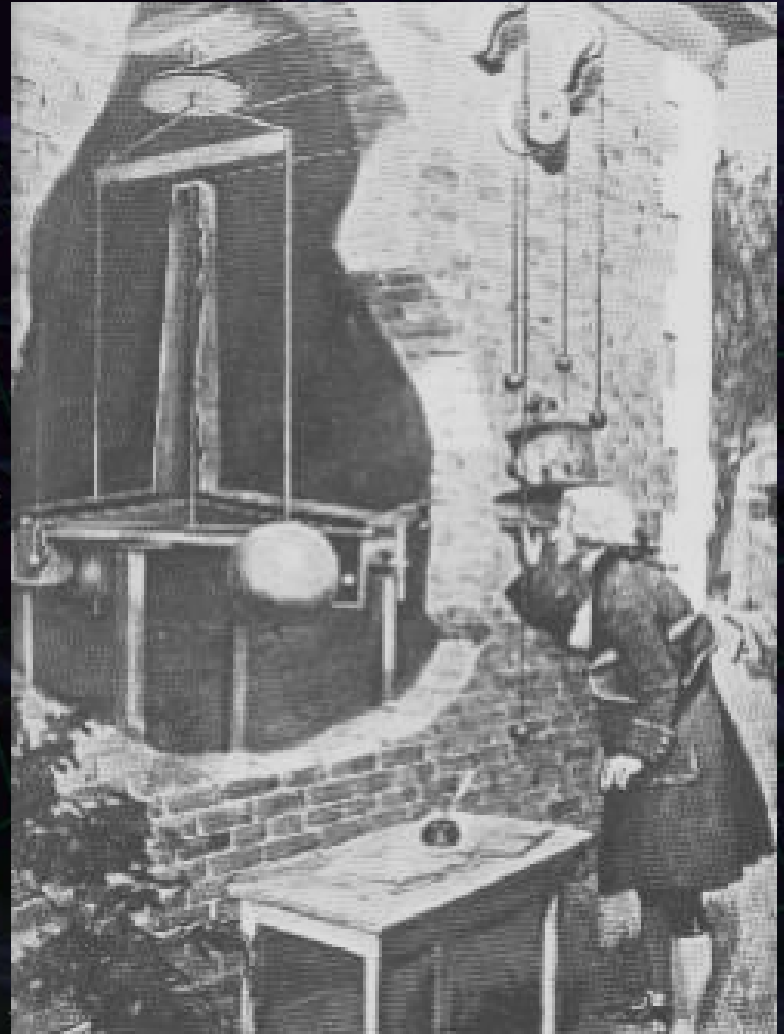


重力逆二乗則の検証実験

安東 正樹

(京都大学 理学研究科)



- (1) イントロダクション**
- (2) 微小距離での検証実験**
- (3) 実験の概要**
- (4) まとめ**

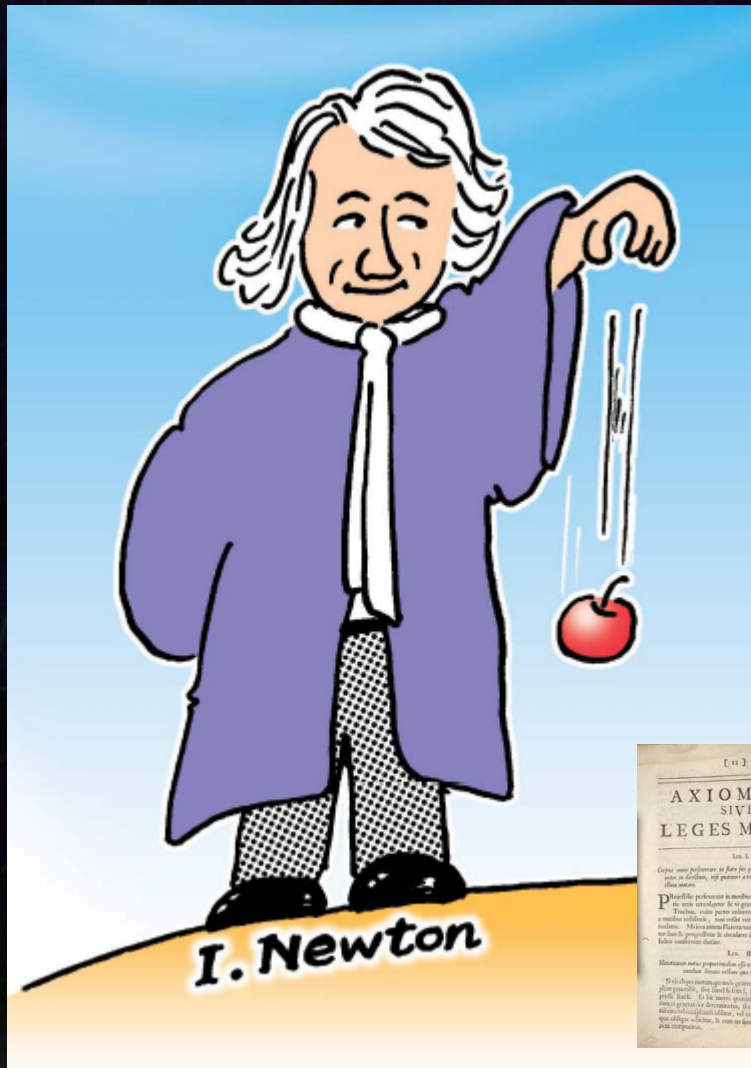


(1) イントロダクション

重力逆二乗則と余剰次元 検証実験



重力の逆二乗則



ニュートン重力の大きさ

$$F(r) = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

⇨ 2つの質点間の
距離の2乗に反比例

ポテンシャル

$$V(r) = -G \frac{m_1 m_2}{r}$$

物理学・宇宙物理学の基本法則

イラスト: Tom Haruyama (2005)

重力逆二乗則の検証

重力法則 --- 基礎物理法則

→ 実現可能な最高の精度で検証されているべき

逆二乗則からのずれの検証

重力の大きさ $\propto 1/r^{2+\delta}$ の形を仮定

重力場に湯川型のポテンシャル補正項

$$V(r) = -G \frac{m_1 m_2}{r} \times \left[1 + \underbrace{\alpha e^{-r/\lambda}}_{\text{補正項}} \right]$$

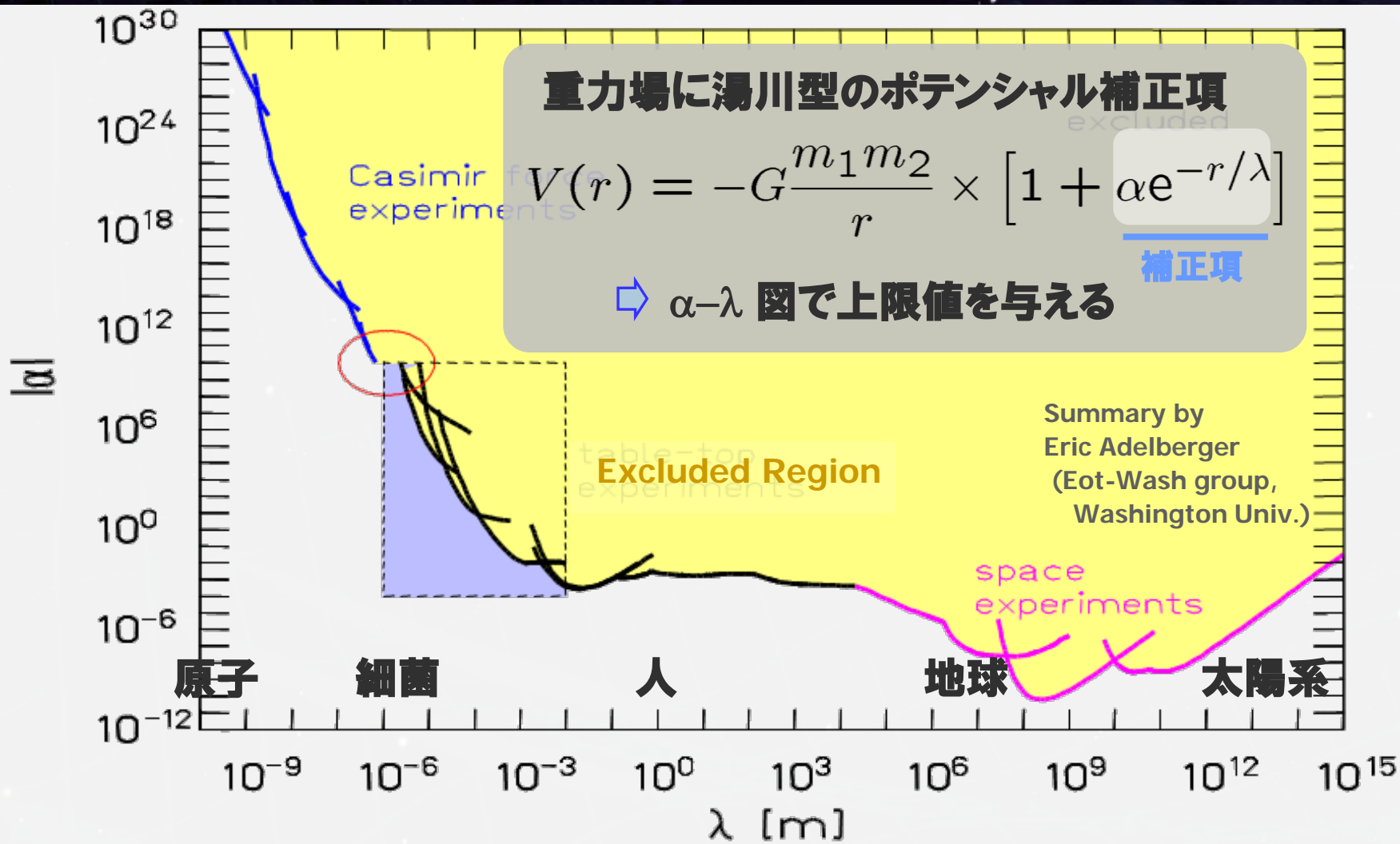
$$\left[\begin{array}{l} \alpha : \text{補正項の大きさ} \\ \lambda : \text{補正項の距離スケール} \end{array} \right]$$

⇒ α - λ 図で上限値を与える

重力逆二乗則の検証

重力法則 --- 基礎物理法則

→ さまざまなスケールで重力逆二乗則の検証



現代物理における重力の逆二乗則

物理学の根本に関わる問題...

階層性問題

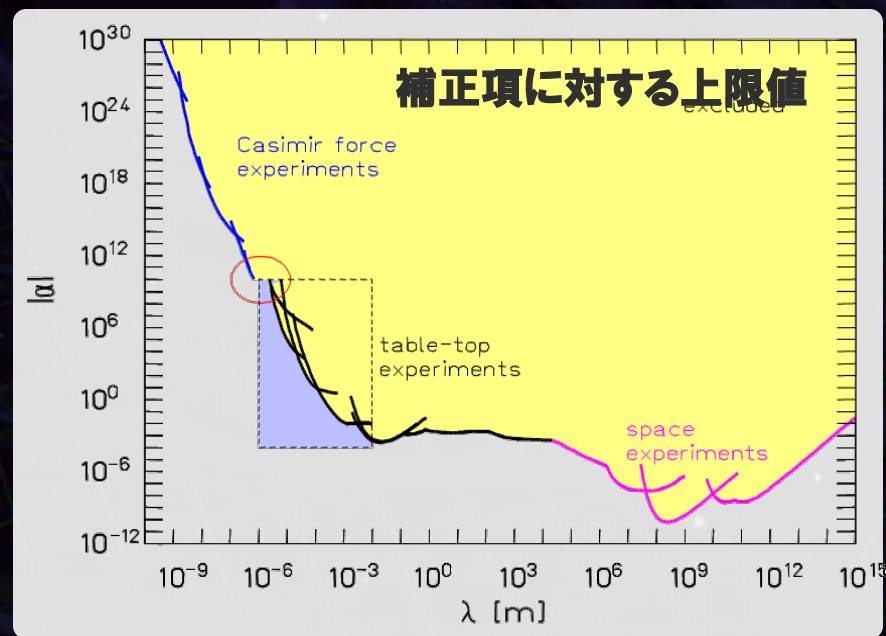
(Hierarchy Problem)

重力だけが極端に弱い

宇宙項問題

(Cosmological Constant Problem)

ダークエネルギーの大きさが、真空場揺らぎのエネルギーより極端に小さい



⇒ 余剰次元の存在などで説明できる可能性

→ 微小距離 (0.1mm以下) での
重力の逆二乗則の破れとして現れる

階層性問題

階層性問題 (Hierarchy Problem) : 重力だけが極端に弱い

プランク質量

$$M_p = \sqrt{\hbar c/G} \\ \sim 1 \times 10^{16} \text{ TeV}/c^2$$

電弱相互作用のスケール

$$M_{EM} \sim 1 \text{ TeV}/c^2$$



大きな余剰次元 (large extra dimensions)
の存在で説明できる可能性

N. Arkani-Hamed, et al.,
Phys. Lett. B 429 (1998) 263

重力だけが、余剰次元に伝搬できる

4+n次元のガウスの法則 → 実効的なプランク質量

$$M_p^2 \sim (M_p^*)^{2+n} R^n$$

4次元

4+n次元

余剰次元のスケール

$$R \sim 10^{30/n-19} \text{ m}$$

$$M_p^* \sim 1 \text{ TeV}/c^2$$

$$n=1, R \sim 10^{11} \text{ m}$$

$$n=2, R \sim 10^{-4} \text{ m}$$



宇宙項問題

宇宙項問題 (Cosmological constant Problem) :

観測されているダークエネルギー密度が極端に小さい

真空場のエネルギー密度より, 60桁以上小さい

S.Weinberg,
Rev. Mod. Phys. 61 (1989) 1



'太った重力子' (Fat graviton) モデル
で説明できる可能性

R.Sundrum,
Phys. Rev. D 69 (2004) 044014

重力子が有限の大きさを持っている

→ 微小距離では, 重力を'見る'ことができない

ダークエネルギーの密度 $\rho_d \sim 4 \text{ keV/cm}^3$

$$\Rightarrow R_d \sim (\hbar c / \rho_d)^{1/4} \sim 85 \text{ } \mu\text{m}$$

重力のガウスの法則

電磁気からの類推

電荷 Q の点粒子が

単位電荷を持つ粒子に及ぼす静電気力

ガウスの法則
$$\int_S \mathbf{E} \cdot \mathbf{n} \, dS = \int_V \rho / \epsilon_0 \, dV = Q / \epsilon_0$$

質量 M の質点が

単位質量に及ぼす重力

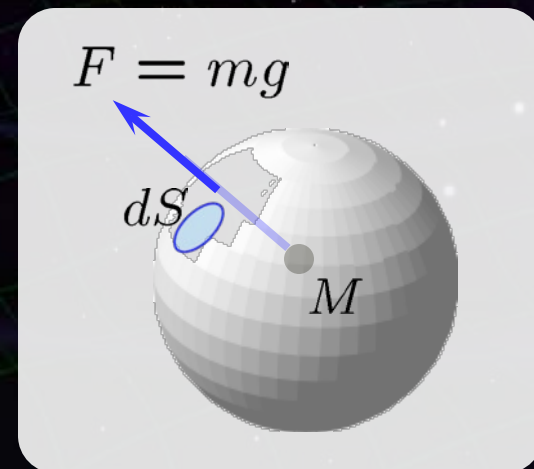
$$\int \mathbf{g} \cdot \mathbf{n} \, dS = -4\pi GM$$

↓

$$g \cdot 4\pi r^2$$

⇒ 力は球面の表面積に反比例

→ 3次元空間では 重力の逆二乗則



n次元でのガウスの法則

空間n次元のとき

n次元球の表面積 $\propto r^{n-1}$

⇒ 重力の逆二乗則 からのずれ

重力の逆二乗則の検証

$\propto 1/r^{2+\delta}$ の形を仮定

⇒ $|\delta| < 10^{-9}$ が検証されている

n次元球の表面積

n Surface Area

2 $2\pi r$

3 $4\pi r^2$

4 $2\pi^2 r^3$

5 $\frac{8}{3}\pi^2 r^4$

電磁気力の逆二乗則の検証

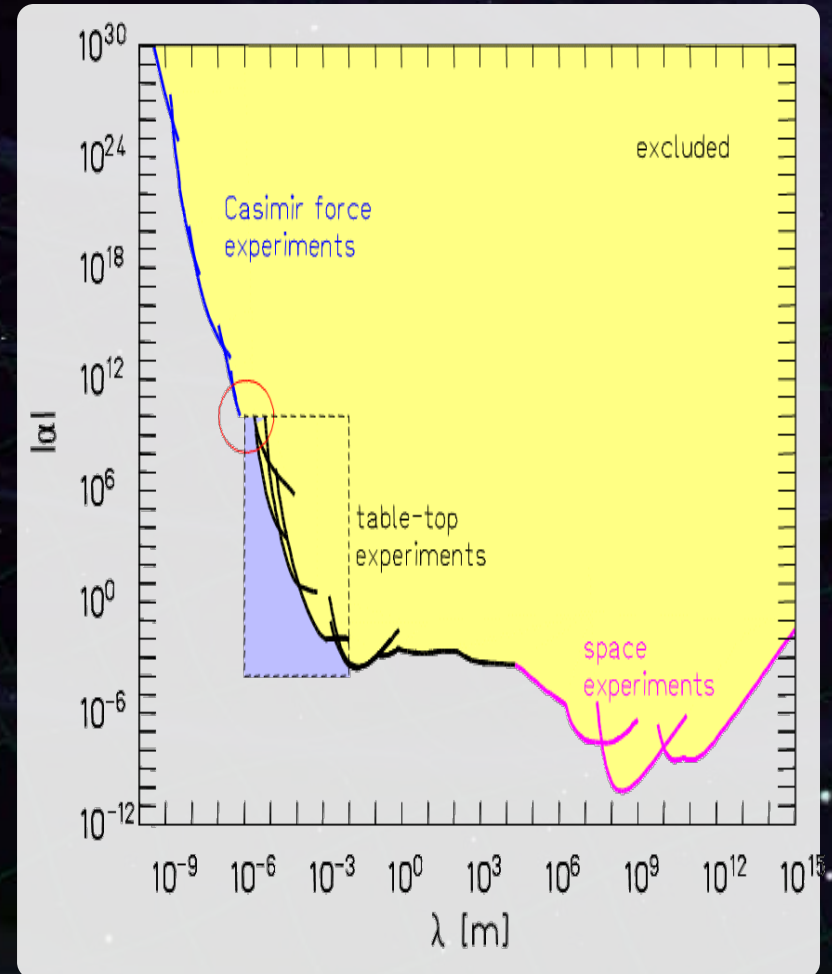
$$|\delta| < 10^{-16}$$

E.R.Williams, et.al.,
Phys. Rev. Lett. 26 (1971) 721.

重力逆二乗則の検証実験

- ~ 10^{-6} m **カシミール力の測定実験**
 マイクロカンチレバーなど
- ~ 1m **実験室内での実験**
 ねじれ振子, カンチレバー
- ~ 10^5 m **地上での実験**
 縦穴, 湖, 海, 塔での実験
- ~ 10^{15} m **天体軌道からの検証**
 人工衛星, 月, 惑星

補正項に対する上限値



極微小距離での検証実験

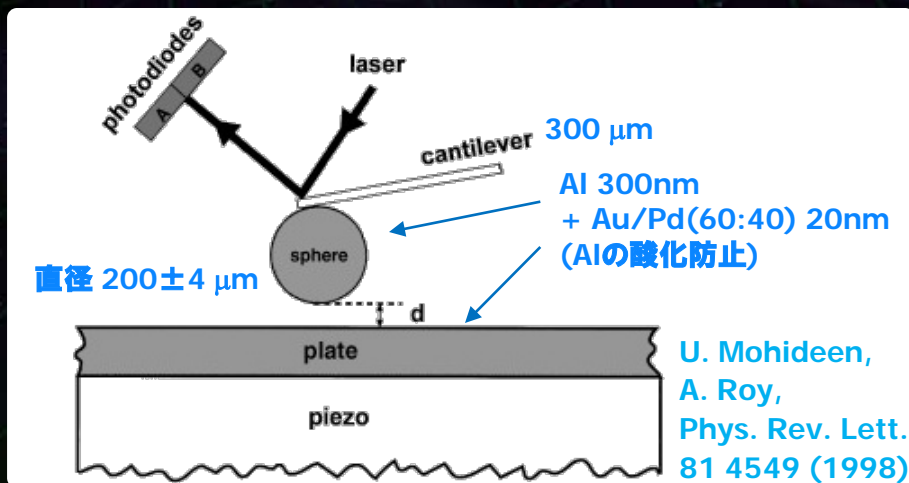
カシミール力

(量子真空場ゼロ点振動力)

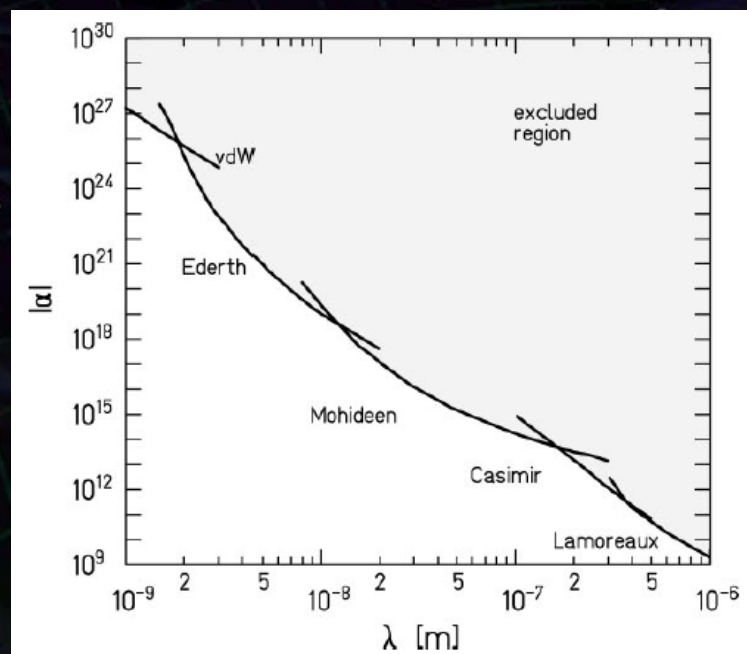
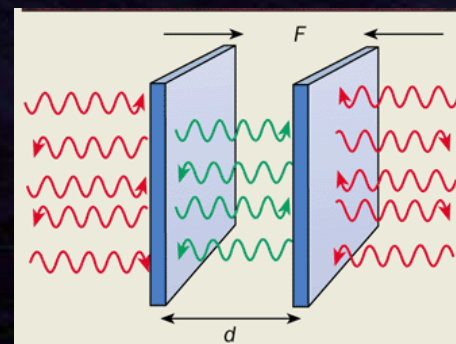
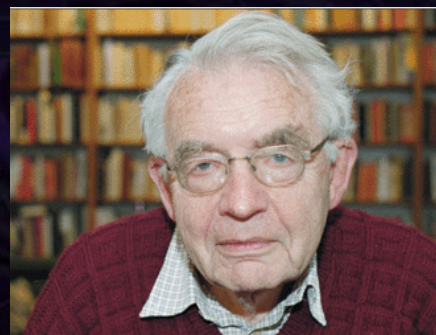
H.D.Casimir,
Proc.K.Ned.Akad Wet. 51, 793 (1948)

電磁場のゼロ点振動エネルギー
→ 金属板内側に引力が生じる

Micro Cantileverを利用して測定



→ 1%の精度でカシミール力を測定



E.G.Adelberger et al.,
Ann.Rev.Nucl.Sci. 53 (2003) 77

実験室内での検証実験

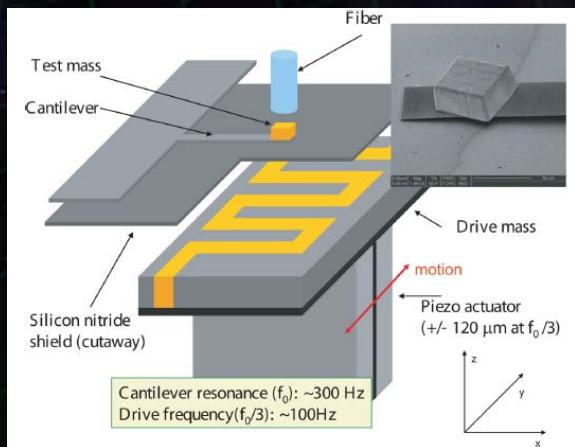
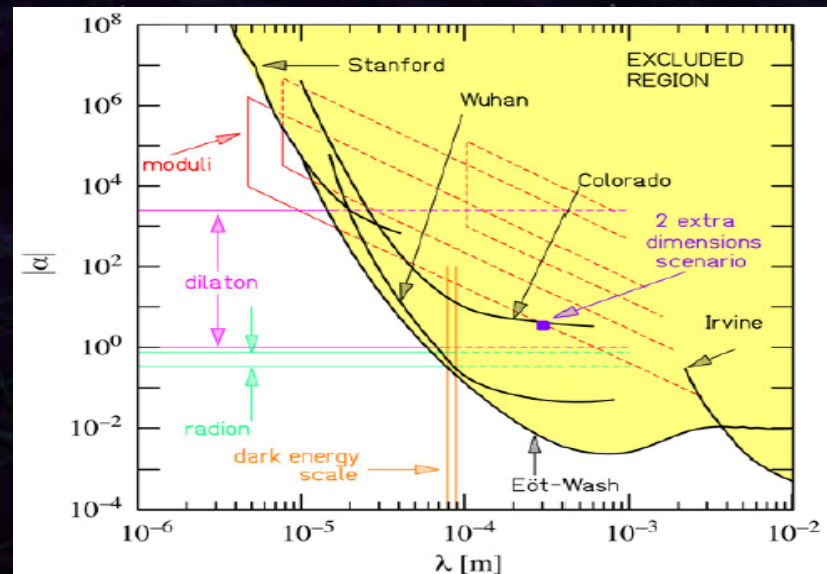
微小距離での実験 (10 μ m – 数cm)

カンチレバー

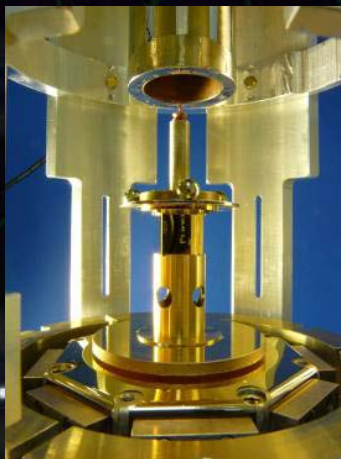
ねじれ秤 (Torsion Balance)

ねじれ計測 --- 光てこ

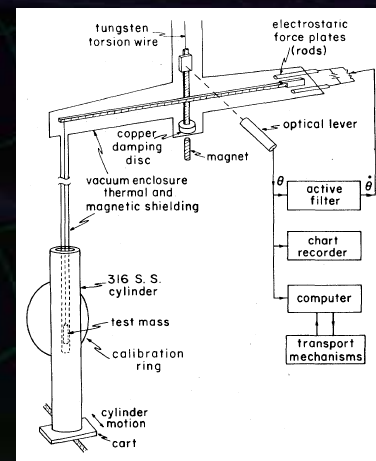
反射された光のスポット位置 \rightarrow 角度変動



A.A.Geraci et al.,
Phys. Rev. D 78 (2008) 022002



D. J. Kapner et al.,
Phys. Rev. Lett 98 (2007) 021101



J.K.Hoskins et al.,
Phys. Rev. D 32 (1985) 3084

地上での検証実験

縦穴を用いた実験

重力加速度の深度依存性を測定

$$\Delta g(z) \simeq 4\pi G \rho z \frac{\alpha}{1 + \alpha}$$

海洋での実験

地質による密度の不定性を排除
潜水艦を用いる (~5000m)

湖での実験

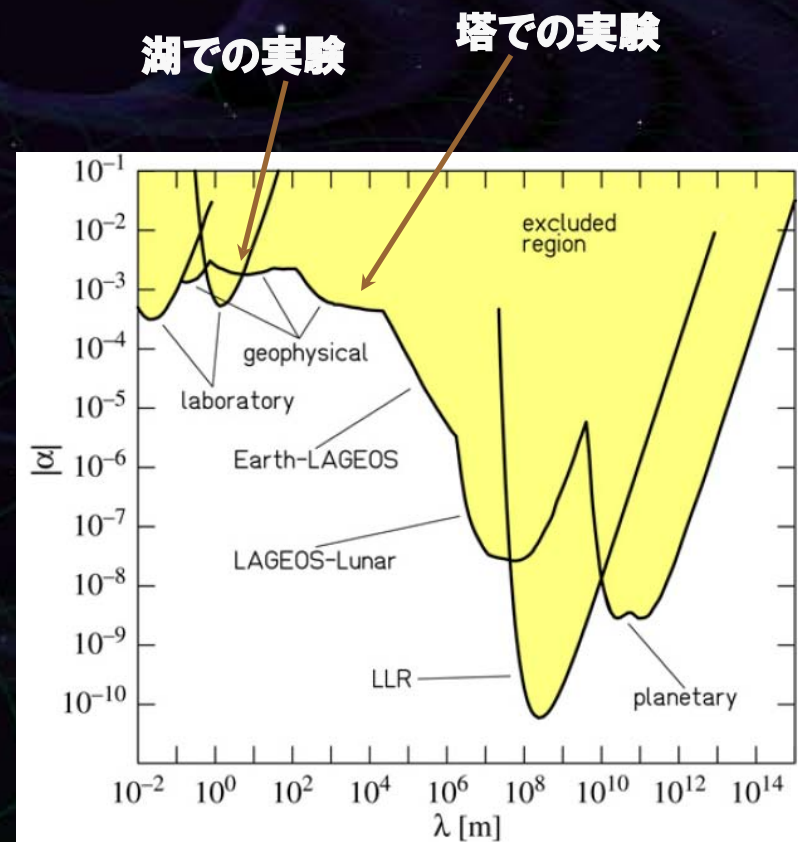
人工湖 (ダム) の水位変化を利用

A. Cornaz, et al., Phys. Rev. Lett. 72 (1994) 1152

塔での実験

塔上での重力加速度を
周囲の重力加速度からの推定と比較

A.J.Romaides et al., Phys. Rev. D 55 (1997) 4532



E.G.Adelberger et al.,
Prog. Part. Nucl. Phys. 62 (2009) 102

天体を用いた検証実験

ニュートン重力による天体の軌道

→ ケプラーの法則

$$\frac{a_P^3}{P^2} = G \frac{M + m}{4\pi^2}$$

⇨ 定常的な楕円軌道

湯川ポテンシャル補正項

→ 近日点の移動として現れる

$$\delta\phi_a \simeq \pi \alpha \left(\frac{a_P}{\lambda} \right)^2 e^{-a_P/\lambda}$$

a_P : 軌道の長軸半径

C. Talmadge,

Phys. Rev. Lett. 61 (1999) 1159

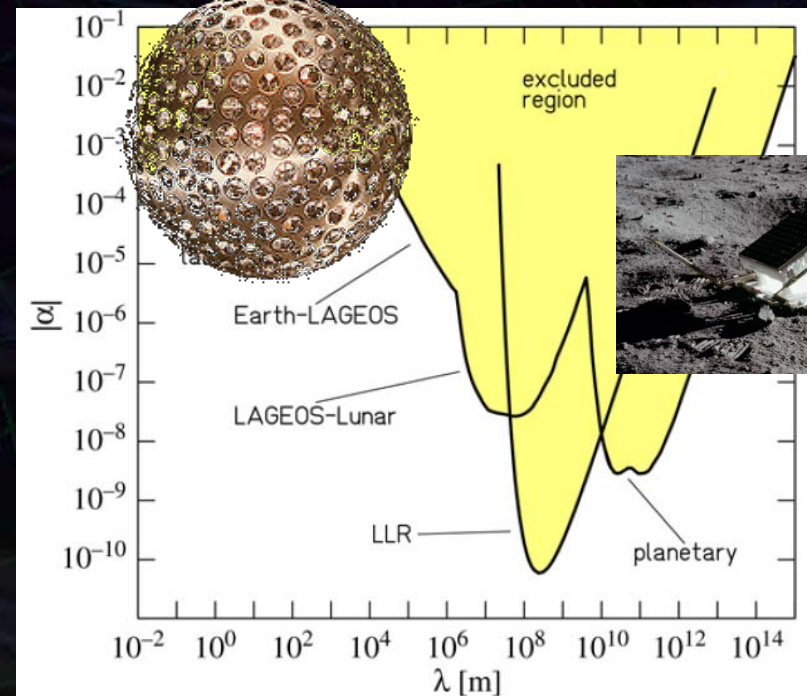
LAGEOS衛星, 月,
惑星 (水星, 火星) の観測で検証

(参考)

海王星の発見 (1846)

天王星の軌道のずれからの予測による
このとき, 逆二乗則の破れも候補に
挙げられていた

LAGEOS衛星



月面の
反射板

LAGEOS衛星

LAGEOS衛星

LAGEOS 1 1976年 打ち上げ

LAGEOS 2 1992年 打ち上げ

軌道高度 5,900km

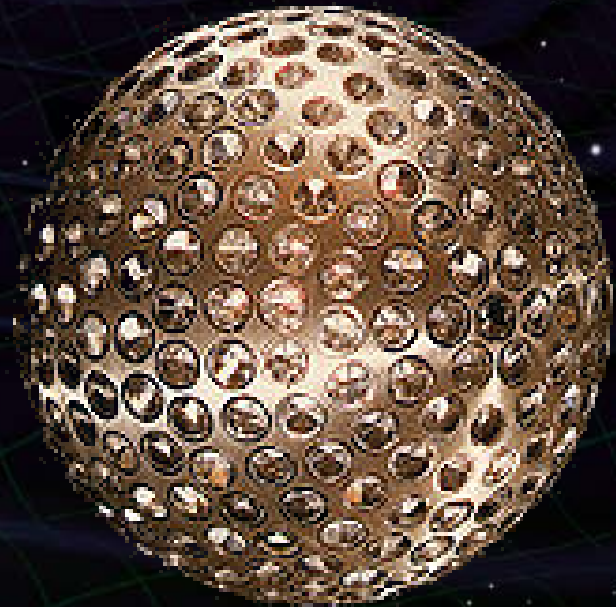
直径60cm, 質量411kg

アルミコートされた真鍮製

表面に426個のコーナリフレクター

→ Laser Ranging により軌道測定

寿命 ~ 800万年



ここまでのまとめ

物理学・宇宙物理学の基本原則

→ 最高の精度で検証されているべき

物理学の根本に関わる問題への知見

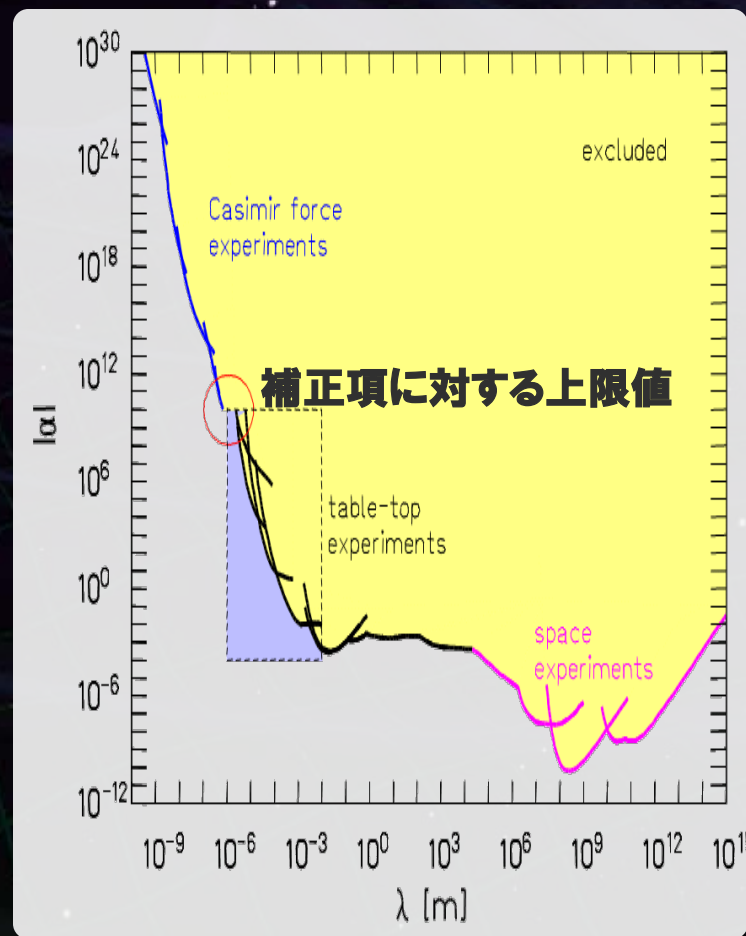
階層性問題

(Hierarchy Problem)

宇宙項問題

(Cosmological Constant Problem)

- 微小距離 (0.1mm以下)
- での検証が重要



(2) 微小距離での検証実験

ねじれ振子を用いた測定
検証の結果



現代物理における重力の逆二乗則

物理学の根本に関わる問題...

階層性問題

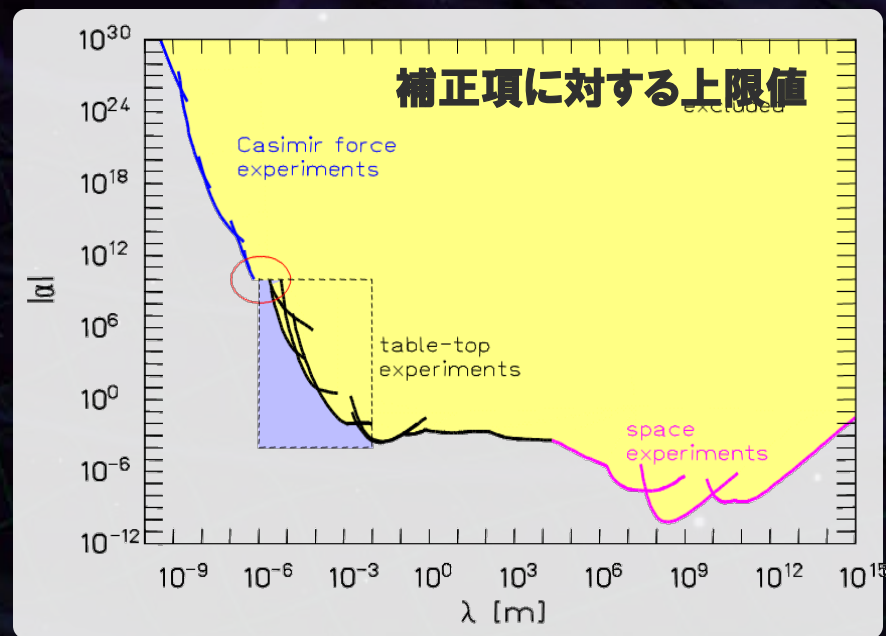
(Hierarchy Problem)

重力だけが極端に弱い

宇宙項問題

(Cosmological Constant Problem)

ダークエネルギーが、極端に小さい



⇒ 余剰次元の存在などで説明できる可能性

→ 微小距離 (0.1mm以下) での
重力の逆二乗則の破れとして現れる

実験原理

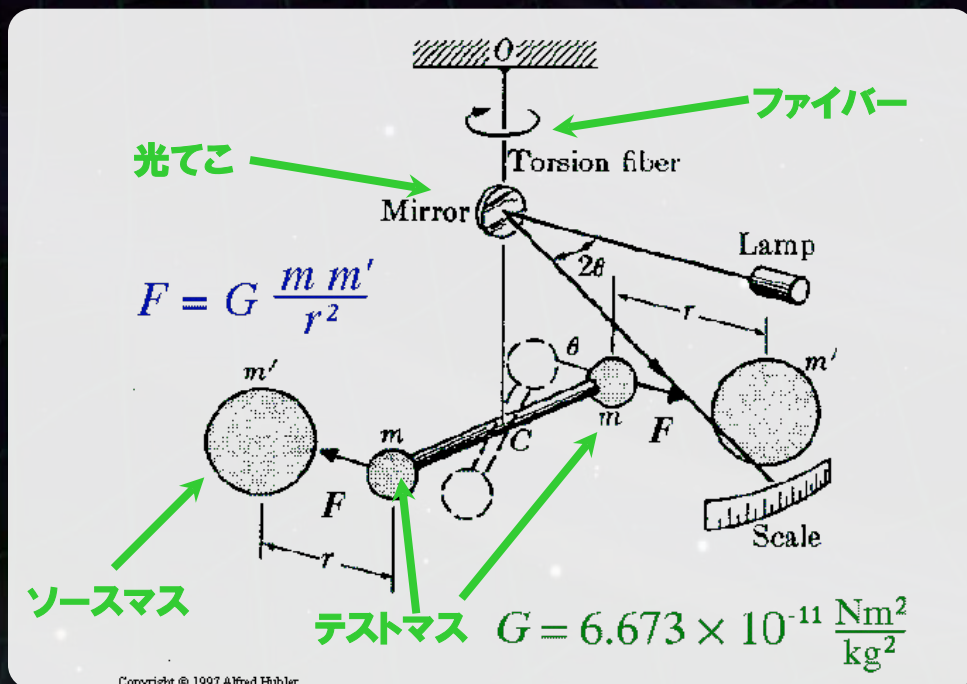
キャベンディッシュの実験 (1798)

ねじれ秤 (Torsion Balance) が基本

ダンベル状をした振り子の
重力によるねじれを測定

ねじれ計測 --- 光てこ

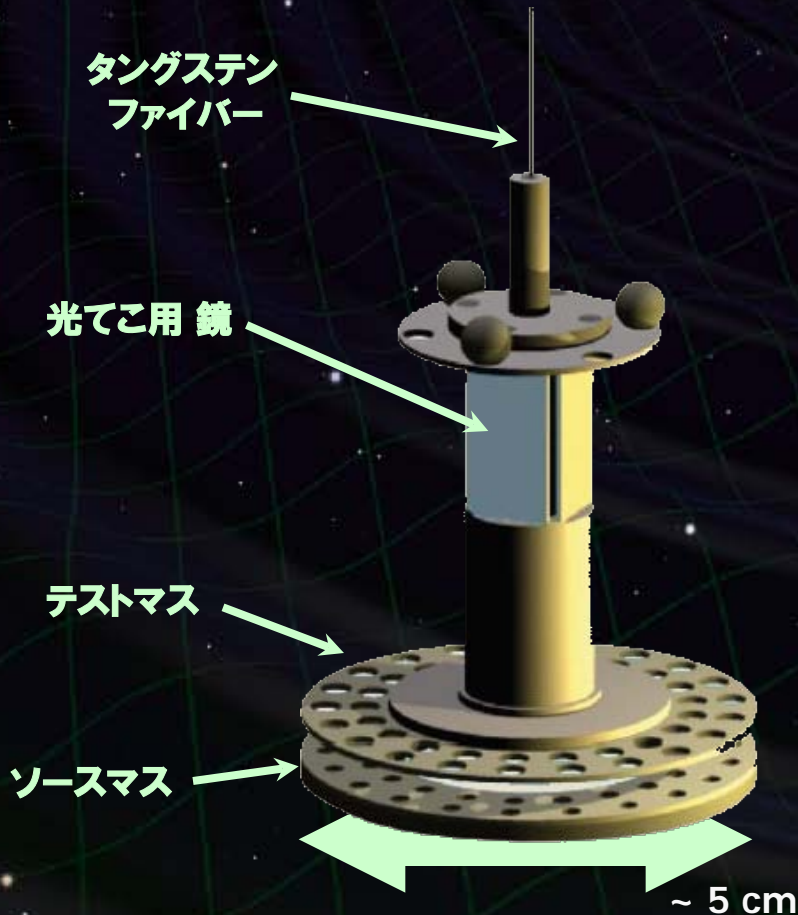
反射された光のスポット位置 → 角度変動



近年の検証実験

ワシントン大グループ (Eot-Wash group)

D. J. Kapner et al., Phys. Rev. Lett 98 (2007) 021101



From Web Page:
PHYSICS DIVISION
Lawrence Berkeley National Laboratory

Challenging our Understanding of Gravity

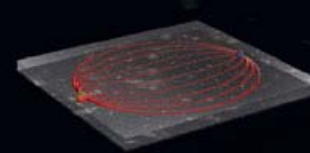


Tabletop Experiments

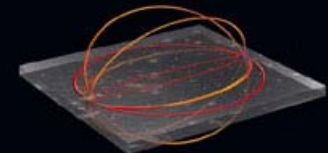
Some paradoxes of particle physics can be investigated in surprisingly direct ways. Measuring the force of gravity extremely carefully with a tabletop apparatus could reveal the existence of hidden dimensions. The astonishing possibility is that, at very short distances, gravity may no longer follow Newton's Law (force of gravity varies inversely with distance squared). The actual strength of gravity at less than 1/32 inch (0.8 mm) is being tested using exquisitely sensitive instruments, such as the precision torsion pendulum at the left. A deviation from Newton's Law would be evidence for hidden dimensions.

Gravity and Hidden Dimensions?

Gravity is so weak that a tiny magnet can hold up a paper clip against the gravity of the entire Earth. Perhaps gravity is weak because its effect is spread out over more than three space dimensions, while stronger forces like magnetism are confined to just the three dimensions we perceive. Notice that the field lines below are more spread out in three dimensions than in two dimensions. The same would be true comparing four dimensions to three dimensions.



ELECTROMAGNETISM!



GRAVITY?

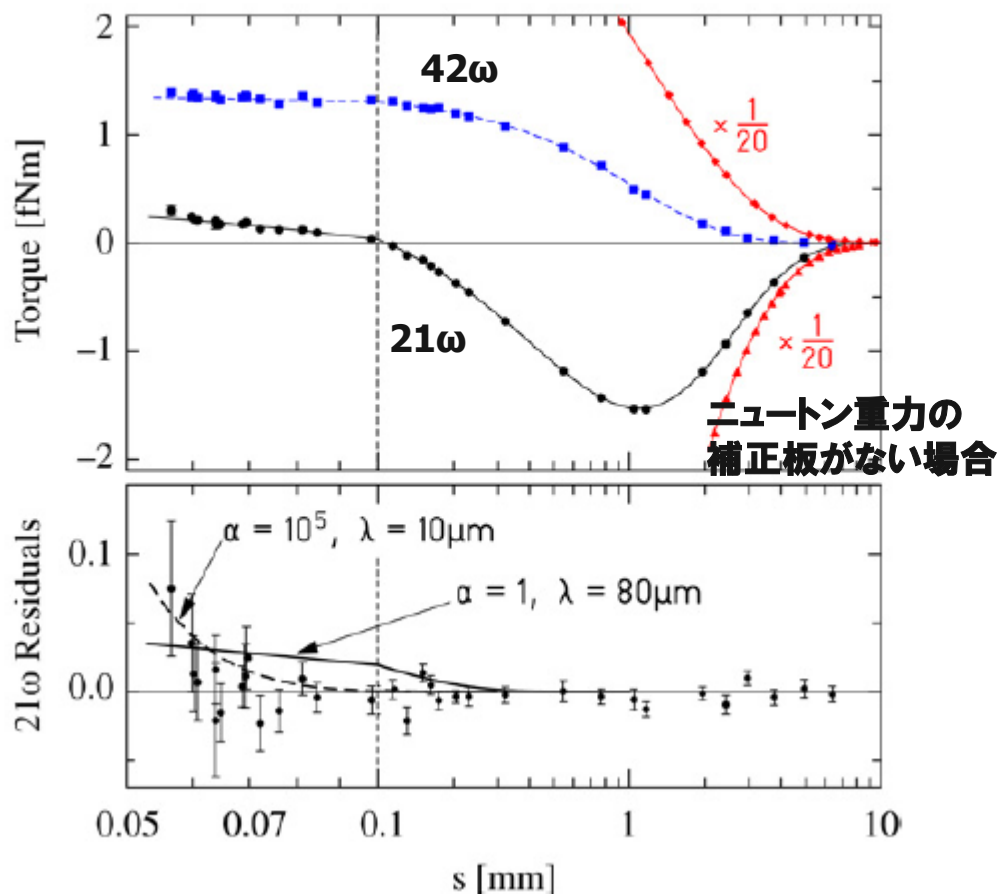
*A tiny magnet exerts
greater force than
Earth's gravity.*

General relativity tells us that gravity warps all of space and is therefore sensitive to all the dimensions of space.



測定結果

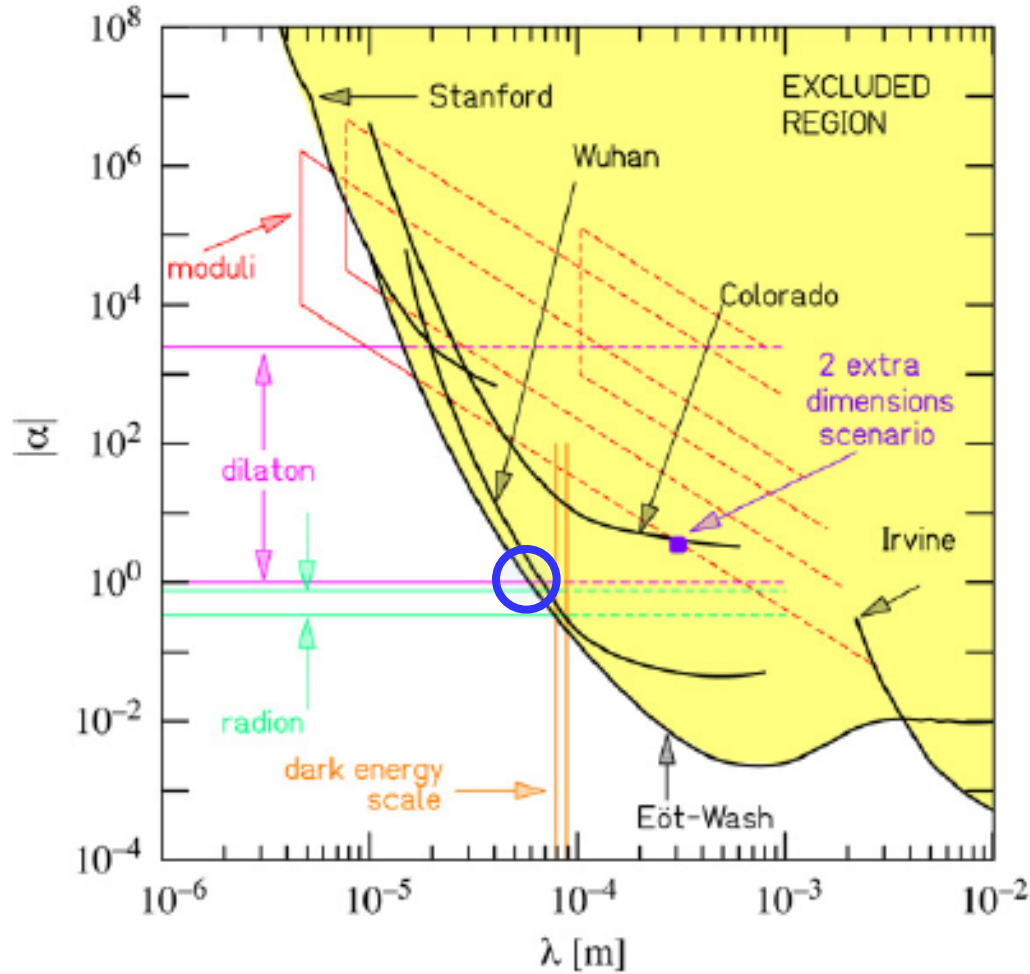
E.G. Adelberger et al. / Progress in Particle and Nuclear Physics 62 (2009) 102–134



測定されたトルク

ニュートン重力
を引いた残差

逆二乗則の検証



0.1mm以下のスケール
→ 最も良い上限値

$$V(r) = -G \frac{m_1 m_2}{r} \times \left[1 + \alpha e^{-r/\lambda} \right]$$

$$|\alpha| < 1, \lambda = 56\mu\text{m}$$

その他

スタンフォード大

(Phys.Rev.D 77,062006, 2008)

ウーハン大 (中国)

(Phys.Rev.Lett. 98,201101, 2007)

カリフォルニア大 アーバイン

(Phys.Rev.D 32,3084, 1985)

トレント大 (イタリア)

結果の解釈

べき乗ポテンシャル形に対する上限値

$$V(r) = -G \frac{m_1 m_2}{r} \beta_k \times \left(\frac{1 \text{ [mm]}}{r} \right)^{k-1}$$

C.L. 68%



k	
2	4.5×10^{-4}
3	1.3×10^{-4}
4	4.9×10^{-5}
5	1.5×10^{-5}

大きな余剰次元 (Large extra dimensions)

最も大きな余剰次元のスケール

$$R \leq 44 \text{ } \mu\text{m} \quad (\text{C.L. 95\%})$$

n=2のときのエネルギースケール

$$M^* \geq 3.2 \text{ TeV}/c^2 \quad (\text{C.L. 95\%})$$

太った重力子 (Fat graviton)

$$F(r) = -G \frac{m_1 m_2}{r^2} \times \left[1 - \exp(-0.914r/l_g)^3 \right]$$

$$\Rightarrow l_g \leq 98 \text{ } \mu\text{m} \quad (\text{C.L. 95\%})$$

(3) 進めている検証実験

目標と概要
実験の現状



研究の目標

実験の目標:

補正項に対する上限値の更新
逆二乗則の破れの探査

初期目標:

1mm程度のスケールでの測定

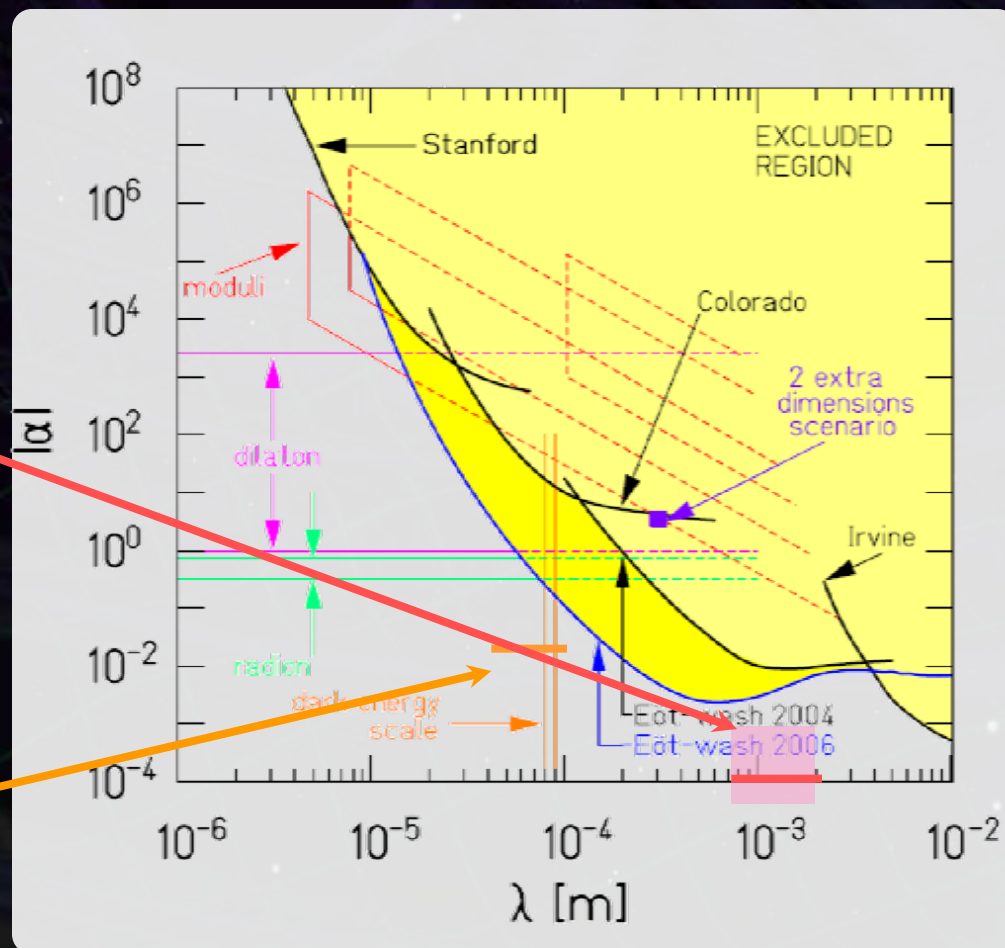
$$|\alpha| < 10^{-4}, \lambda = 1-3 \text{ mm}$$

(従来の上限値を2桁更新)

次の段階:

0.1mm程度のスケールでの測定

$$|\alpha| < 10^{-2}, \lambda = 0.1 \text{ mm}$$



実験の概要

測定の概要

長さ 50cm程度の棒状ねじれ秤
先端にテストマス

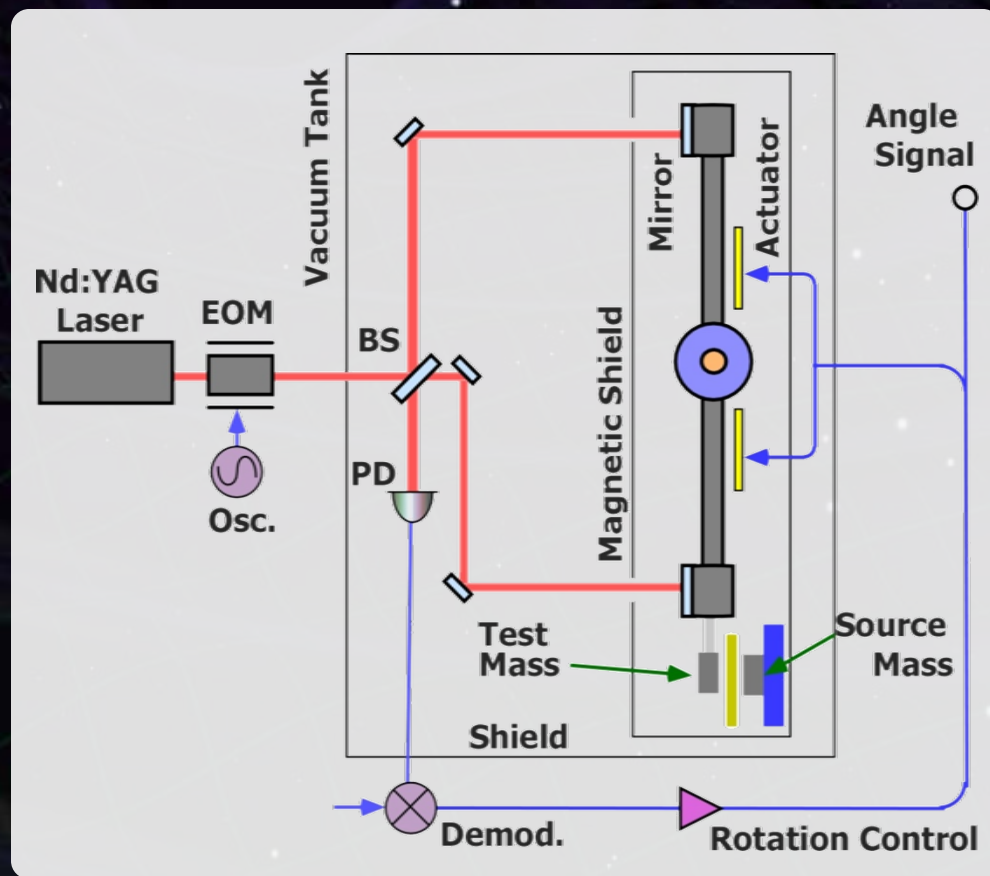
近くにソースマスを設置

⇒ 重力による角度変動を
レーザー干渉計で測定

特徴

- (1) 超伝導体による非接触支持
- (2) レーザー干渉計による角度計測

⇒ 高感度化



精度を制限する要因

基本的な雑音

角度センサ雑音

角度読取り装置の雑音

光てこ $\sim 10^{-10}$ rad/Hz^{1/2}

熱雑音

有限温度の熱浴 + 機械損失

→ 揺動力 (揺動散逸定理)

$$\langle f_n^2 \rangle = 2k_B\gamma T$$

揺動力

振り子の機械損失

外来雑音

地面振動, 傾斜変動

電場変動, 表面のポテンシャル

外部磁場変動

熱輻射

残留大気変動

誤差要因

形状誤差

材質の密度分布

測定距離の不定性

測定中のドリフト変動

感度の限界

低周波数: 熱雑音

有限温度の熱浴 + 機械損失
→ 揺動力 (揺動散逸定理)

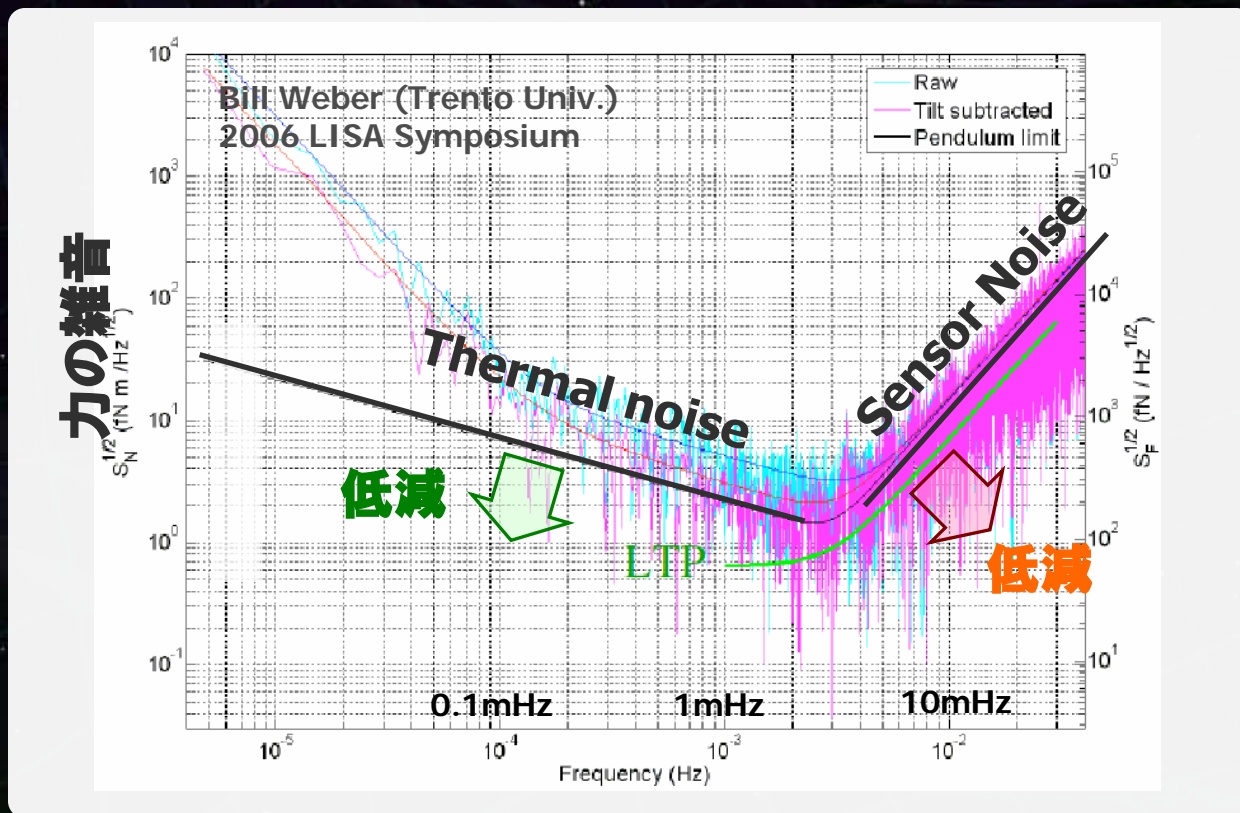
⇒ 機械損失の小さい振り子

高周波数: センサ雑音

角度読取り装置の雑音

光てこ $\sim 10^{-10}$ rad/Hz^{1/2}

⇒ 高感度なセンサ

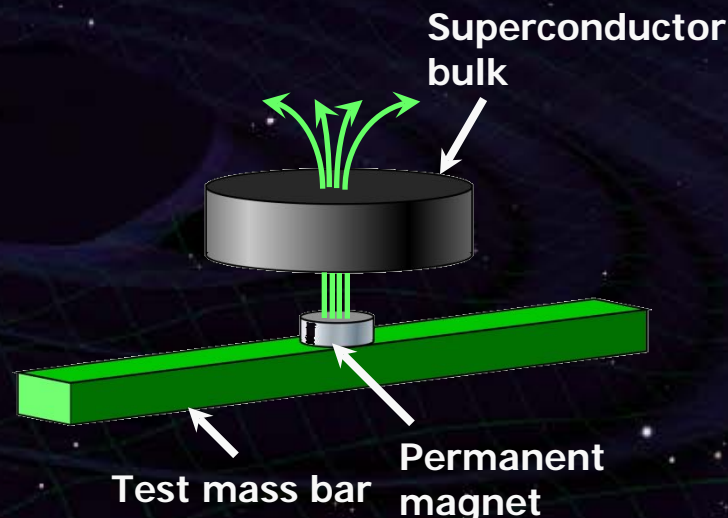


装置の特徴

(1) 超伝導体のピン止め効果を利用

永久磁石の磁束をトラップ → 磁気浮上
→ 回転方向には、
復元力・機械的な摩擦が働かない

⇒ 熱雑音を低減できる可能性



(2) レーザー干渉計による角度測定

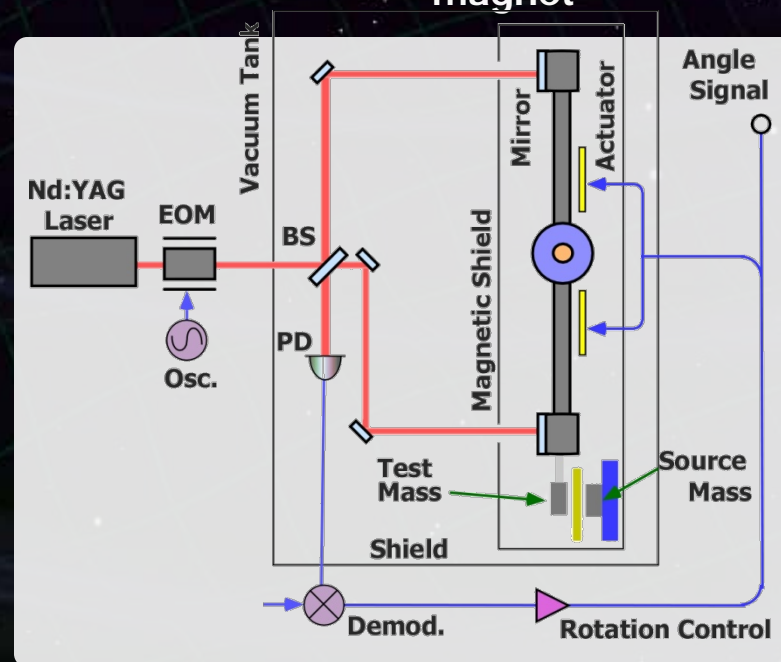
従来の装置

10mHz以上では、光てこの雑音

光てこ $\sim 10^{-10}$ rad/Hz^{1/2}

干渉計 $< 10^{-14}$ rad/Hz^{1/2}

⇒ 高周波数帯での感度の向上



実験装置の全体構成

マイケルソン干渉計

試験マス両端の差動変動（回転）測定

光源: Nd:YAGレーザー

波長 1064nm, 出力 50mW

真空槽

直径600mm円筒形

真空度 10^{-5} Pa (ターボポンプ)

防音・断熱シールド内に設置

超伝導体バルク

直径 600mm, 厚さ 20mm

$Gd_1Ba_2Cu_3O_{6.9}$: 70.9%

$Gd_2Ba_1Cu_1O_7$: 19.2%

転移温度 ~92K

パルス管冷凍機

最低到達温度 ~40K

バルブユニット分離 → 低振動化

柔軟ヒートリンクによる防振

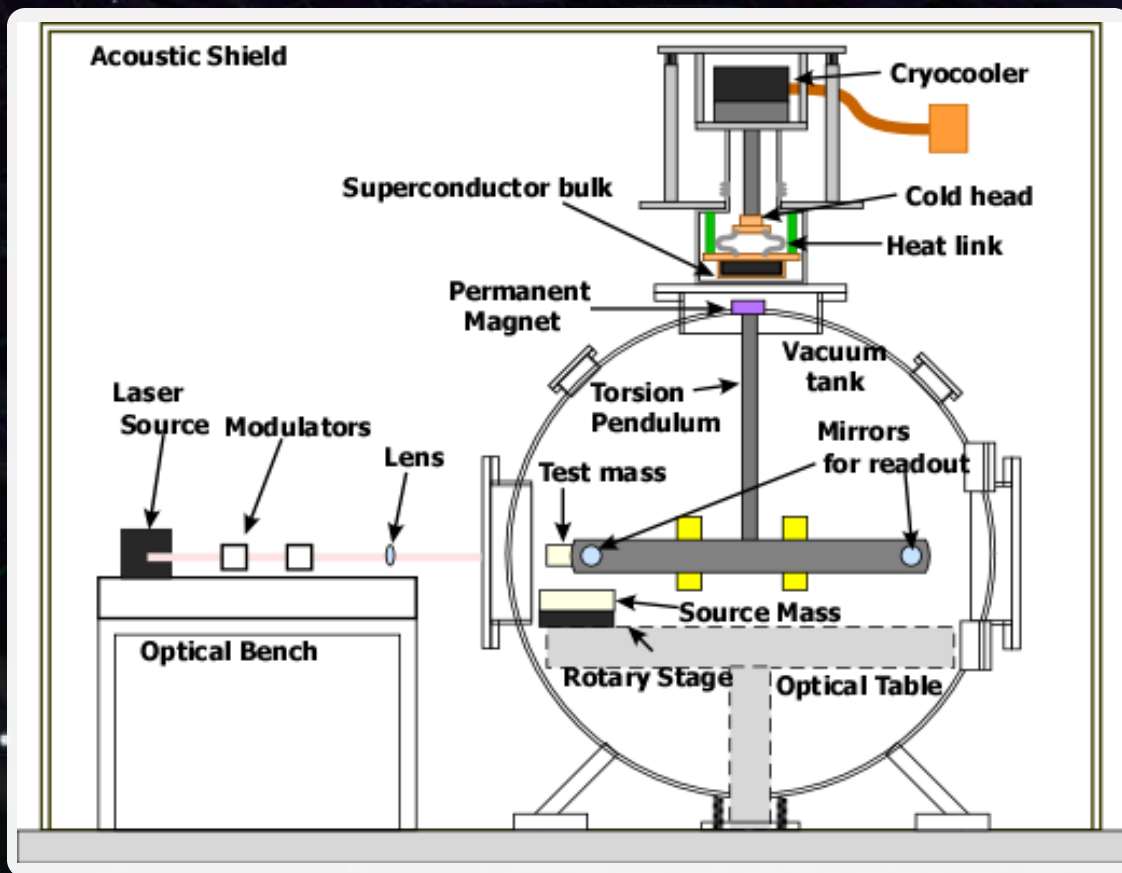
棒状ねじれ秤

長さ500mm程度

先端にテストマスを設置

ソースマス形状を工夫

→ Null測定を行う



到達感度の見積もり

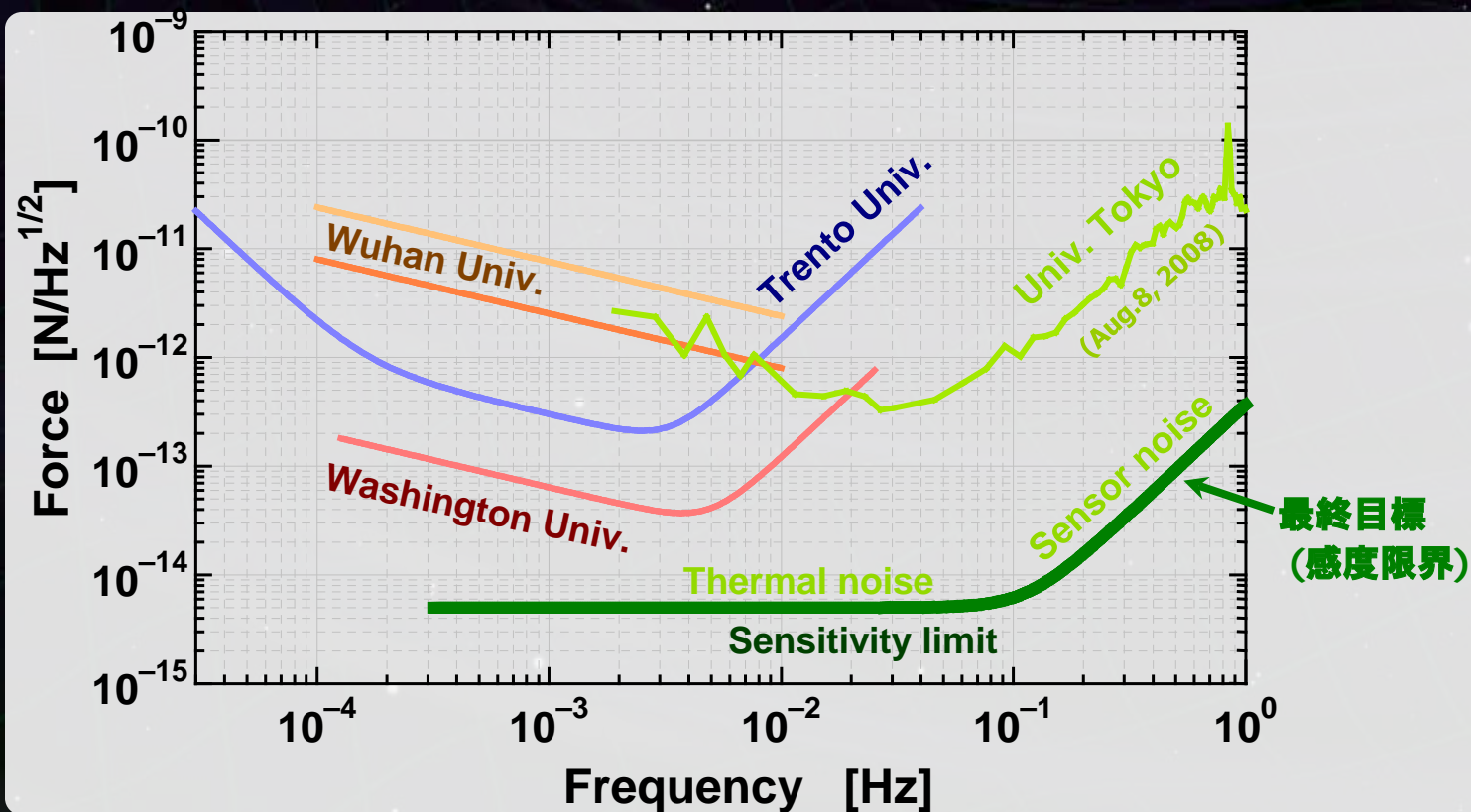
低周波数: 熱雑音

有限温度の熱浴 + 機械損失
→ 揺動力 (揺動散逸定理)

$$\langle f_n^2 \rangle = 2k_B \gamma T$$

高周波数: センサ雑音

角度読取り装置の雑音
干渉計 $<10^{-14}$ rad/Hz^{1/2}



ポテンシャル補正項に対する精度

ポテンシャル補正項の定量的評価

初期目標 : $|\alpha| < 10^{-4}$, $\lambda = 1-3$ mm

距離 $r = \lambda$ で測定するときの力

$$F = F_{\text{Newton}} \times (1 + 2\alpha)$$

⇨ $|\alpha|$ 程度の相対精度が必要

ニュートン重力の大きさ

タングステン板 2枚に働く力

10x10x1mm, 間隔 1mm

⇨ 2.5×10^{-10} N

見積もられる精度

良い帯域での感度: 5×10^{-15} N/Hz^{1/2}

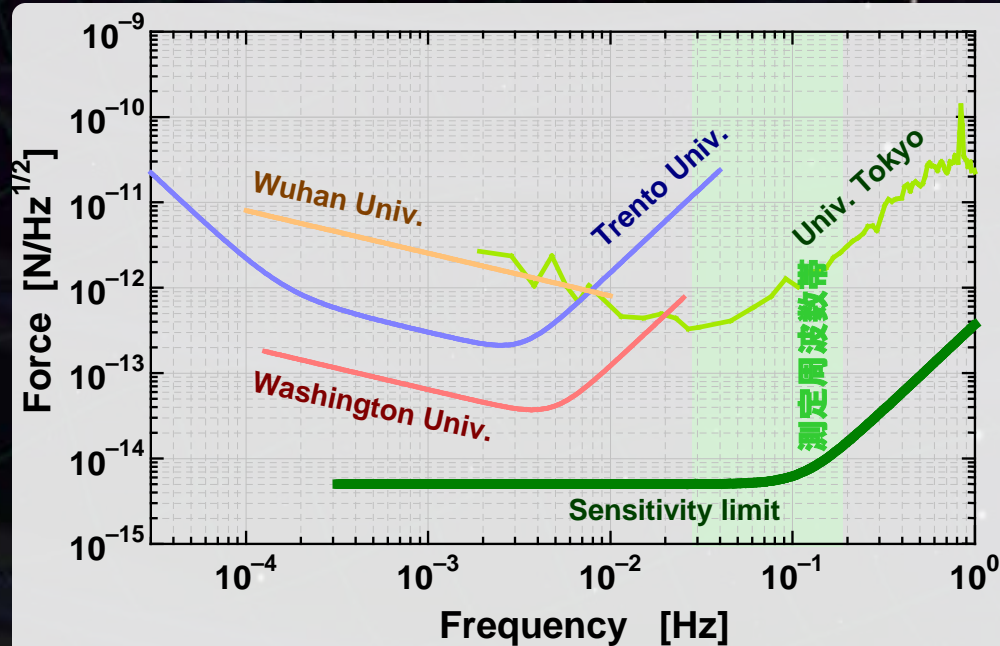
測定時間 : 10^2 sec

⇨ 5×10^{-16} N

⇨ $|\alpha| \sim 1 \times 10^{-6}$ の精度に対応

感度には 2桁の余裕

→ 目標実現は十分可能



外来雑音の見積もり

0.1Hz付近での外力の見積もり

電場変動

静電シールドと
テストマスとの電位差変動

$$8 \times 10^{-16} \text{ N/Hz}^{1/2}$$

面積 10^{-4} m^2
電位差変動 $10^{-4} \text{ V/Hz}^{1/2}$
距離 0.1mm

磁場変動

磁場勾配によるテストマス磁化と
外部磁場変動のカップリング

$$1 \times 10^{-16} \text{ N/Hz}^{1/2}$$

磁場勾配 10^{-7} T/m
磁場変動 $10^{-7} \text{ T/Hz}^{1/2}$
磁化率 1×10^{-5}

残留気体分子

残留気体分子の衝突
によるランダムな外力

$$3 \times 10^{-15} \text{ N/Hz}^{1/2}$$

真空度 10^{-3} Pa
表面積 10^{-4} m^2
常温, 窒素分子

熱輻射

周囲の温度変動
による輻射圧変動

$$1 \times 10^{-17} \text{ N/Hz}^{1/2}$$

温度変動 $10^{-3} \text{ K/Hz}^{1/2}$
表面積 10^{-4} m^2 , 常温
同相除去比 10^{-3}

地面振動起因の重力場変動

地面の表面波
による重力場変動

$$1 \times 10^{-16} \text{ N/Hz}^{1/2}$$

バランスマス
による除去比 10^{-2}

開発体制

2台の装置の同時開発

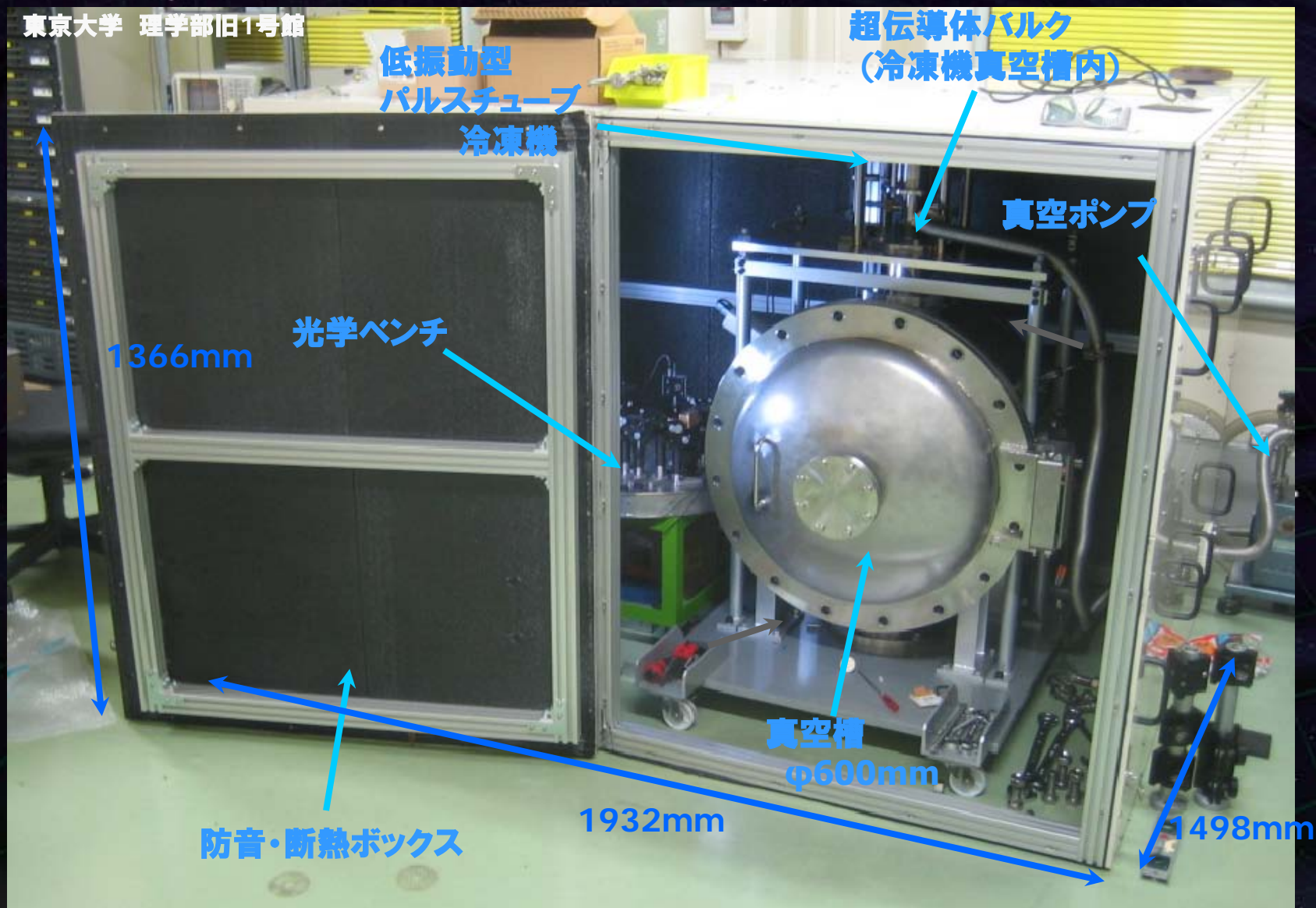
東京大学
(2006-)
低周波数
重力波検出器



京都大学
(2009-)
重力法則の検証



実験装置全景



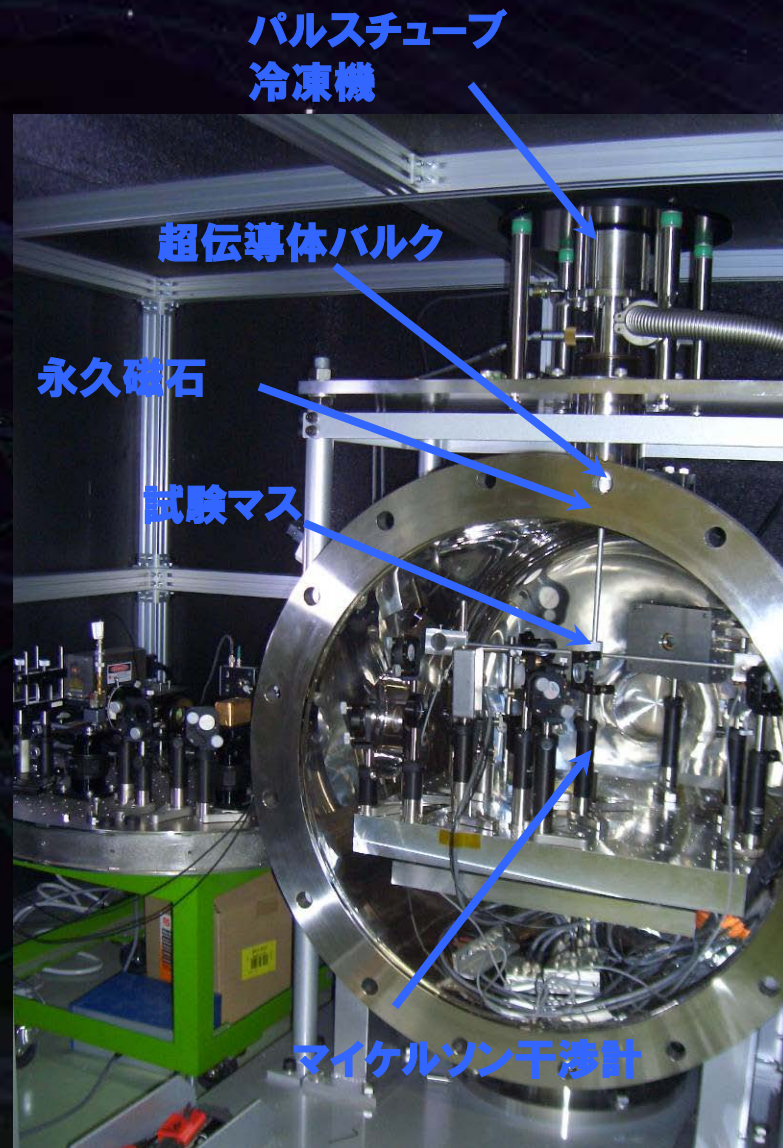
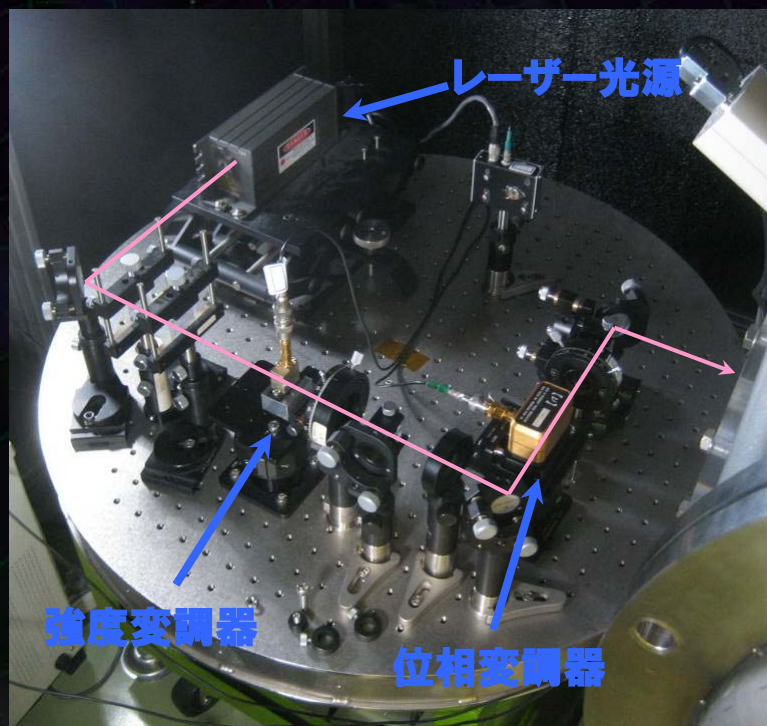
光学系

Nd:YAGレーザー光源

波長 1064nm, 出力 500mW

マイケルソン干渉計

試験マス両端の差動変動 (回転) 測定



超伝導体・冷凍機

超伝導体バルク

直径 600mm, 厚さ 20mm

$Gd_1Ba_2Cu_3O_{6.9}$: 70.9%

$Gd_2Ba_1Cu_1O_7$: 19.2%

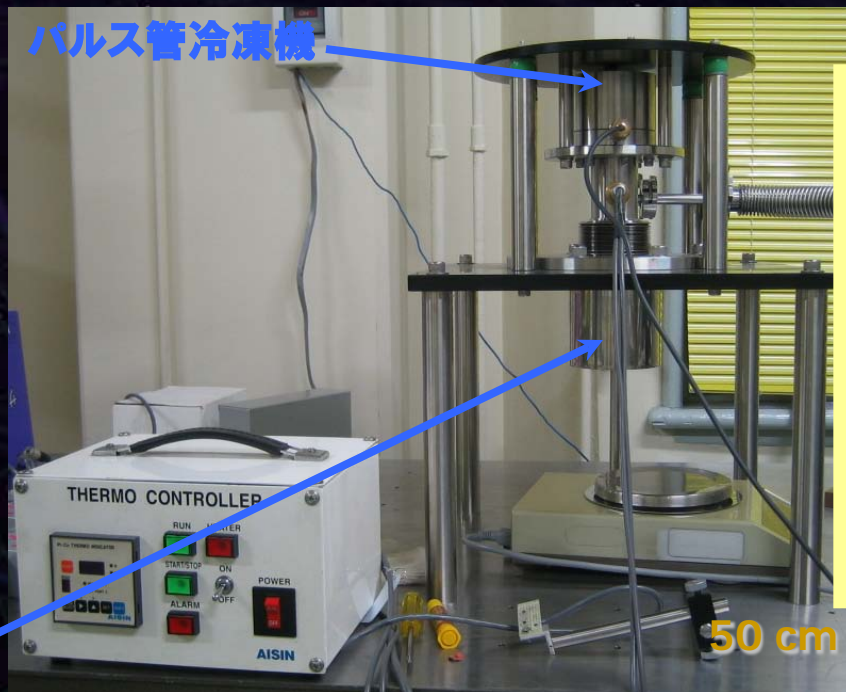
転移温度 ~92K

パルス管冷凍機

最低到達温度 ~40K

バルブユニット分離による低振動化

柔軟ヒートリンクによる防振



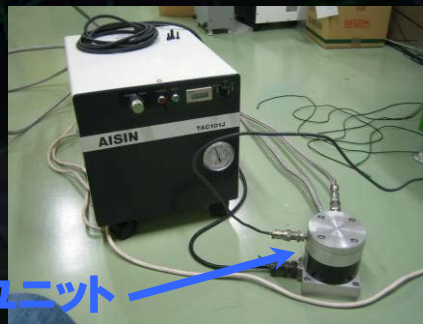
パルス管冷凍機

50 cm



超伝導体バルク

コンプレッサー



バルブユニット

防振用ヒートリンク
銅線 (銀コーティング)



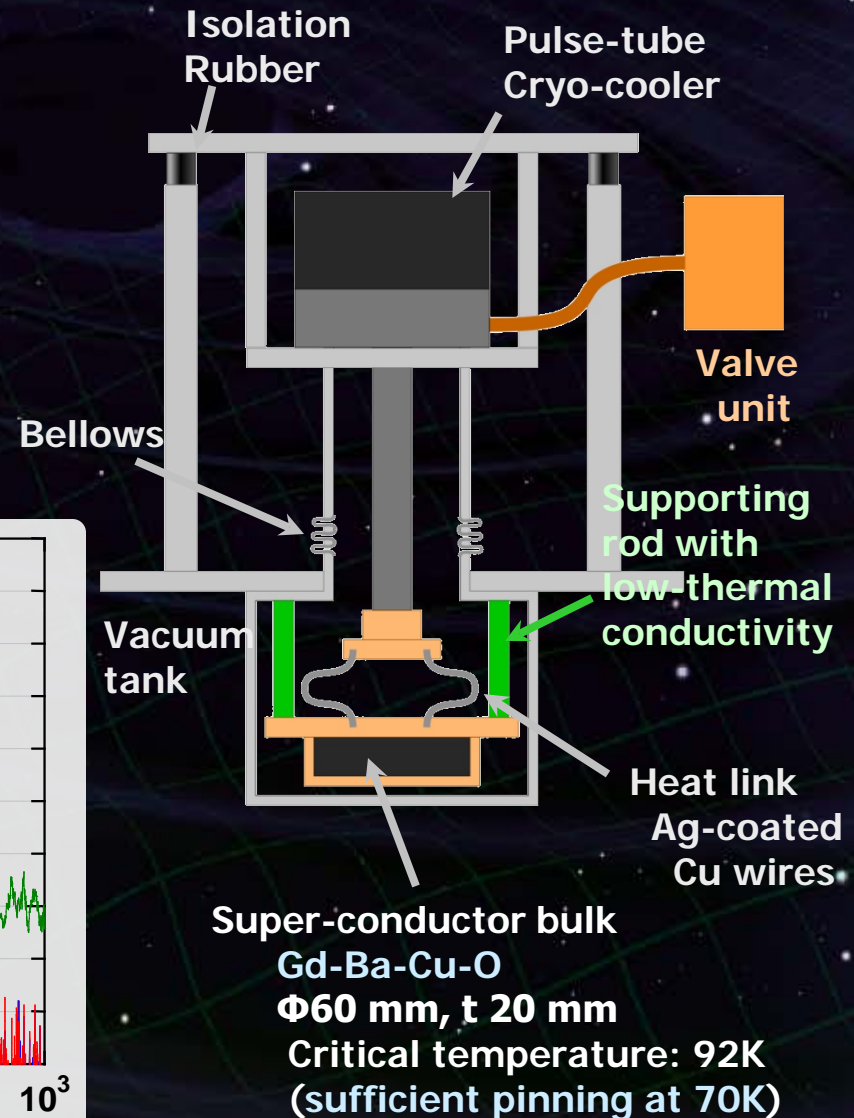
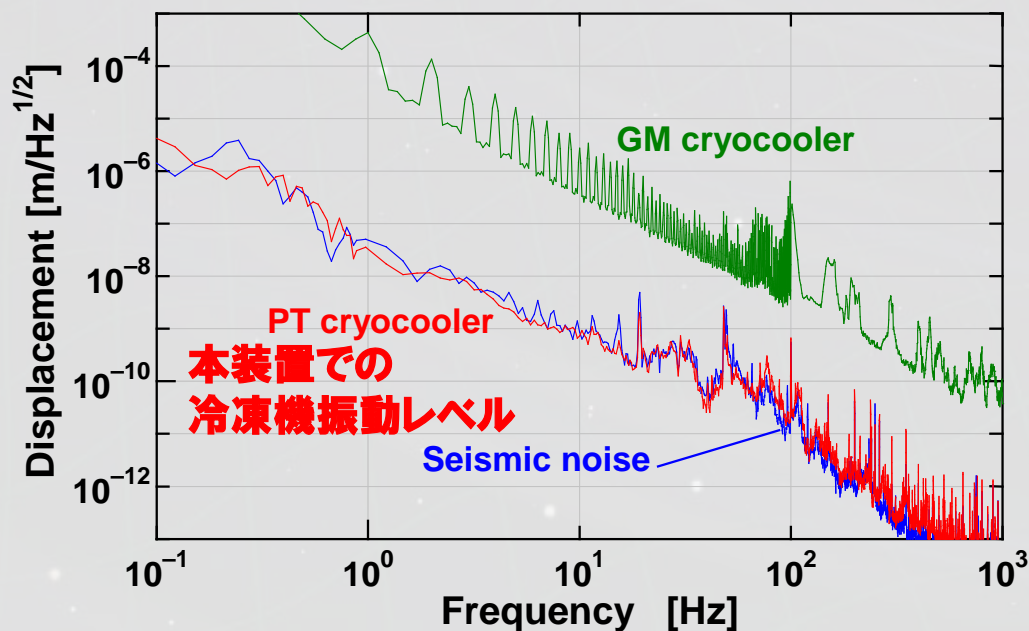
超伝導体・冷凍機の振動

低振動型パルスチューブ冷凍機

超伝導体バルク：
地面に対して 硬く固定
冷凍機に対して 柔らかく接続

振動評価

→ 振動は地面振動レベル 以下



超伝導浮上の評価

ピン止め効果による浮上力

永久磁石: Nd magnet (~1T)
Φ22 mm, t 18 mm
Φ70 mm, t 18 mm

測定された最大力 > 1 kgf

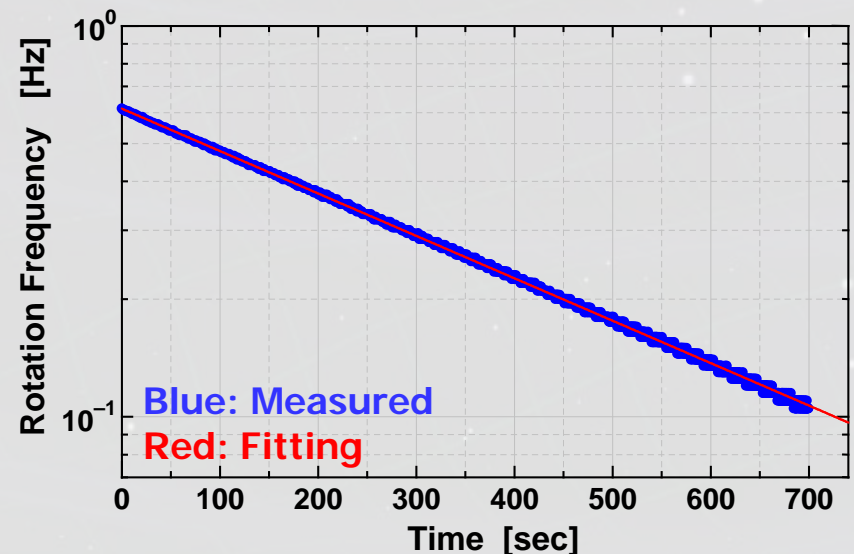
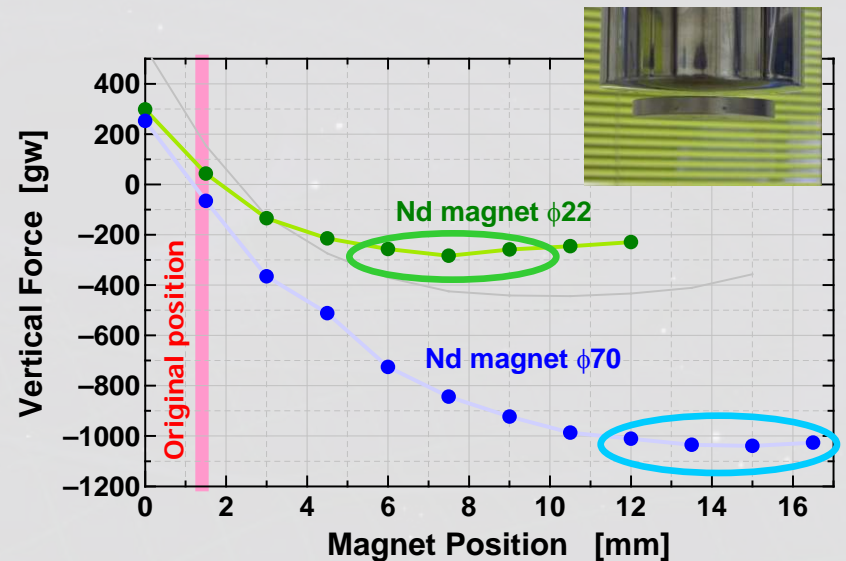
ダンピング係数の測定

浮上した磁石を回転
→ 回転周波数の減衰を測定

$$I\ddot{\theta} + \gamma\dot{\theta} = 0$$
$$\rightarrow \theta \propto e^{-\frac{\gamma}{I}t}$$

⇒ $\gamma = 1.5 \times 10^{-10}$ [N·m·s/rad]

Torsion pendulum at Washington Univ.
 $\gamma = 8 \times 10^{-11}$ [N·m·s/rad]



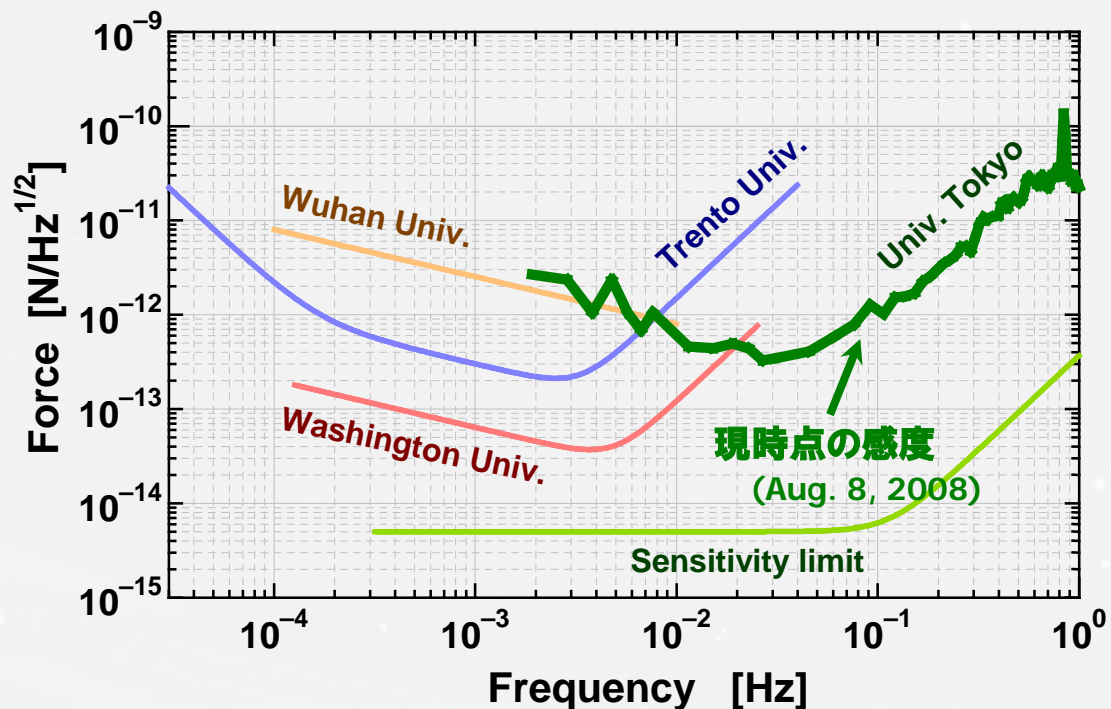
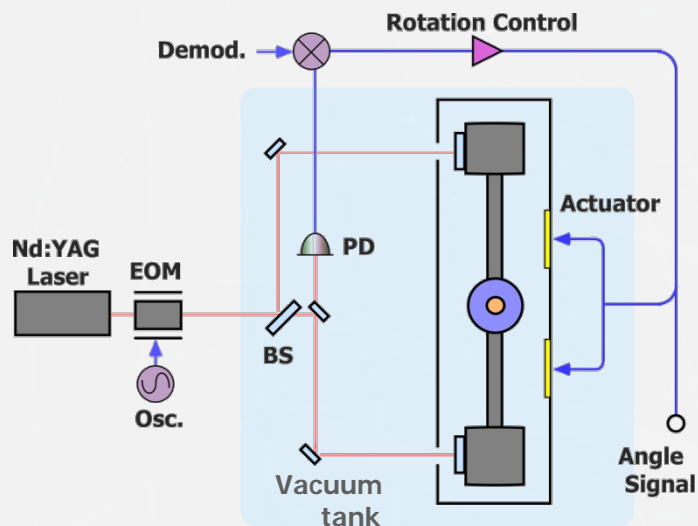
干渉計感度

干渉計感度の測定

マイケルソン干渉計の感度

→ $3 \times 10^{-13} \text{ N/Hz}^{1/2}$ ($\sim 30 \text{ mHz}$)

他のグループに匹敵する感度
感度限界 (熱雑音) まで 2桁



現在の感度からの推定

初期目標 : $|\alpha| < 10^{-4}$, $\lambda = 1-3$ mm \Rightarrow 目標実現は十分可能

ニュートン重力の大きさ

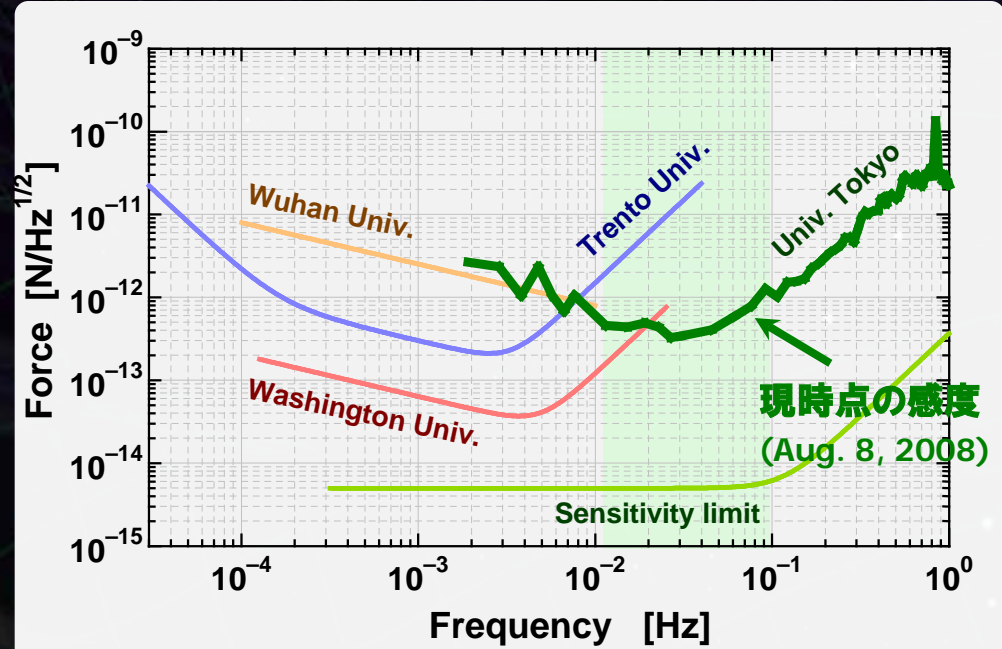
タングステン板 2枚に働く力
10x10x1mm, 間隔 1mm
 $\Rightarrow 2.5 \times 10^{-10}$ N

現時点での精度 (静置測定)

良い帯域での感度: 4×10^{-13} N/Hz^{1/2}
測定時間 : 10^4 sec (~3hour)
 $\Rightarrow 4 \times 10^{-15}$ N

$\Rightarrow |\alpha| \sim 1 \times 10^{-5}$ の精度に対応

原理的限界をさらに1.2桁向上の可能性



ソースマス駆動方式

ソースマス・テストマス

形状・材質・駆動方式などが課題

材質

高い密度, 一様性, 加工性

低い磁化率

候補: 銅, タングステン, 金-白金

形状

高い工作精度 ($\sim 1\mu\text{m}$)

表面研磨, 金コーティング

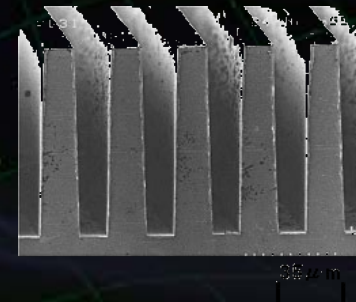
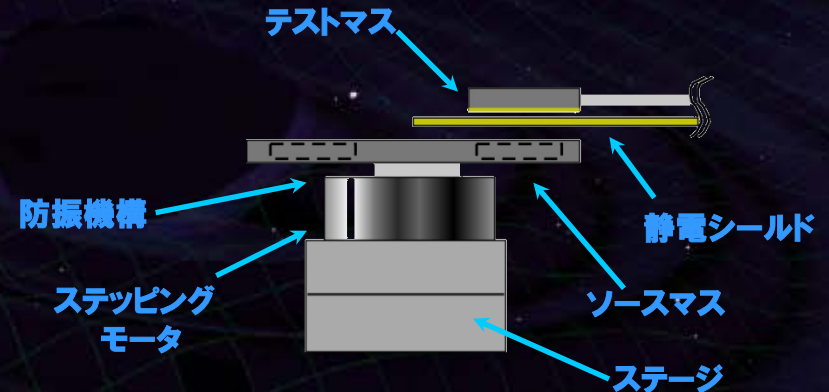
形状の測定

駆動方式

低振動のステッピングモータ

防振機構

精密ステージによる位置決め



(4) まとめ



重力逆二乗則の検証

物理学・宇宙物理学の基本原則

→ 最高の精度で検証されているべき

物理学の根本に関わる問題への知見

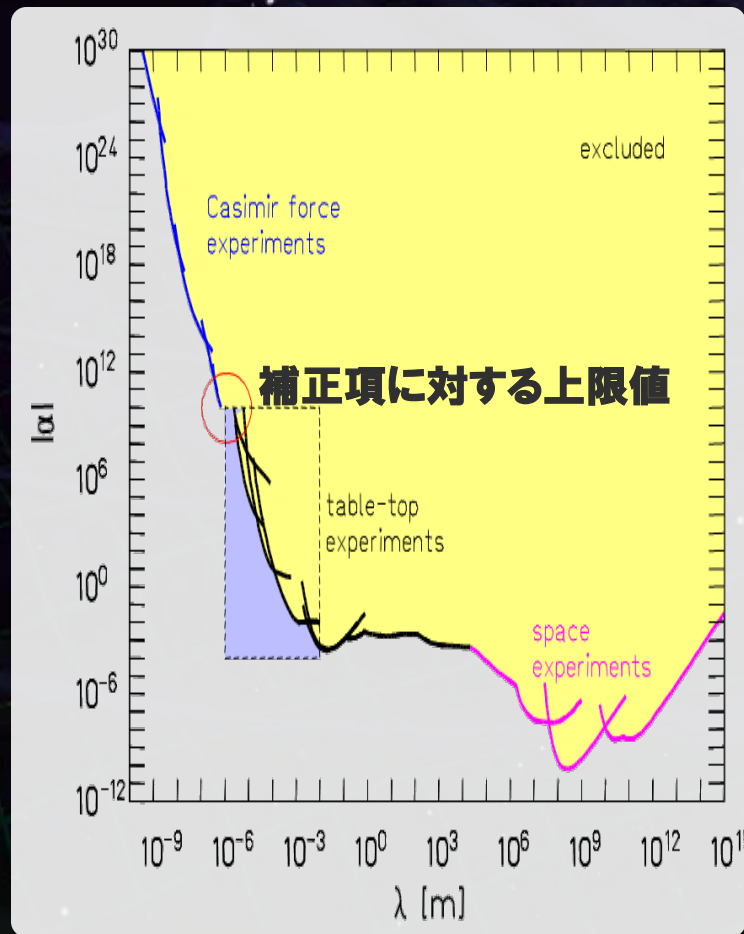
階層性問題

(Hierarchy Problem)

宇宙項問題

(Cosmological Constant Problem)

→ 新しい物理？



重力測定実験 まとめ

余剰次元理論の検証のため、
重力の逆二乗則検証実験を行う

⇒ 物理学の基本法則に対する知見

目標: 現在の上限値を超える結果

$$|\alpha| < 10^{-4}, \lambda = 1-3 \text{ mm}$$

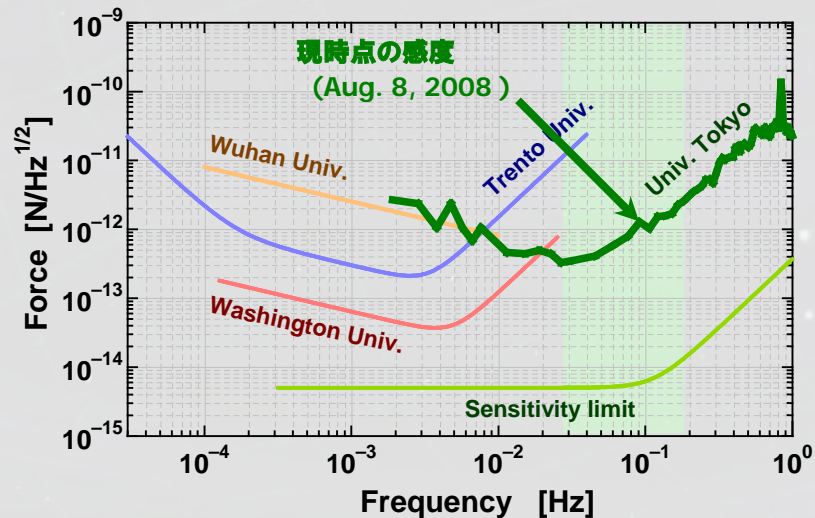
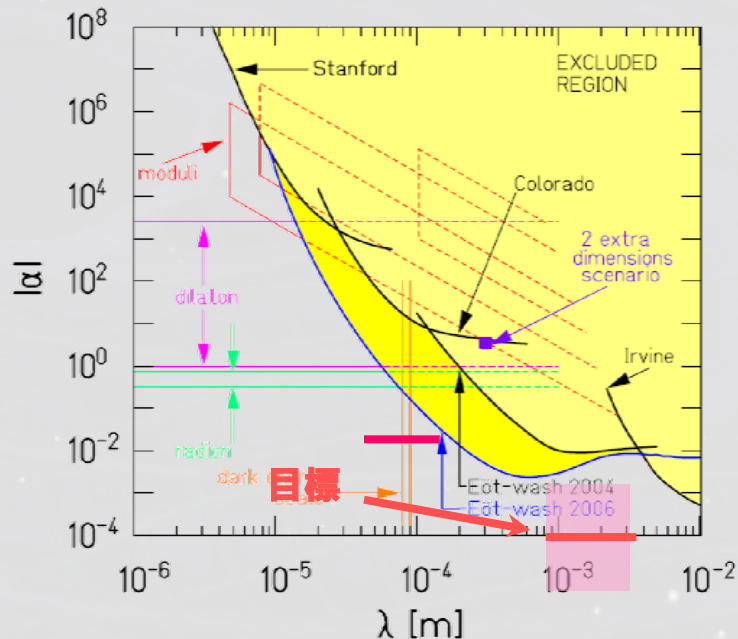
新しい物理の可能性を探求

実験装置:

ねじれ秤の主要な部分は、ほぼ完成
ソースマス駆動方式などが課題

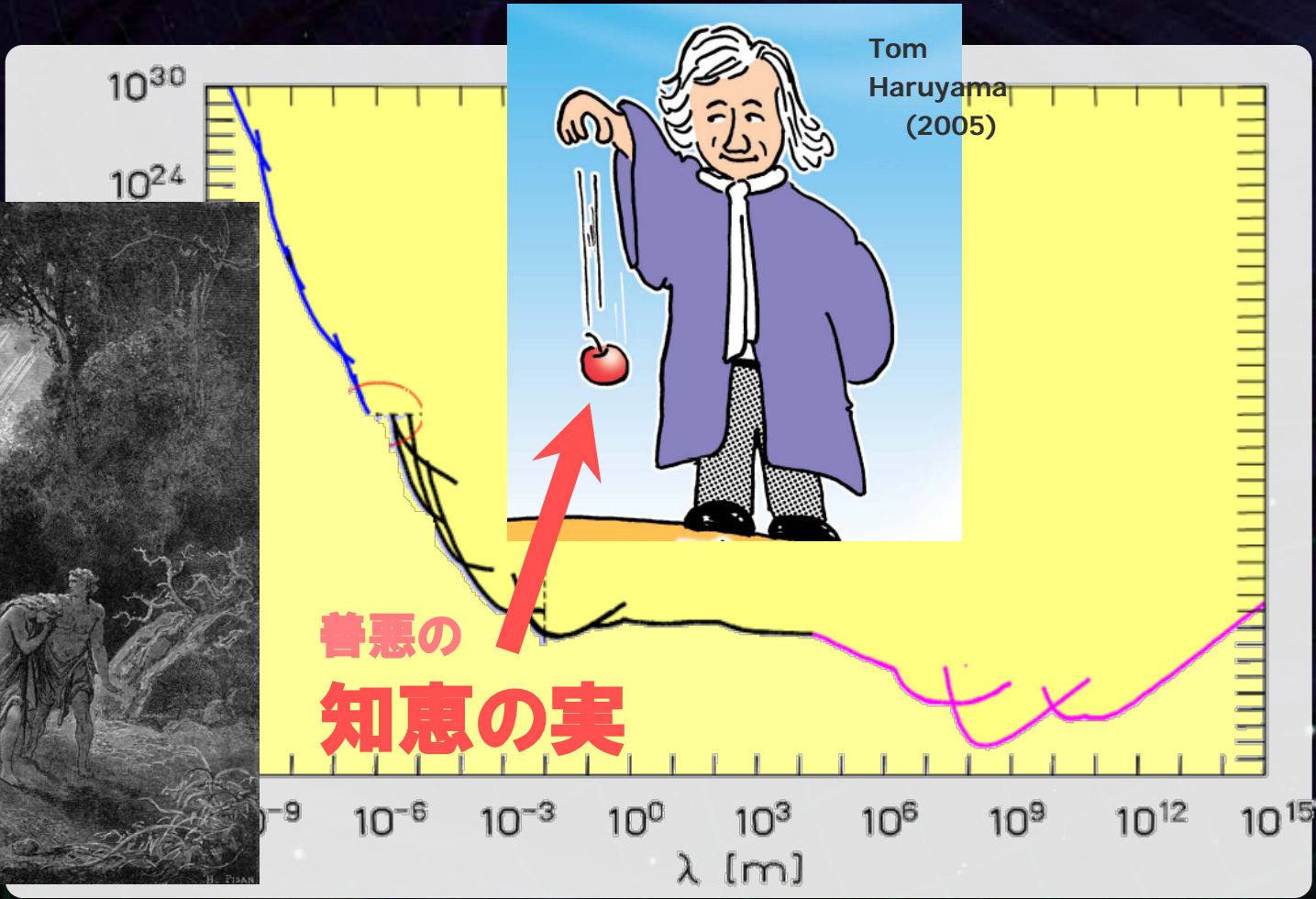
現時点での精度 (静置測定)

⇒ $|\alpha| \sim 1 \times 10^{-5}$ の精度に対応

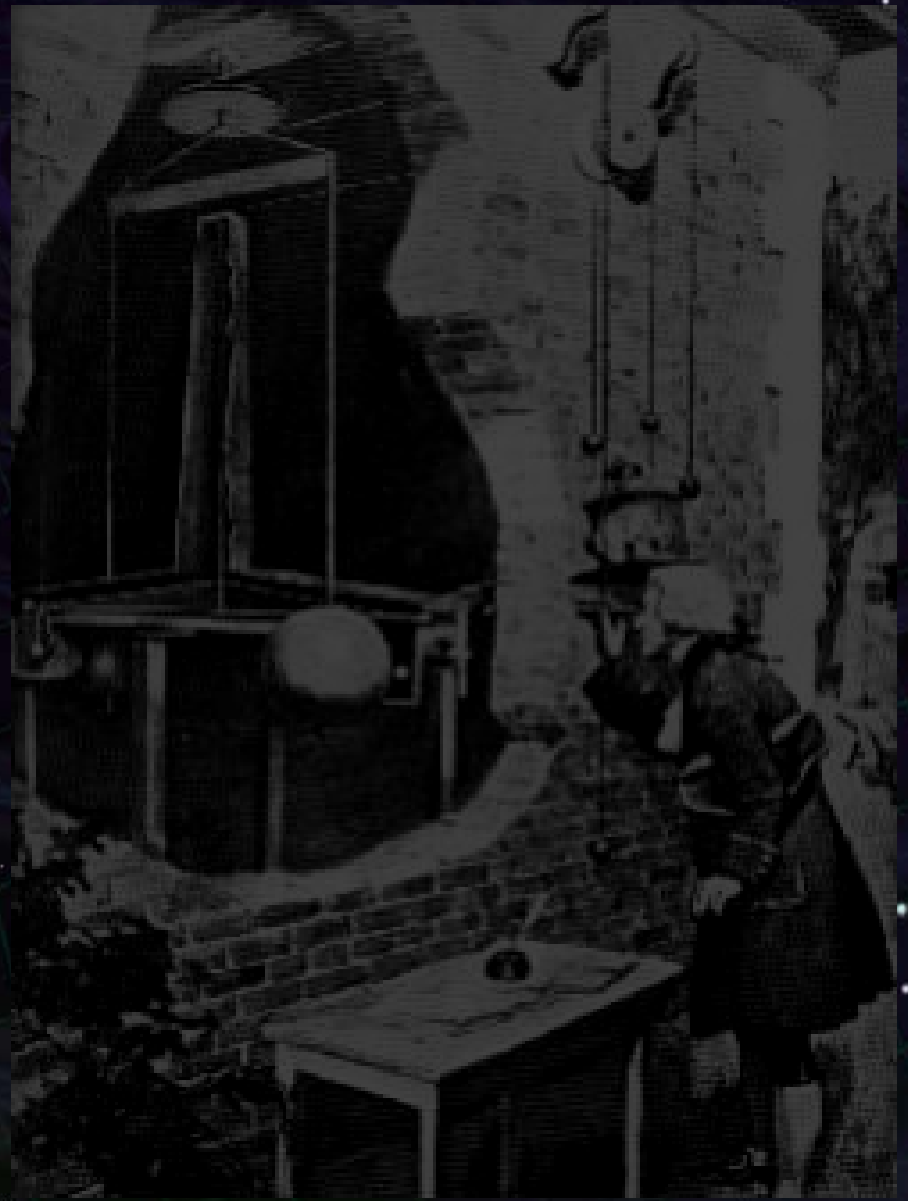


おまけ





終



重力・重力波物理学

重力という普遍的な対象を、先進的な実験手法で研究
→ 宇宙・基礎物理に対して新しい知見を得る。

高感度レーザー干渉計

標準量子限界を越える
マクロな系の高感度計測

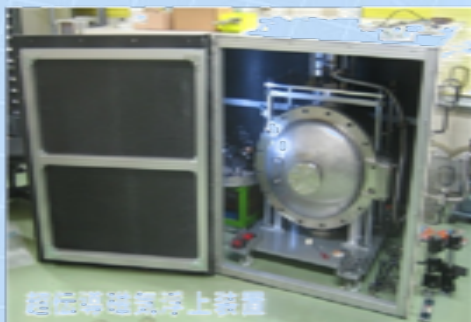
重力による余剰次元検証

微小距離での重力逆二乗則測定
超伝導磁気浮上による試験マス支持
外来雑音抑圧・除去 微小信号処理



重力波による天文学

大型レーザー干渉計画の推進
国際重力波観測網への参加
宇宙重力波望遠鏡の基礎開発



光の量子雑音に対する知見
量子光学的手法の発展



基礎物理法則に
対する新たな知見

宇宙に対する
新たな知見