

2005年2/19 第4回 TAMAシンポジウム

ねじれ秤を用いた
カシミール力の精密測定

東京大学宇宙線研究所 増田正孝

内容

- ・カシミール力とは?
- ・実験の目的
- ・ねじれ秤による力の測定原理
- ・測定データの解析
- ・まとめ

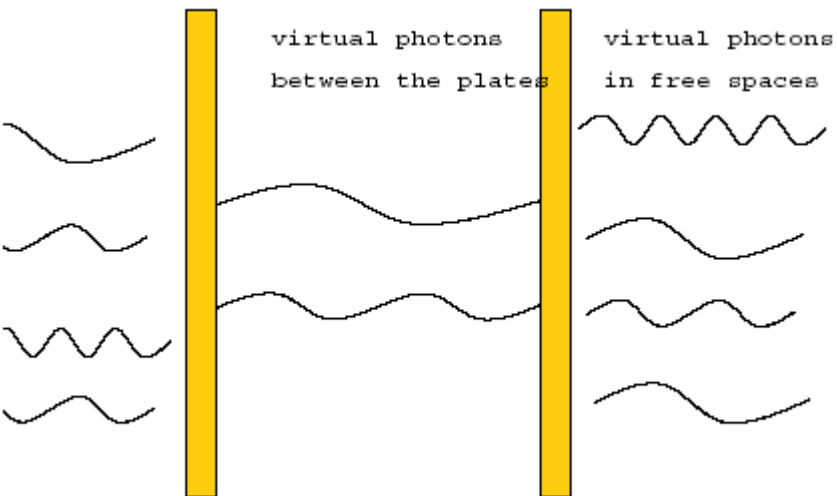
カシミール力とは？

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

QEDによる帰結

真空中での電磁場のゼロ点振動エネルギーによって生じる引力

2枚の導体平板の存在=>エネルギー密度の差



$$\Delta V = \Delta \sum_{\omega} \frac{1}{2} \hbar \omega = 2 \frac{c \hbar}{(2\pi)^2} \frac{1}{d} \int dk_x dk_y \sum_k k_z - \frac{c \hbar}{(2\pi)^3} \int d\vec{k} = -\frac{c \hbar \pi^2}{720 d^3}$$

$$F = -\frac{\partial(\Delta V)}{\partial d} = -\frac{c \hbar \pi^2}{240 d^4} = -\frac{1.3 \times 10^{-7}}{(d_{\mu m})^4} N / cm^2 \text{ (平行平板間)}$$

$$F' = 2\pi R \Delta V = -\frac{c \hbar R \pi^3}{360 d^3} = -\frac{2.7 \times 10^{-9} R(m)}{(d_{\mu m})^3} N \text{ (平板球面間)}$$

有限の導電率・有限の温度・表面の粗さetcを補正

船にもカシミール力？

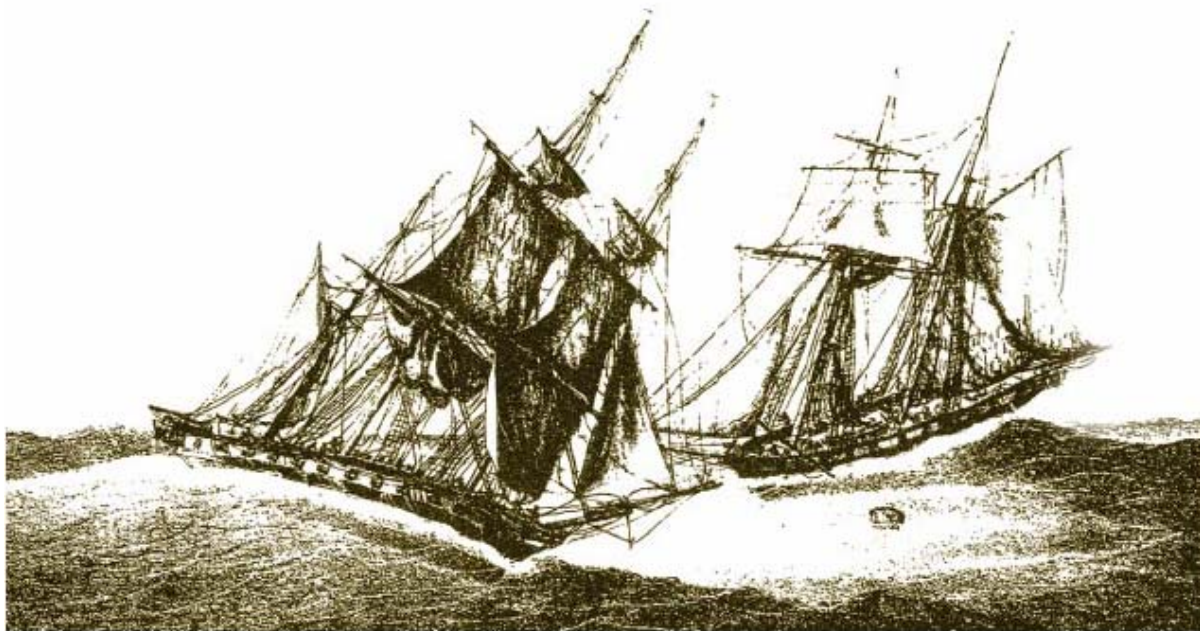


Figure 1 A Casimir-like effect at sea. In the days of square-riggers, sailors noticed that, under certain conditions, ships lying close to one another would be mysteriously drawn together, with various unhappy outcomes. Only in the 1990s was the phenomenon explained as a maritime analogy of the Casimir force. (Illustration from ref. 5.)

- ・2艘の船の間に引力
- ・波：固定端条件
密度(内側) $<$ 密度(外側)
- ・波の輻射圧 \Rightarrow 引力

金属という境界条件

電気伝導度が有限

境界条件が

- ・光子の周波数に依存
- ・遅延の効果を受ける

Lifshitz (E.M.Lifshitz Sov.Phys JETP(USA)2(1956))による定式化
極板の間隔 d 、温度 T 、誘電関数 () に依存

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

for $k^2 = k_\perp^2$ $\kappa^2 = k^2 + \zeta^2 \epsilon$ $\kappa' = \frac{\kappa}{\epsilon}$ $\epsilon(\omega) = 1 + \frac{4\pi i \sigma(\omega)}{\omega}$

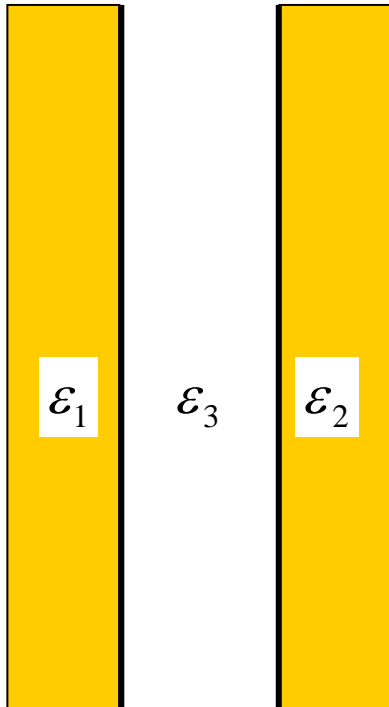
完全導体極限で理想的なカシミール力と一致

$$\epsilon_3 \rightarrow 1 \quad \epsilon_1 = \epsilon_2 \rightarrow \infty \quad F \Rightarrow -\frac{\pi^2 \hbar c}{240 a^4}$$

誘電体間のカシミール力 計算も可能

(誘電体を希薄な気体とみなす)

$$\epsilon_3 \rightarrow 1 \quad \epsilon_{1,2} = 1 + 4\pi N_{1,2} \alpha_{1,2}$$



$z = 0$ $z = a$

金属の物性

PlasmaモデルとDrudeモデル

金属の誘電関数は良く定式化されていない

- Plasmaモデル $\varepsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}$
- Drudeモデル $\varepsilon(i\xi) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\xi(\xi + \gamma)}$
- Optical Dataを外挿

Plasmaモデルを代入

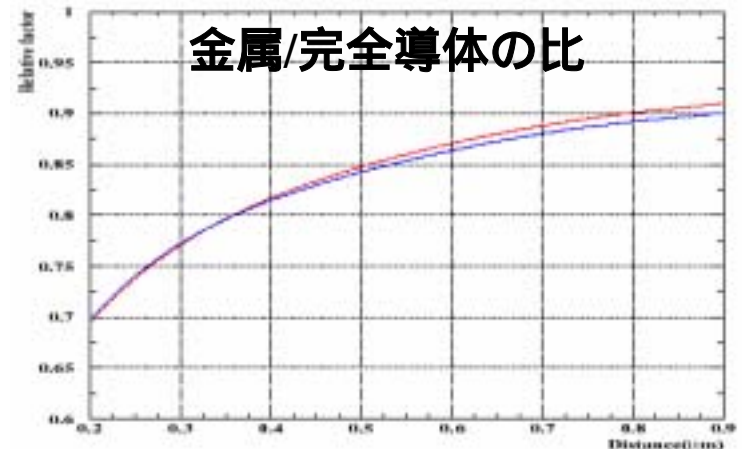
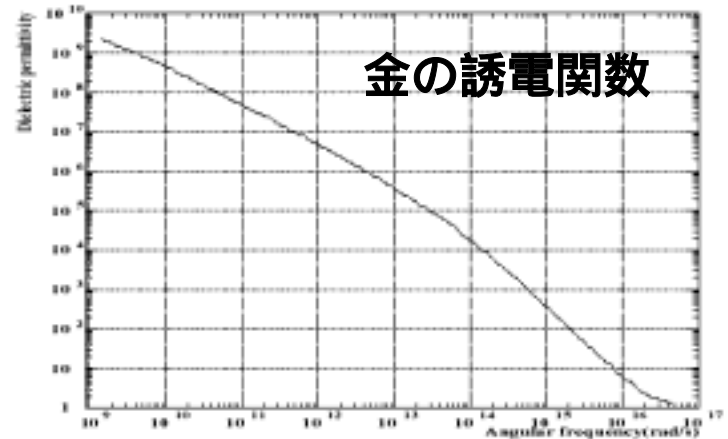
$$\omega_p = \frac{4\pi e^2 N}{m} \quad \delta = c / \omega_p \text{ (penetration depth)}$$

$$F \approx -\frac{\pi^2 \hbar c}{240 a^4} \left(1 - \frac{16}{3} \frac{\delta}{a} + 24 \left(\frac{\delta}{a} \right)^2 \right)$$

=> 金属間のカシミール力

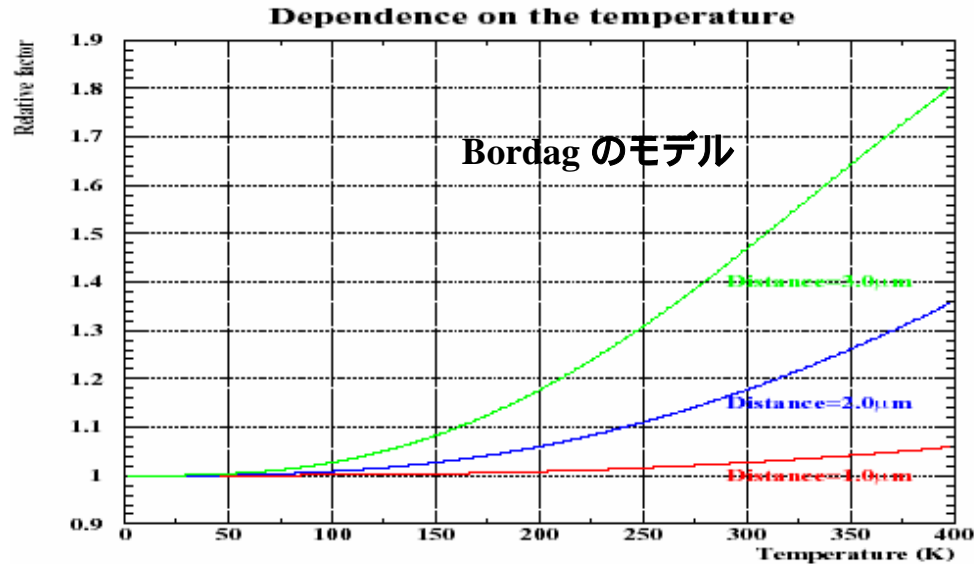
実験の精度内では検証されている

Mohideen et al PRL81,4549(1998) 他多数



有限温度でのカシミール力

黒体輻射光子の密度の差による影響



$$F = \frac{1}{8\pi^2} \int_0^\infty d\zeta \int_0^\infty dk^2 2\kappa_3 \left[\left(\frac{\kappa_3 + \kappa_1}{\kappa_3 - \kappa_1} \frac{\kappa_3 + \kappa_2}{\kappa_3 - \kappa_2} e^{2\kappa_3 a} - 1 \right)^{-1} + \left(\frac{\kappa'_3 + \kappa'_1}{\kappa'_3 - \kappa'_1} \frac{\kappa'_3 + \kappa'_2}{\kappa'_3 - \kappa'_2} e^{2\kappa_3 a} - 1 \right)^{-1} \right] \quad \zeta \rightarrow \zeta_n = \frac{2\pi n}{\beta} \quad \int_{-\infty}^{\infty} \frac{d\zeta}{2\pi} \rightarrow \frac{1}{\beta} \sum_{n=-\infty}^{\infty}$$

$$E_F = -k_b T \ln Z \quad \ln Z = -\sum_i \ln(1 - e^{-\beta p_i}) \quad p = -\frac{\partial E_F}{\partial V}$$

3つのグループが大きく異なるモデル

- Bostrom, Sernelius PRL 84,20(2000)
- Bordag, Geyer, Klimchitukaya PRL 85,503(2000)
- Svetoy, Lokhanin Phys.Lett.A15,1013(2000)

実験(0.5-3 μmカシミール力測定)の目的

・補正項を含めたカシミール力の検証

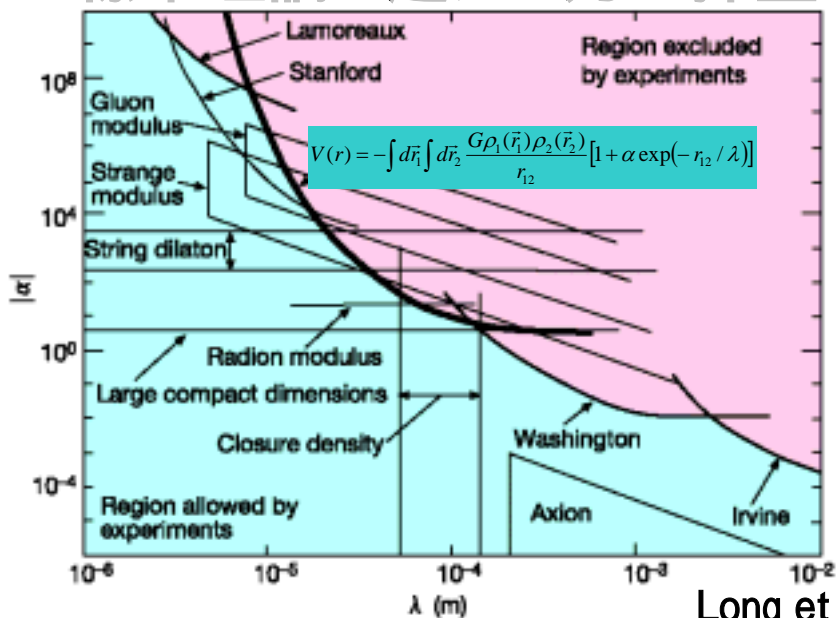
有限温度による補正項 モデルによって異なる予測

Bordag, et. al PRL 85 503 (2000), Bostorom PRL84,40(2000) etc.

・1 μmよりも遠方で有限温度効果が大きい

・実験的に検証されていない

・標準理論を越える力の探査



20nm < <1 μm

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

平面・球面間のカシミール力測定実験比較

Sensitivity to the casimir force

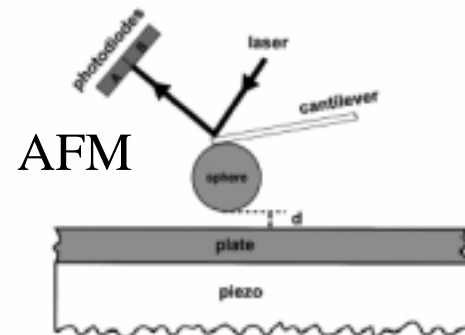
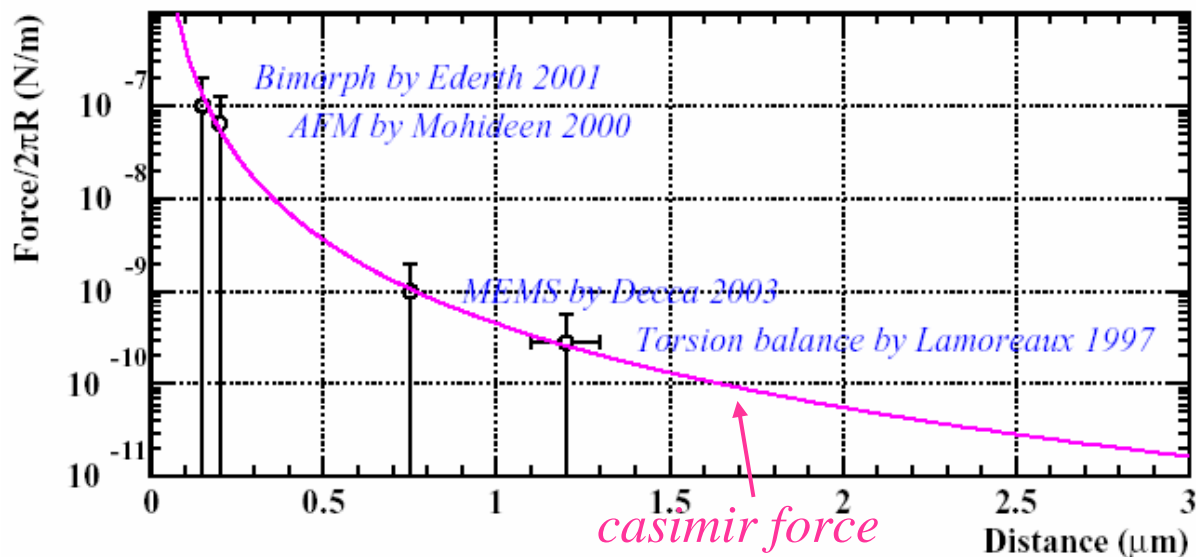


FIG. 1. Schematic diagram of the experimental setup. Application of voltage to the piezo results in the movement of the plate towards the sphere. The experiments were done at a pressure of 50 mTorr and at room temperature.

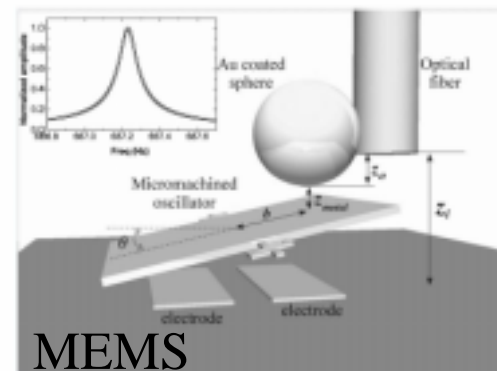


FIG. 1. Schematic of the experimental setup showing its main components, see text. Inset: Resonance curve for the MTO. Also shown is a Lorentzian fit with $Q \sim 8000$. See text for further details.

・小型装置

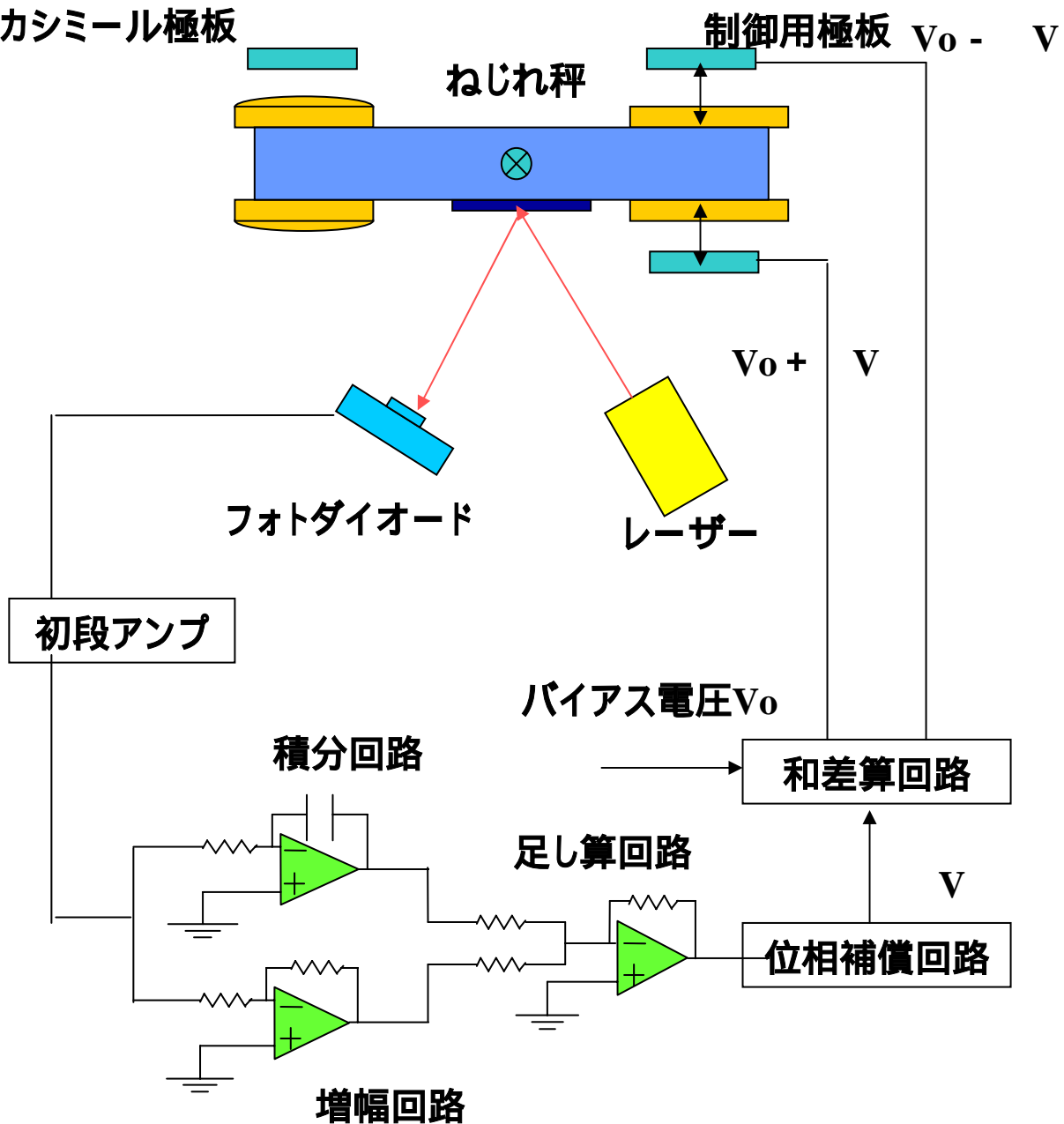
細かいステップ (~ nm) => 近距離で高感度

・ねじれ秤

力の測定感度が高い => 遠距離まで測定可能

ねじれ秤を用いて遠距離カシミール力の精密測定へ

ねじれ秤による測定の原理



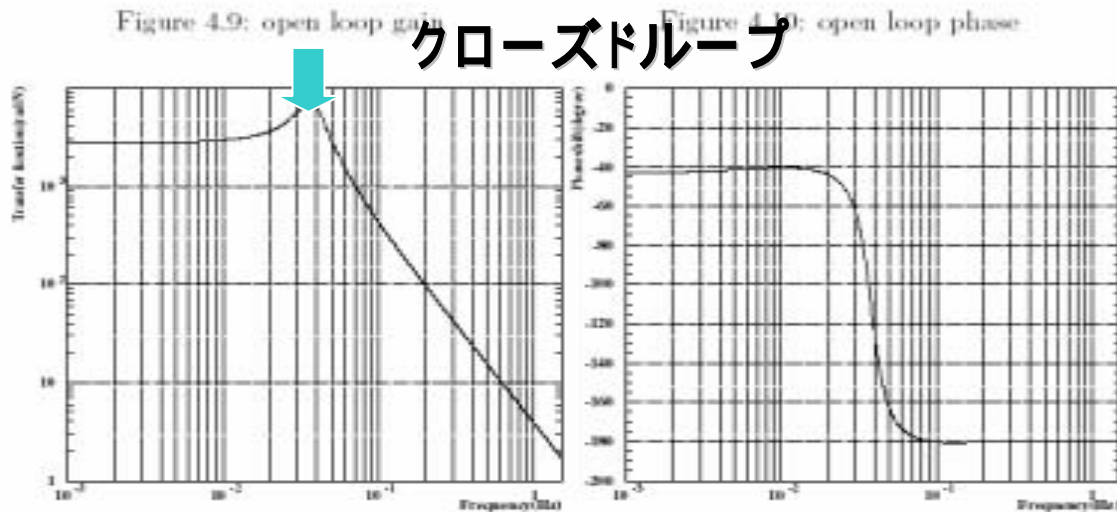
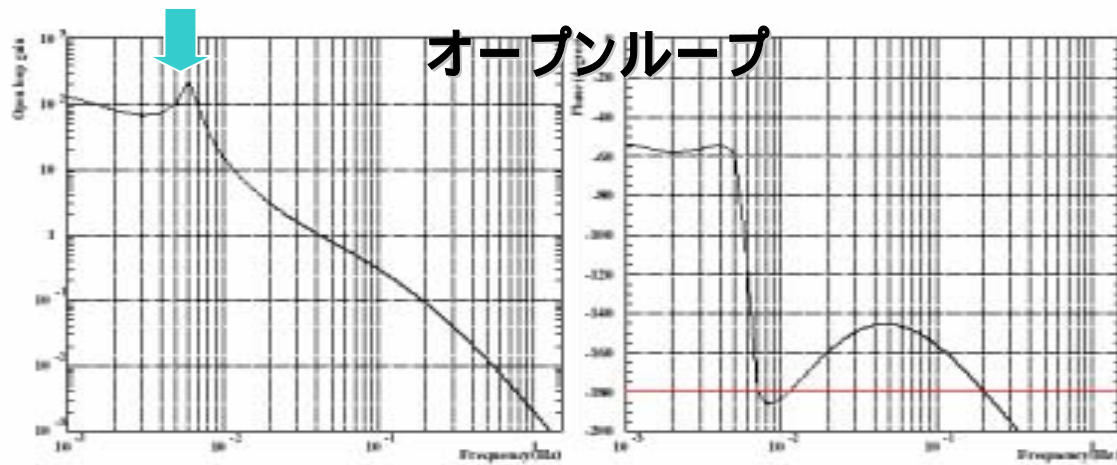
フィードバック制御
[ねじれ秤を常に定位置に]

$$F(\text{極板間の力}) \\ = F(\text{制御による電気力})$$



フィードバック信号を
力の変化量に換算

フィードバックゲインと位相



ねじれの周期 165秒=> 25秒

装置写真

江刺地球潮汐観測施設(国立天文台)



真空チェンバー

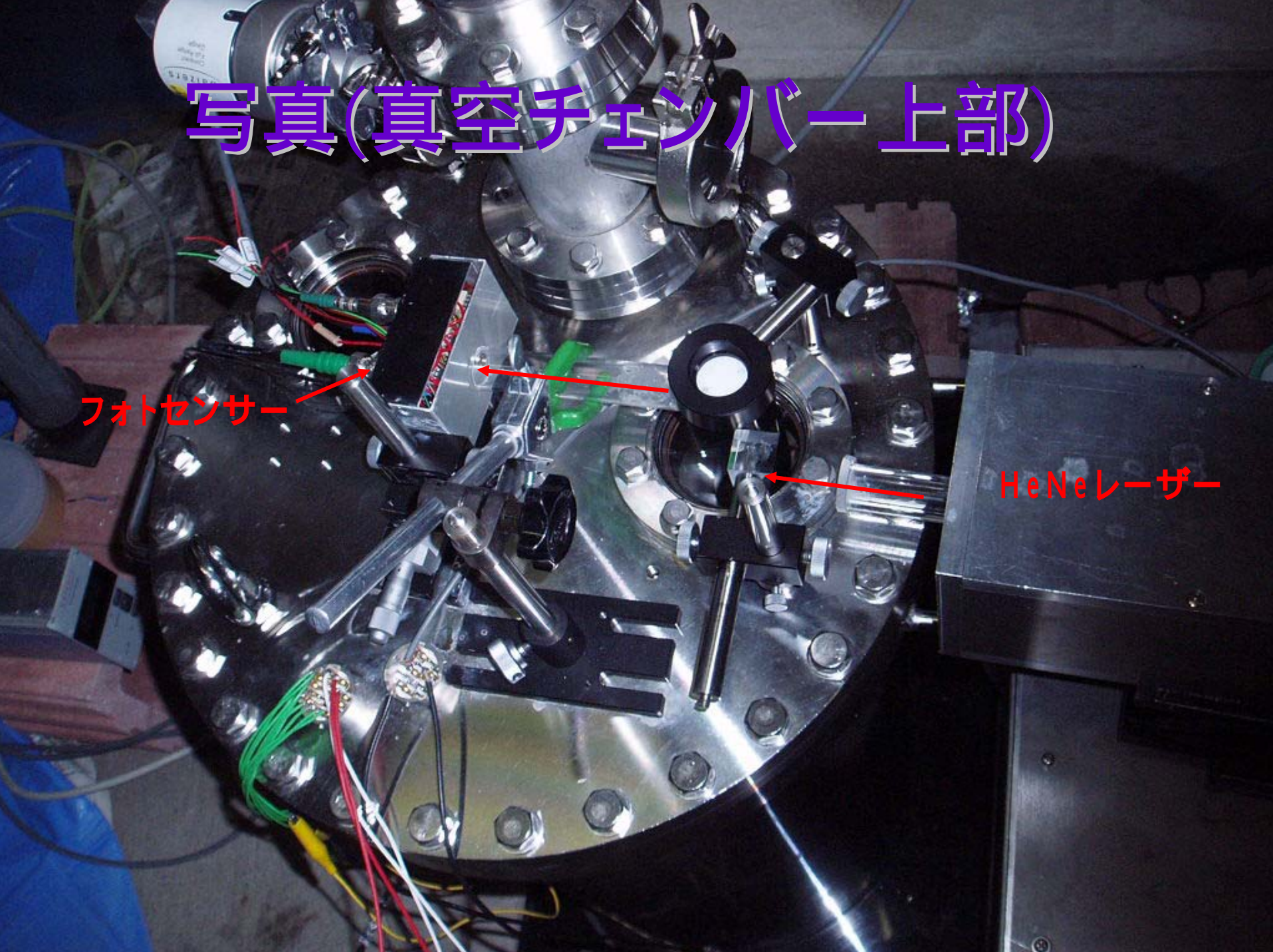


江刺坑道内実験室

写真(真空チェンバー上部)

フォトセンサー

HeNeレーザー



装置写真(真空チェンバー内部)

フィードバック用極板

レーザー光

ねじれ秤

カシミール極板

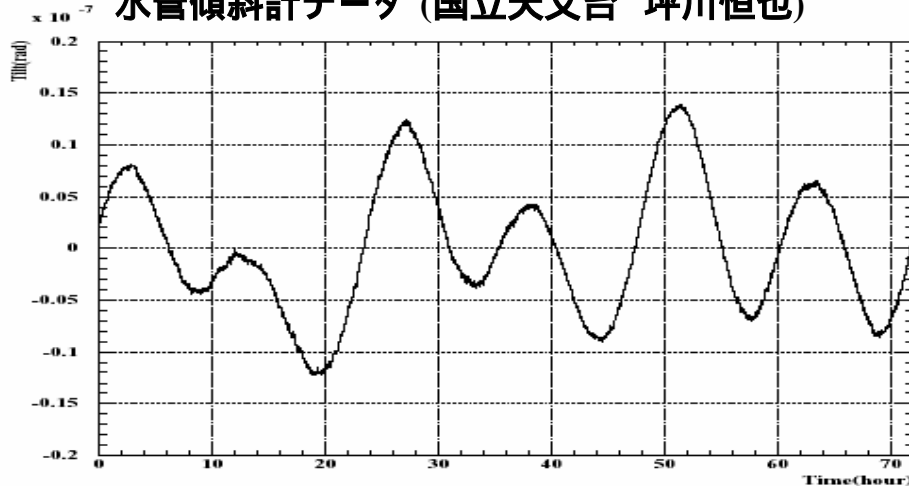
BK7レンズにCr10nm,Au200nmを蒸着

球面 40mm R207.62mm 表面粗度 /4

平面 30mm 表面粗度 /10

江刺での環境ノイズとその影響

水管傾斜計データ (国立天文台 坪川恒也)



傾斜

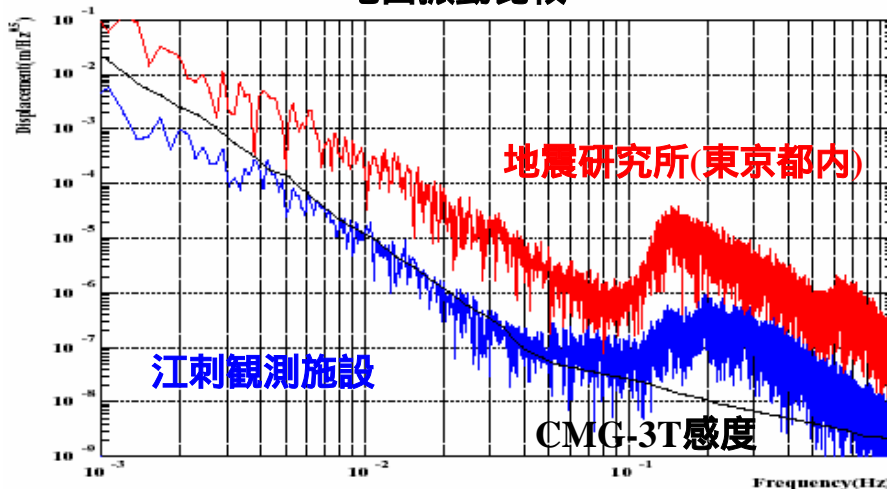
都内の建物 ~ 10 μ rad/day

江刺 < 20 nrad/day

=> 2枚の極板間の変位に換算

$d < 10$ nm/day

地面振動比較



地面振動(1mHz ~ 1Hz)

都内に比べ、1桁以上小さい

=> 2枚の極板間の変位に換算

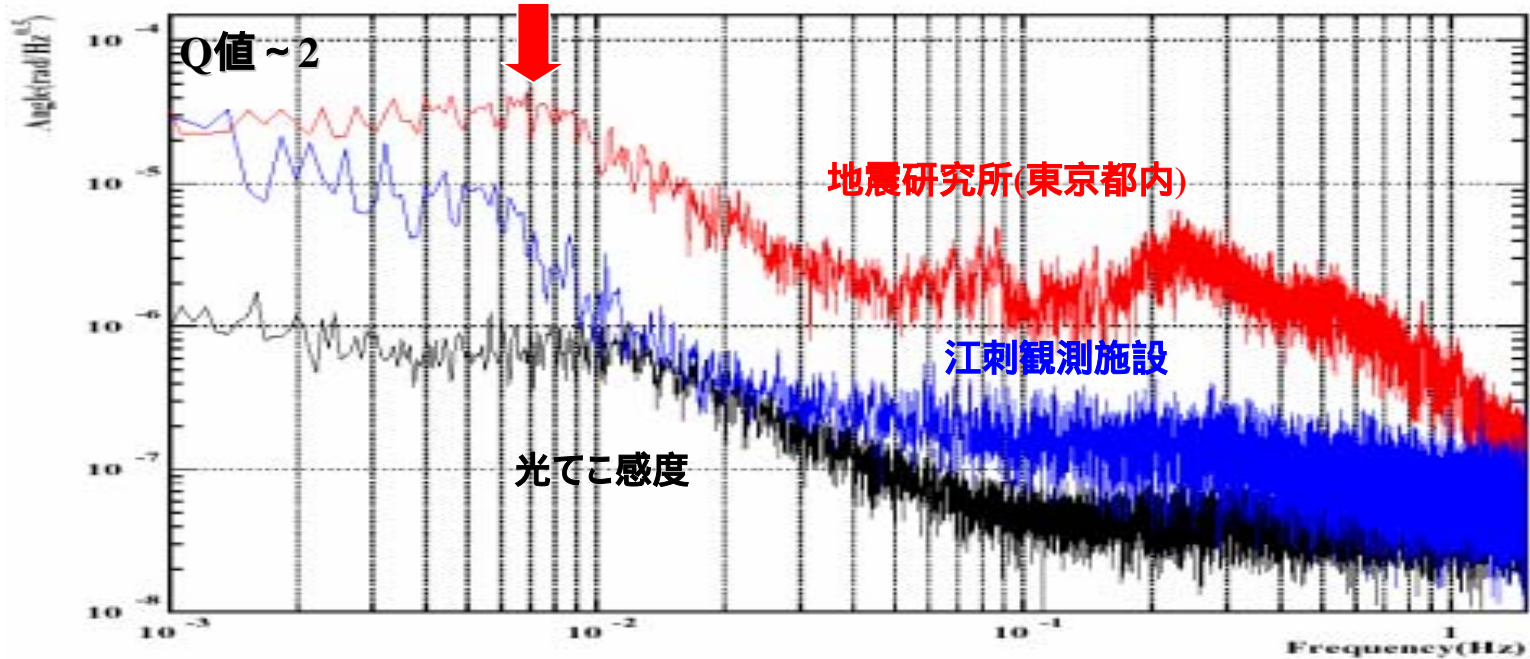
$$\text{伝達関数 } |\tilde{H}(\omega)| = \frac{(\frac{\omega}{\omega_1})^2}{\sqrt{\{1 - (\frac{\omega}{\omega_1})^2\}^2 + \{\frac{1}{Q_1}(\frac{\omega}{\omega_1})\}^2}}$$

$d_{\text{RMS}} < 30$ nm

地面の傾斜及び常時微動の影響は十分小さい

ねじれ振動のノイズ

ねじれ固有周波数 ~ 7mHz



ねじれ振動ノイズ源

$f > 10\text{mHz}$ 光てこ感度

$f < 10\text{mHz}$ 温度 etc

力の測定感度 $f < 10\text{mHz}$ の成分がメイン(積分時間600秒/データ1点)

$$F \sim 3 \times 10^{-11}\text{N}$$

カシミール力の測定の手順

1.接触電位差(2枚の極板間の電氣的なポテンシャル)の測定

力のバイアス電圧依存性の測定(極板間隔一定)

100mV-0mVを10mVステップで Fを測定

1回の測定に1.5時間

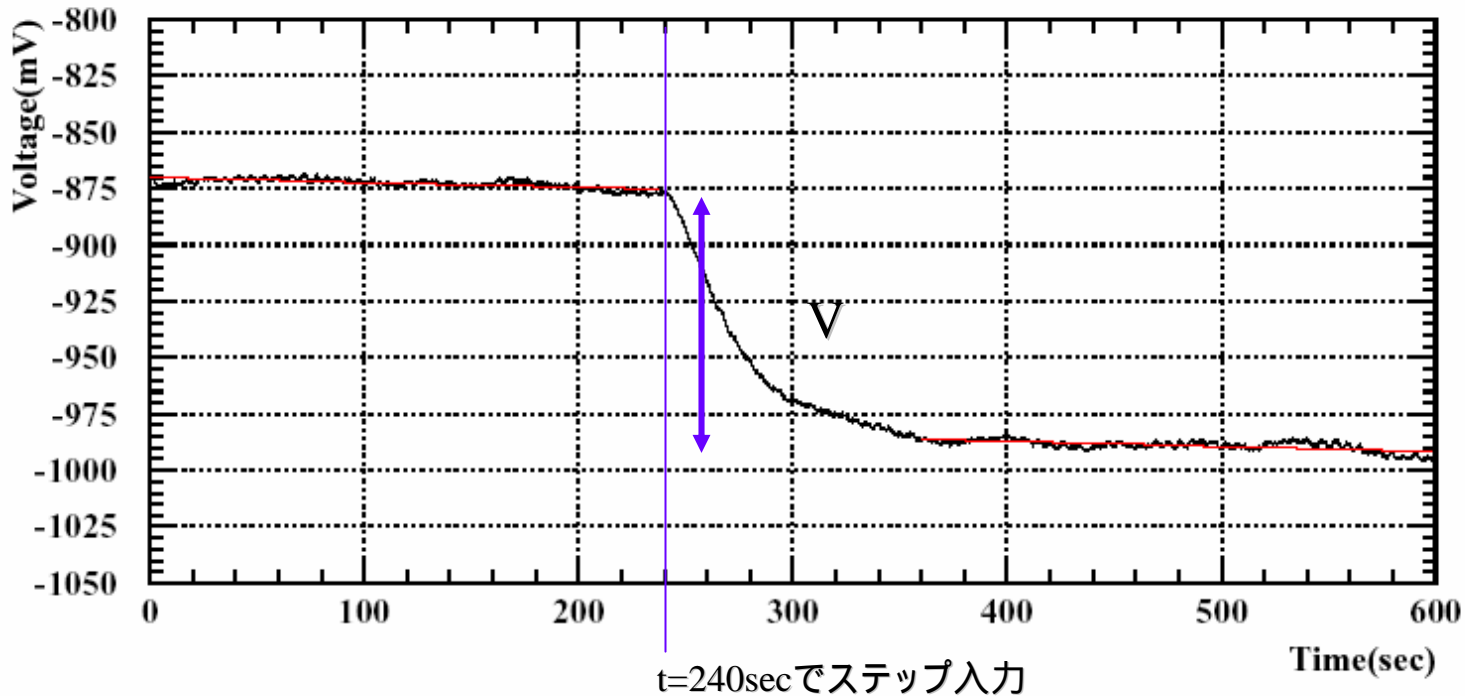
2.カシミール力の測定

力の距離依存性を測定(極板間に逆バイアス電圧)

遠方4.5 μm 付近から0.3 μm づつ接近させて Fを測定

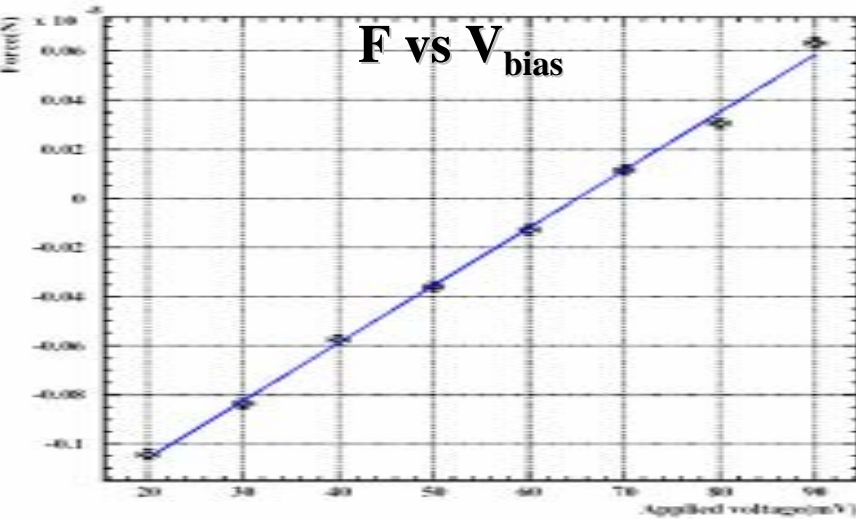
極板が接触するまでの1サイクルの測定(4.5-0.5 μm)で3時間。

1点のデータ点の解析



1. 0 ~ 240sec 及び 360 ~ 600secの範囲をリニアフィット
2. フィット直線をt=240secまで外挿 Vを求める
3. Vを Fに換算 $1\text{mV} \Rightarrow 8.7 \times 10^{-12} \text{ N}$

接触電位差の測定



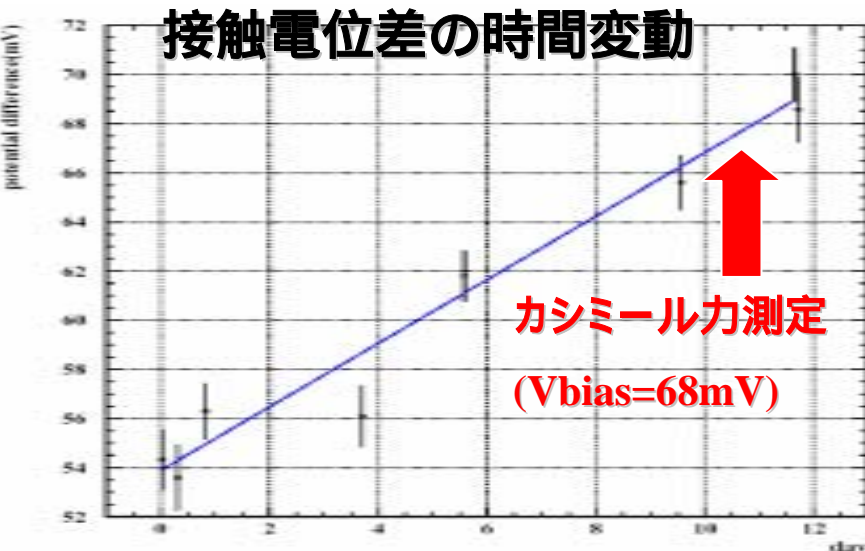
Fの V_{bias} 依存性を測定

$$F_e(d) = -\frac{\pi\epsilon_0 R(V_{bias} - V_{cpd})^2}{d}$$

$$\begin{aligned} \Delta F(V_{bias}) &\equiv F_e(V_{bias} + \Delta V) - F_e(V_{bias}) \\ &= \frac{2\pi\epsilon_0 R\Delta V}{d}V_{bias} + \frac{\pi\epsilon_0 R}{d}(\Delta V^2 - \Delta V V_{cpd}) \end{aligned}$$

1次式でフィット

=>接触電位差 V_{cpd} の決定

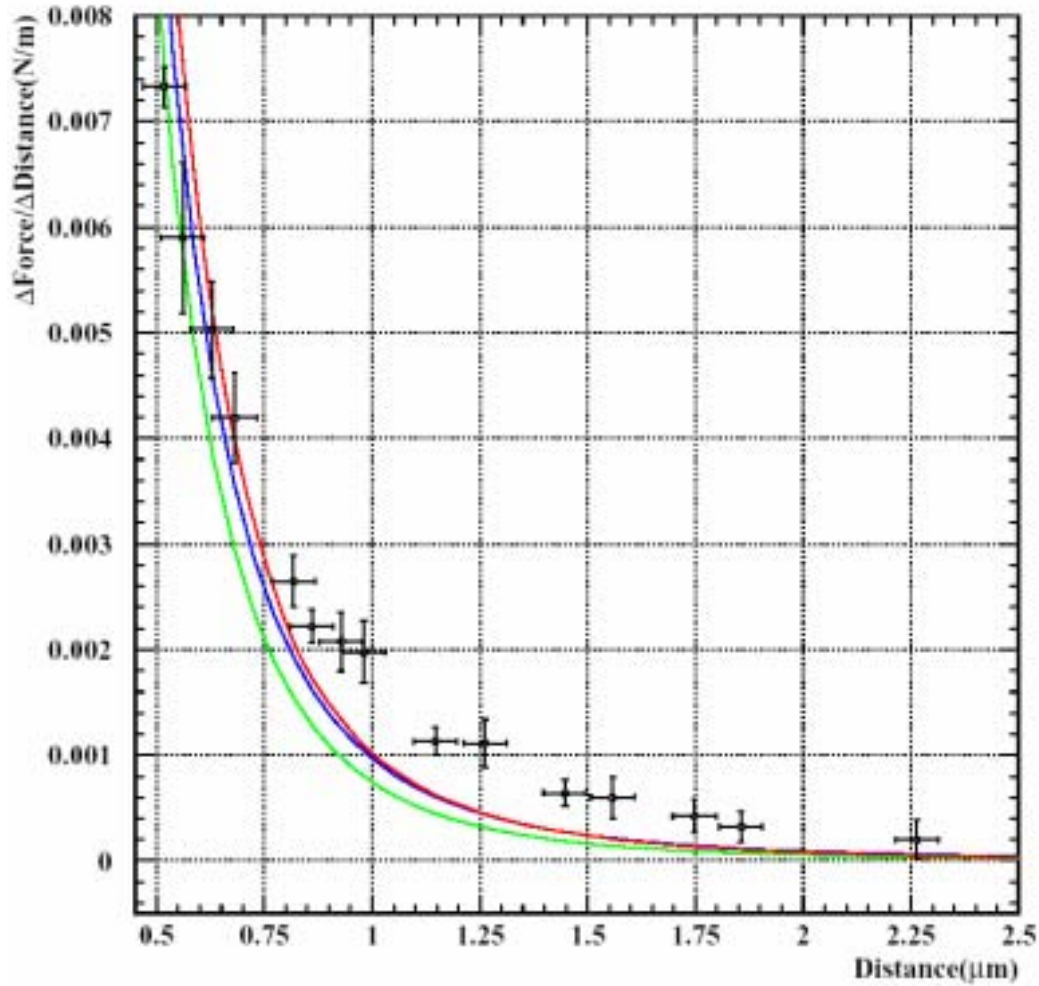


接触電位差のドリフト + 1.2mV/day

バイアス電圧 $V_{bias}=68\text{mV}$

残留電気力 < 2mVの電気力

0.5-2.5 μm でのデータ例



解析

力の変化量/ステップをプロット

オフセットの処理

2.5 - 4.5 μm の範囲

でフィットして引き算

データは解析中

系統誤差の評価

まとめ

- ・2枚の金属極板間の力を0.5-4.6 μm の範囲で測定
- ・測定結果は解析中
- ・系統誤差を検討中
- ・データの統計量の増加($N > 1000$ 点)へ