

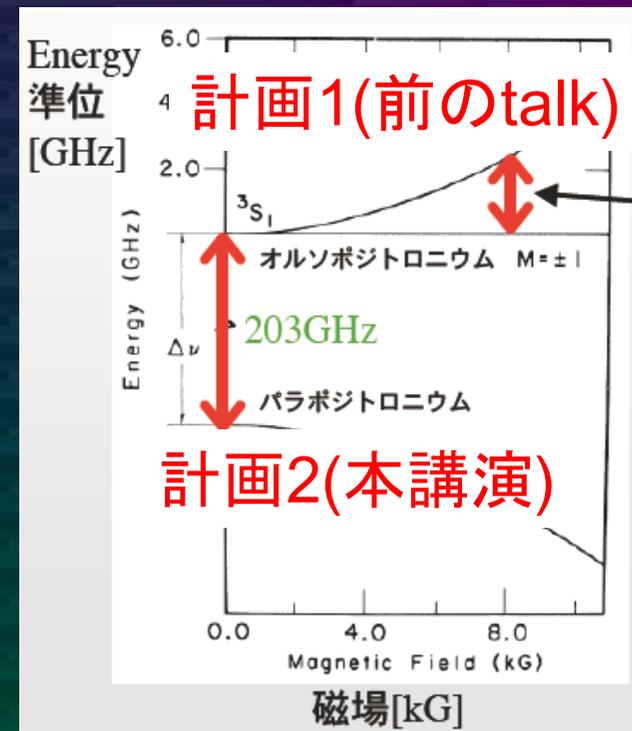
サブテラヘルツ波を用いた ポジトロニウム超微細構造の 精密測定

末原 大幹 (東大ICEPP)

秋元銀河, 石田明, Mark M. Hashimoto, 田川智博, 浅井祥仁(東大理),
難波俊雄, 小林富雄 (東大ICEPP),
斎藤晴雄 (東大総合文化), 吉田光宏 (KEK加速器),
出原敏孝, 小川勇, 小林真一郎 (福井大遠赤センター),
S.Sabchebski (ブルガリア科学アカデミー)

実験計画2: 203 GHz 直接測定

- Zeeman効果を用いず、磁場なしで
203GHz高周波を使い直接測定 → **世界初**
 - 磁場の不定性・不均一性による誤差がない
- 鍵となる技術
 - **高周波源ジャイロトロン**
 - kWクラスの出力が既に実現されている
 - 単色性高, 周波数変調可能
 - **1次元ファブリー・ペロー共振器**
 - ミリ波の直進性を利用
 - RFより高いQ値を実現可能



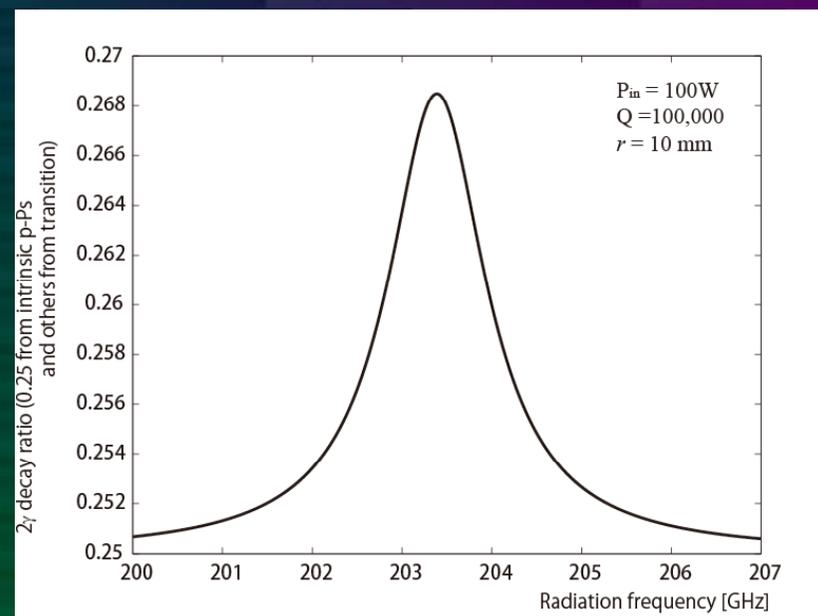
203 GHz 電磁波での遷移確率

- 状態間の遷移確率は周波数に反比例
→ 静磁場+RF(2.8GHz)の測定に比べ不利
- ファブリーペロー共振器
→ 静磁場+RFに比べ高いエネルギー密度を得られる

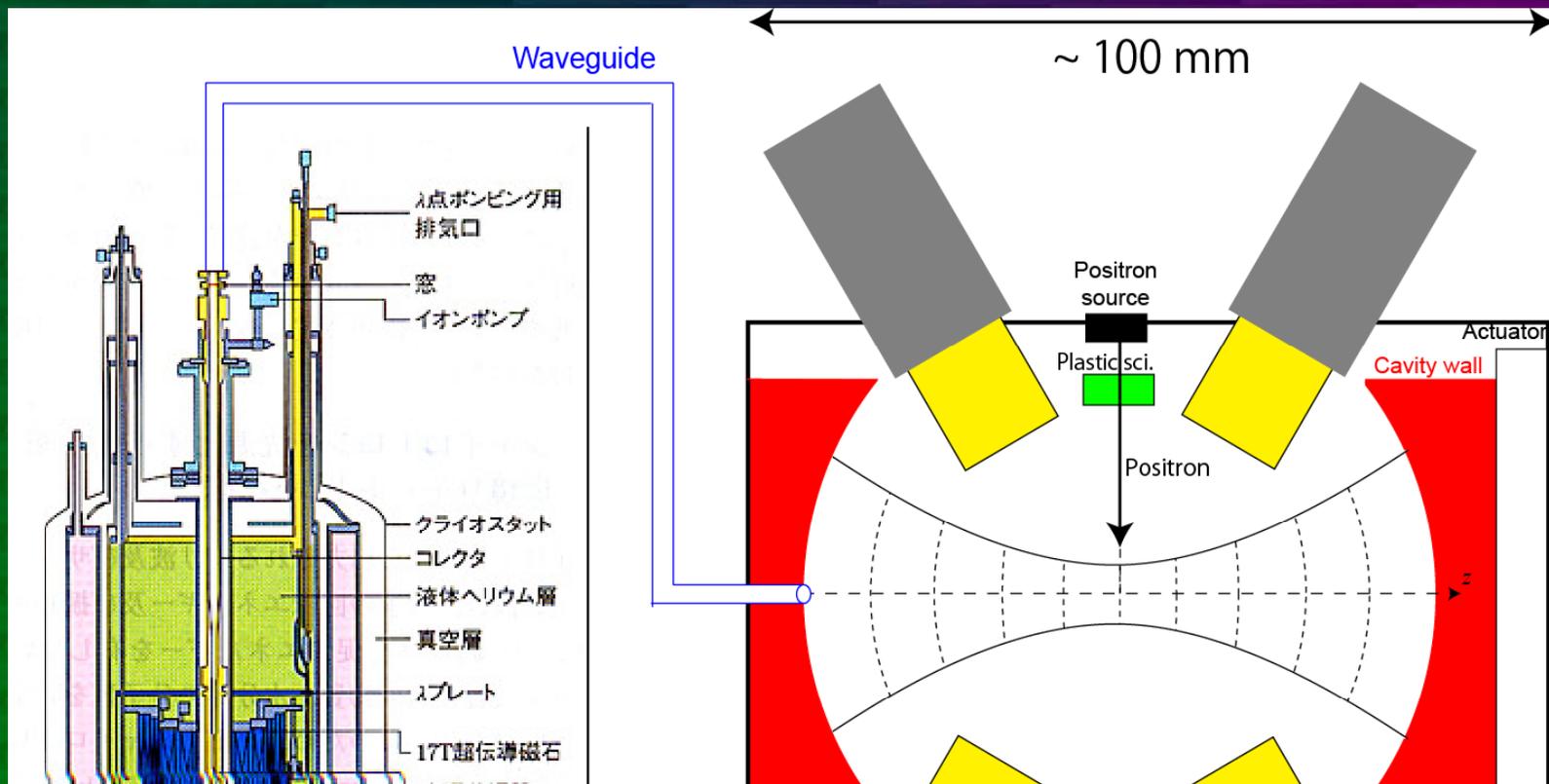
設計値

$P_{in} = 100 \text{ W}$, $Q = 10^5$,
 $r = 10 \text{ mm}$
(共振モードの収束半径)

→ 遷移確率は約2%
十分精密測定可能なレベル

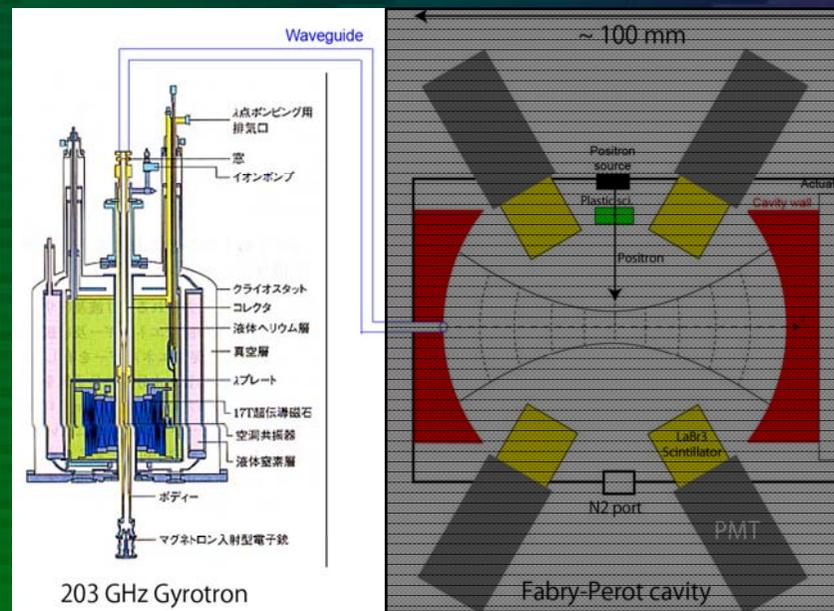


セットアップ概念図

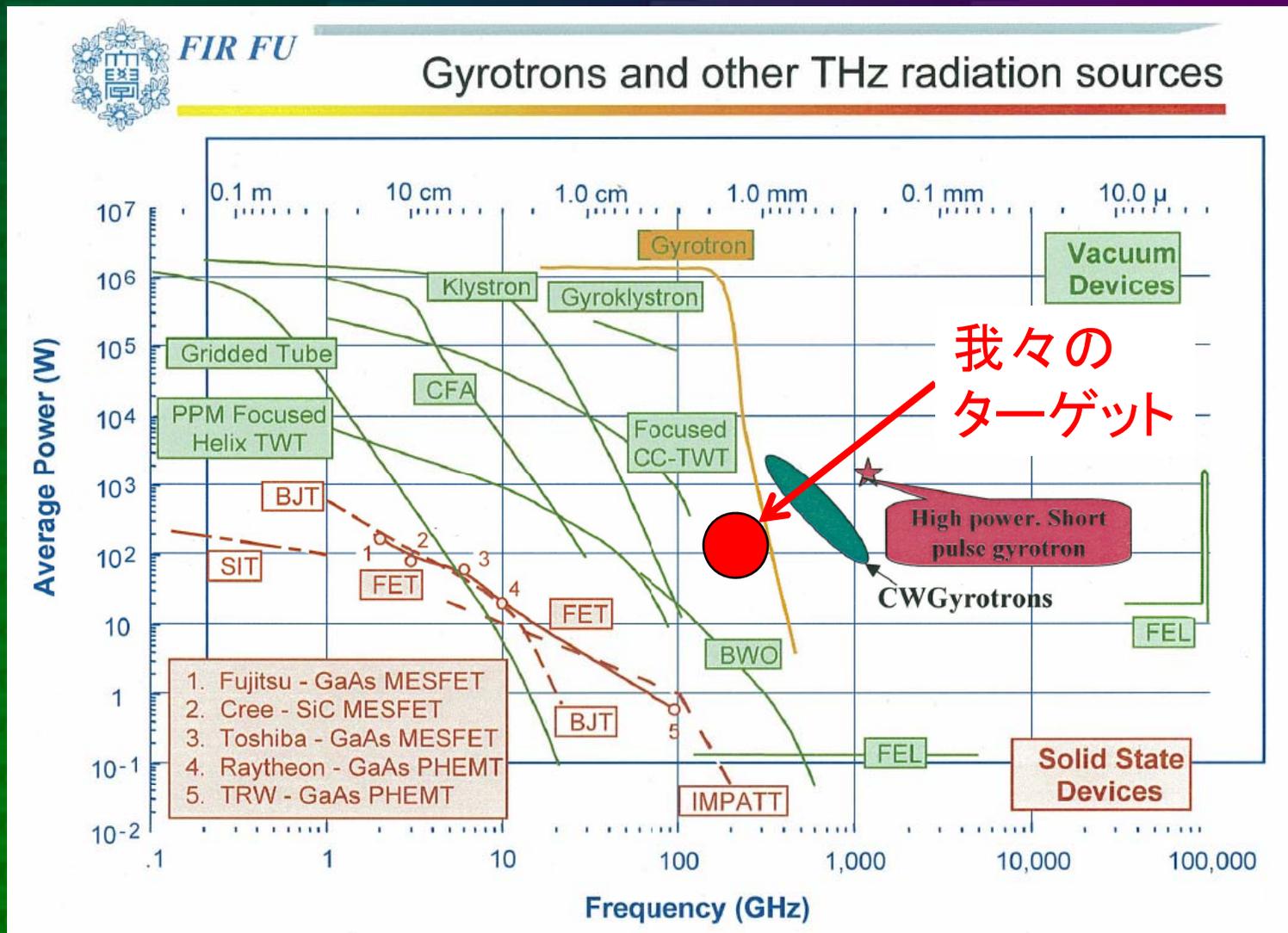


- 203 GHzジャイロトロン出力を共振器に接続
- 陽電子源、 γ 線検出器は静磁場による測定とほぼ同様のものを使用可能 (本講演では略)

ジャイロトロン

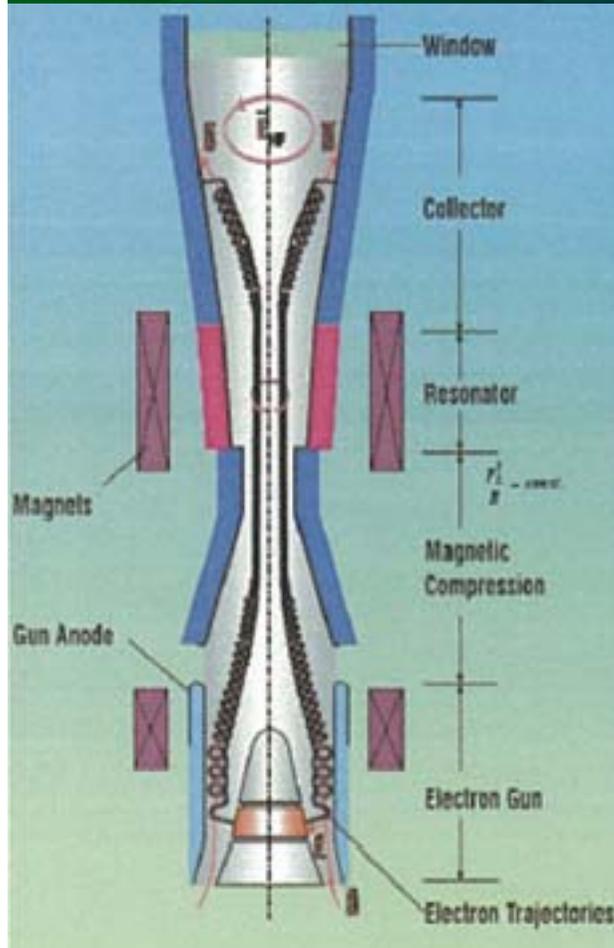


ジャイロトロン(1) 高周波源の比較



200 GHz付近で高出力を得られるのは現状ではジャイロトロンのみ。

ジャイロトロン(2) 動作原理



- 電子銃から出た電子は強力な磁場によりサイクロトロン運動をする
 - サイクロトロン周波数 $f_c = eB/2\pi m_0\gamma$
 - 本実験で使用するジャイロトロンは $B_{\max} = 8T$
- 磁場中心の横方向にサイクロトロン周波数で共振する共振器を形成しておくとその周波数の電磁波が発振する
- 発振した電磁波は上部のウインドウから取り出す。使用済みの電子ビームはウインドウ下部のコレクタに収集される
- 出力強度の変調: 電子銃の電子放出頻度を変える
周波数変調: 磁場・電子速度(γ)を変える
(変調幅が広い場合共振器にも変調機構が必要)

ジャイロトロン(3) 開発状況

- 福井大学遠赤外センターと共同で開発。
- 製作は終了し、エージング・動作テスト中。
- 定格出力100W, 200W程度まで出せる可能性も
 - 現在発振に成功したところ。出力8.5W。
 - パワーアップのためのエージング中。
- 中心周波数203.08 GHz (実測値)。
 - 周波数変調幅は数百MHz程度の予定。未計測。
 - 数GHzの変調可能なジャイロトロンもすでに製作されており今後改造により変調幅の拡大も可能。
- 単色性は極めて高く、10kHz程度。

ジャイロトロン(4) 写真

約2m



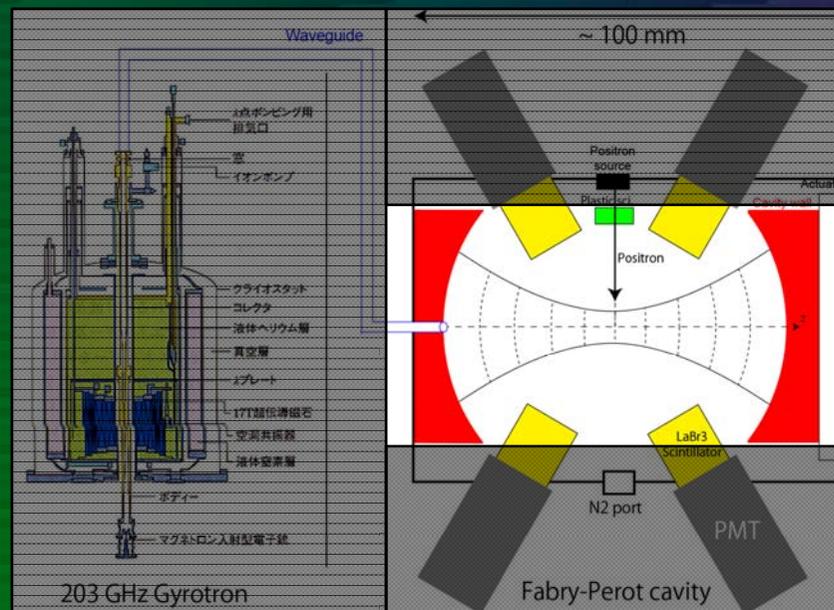
電源・制御部



実験室

本測定用に開発されテスト中の
ジャイロトロン(Gyrotron FU CW V)

ファブリー・ペロー共振器

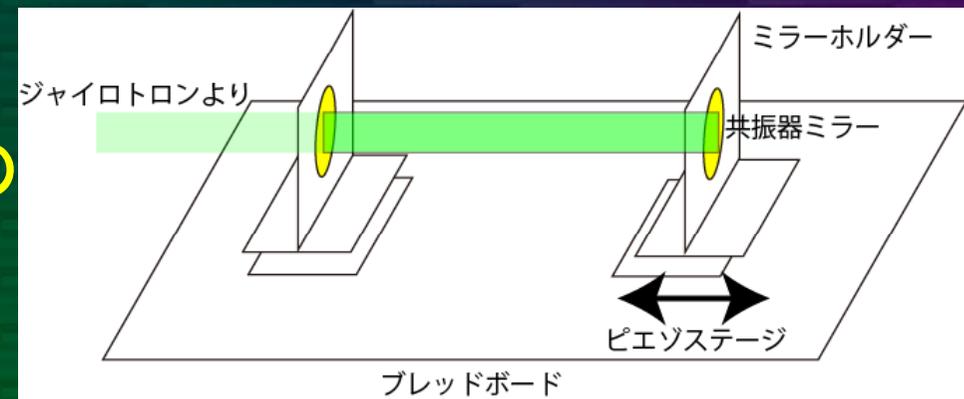


1次元共振器の検討・開発課題

- 検討・開発課題

- ジャイロトロンからの高周波をどう共振器内に導入するか(入力カップリング・導入損失の低減)
- 共振器形状、高い反射率を得られる共振器ミラーの検討(エネルギー蓄積効率の最大化)
- 共振器長の調整(ピエゾステージ)

まずは線源・測定器のない状態で共振器を作り、目標のエネルギー密度を達成することを目標とする。



共振器テスト概念図

カップリングとQ値

Q値: 空洞のエネルギー蓄積能力を示す

$$Q = \omega \frac{W}{\delta W}$$

ω : 周波数, W : 蓄積エネルギー,
 δW : 単位時間あたりに失うエネルギー

$$\frac{1}{Q_l} = \frac{1}{Q_{in}} + \frac{1}{Q_{ext}}$$

Q_l : 負荷Q(トータルでのエネルギー蓄積能力),
 Q_{in} : 内部Q(空洞内での損失に起因するQ),
 Q_{ext} : 外部Q(空洞外への放出に起因するQ)

- 内部Q: ミラーの反射率, 共振モードの回折損失が影響
- 外部Q: 外部との結合が影響(結合小→Q大)

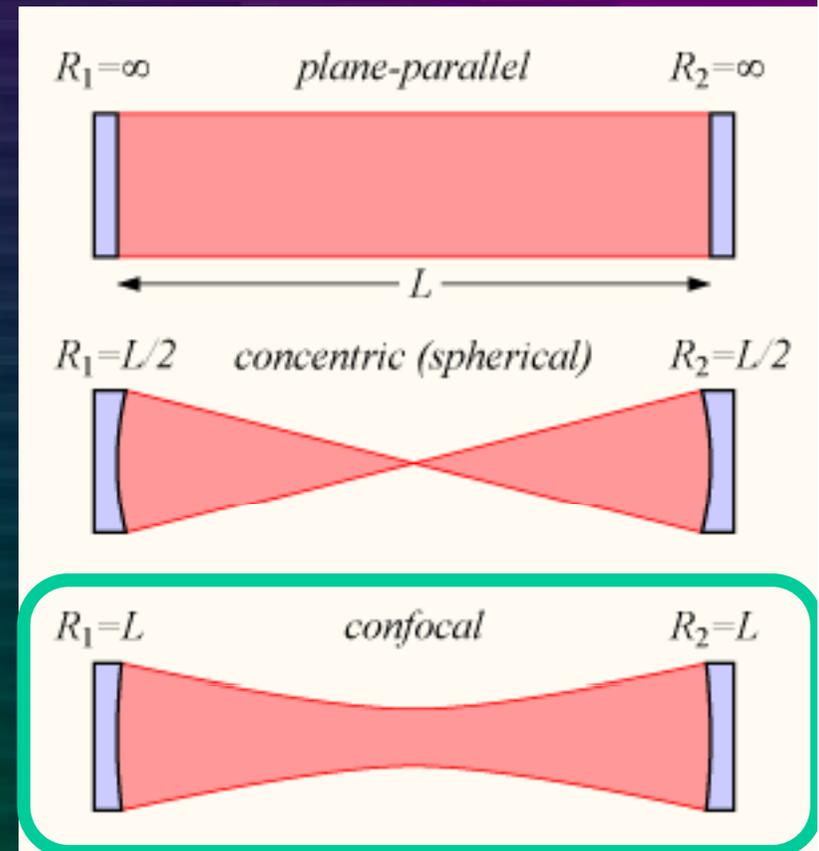
入力損失: 入力パワー中共振モードに入らない部分

- 反射損失: Q_{in} と Q_{ext} が一致しないと生じる
- 回折損失: カップリング方法により重大な損失となる

Q大、入力損失小→蓄積エネルギー大

Confocal共振器

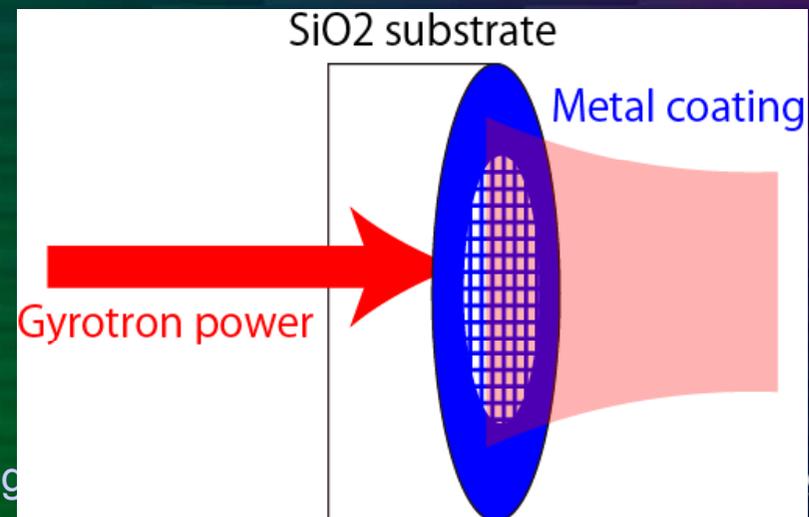
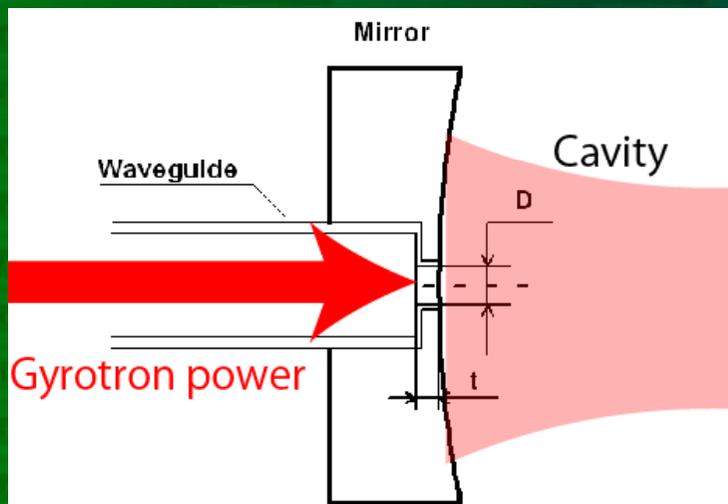
- Confocal共振器(右図下)
 - 凹面ミラー2枚で構成
 - ミラーの焦点距離はミラー間距離に等しい
- Confocal共振器の特徴
 - ミラー間の角度が完全に平行にならなくても回折損失があまり増えない(平行平板と比べて)
 - 中心でのビームサイズがさほど小さくならない(concentricと比べて)



出典: wikipedia

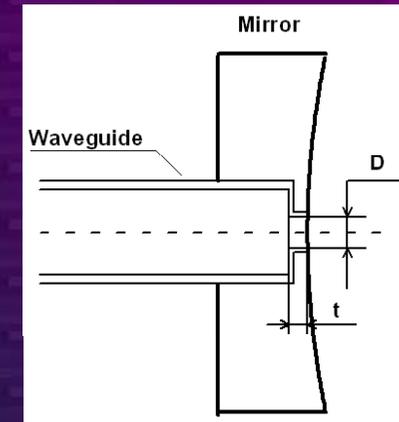
入力カップリング

- ミラーを2枚向かい合わせただけでは共振器にジャイロトロンのパワーを供給できない
- 二つの方法
 - ミラー中央に波長以下の小孔をあけ、小孔を通してジャイロトロンのパワーを供給
 - ミラーを波長より十分細かい薄膜メッシュにし、メッシュの裏側からジャイロトロンのパワーを供給



小孔による結合

- 銅板の凹面ミラーに小孔をあけ、そこにパワーを供給する単純な方法。
- 小孔径 \propto カップリング: 穴径小が必要
- 波長以下の径では高周波が減衰
→ 小径部分の厚みを減らすことで抑制可能
- **入力時の回折損失大**
波長以下の径では共振器内のモードが球面波に
→ 大部分は対向ミラーに届かない
- 製作は容易: 穴径 $D=300\mu\text{m}$, $t=500\mu\text{m}$ のものを製作中→10月上旬には完成予定



メッシュによる結合

- 石英凹面基板の上に銀メッシュを蒸着

$$R \approx 1 - \left(\frac{2g}{\lambda} \ln \frac{g}{2\pi a} \right)^2$$

R: 反射率 λ : 波長(1.5mm)
a,g: メッシュパラメータ (右図)

$2a=10\mu\text{m}$, $g=50\mu\text{m}$ で

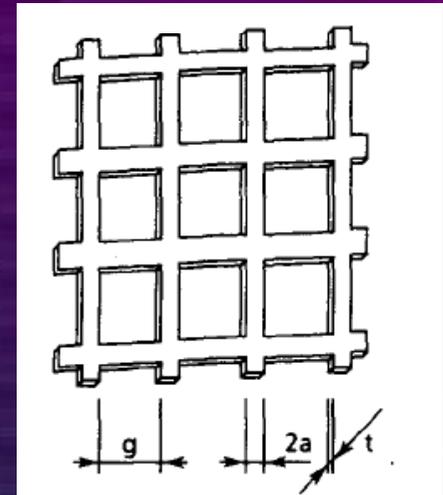
反射率99.9% $\rightarrow Q_{\text{ext}} = 425000$

上記パラメータを中心に性能評価を行う。

- 入射時の減衰は少なく、回折損失もない

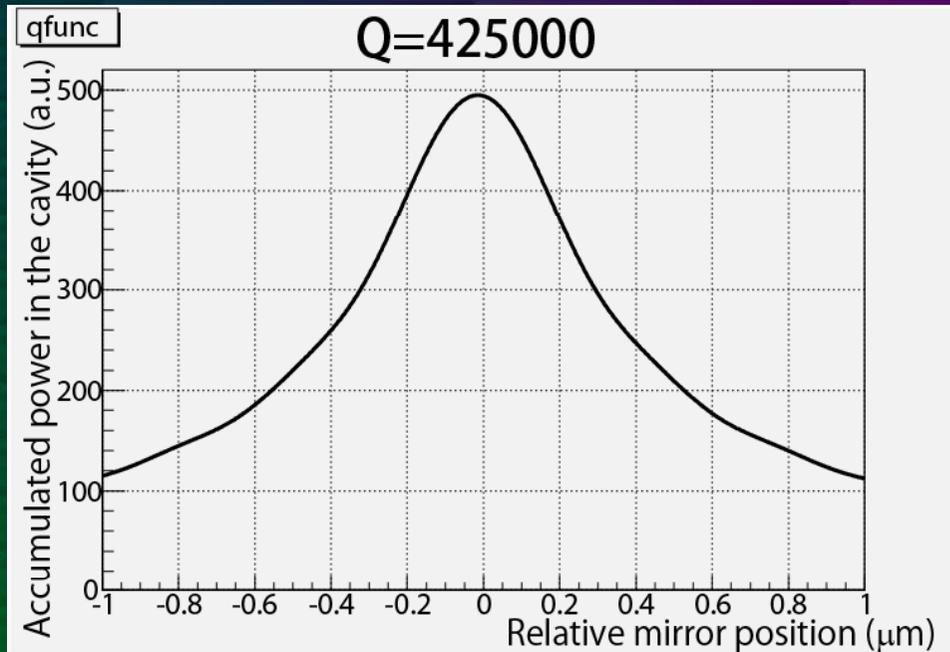
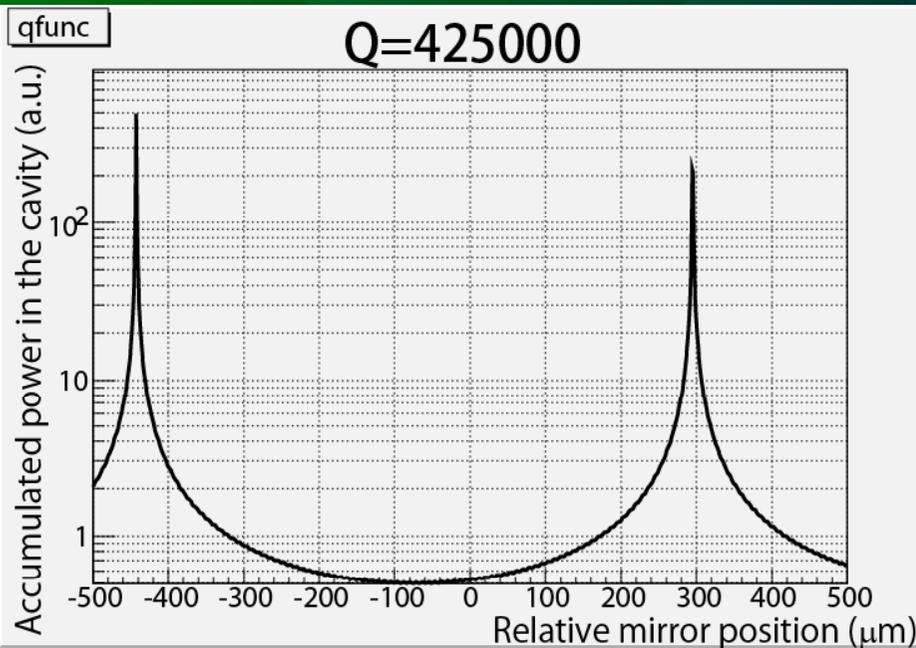
メッシュ壁面の表面抵抗が金属ベタ壁面より高く
 Q_{in} が下がる懸念あり、実測が必要

- 蒸着はフォトマスクを用いて行う予定。
凹面基板が今週届くのでこれを用いて蒸着試験。
- 年内に製作完了し、共振器の試験を行いたい。



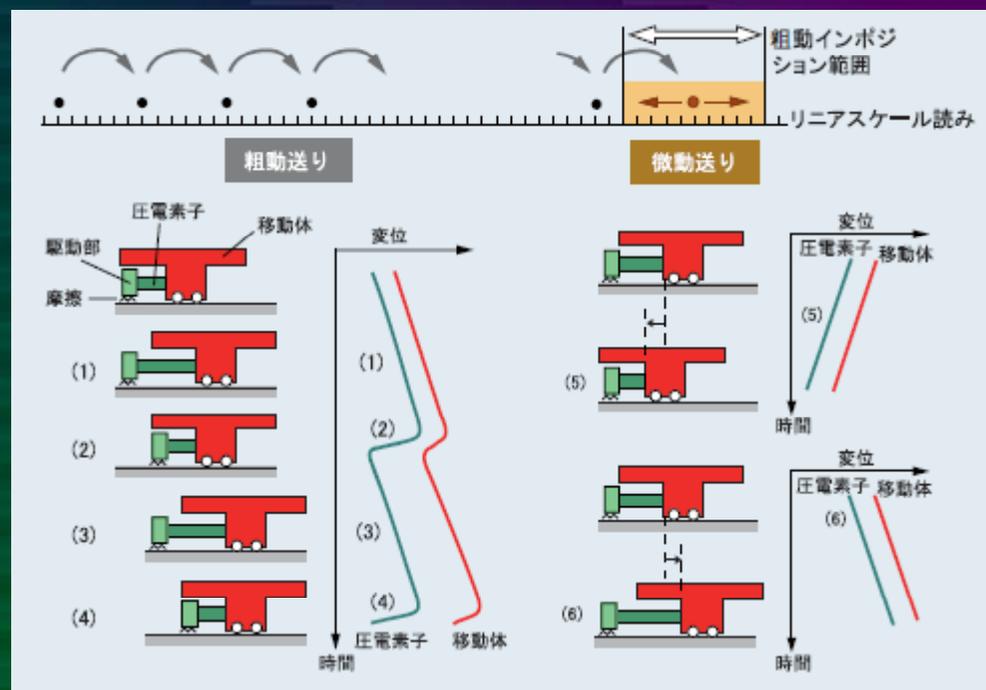
共振周波数の制御(1)

- 高いQ値 → ミラーの位置の精密制御が必要
Q=425000: < 100 nm の位置精度(下図)
- 共振周波数の変更 → ミラーの移動が必要
移動距離: 波長/2以上 (0.8 mm)



共振周波数の制御(2)

- 精密(<100 nm)かつ長ストローク(>0.8mm)の Piezo ステージ: SIDM アクチュエータ
- 使用予定ステージ:
 - ストローク: 15mm
 - 分解能: 10nm
 - 耐荷重: 2kg
 - 要求仕様を満たしている
- このステージの性能評価を行った。

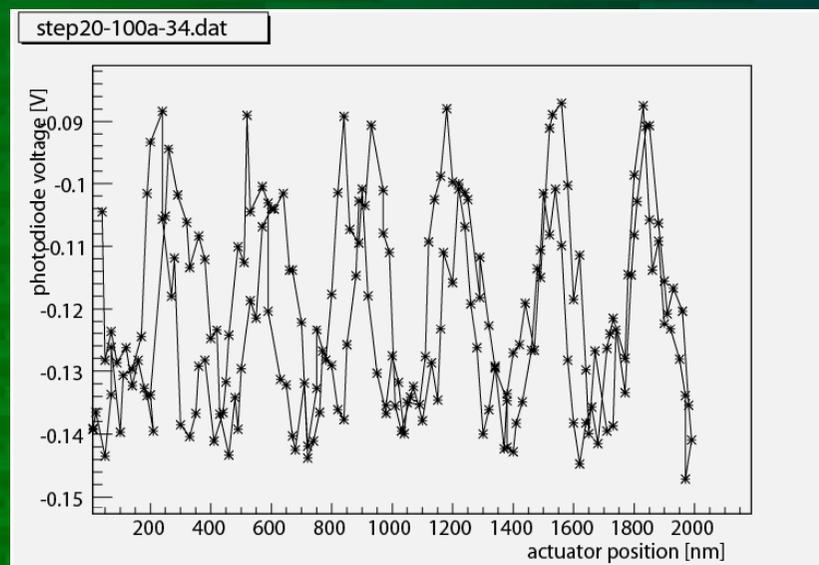
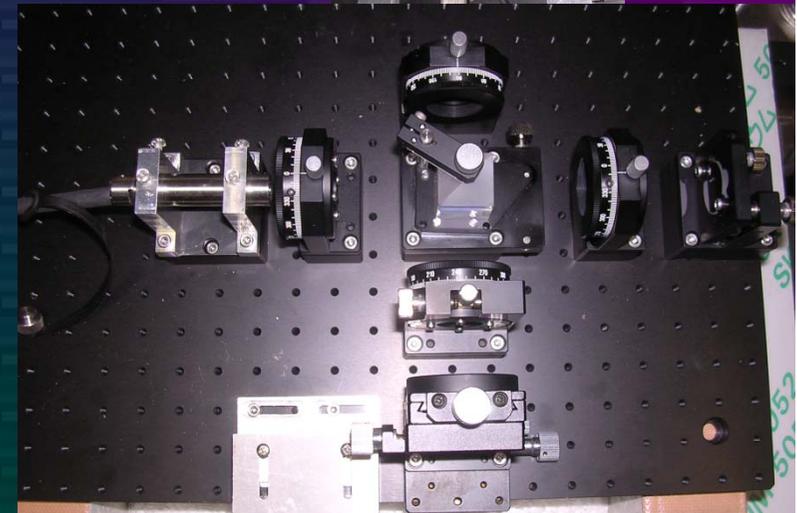


(株)ナノコントロール

SIDMアクチュエータの動作原理

共振周波数の制御(3)

- 性能評価項目:
 - 応答・整定時間
 - 荷重による応答変化
 - 位置精度(スケール読み&マイケルソン干渉計)



要求性能を概ね
満たすことが確認できた。

共振器試験と今後の予定

- ~9月末: ジャイロトンエーシング & 単体試験
共振器設計確定, 製作
- 10月中旬: 共振器試験(第1回)
 - 銅板ミラー+小孔結合でQ値を測定、予測値と比較
 - 共振器パラメータ(ミラー曲率、入力カップリング、ミラー間距離等)を変えてQ値等の変化を観測
 - 周波数変調&追従機構の試験
- 12月頃: 共振器試験(第2回)
 - メッシュ蒸着ミラーを用いて試験
- 年度内: HFS測定(第1回) – 直接遷移の観測が目標
- 2009年度: 光源・共振器等の改善、統計の蓄積により、静磁場による測定と同等精度のHFS計測を目指す

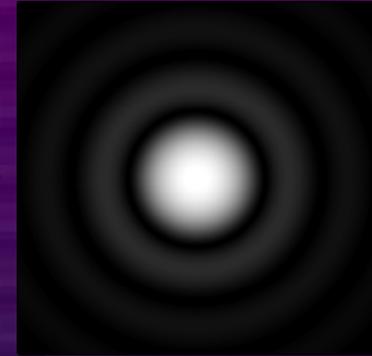
まとめ

- Ps-HFS測定計画として、3GHzのRF電磁波と静磁場を用いた従来の方法の他に、203GHz電磁波を用いた直接測定を計画・準備中。
- HFS直接遷移の観測が可能なレベルの光源(ジャイロトロン)はほぼ準備が整った。
- ジャイロトロンのパワーを蓄積するファブリー・ペロー共振器の設計もほぼ終了・製作中。
- 10月・12月には共振器の試験を行い、年度内に初回のHFS観測、2009年度には静磁場による測定と同等の測定精度を目指す。

**Thank you
for your attention!**

YOBI

回折(Airy disc)



- 円形開口による回折:ベッセル関数

$$I(\theta) = I_0 \left(\frac{2J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} \right)^2 = I_0 \left(\frac{2J_1(x)}{x} \right)^2$$

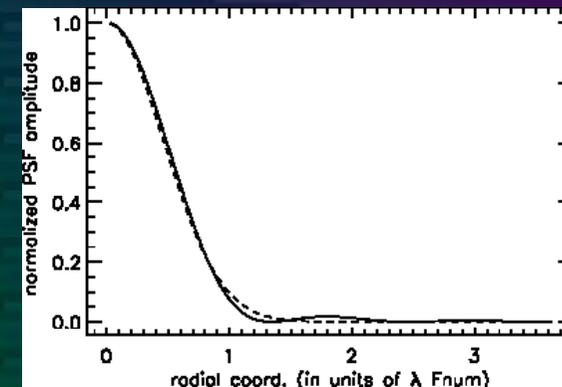
- 最も内側の暗部が来る角度

$$\sin \theta = 1.22 \frac{\lambda}{d}$$

- 最も内側の暗部より内部は対手のミラーに届くようにするには(見込み角0.25rad)

$$\phi > 5\lambda = 7.5 \text{ mm}$$

- 中心付近はわりとガウシアンに近い



Q値どこまでいけるか

- ロス率0.1% → $Q=425000$
 $Q=100000$ → ロス率0.425%
(Cavity length=10cmの場合)
 - Cavity lengthを変えるとQは変わるが
エネルギー密度は変わらない(当たり前)
- 銀が抵抗値最小: 反射率99.8-9%
(テラヘルツ総覧のグラフ)
- メッシュによる反射率の低下は？
表面の凸凹による抵抗率の変化は？

TS102 ナノコントロール

圧電素子の一方を摩擦保持し、他方に移動体を取り付けます。

粗動送り

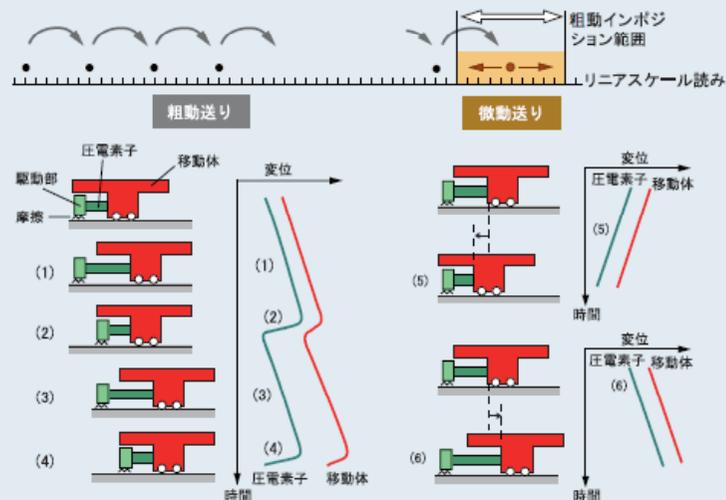
- (1) 圧電素子をゆっくり伸ばすと摩擦保持力によって移動体は右に移動します。
- (2) 次に圧電素子を急激に縮めると、慣性によって移動体はほぼ元の位置にとどまり摩擦保持側が右に移動します。
- (3) 再び圧電素子をゆっくり伸ばすと摩擦力で移動体が右に移動します。
- (4) 圧電素子を急峻に縮め摩擦側を右に移動させます。

以上の動作を高速に繰り返すことによって移動体は右に進み、粗動インポジションに入った直後、微動制御に移ります。

微動送り

- (5) (6) 圧電素子にサーボ電圧を印加して指令値ヘナノレベルで位置決めを行います。

停止後もリニアスケールの信号をフィードバックし位置を制御維持します。圧電素子への駆動電圧波形を制御するだけで粗動と微動の両方が同時に切り替わり、長ストロークと高分解能が同時に且つスムーズに達成できます。



スライダ
Slider

TS102

ストローク
Travel Range **15mm**

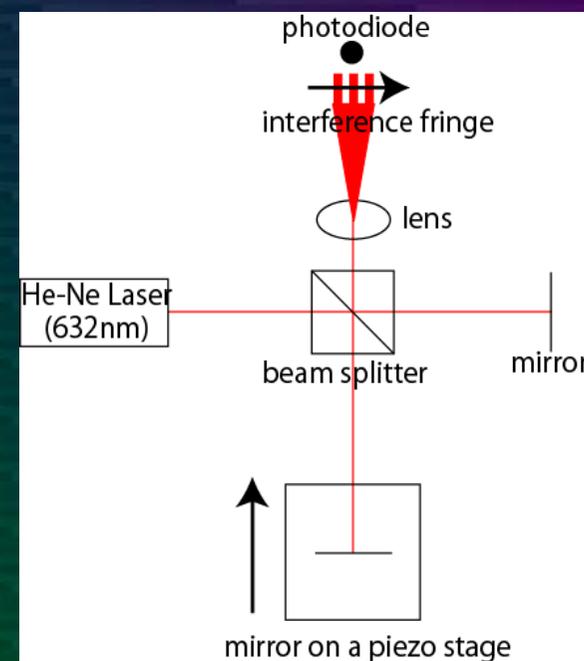
本体サイズ
Body Size **60×60×24mm**

型 式		Model	TS102-G
精度仕様	内蔵変位センサ	Displacement Sensor	リニアスケール/Linear Encoder
	ストローク	Travel Range	15mm
	外形サイズ	Dimensions	60 × 60 × 24mm
	分解能	Resolution	10nm
	繰り返し精度	Repeatability	±20nm
	ピッチング	Pitching	25"
構造仕様	ヨーイング	Yawing	15"
	最大移動速度	Maximum Speed	10mm/sec
	推力	Thrust	1N
	耐荷重	Recommended Load	2kg
	ガイド機構	Guide Mechanism	クロスローラガイド/Cross-roller
	リミットスイッチ	Limit Switch	有/Provided
本体材質	Body Material (Finishing)	アルミ(黒アルマイト処理)/Aluminum(Black)	

測定項目

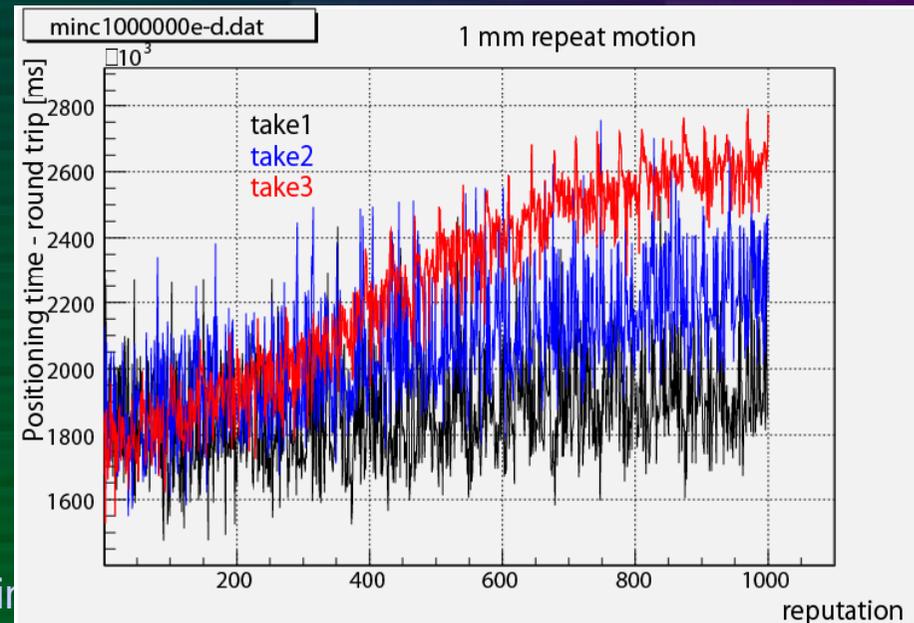
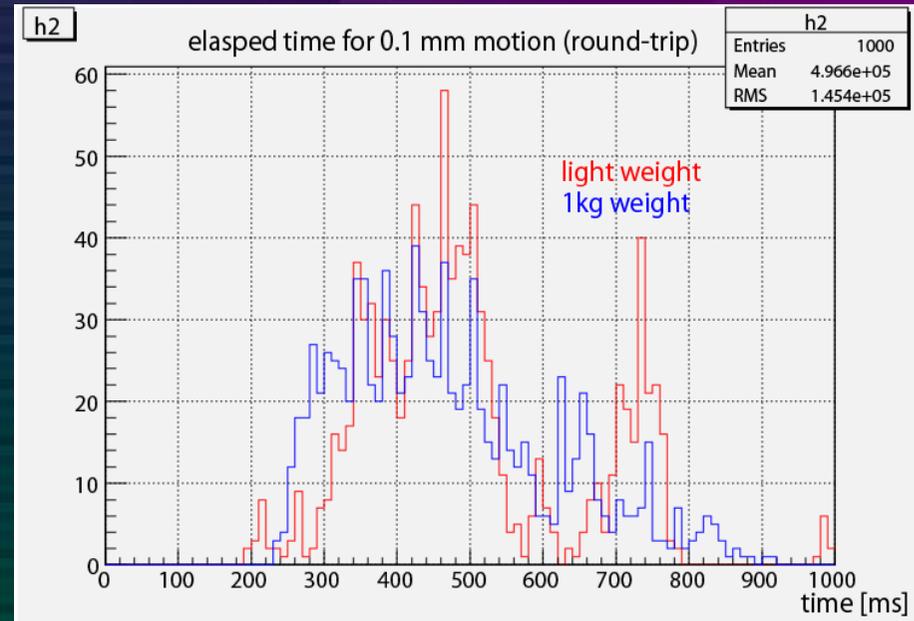
- 繰り返し移動(往復, 100nm – 5mm)
 - 重さ(~100g, ~1kgの2種類)
- ステップ移動(20, 100, 1000, 10000nm/step)
- ランダム移動(0-ランダム-0 の繰り返し)

- 測定したもの
 - 整定時間
 - リニアスケール読み
 - 干渉計PD出力(右図)
 - HIOKIのロガーをnetwork読出

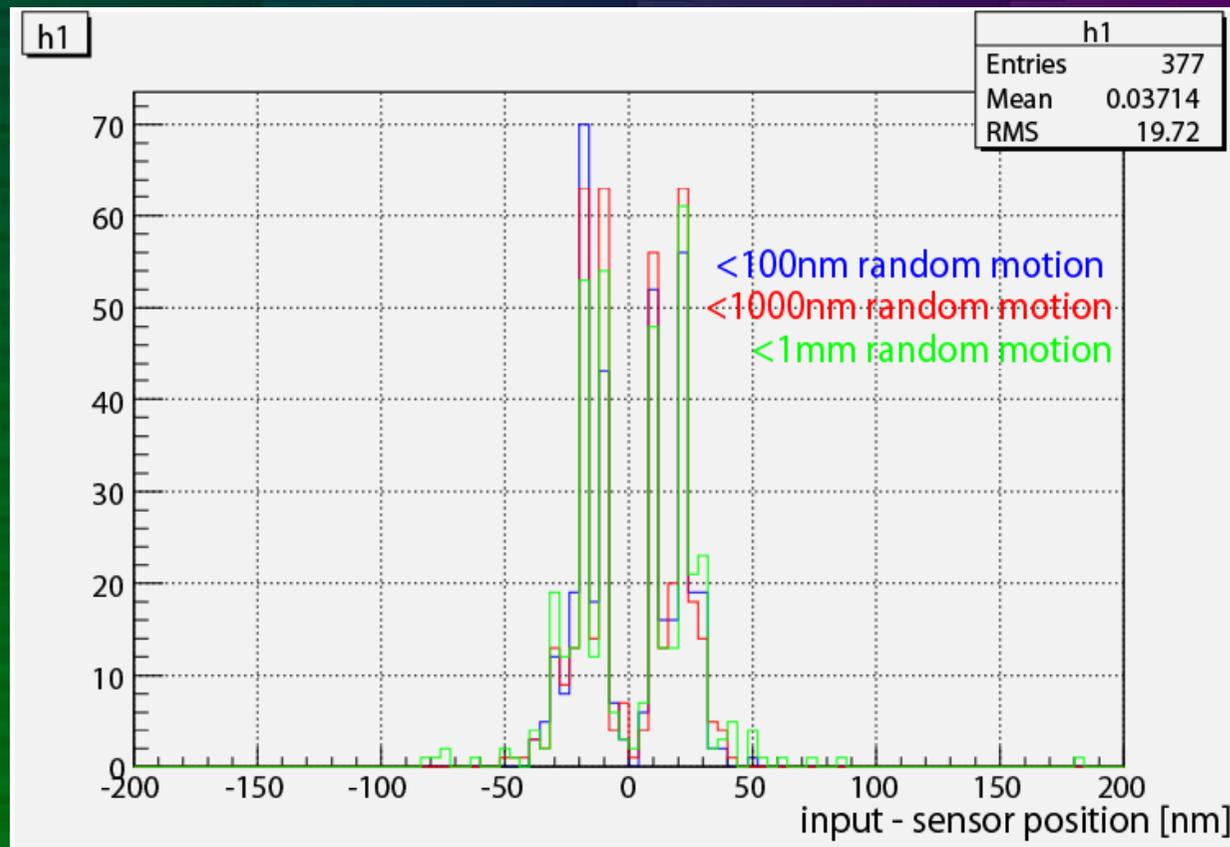


繰り返し移動 – 整定時間

- 再現性はない
- 荷重によってあまりかわらない
- 繰り返すとだんだん悪くなる
 - 摩耗？
 - しばらくおくとまた変わるのでは？
 - Take3は悪化が早かった→摩耗？
 - 温度？



スケール一致精度(ランダム移動)



- リニアスケールを信じると、精度は20nmくらい
- 移動距離には大差ない(19.7, 19.4, 25.2)