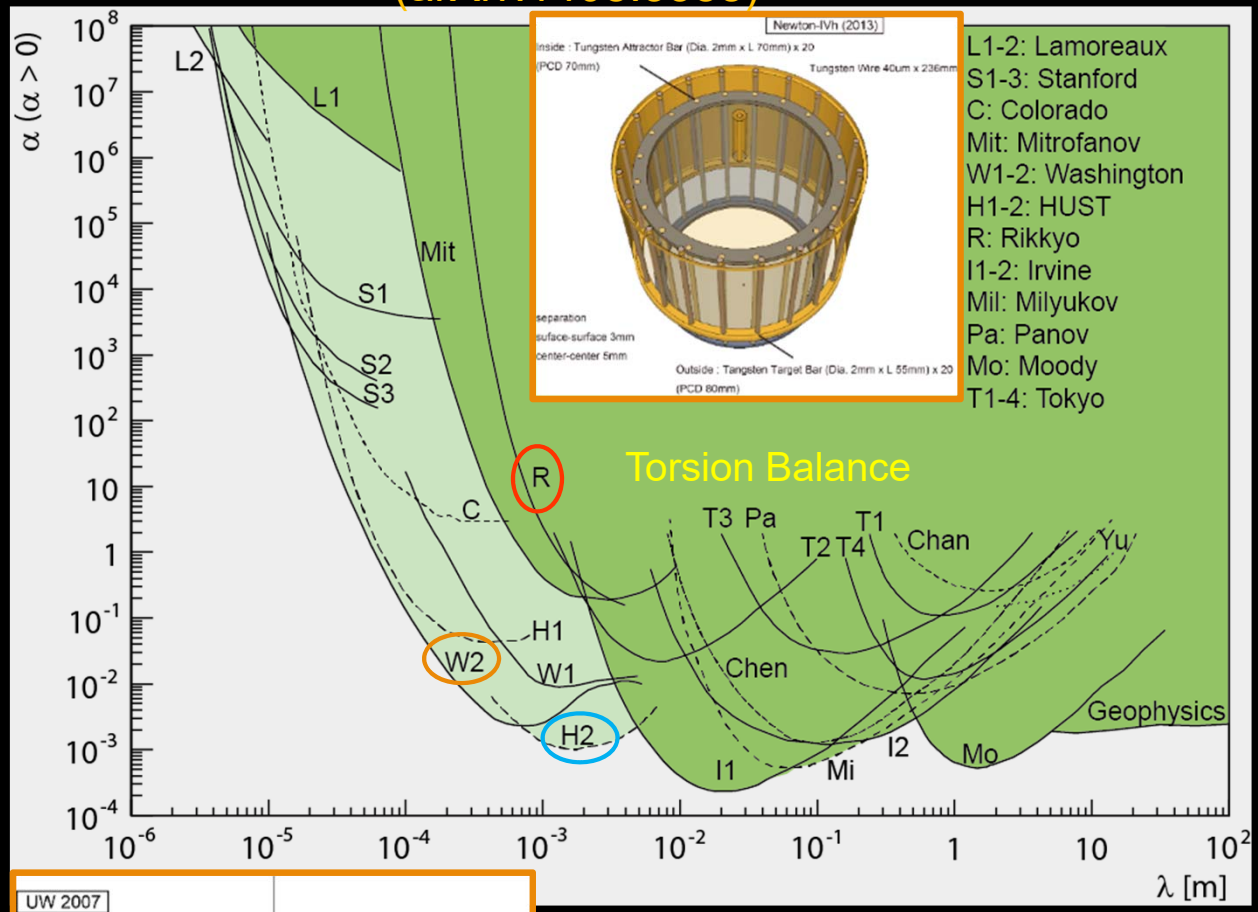
ADD n>2

LHC is the only sensitive tool

$$V'_{Yukawa} = -G\frac{Mm}{r}\left[1+\alpha\cdot e^{-r/\lambda}\right]$$

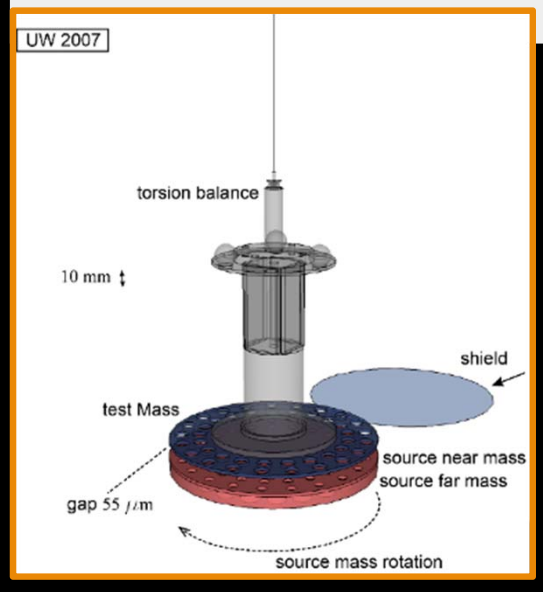
Murata-Tanaka CQG 32 (2015) 033001 (arXiv:1408.3588)

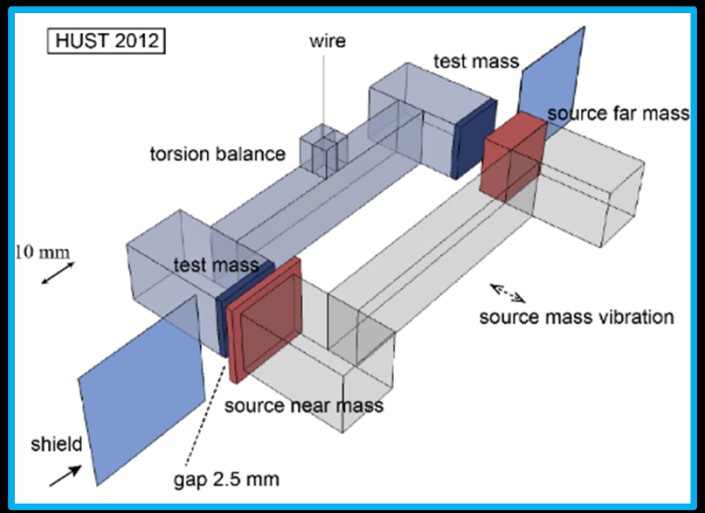


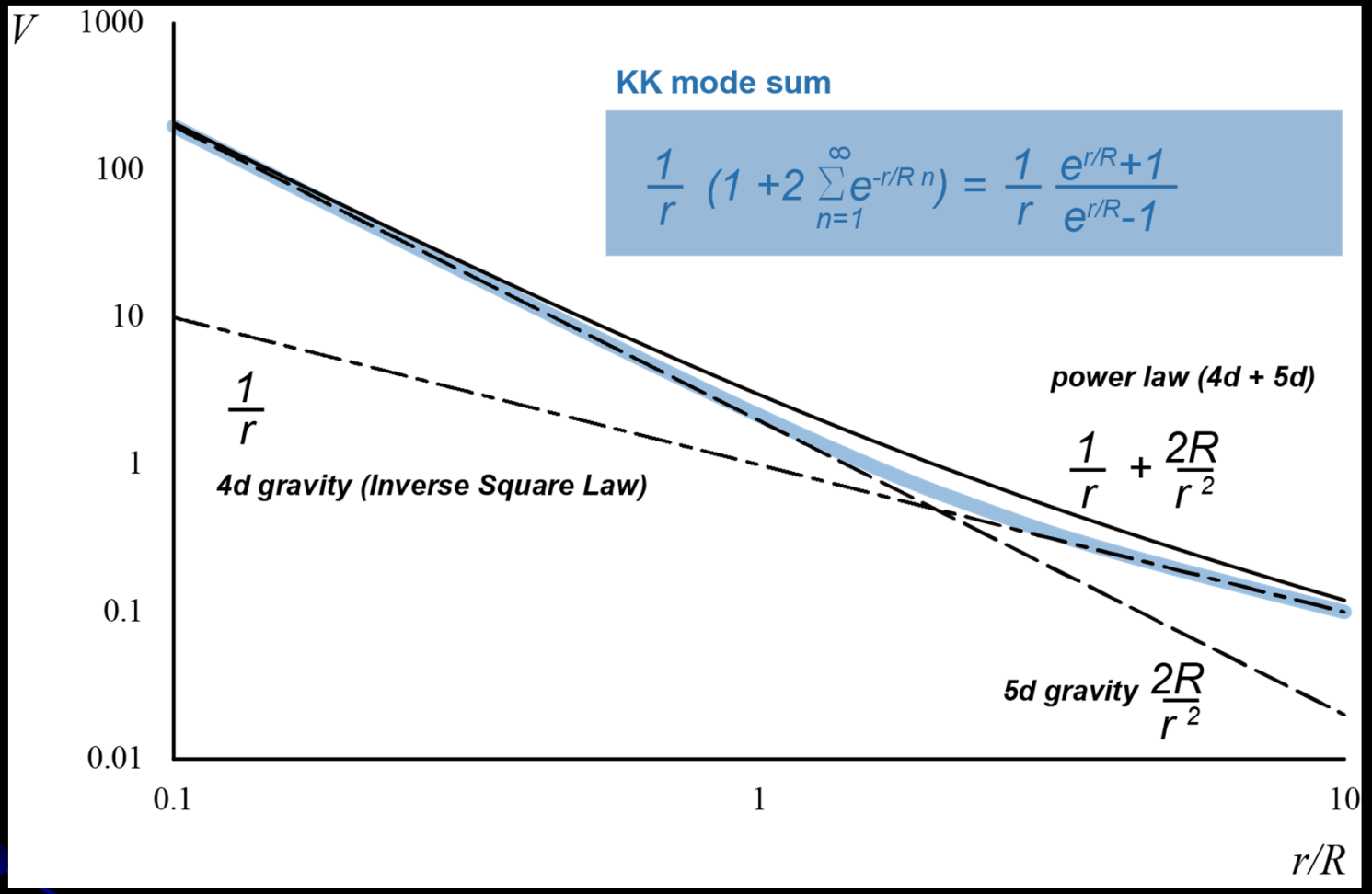


< 10 um
Gravity cannot observed
Setting Upper Limits

Casimir, Atomic and Particle exp.







$$V'_{Yukawa} = -G\frac{Mm}{r}\left[1+\alpha\cdot e^{-r/\lambda}\right]$$

Single Yukawa : Good at $\lambda \sim r$

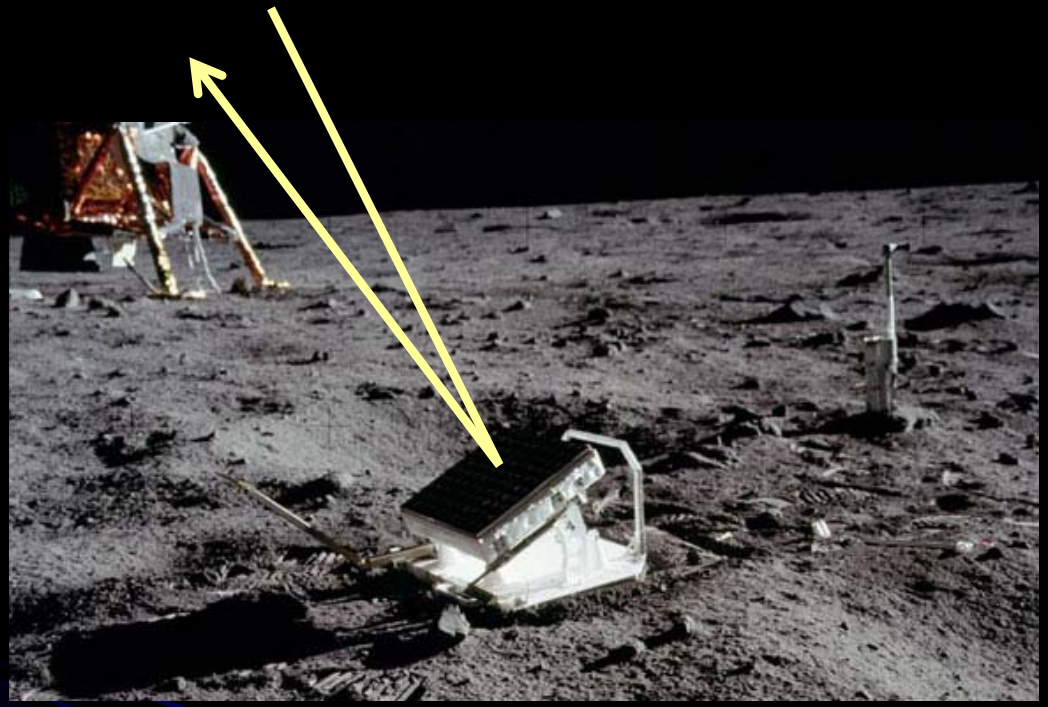
Not Good for $\lambda >> r$

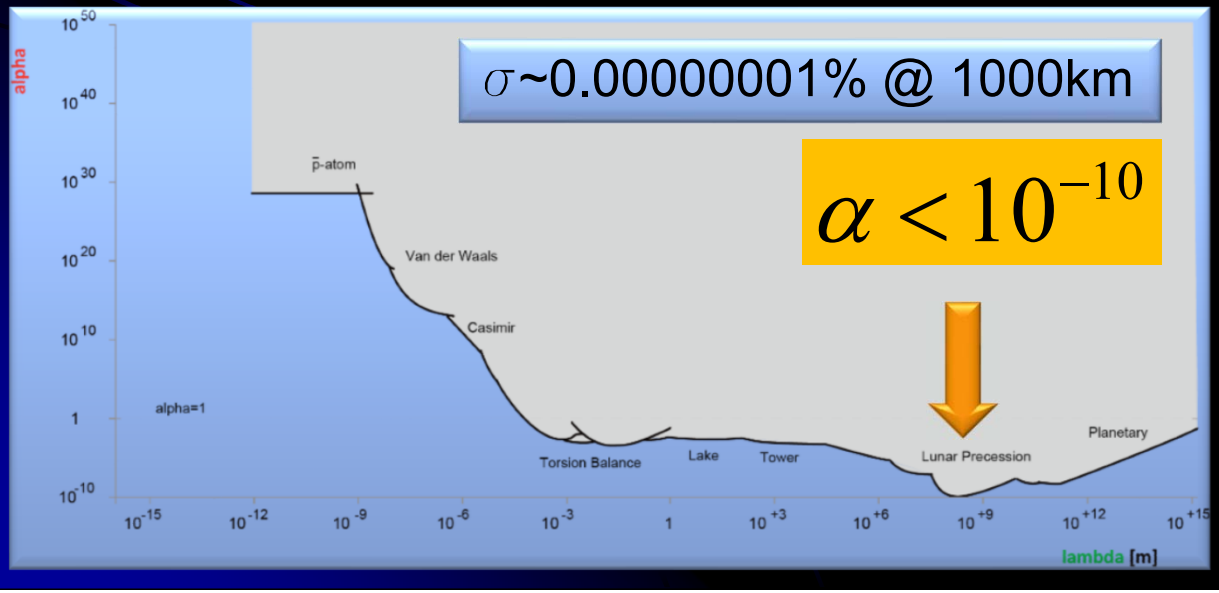
misleading ..

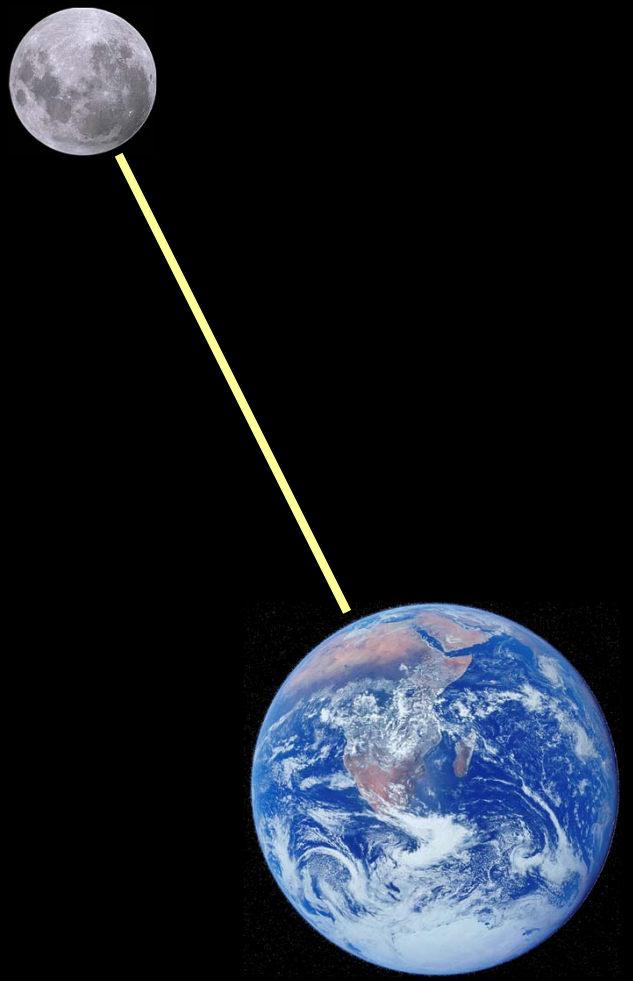
$$V'_{power} = -G\frac{Mm}{r}\left[1+\left(\frac{\lambda}{r}\right)^{n}\right]$$

Power Law (Yukawa sum) : Good at all λ region

Lunar Laser Ranging (LLR) Measurement : Apollo-11, 1969







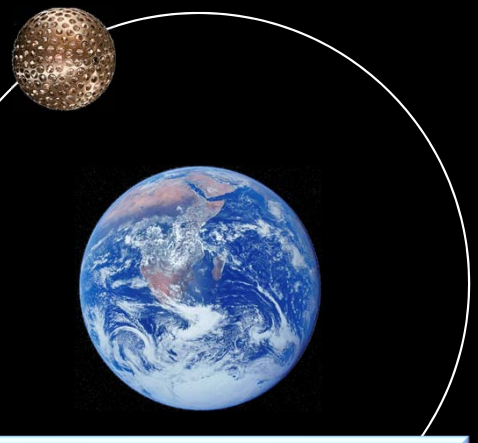
Dickey, Science 265 (1994) 482

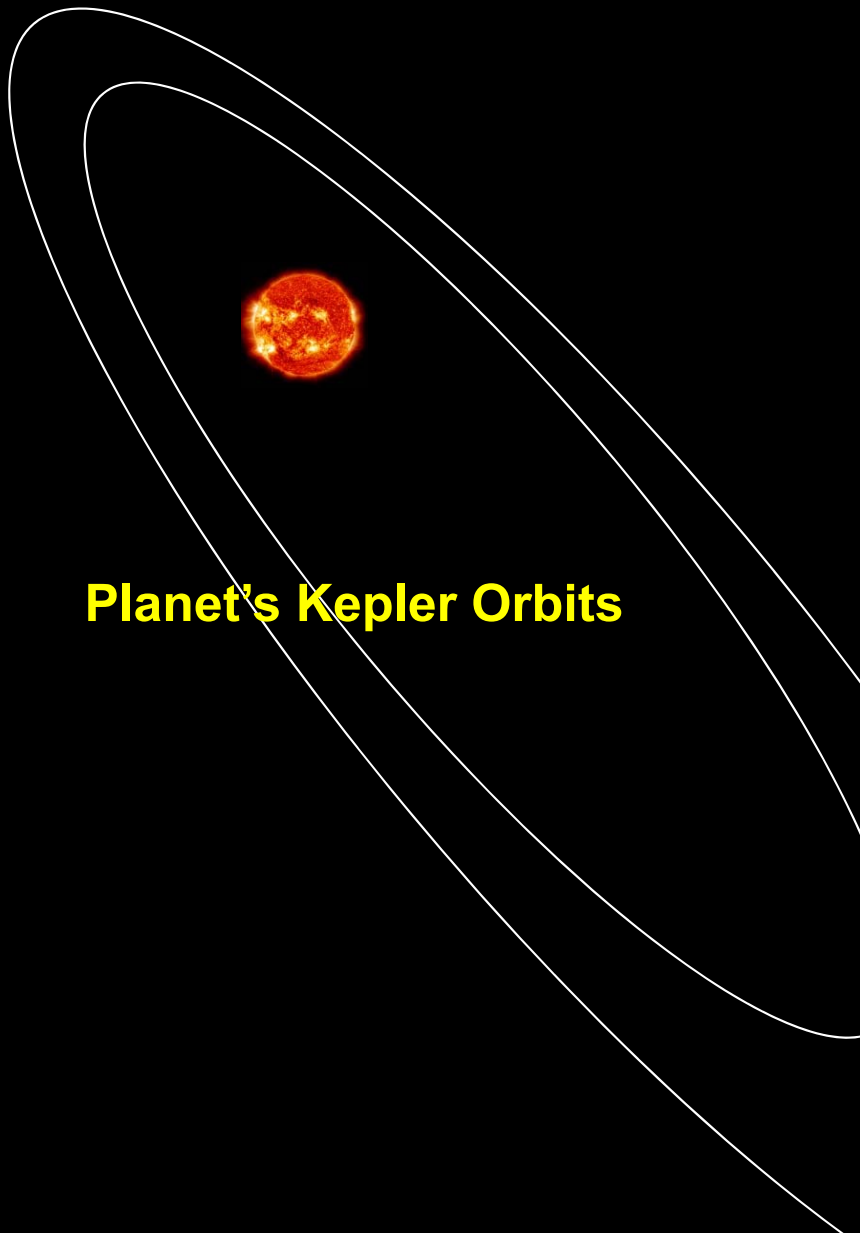
Satellite / Planets Kepler Orbit : LAGEOS-NASA (1985)

Smith J. Geophys. Res. 90 (1985) 9221

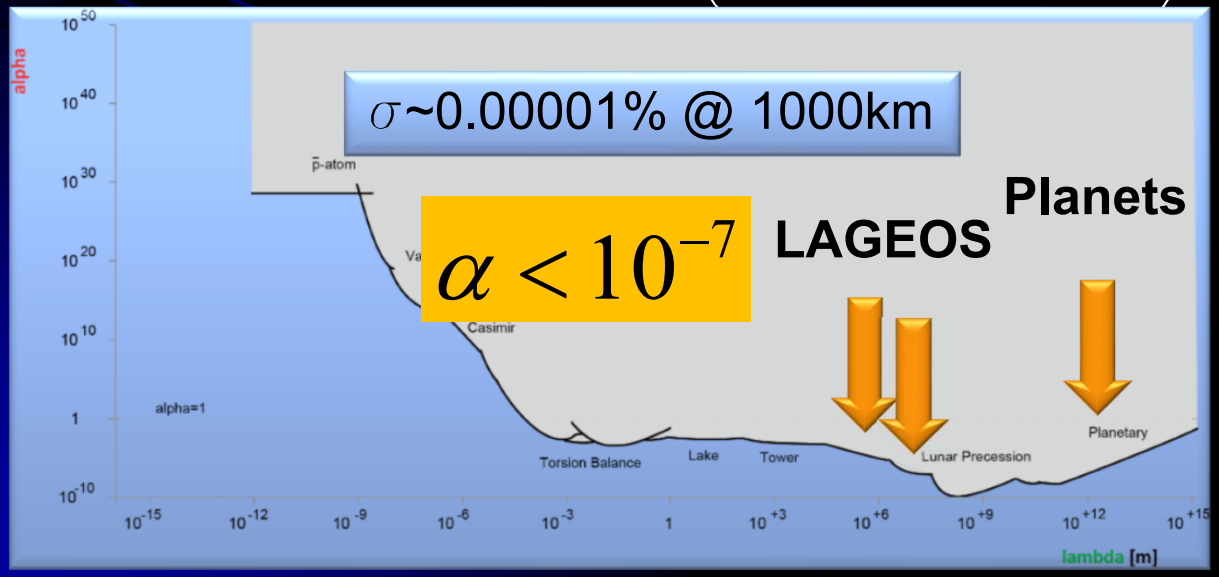
Moon - LAGEOS

Earth - LAGEOS

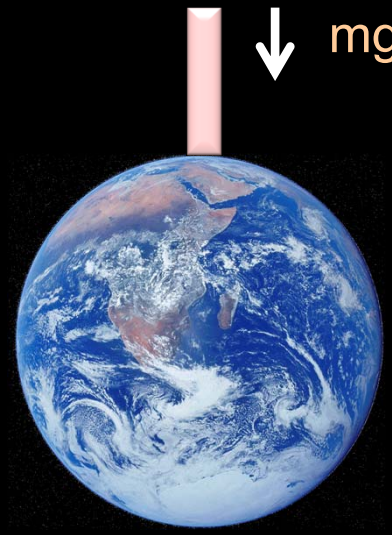


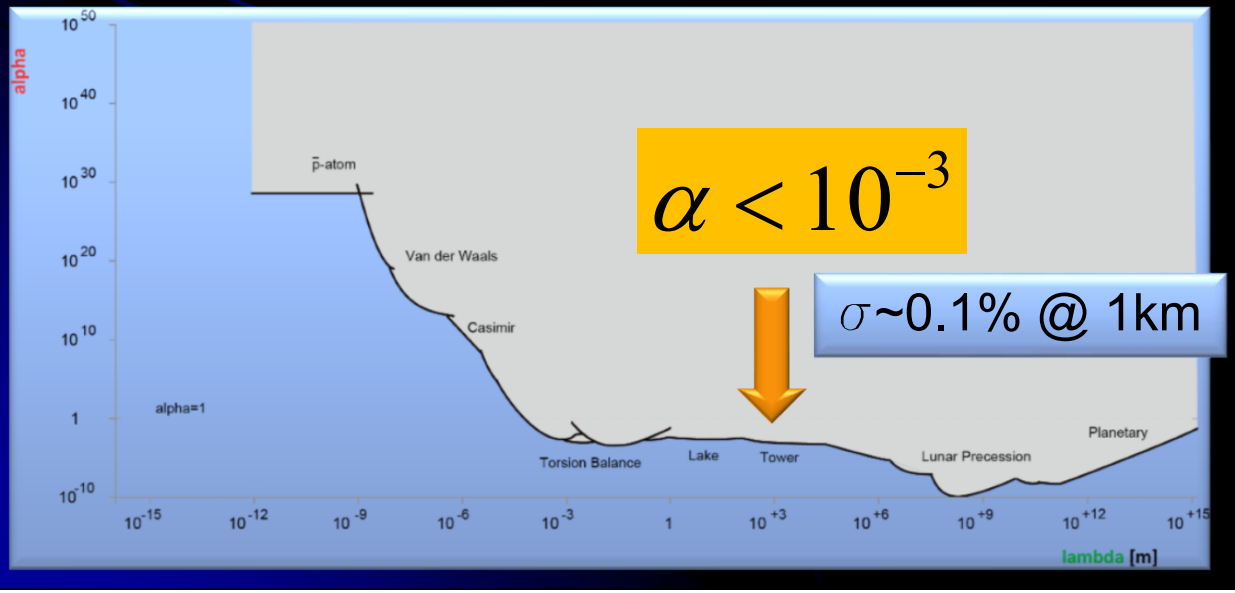


Planet's Kepler Orbits



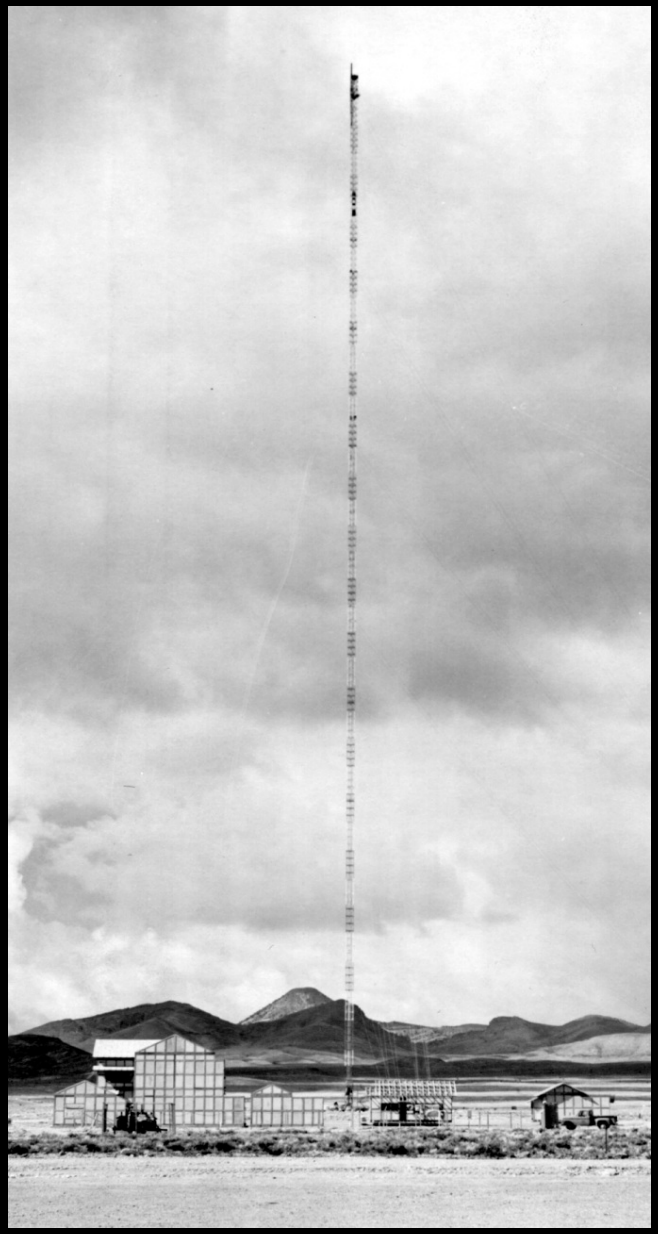
Tower Measurement : BREN tower 465m, Nevada, 1989





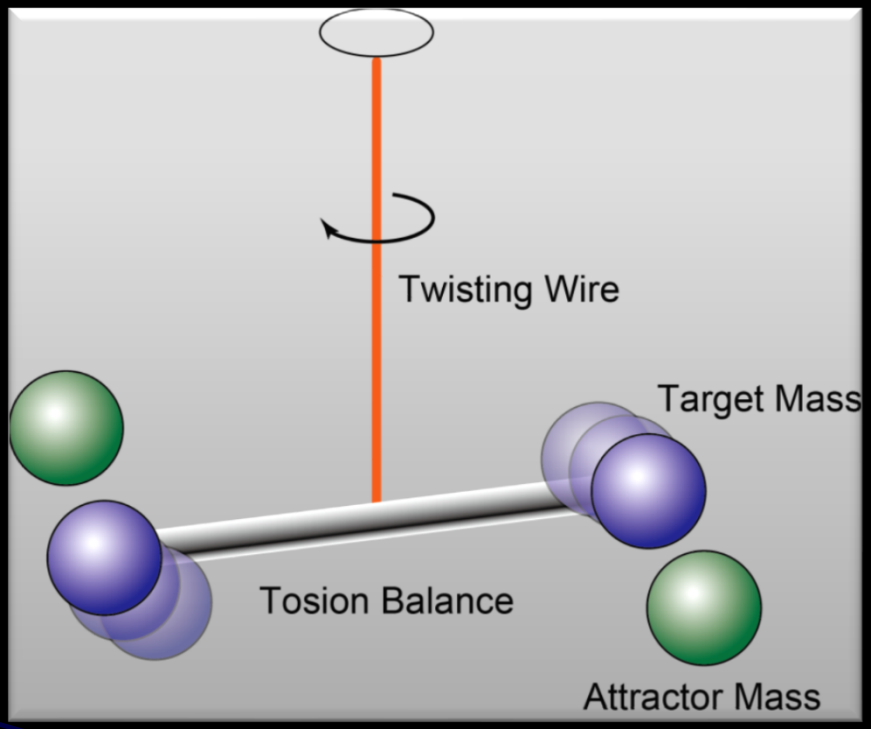
$\alpha < 10^{-3}$

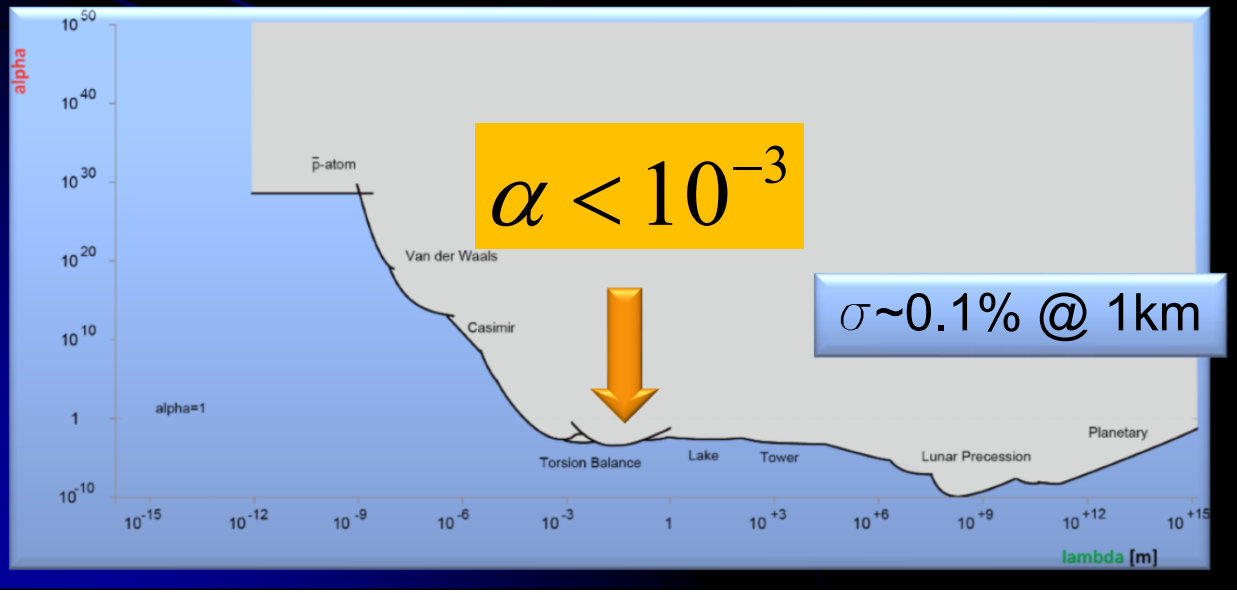
σ~0.1% @ 1km



Thomas PRL 63 (1989) 1902

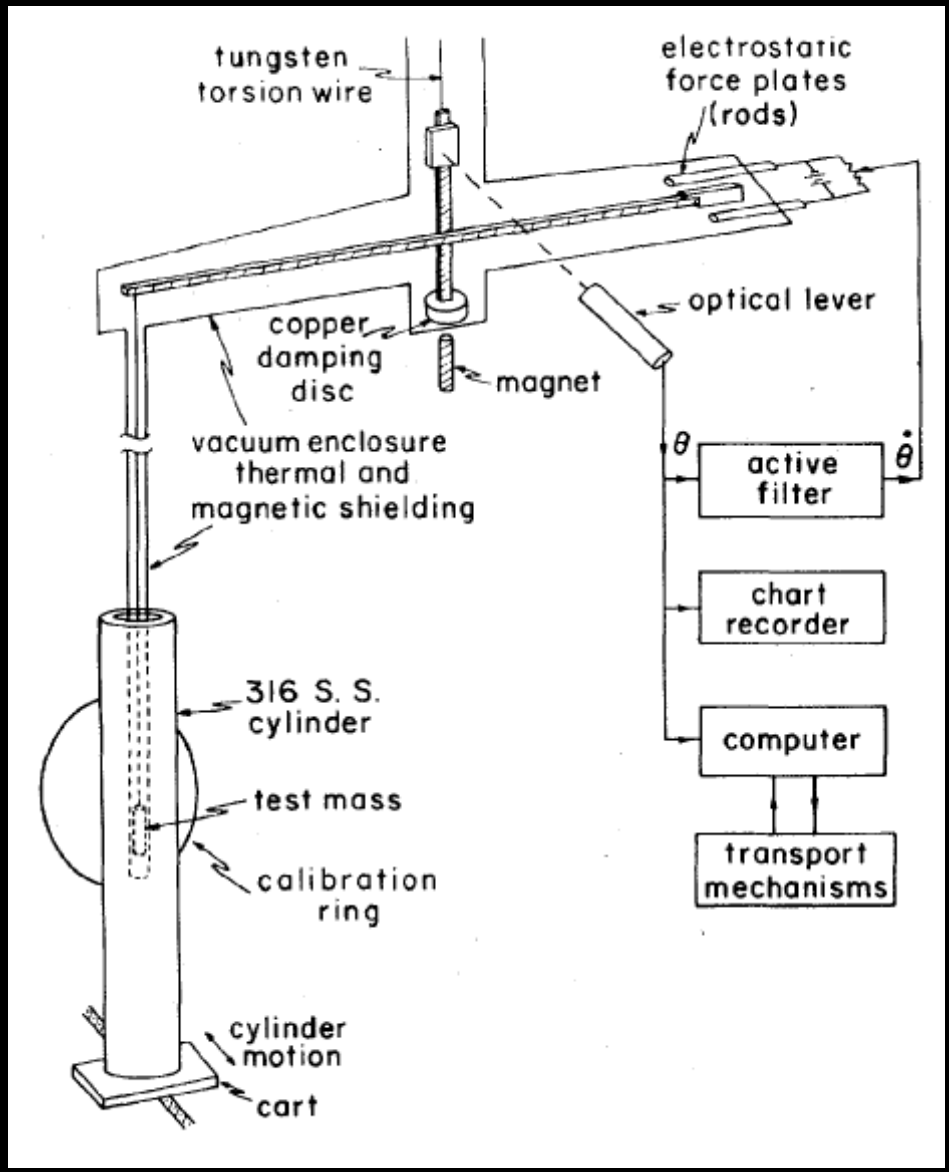
Torsion Balance Measurement : UC – Irvine 1985





$\alpha < 10^{-3}$

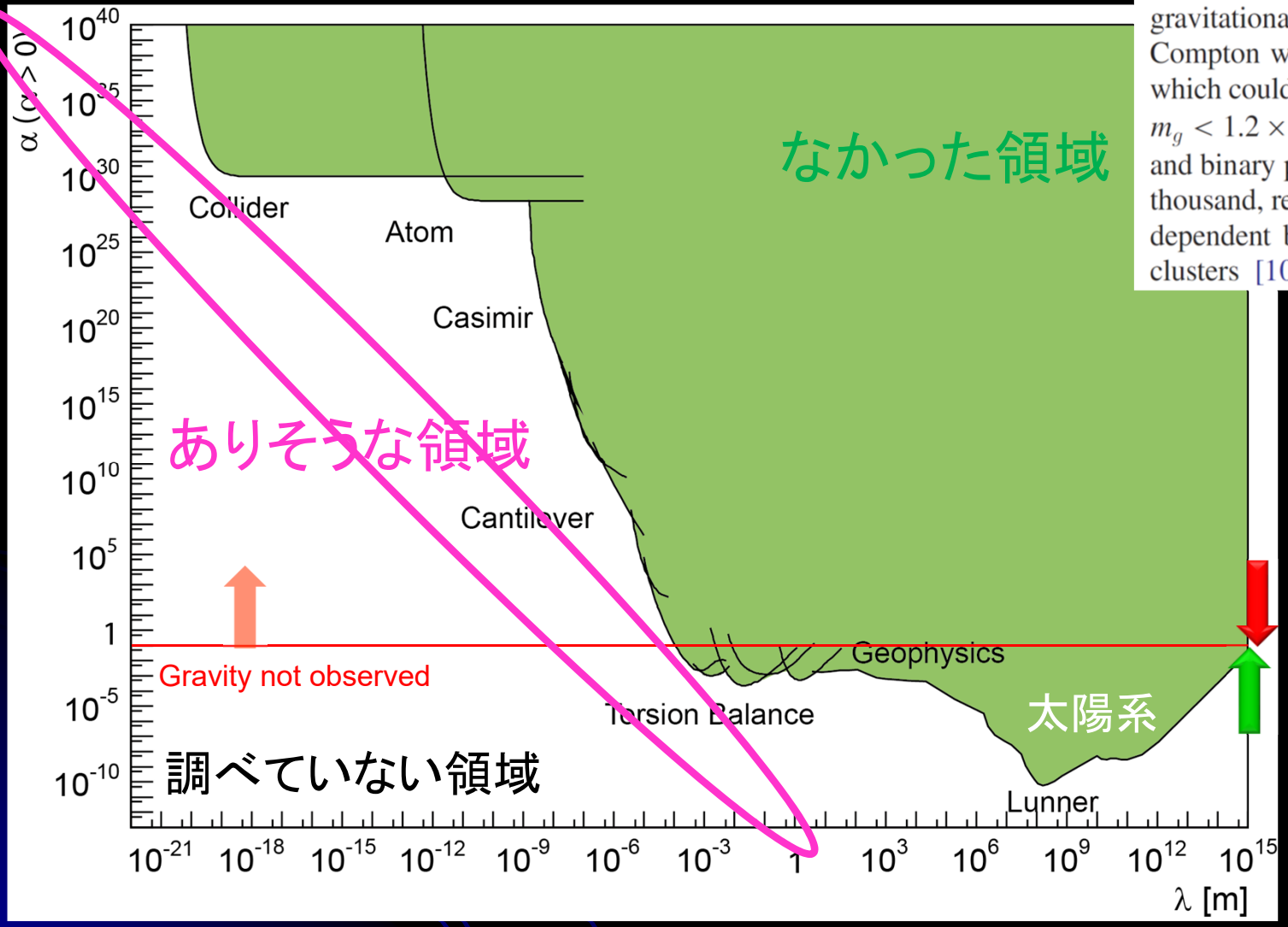
σ~0.1% @ 1km



Hoskins PRD 32 (1985) 3085

今回の重力波観測の影響

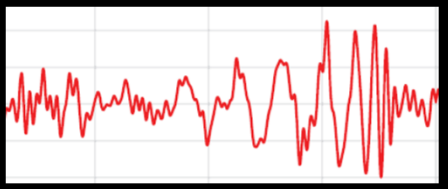
ずれ（誤差）



Finally, assuming a modified dispersion relation for gravitational waves [97], our observations constrain the Compton wavelength of the graviton to be $\lambda_g > 10^{13}$ km, which could be interpreted as a bound on the graviton mass $m_g < 1.2 \times 10^{-22}$ eV/c^2. This improves on Solar System and binary pulsar bounds [98,99] by factors of a few and a thousand, respectively, but does not improve on the model-dependent bounds derived from the dynamics of Galaxy clusters [100] and weak lensing observations [101]. In

LIGO/Virgo PRL116 (2016)

波形解析から



> 10^{16} m

> 2.8 x 10^{15} m

逆二乗則からずれる～重力子が質量を持つ～周波数によって速さが変わる～波形が変わる

分解能が向上すれば大幅に感度あがるかも