サブミクロン領域での未知の力の探査

余剰次元をQED真空で探る

KEK物理セミナー

4号館345号室

2009/07/14

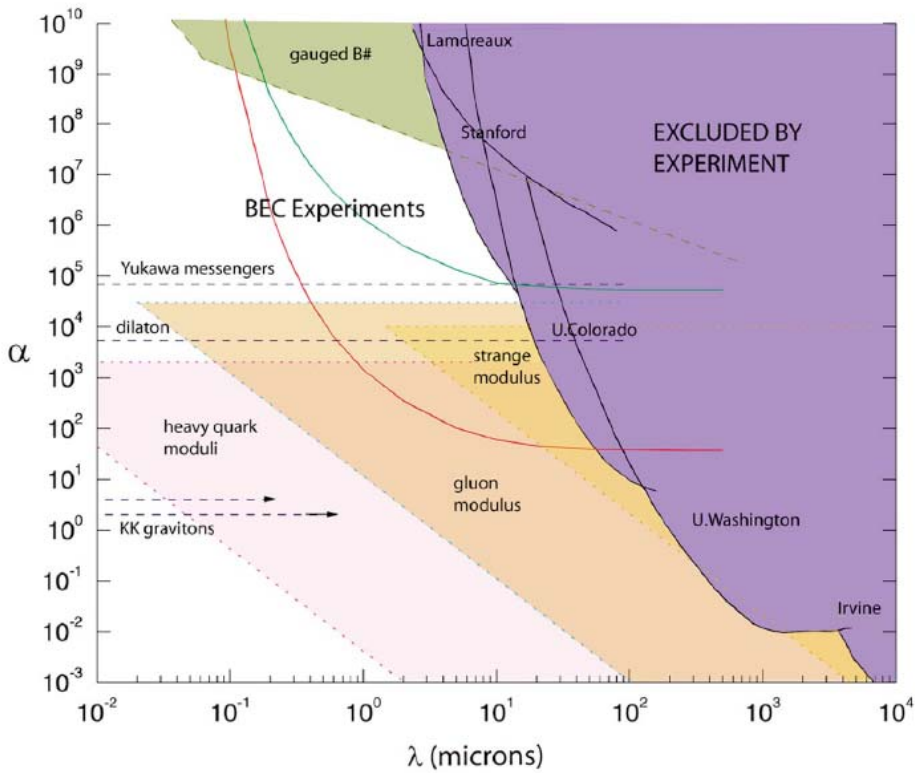
増田　正孝　東京大学宇宙線研究所

内容

- 実験の目的と背景
- カシミール力
- 他の実験の紹介
- 実験の方法
- 装置の感度評価
- 力の測定と解析
- 標準理論を越える力への制限
- まとめ

実験の目的

低エネルギー極限である真空にプローブを入れることによって、未知の力を探査



未知の力を湯川型の補正項で表したときの結合定数αへの実験的制限

$$V(r) = -\int d\vec{r}_1 \int d\vec{r}_2 \frac{G\rho_1(\vec{r}_1)\rho_2(\vec{r}_2)}{r_{12}}\left[1 + \alpha \exp(-r_{12}/\lambda)\right]$$

λ～1μmではカシミール力がバックグラウンド

カシミール力の精密検証⇒未知の力の探査

Phys. Rev. D 68 124021 (2003)

標準理論を越えるモデルの一つ
Large Extra Dimensions

階層性問題　４つの基本相互作用の中でなぜ重力のみが弱いのか

一つの解　⇒　Large Extra Dimensionsモデル

・Arkani-Hamed et al. Phys. Rev. D 086004 (1999) 等

・4つの相互作用のうち、重力以外の力の媒介粒子は3+1次元のブレーン内しか移動できない。グラビトンのみがバルク(高次元の時空)中を移動できる。

・次元のコンパクト化がプランクスケール(～10^19GeV)ではなく、電弱スケール(～1TeV)で生じる。

Large extra dimensionsへの実験的制限

次元のコンパクト化の生じるスケール

$$r_c \sim \frac{1}{M_r}\left(\frac{M_{planck}}{M_r}\right)^{2/n} \sim (10^{-19}m)(10^{16})^{2/n} = \begin{cases} 10^{13}m & n=1 \\ 10^{-3}m & n=2 \\ 10^{-9}m & n=3 \end{cases}$$

重力が逆2乗則からずれる現象

$$V(r) = \begin{cases} \dfrac{G_4 m_1 m_2}{r} & for \quad r >> r_c \\ \dfrac{G_{4+n} m_1 m_2}{r^{1+n}} & for \quad r << r_c \end{cases}$$

n=1 の場合　実験的に排除

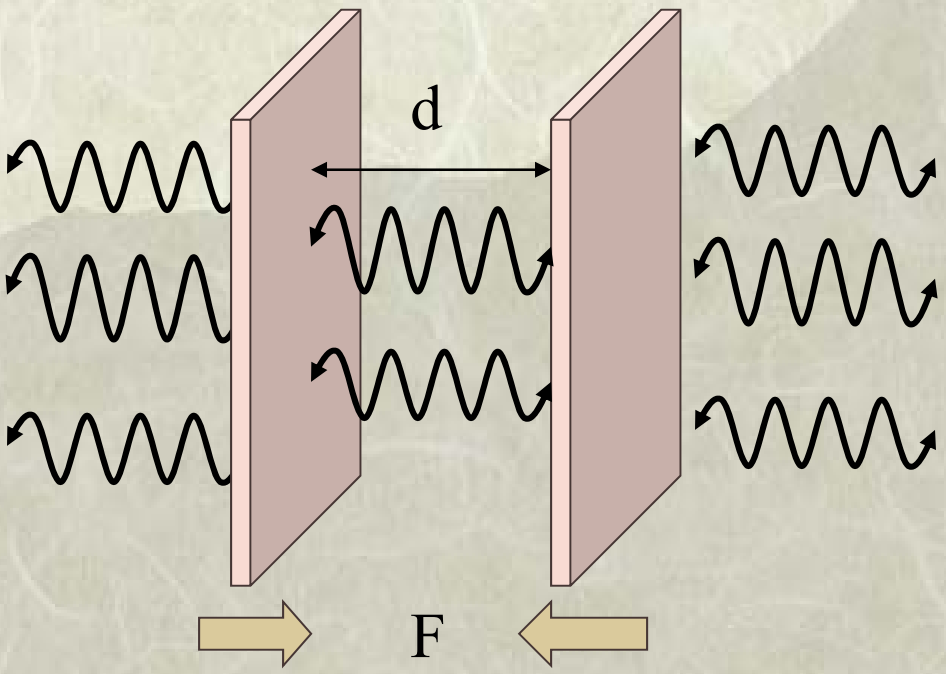
n=2 の場合　実験的な制限

$r_c < 44\mu m$ *at 95% CL*　$Mr > 3.6$ *TeV for* $\delta = 2$.　Phys. Rev. Lett 98, 021101 (2007)

1μm付近のレンジで余剰次元のコンパクト化が生じれば、

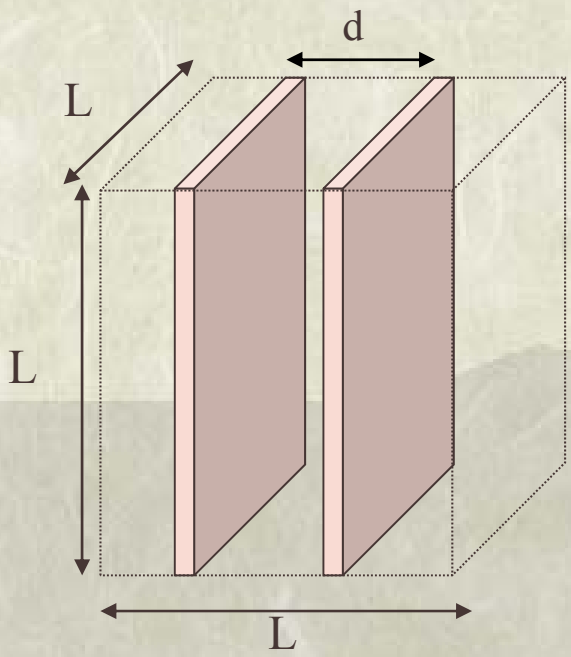
カシミール力からのずれとして観測される可能性がある。

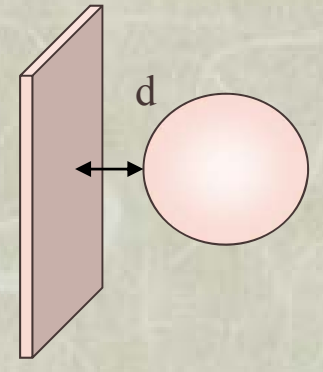
カシミール力とは



・素粒子標準理論の枠内で予測された導体間にはたらく引力
・1948年にH.B.G.Casimirが 量子電磁力学を元に予言
・電磁場の零点振動エネルギーが境界条件によって差を生じることに起因

導体間のカシミール力について





零点振動エネルギーの差

$$\Delta V = d\left(\frac{1}{L^3}\sum_{\omega}\frac{1}{2}\hbar\omega - \frac{1}{L^2 d}\sum_{\omega}\frac{1}{2}\hbar\omega\right)$$

$$= 2\frac{\hbar c d}{(2\pi)^3}\int\sqrt{k_x{}^2 + k_y{}^2 + k_z{}^2}\,dk_x dk_y dk_z - 2\frac{\hbar c}{(2\pi)^2}\int dk_x dk_y \sum_{n_z} k_z$$

$$= -\frac{c\hbar\pi^2}{720 d^3}$$

単位面積あたりの力：距離の4乗に反比例

$$F = -\frac{\partial(\Delta V)}{\partial d} = -\frac{c\hbar\pi^2}{240 d^4} = -\frac{1.3\times10^{-7}}{d(\mu\mathrm{m})^4}(\mathrm{N/cm^2})$$

平面と球面の間の力：距離の3乗に反比例

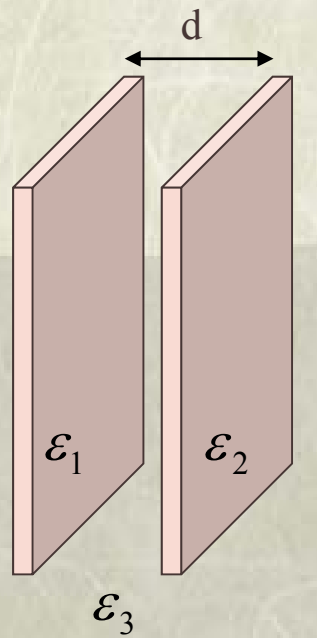
$$F' = 2\pi R\Delta V = -\frac{c\hbar R\pi^3}{360 d^3} = -\frac{2.7\times10^{-9}\,R(\mathrm{m})}{d(\mu\mathrm{m})^3}(\mathrm{N})$$

金属間のカシミール力：いくつかの補正計算が必要

有限の導電率、有限の温度、表面の凹凸など

金属間のカシミール力

有限の導電率による効果



境界条件が光子の周波数に依存

Lifshitzによる定式化（Casimirと異なる計算方法）

$$F(d)=\frac{1}{8\pi^2}\int_0^\infty d\varsigma\int_0^\infty dk^2\,2\kappa_3\left[\left(\frac{\kappa_3+\kappa_1}{\kappa_3-\kappa_1}\frac{\kappa_3+\kappa_2}{\kappa_3-\kappa_2}e^{2\kappa_3 d}-1\right)^{-1}+\left(\frac{\kappa'_3+\kappa'_1}{\kappa'_3-\kappa'_1}\frac{\kappa'_3+\kappa'_2}{\kappa'_3-\kappa'_2}e^{2\kappa_3 d}-1\right)^{-1}\right]$$

$$\text{for}\qquad \varepsilon(\omega)=1+\frac{4\pi i\sigma(\omega)}{\omega}\qquad k^2=k^2{}_\perp\qquad \kappa^2=k^2+\varsigma^2\varepsilon\qquad \kappa'=\frac{\kappa}{\varepsilon}$$

E. M. Lifshitz, Zh. Eksp. Teor. Fiz. 29 (1956) 94, Sov. Phys. JETP 2 (1956)73

・金属間のカシミール力は

極板の間隔d、誘電関数 $\varepsilon_{(\omega)}$ に依存

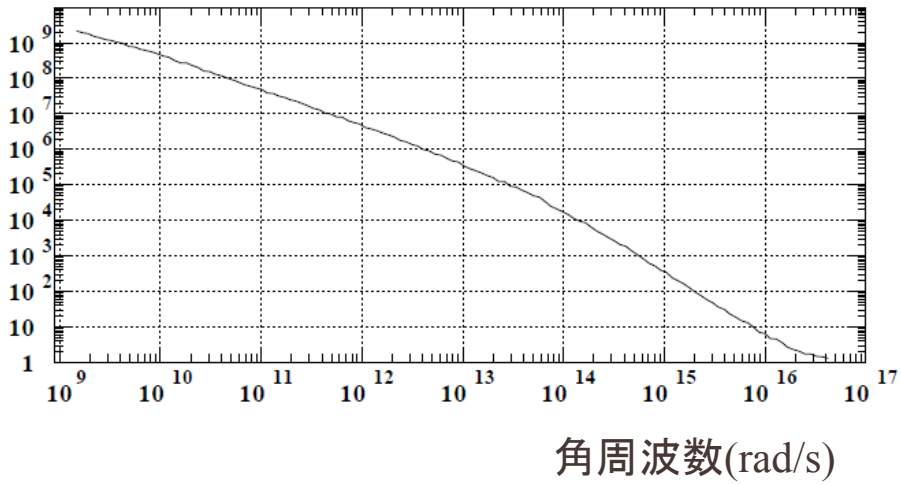
・完全導体極限で理想的なカシミール力と一致

$$\varepsilon_3\to 1\qquad \varepsilon_1=\varepsilon_2\to\infty\qquad F\Rightarrow -\frac{\pi^2\hbar c}{240d^4}$$

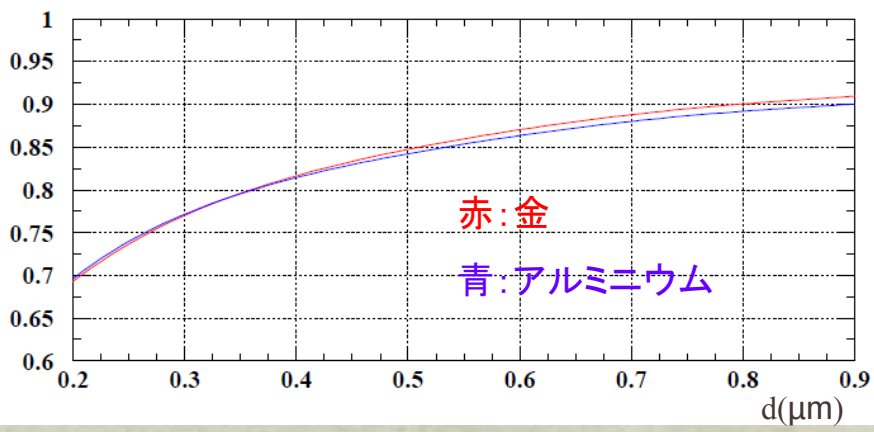
有限の導電率による補正

$\varepsilon(\omega)$

金の誘電関数



金属/完全導体の比



金属の誘電関数の計算

- プラズマモデル $\varepsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}$
- ドルーデモデル $\varepsilon(i\xi) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\xi(\xi+\gamma)}$
- 光学測定値を外挿

⇒金ではモデル依存性は十分小さい。

プラズマモデルで浸透深さの4次まで計算

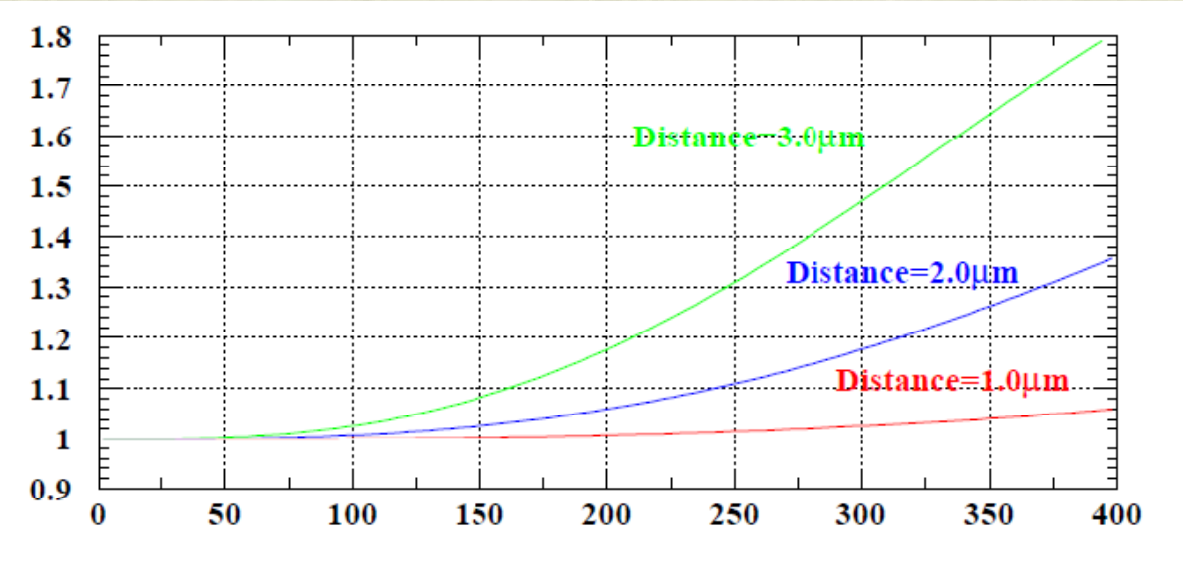
有限の導電率による効果の特徴

- 近距離であるほど顕著
- 完全導体の場合に比べて力を弱める効果

有限温度でのカシミール力

輻射光子による効果

0Kカシミール力
に対する比



温度(K)

Lifshitzの式を温度によって量子化して計算

・遠距離であるほどその効果が顕著(小さい効果)

・温度が高いほどカシミール力は大きくなる PRL 85 503 (2000), PRL84 40 (2000) 等

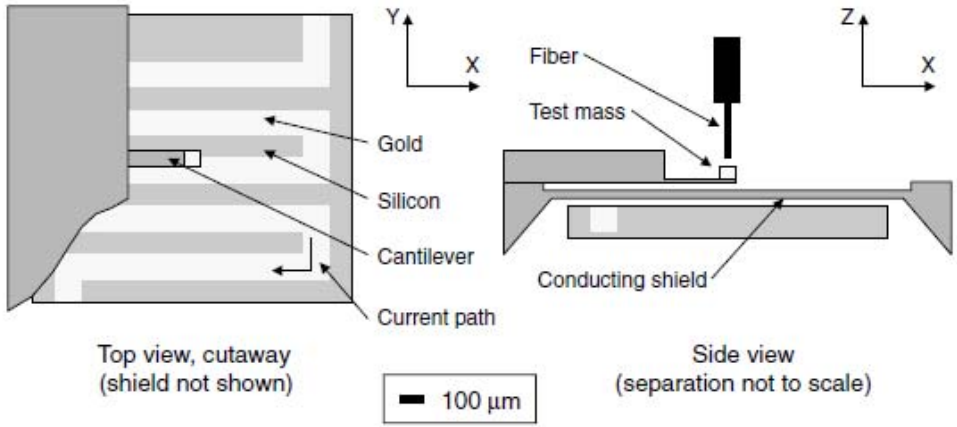
・有限温度の効果は実験精度よりも十分小さい。

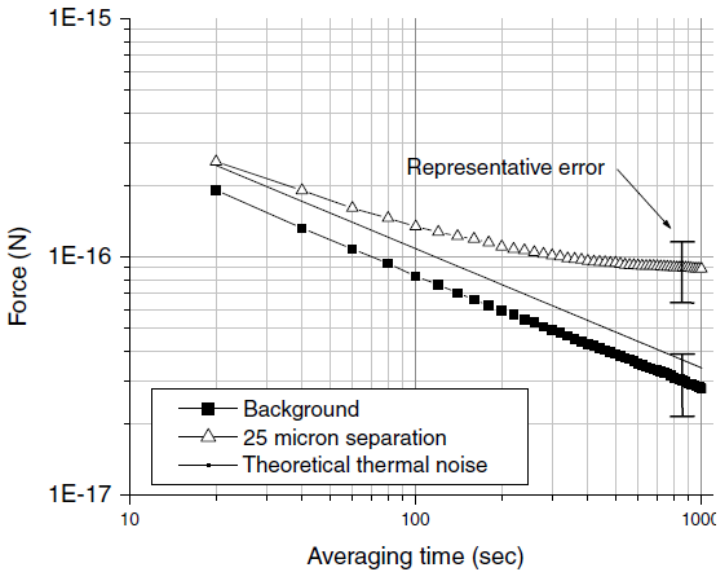
＝＞本実験ではカシミール力を測定し、理論と比較した。

その結果を元に未知の力を検証した。

１μm付近での未知の力を探索した他の実験を紹介。

実験の紹介1 Chiaverini, et al.　2003





null実験

・マイクロカンチレバー

l=250µm,w=50µm,t =0.335µm

k=5.0-5.5mN/m , f0～300Hz

・動的測定

・テスト質量 1.4µg

・ドライブ質量 金とシリコン

・温度T=9-11K　真空度<10^-4Torr

・測定感度ΔF～10^-16N(熱雑音)

・静電遮蔽

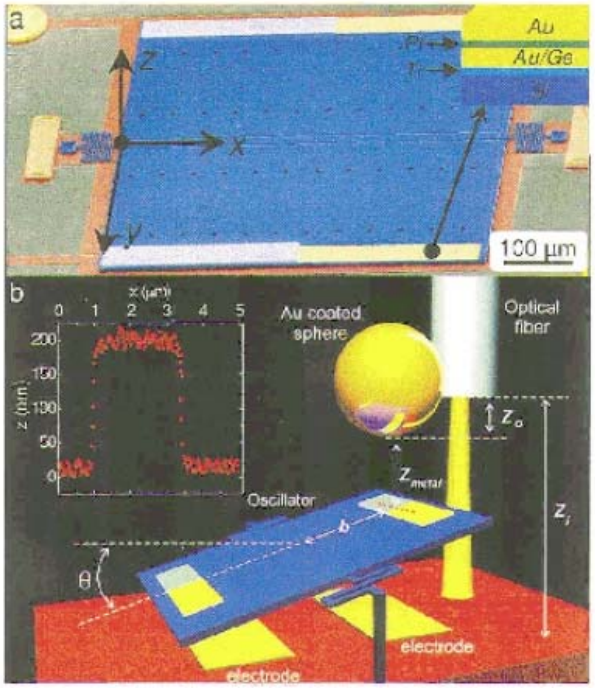
測定結果は熱雑音以上の力：遮蔽板が振動し、静電気力が変動している?

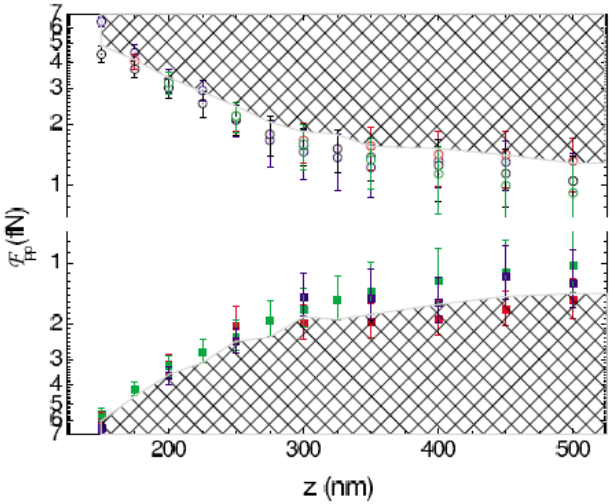
αに対し、3-40µmに対して厳しい制限

Phys. Rev. Lett.90　151101(2003)

Phys. Rev. D 78, 022002 (2008).

実験の紹介2 Decca et, al. 2005





・小型ねじれ振動子(MTO)

k～10^-9Nm/rad Q～10^4

・容量センサ δθ～10^-9rad/Hz^0.5

・力の働く極板は球面と平面

球面 R～50μm Au被覆150nm

平面 Au被覆200nmの下にAu/Ge 200nm

(AuとGeの密度差13.96kg/m^3)

・MTOをz方向に振動させ、x方向に移動

・極板間距離zは150nm～500nm

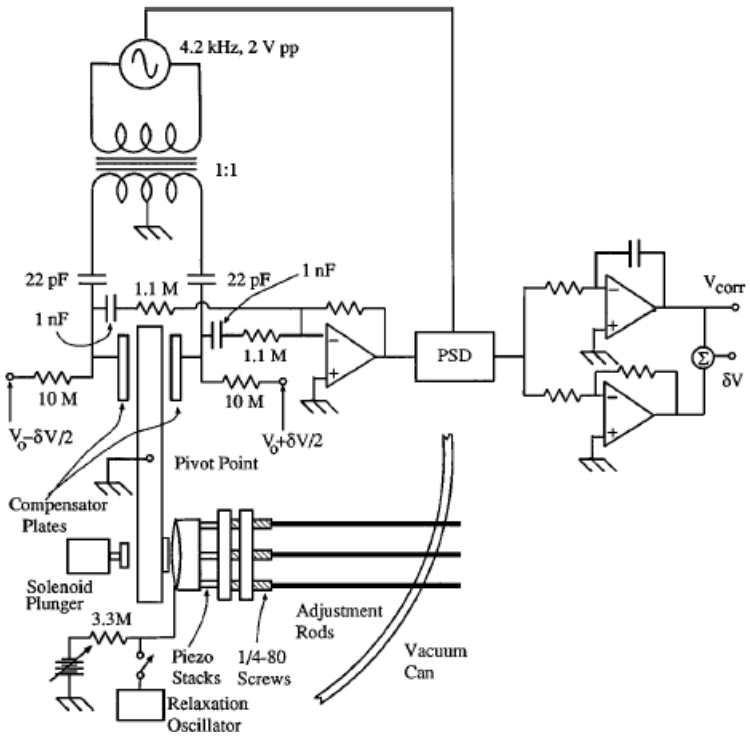
力の差分F≠0

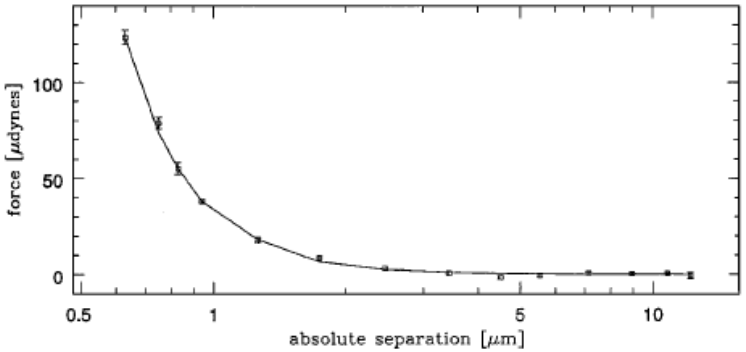
z_m0の差によるカシミール力の差では？

Phys. Rev. Lett. 94, 240401 (2005).

Phys. Rev. D 75, 077101 (2007).

実験の紹介3 Lamoreaux 1997





静的カシミール力の測定実験

Phys. Rev. Lett. 78, 5 (1997).

・フィードバック制御による零位法

・ねじれ秤と静電容量センサー k=4.8dyn/rad

・力の測定感度 δF=10^-11N

測定結果 $F_c^m(a_i) = (1 + \delta)F_c^T(a_i) + b'$.

δ=0.01±0.05 b'<5×10^-7 dyn

・Phys. Rev. Lett. 84, 5672 (2000).や*Class. Quant. Grav. 22, 5397 (2005).*で計算の間違いを指摘された。

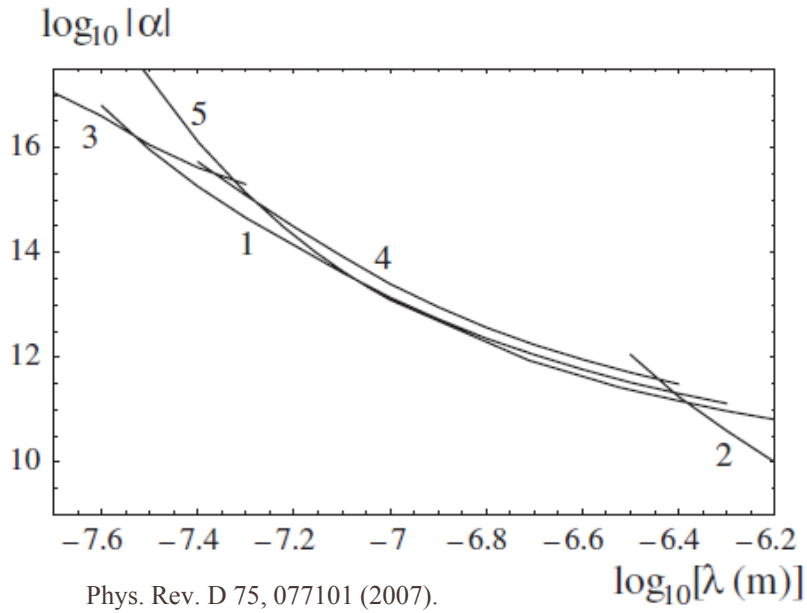
=>Erratumも間違いを指摘された。 実験精度の過大評価が指摘されている。

$$\left|\frac{\delta F(z)}{\delta z}/F(z)\right| = 3\frac{\Delta z}{z}.$$

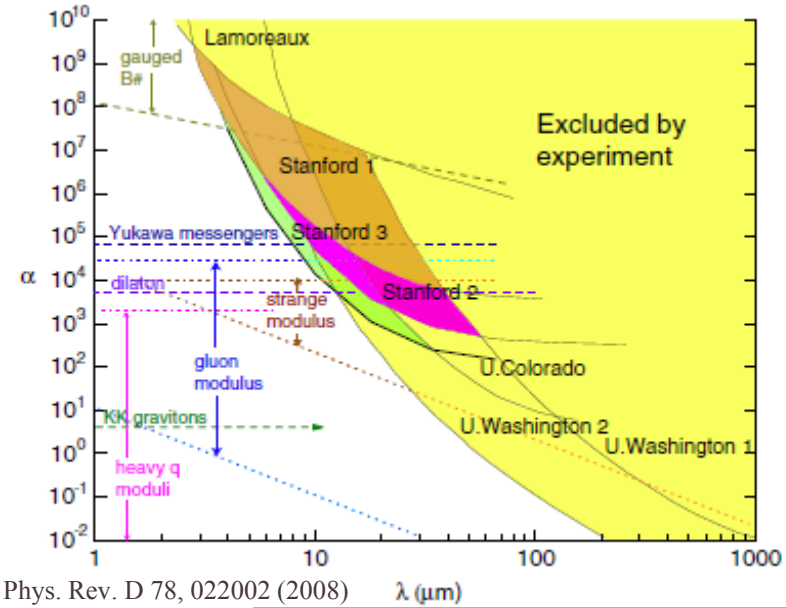
特に1サイクルの測定で0.1μmのドリフト(床の傾き?)

=>1μmで30%の相対誤差(～10^-10N)

未知の力への実験からの制限



Phys. Rev. D 75, 077101 (2007).



Phys. Rev. D 78, 022002 (2008)

$$V(r) = -\int d\vec{r}_1 \int d\vec{r}_2 \frac{G\rho_1(\vec{r}_1)\rho_2(\vec{r}_2)}{r_{12}}\left[1+\alpha\exp(-r_{12}/\lambda)\right]$$

λ=1μmより長距離と短距離の比較

・長距離用の小型装置

静電気力やカシミール力をキャンセルさせる遮蔽板　近づけるのが困難

・近距離用の小型装置

テストマスを大きくする事が困難

他のカシミール力測定の実験と比較

球面と平面間のカシミール力測定実験の比較

最初の出版年	主著者	実験装置	球面半径	測定範囲(μm)
1997	Lamoreaux	ねじれ秤	10cm	0.6−6.0
1999	Mohideen	AFM	200μm	0.1−0.9
2001	Ederth	板ばね	1cm	0.02−0.1
2002	Chan	MEMS	200μm	0.1−2.0
2003	Decca	MTO	200μm	0.2−1.2
2007	我々の実験	ねじれ秤	20cm	0.4−6.5

・小型装置

細かいステップ：近距離で高感度

・ねじれ秤

制御の不安定性：近距離で不利

大きな球面半径：**遠距離で高感度、未知の力に対して強い探査能力**

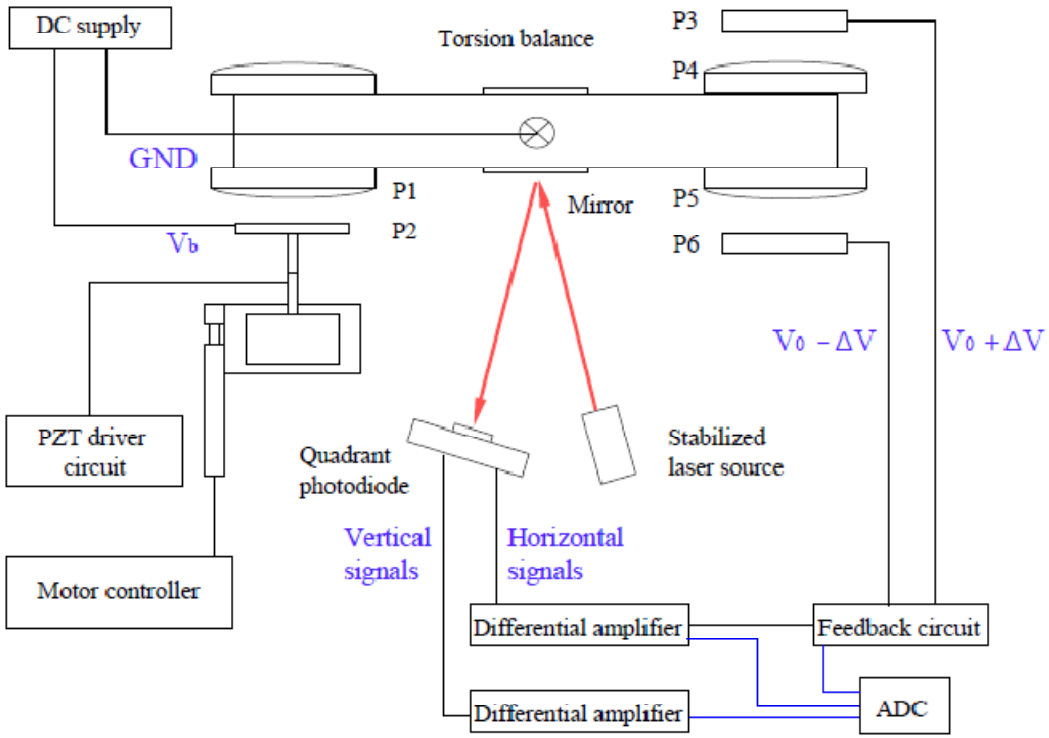
特にこの実験ではLamoreauxの実験と比較して

・長周期化 ⇒ 力の測定感度を高めた

・制御の安定性を高めた ⇒ より近距離側でも測定可能に

・系統誤差を定量的に評価

ねじれ秤を用いた測定装置



1.ねじれ秤
- 高純度銅 (99.999%)
- タングステンワイヤー
  φ60 μm, L400 mm

2.光てこ
- He-Neレーザー
- 2モード法による強度安定化
- 4分割フォトダイオード
- 角度検出感度 1 μrad/Hz$^{1/2}$ at 1mHz

3.フィードバック系
- ユニティゲイン周波数 ~ 0.04 Hz

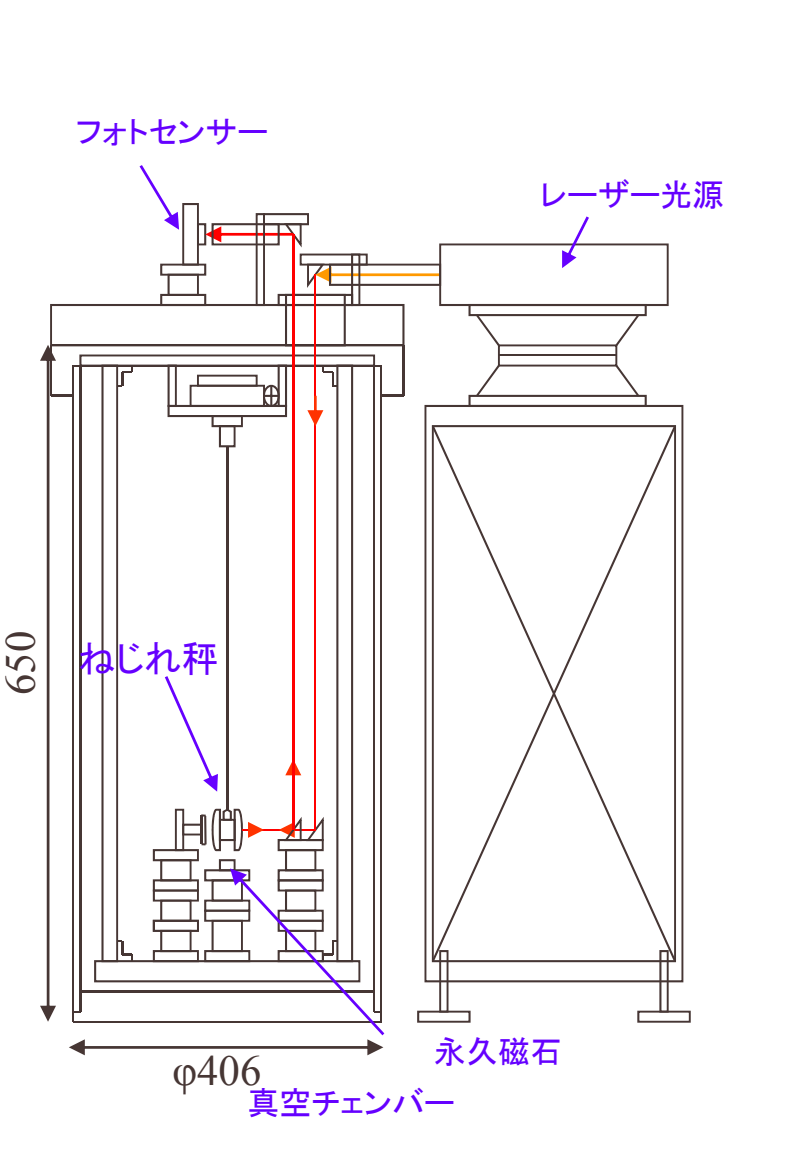
4. カシミール力用の極板
- 球面鏡 φ40mm R207mm
- 平面鏡 φ30mm

5.距離の制御
- ピエゾ素子と自動ステージ

6.真空チェンバー
- 真空度～0.1 Pa

平面極板と球面極板間を距離を変化させ、力の差分を測定する。

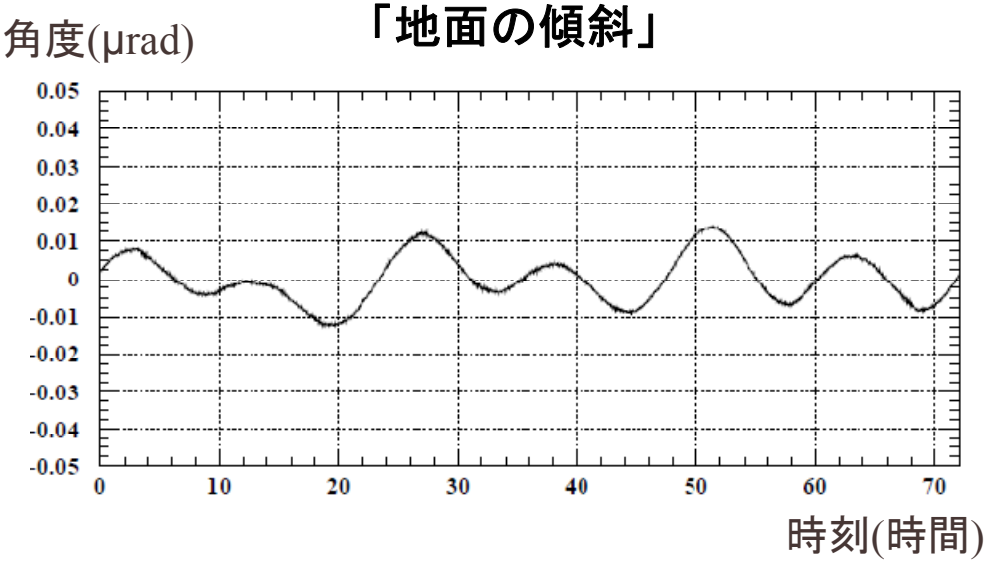
装置の図と写真



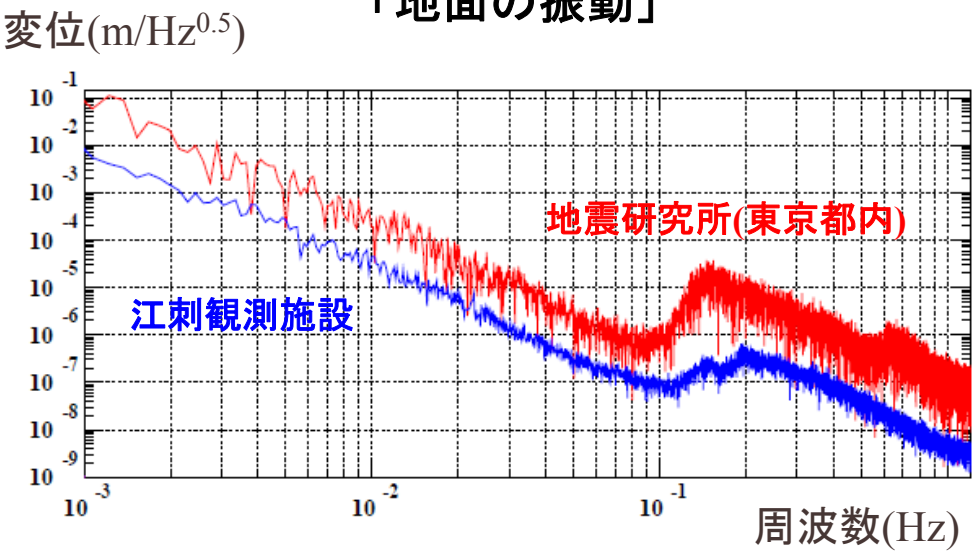
実験は地面振動や地面の傾斜振動の小さな山奥(阿原山)の坑道内で行なった。

江刺観測施設での環境ノイズ

「地面の傾斜」



「地面の振動」



傾斜

都内の建物　～　10μrad/day

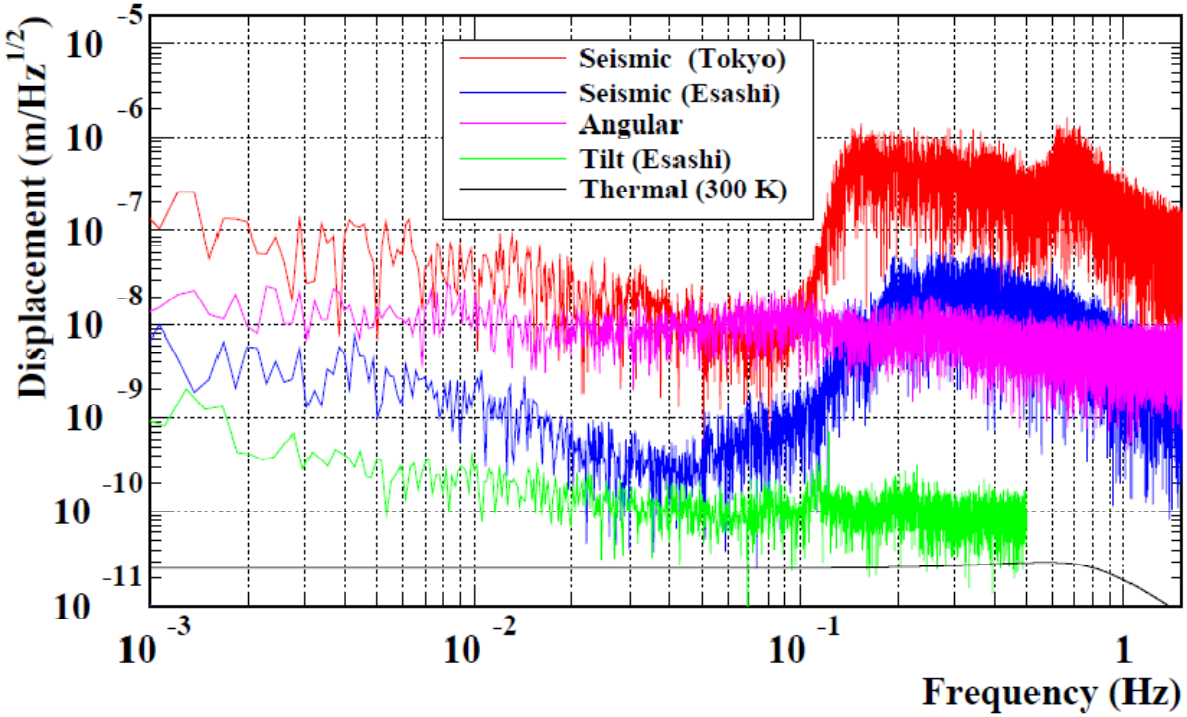
江刺観測施設　～　20nrad/day

地面振動(1mHz～1Hz)

都内に比べ、1桁以上小さい

非常に測定に適した環境

距離の変動の見積もり

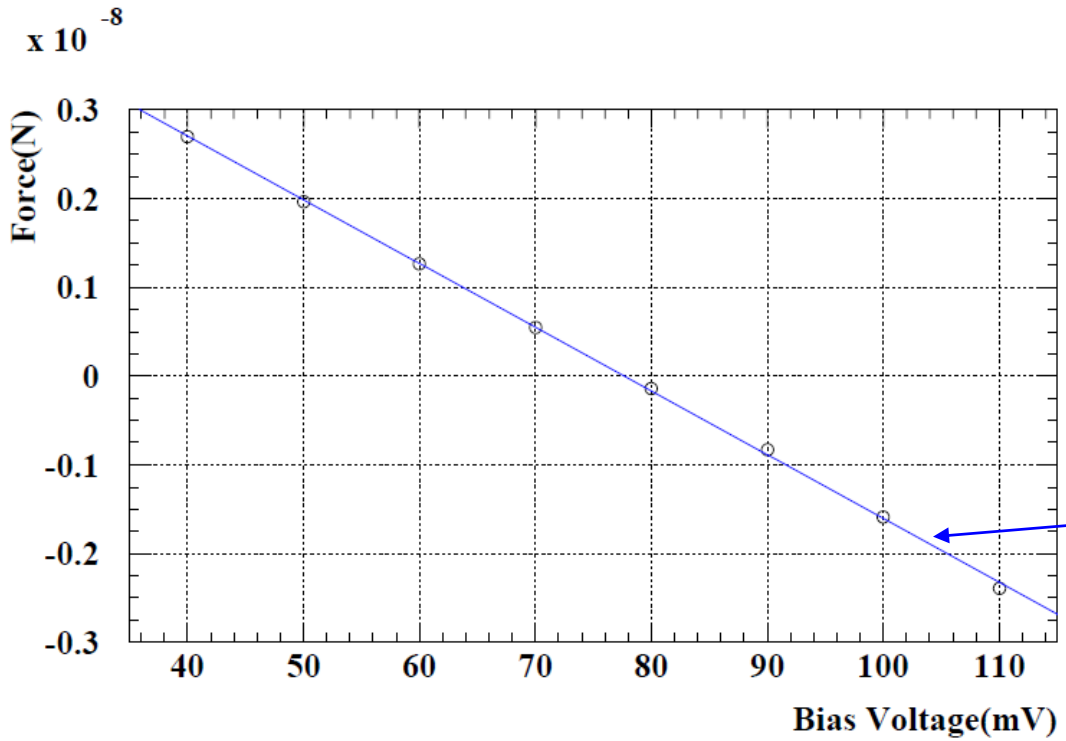


様々な要因により距離が変動

- 地面振動　　実測×伝達関数
- 地面の傾斜　　実測×伝達関数
- ねじれ振動の残差　　実測
- 熱雑音　　理論計算

すべての影響による距離のRMS 振幅　σ_{all}=18 nm

距離のオフセットの測定



球面と平面間の電気力

$$F_e(V_b, d) = \frac{\pi\varepsilon_0 R(V_c - V_b)^2}{d} \quad \text{for } d \ll R$$

バイアス電圧を変化させた時の電気力の差分

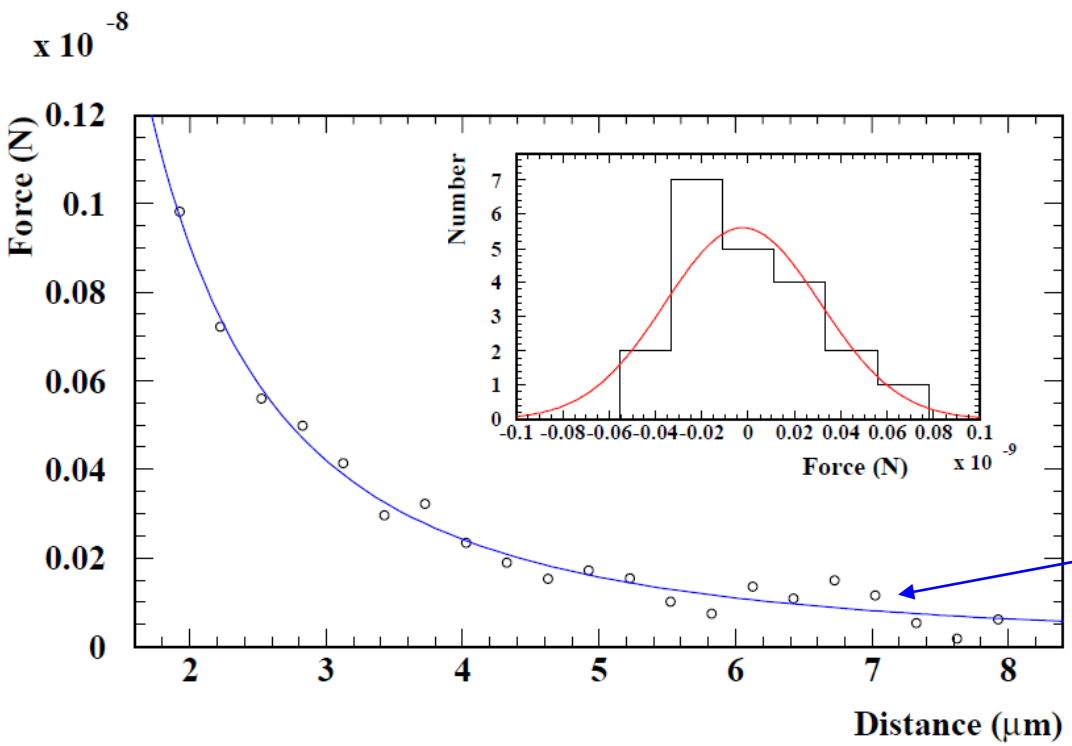
$$\Delta F_v(V_b, d) = F_e(V_b + V_s, d_0) - F_e(V_b, d_0)$$

距離一定の状態で、極板間のバイアス電圧依存性を測定

⇒Vc=82.6±0.9mV　d_0=1.601±0.013μm

距離のオフセット測定感度　σ=13nm

力の測定感度;電気力の測定



球面と平面間の電気力

$$F_e(V_b, d) = \frac{\pi\varepsilon_0 R(V_c - V_b)^2}{d} \quad \text{for } d \ll R$$

距離を変化させた時の

電気力の差分

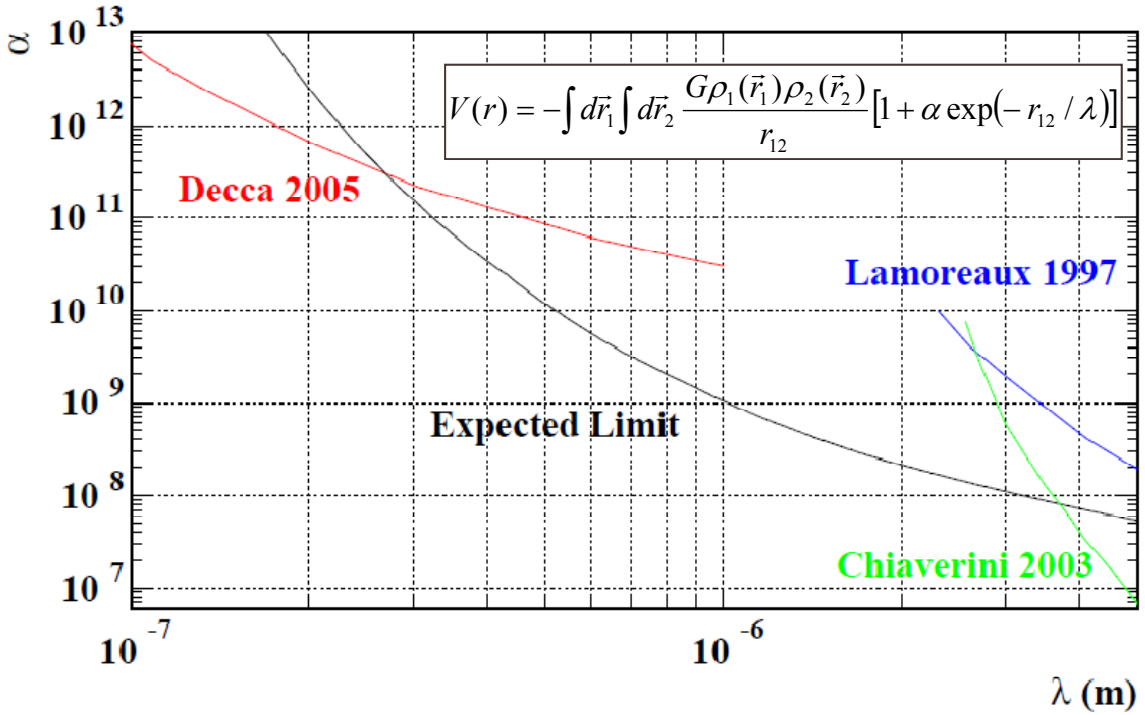
$$\Delta F_s(V_b, d) = F_e(V_b, d) - F_e(V_b, d+s)$$

バイアス電圧一定の状態で、遠距離から0.3μmづつ接近させ、

電気力の距離依存性を測定

⇒**力の差分への測定感度** $\sigma_F = 3.4 \times 10^{-11}$ N

未知の力への感度の見積もり



未知の力への予想感度の見積もり

・距離変動　σ=18nm

・絶対距離　σ=13nm

・力の差分への測定感度　σ_F=3.4×10^{-11} N

データ100点づつ取得 at 0.8, 1.1, 1.4, and 1.7μmを仮定

⇒1μm付近で非常に高感度　　Class. Quantum Grav. 24 (2007) 3965-3974.

極板間の力の距離依存性の測定

測定方法

・6.5μm付近の距離から0.3μmづつ極板を近づけていき、
その時の極板間の力の変動をフィードバック信号から測定。

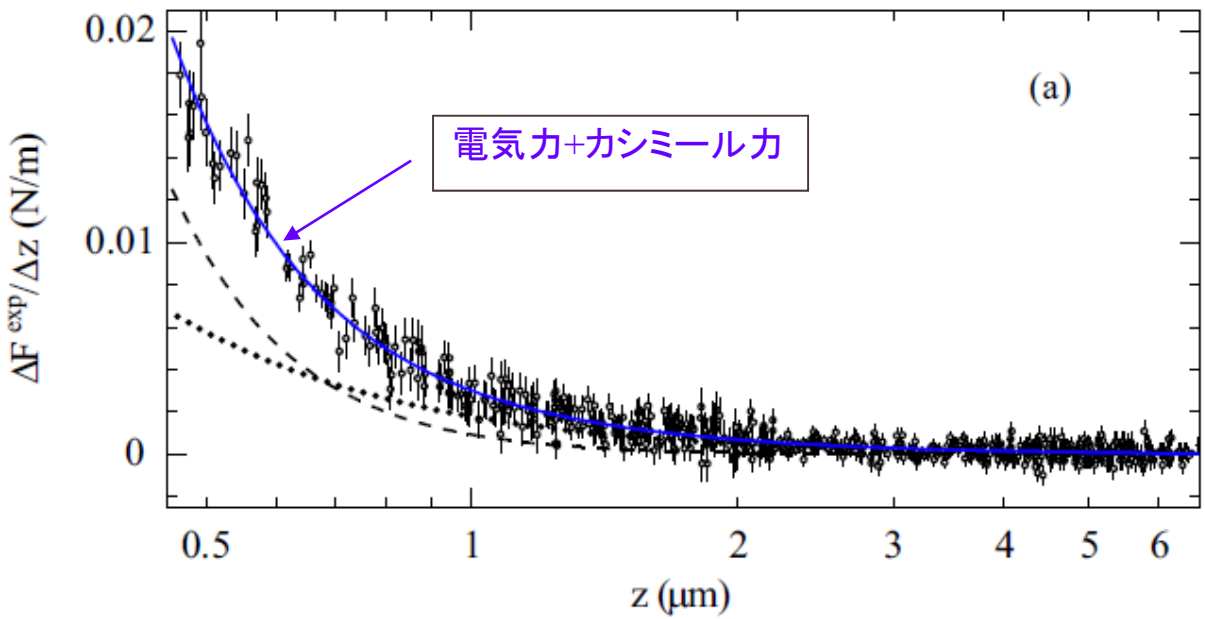
・距離が0.5μm付近に達したら極板を遠方に戻し、また0.3μmづつ
近づけていく。

測定データ

・合計587点のデータを取得

・データをビンに距離ごとに区切り、リニアフィットから2.5σ以上ずれている
28点を取り除いた。残りの合計559点のデータを元に解析

カシミール力の検証



・全点を「電気力＋カシミール力」でフィット

・フィットパラメータは極板間の残留電位差V_{res}

・ V_{res} =20.0±0.2mV　χ^2/N_{dof}=513/558

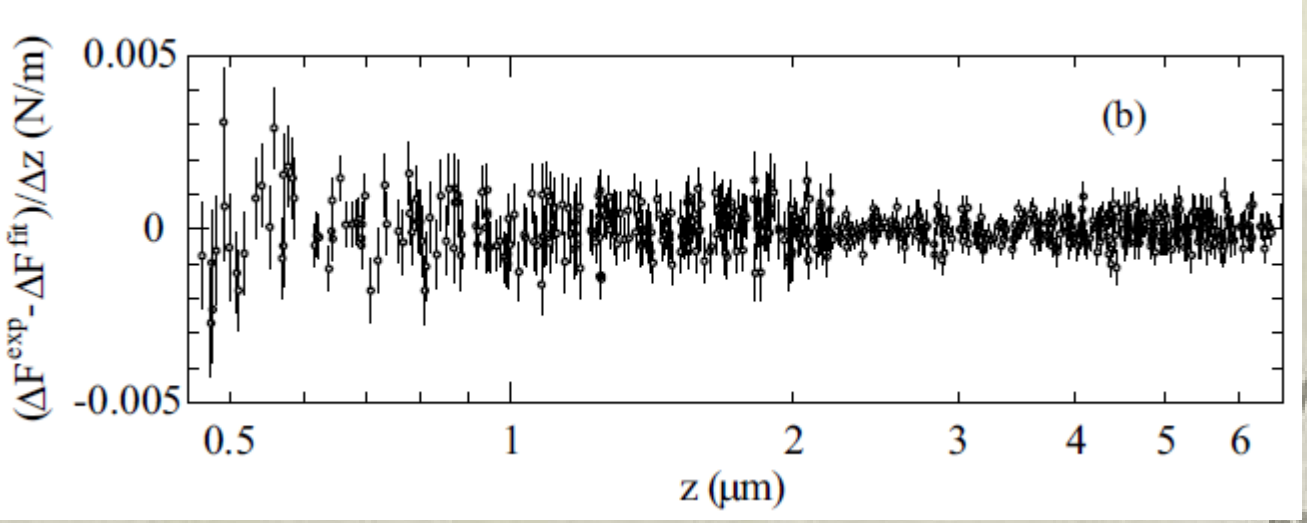
・系統誤差の影響

力の誤差　　χ^2/N_{dof}=533/558

距離の誤差　　χ^2/N_{dof}=525/558

データは「カシミール力と残留電気力の和」と一致

未知の力への制限



・全点を「電気力＋カシミール力+湯川力」でフィット

・フィットパラメータは極板間の残留電位差V_{res} と

湯川力の結合定数α

$$V_{Yu}(d) = -\alpha G \sum_{i,j=1}^{3} \rho_i' \rho_j \int_{Vi} d^3 r_1 \int_{Vj} d^3 r_2 \frac{1}{r_{12}} \exp(-r_{12}/\lambda)$$

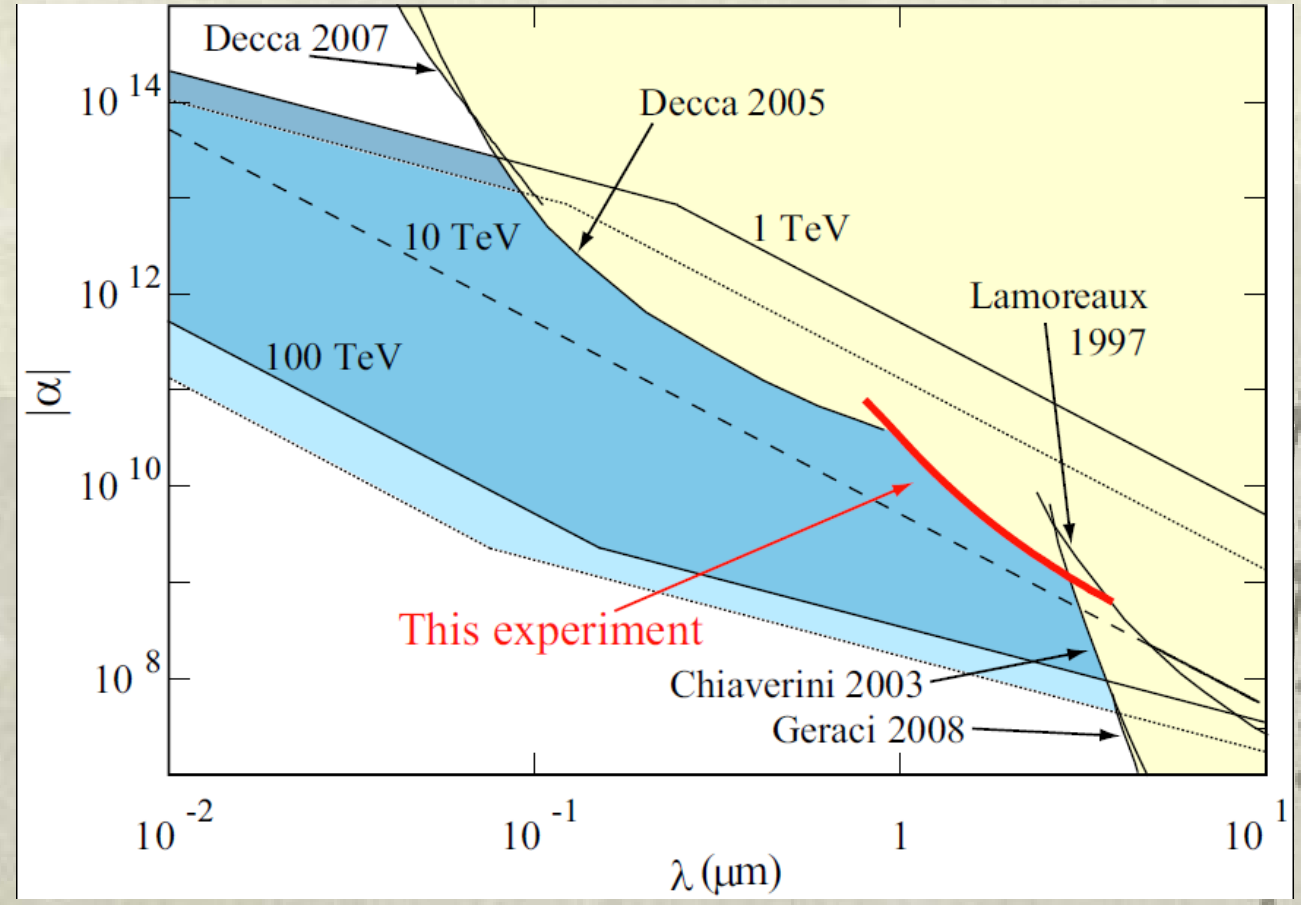
・データとフィット関数の差分を図に示した。

・λごとにαに対する2σ制限を求めた。

・系統誤差を考慮し、力の誤差と距離の誤差分データを同時

にシフトさせ、最も控え目なαへの制限を求めた。

未知の力の結合定数への制限

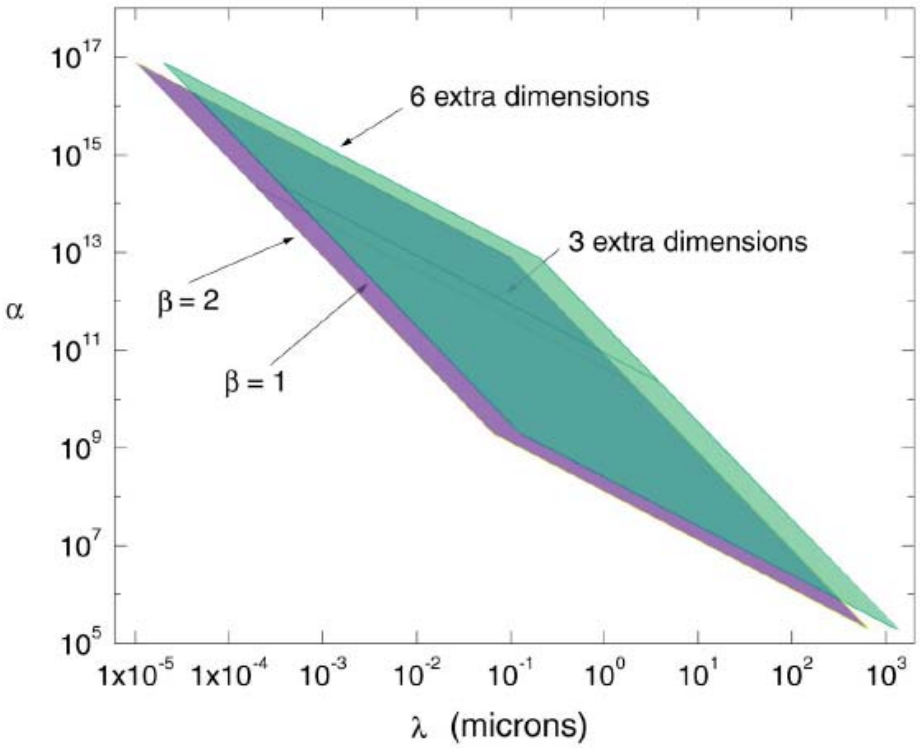


・αに対する2σ制限(系統誤差込み)

・1.0μm<λ<2.9μmで最も厳しい制限

・余剰次元のモデルの一つに制限

サブミクロンレンジでの
標準理論を越える力の検証



Gauged Fields (baryon number) in the Bulk

PRD 59 086004 Arkani-Hamed,et al(1999)

PRD 68 124021 Dimopoulos, et al.(2003)

・4つの基本相互作用以外の力が存在し、
そのゲージボゾンがバルク中を移動できる。

・基本エネルギースケールM* 以下では質
量を持つ粒子として振るまう。

・結合定数αとコンプトン波長λ

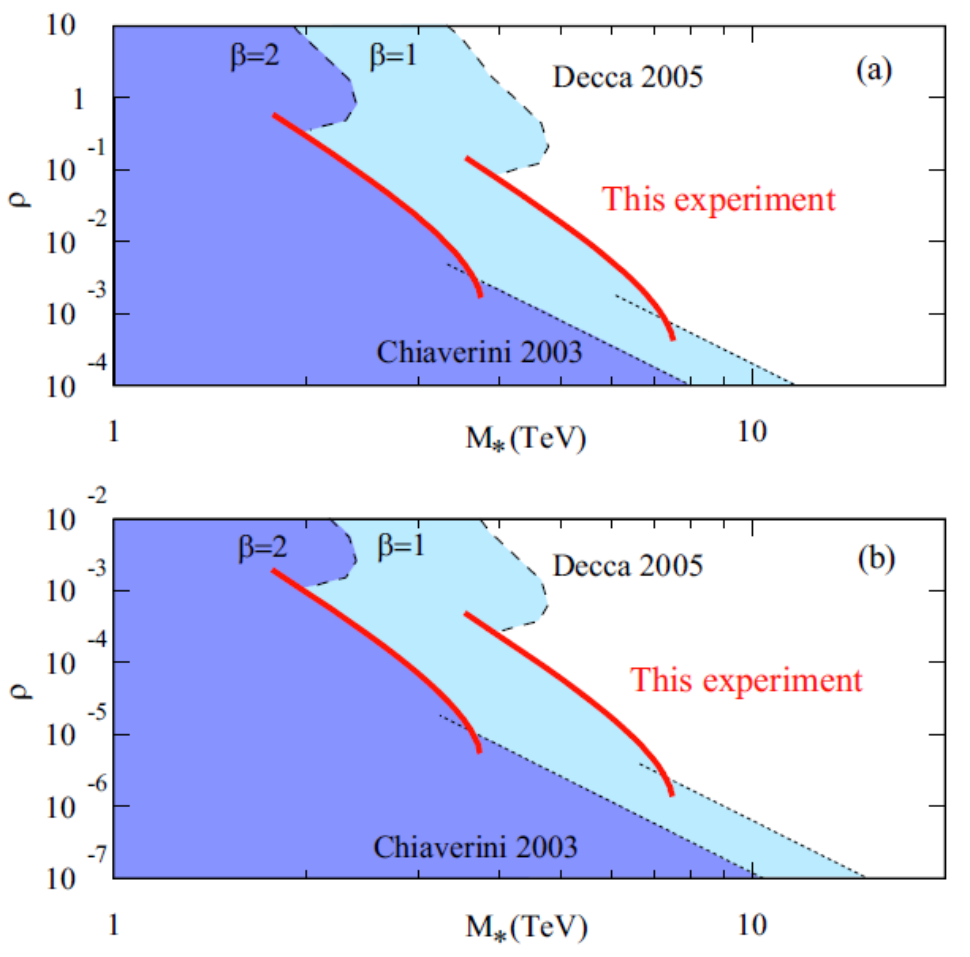
$$\alpha = \frac{25}{4\pi}\left(\frac{M_*}{m_p}\right)^2 \rho\Phi_{n+4} \qquad \lambda = \frac{1}{\sqrt{\Phi_{n+4}\rho}}\frac{M_4}{M_*^{\,2}}\frac{1}{\beta}\hbar c$$

ρ 相互作用の強さを表す係数 $\frac{1}{\Phi_{n+4}} \le \rho \le 1$

M* 基本エネルギースケール $1 \le M_* \le 100TeV$

・M*に対して実験的な制限を加えた。

Gauged Baryon in the bulkへの制限



・Gauged Fields in the bulk
PRD 59 086004 Arkani-Hamed,et al(1999)
PRD 68 124021 Dimopoulos, et al.(2003)

・パラメータ
ρ　　力の強さを表すパラメータ
M*　基本エネルギースケール

・基本エネルギースケールに対する下限値を求めた(95%C.L.)。

・余剰次元nごとに制限を求めた。
例としてn=6　β=1 では以下の範囲で最も厳しい制限となる。
$6.5 \times 10^{-6} < \rho < 2.5 \times 10^{-4}$

Phys.Rev.Lett 102 171101 (2009)

まとめ

・低エネルギー極限としての真空を探査することで、未知の力を探査する。

・ねじれ秤を用い、金の極板間に働く力を距離0.4－6.5μm の範囲で測定した。

・測定データは「カシミール力と電気力の和」と一致した。

・未知の力の結合定数αに対し、
$1.0<\lambda<2.9$ μm の範囲で最も厳しい上限値を得た。

・Gauged Fields in the bulk へ制限を求めた。
余剰次元が6のとき、M*に対し、
$6.5\times10^{-6} < \rho < 2.5\times10^{-4}$ ($\beta=1$の場合)で最も厳しい制限を得た。