

---

# 高品質鏡のための 微小散乱光測定システムの開発

東大新領域 森脇 成典

---

## 内容

- 実験の目的
- 実験装置の概要と特徴
- 高品質ミラーのマッピング測定例
- 粘着洗浄剤の利用
- ビームストップの評価
- まとめ・今後の課題

# 目的

---

干渉計型重力波検出器 — Fabry-Perot 共振器型 Michelson 干渉計

- 高反射率鏡での光のロスにより，共振器の位相感度が低下する．
- 高反射率鏡での光の散乱により，干渉信号の雑音が増える．

→ 鏡への要求として厳しい損失の上限値がつく：（数 ppm ～）数十 ppm

$$T + R + L = 1$$

$T$ : 透過率,  $R$ : 反射率,  $L$ : ロス

$$L = L_A + L_S$$

$L_A$ : 吸収ロス,  $L_S$ : 散乱ロス

高反射率の鏡で光共振器を構成してリングダウン時間を測ると，ロスが精度よく測れる（散乱ロスと吸収ロスの内訳は分からない）．

# 高反射率鏡の性能計測の例

---

- 反射率計測 — ex. ペア鏡で共振器を構成してリングダウン時間・キャビティーポール周波数を測る

$$L = 6 \text{ ppm} \text{ [N.Uehara et al., Opt. Lett. 20 (1995) p.530]}$$

$$L = 1.5 \text{ ppm} \text{ [A.Ueda et al., Opt. Rev. 3 (1996) p.369]}$$

- 吸収率計測 — ex. ポンプ光の光熱効果をプローブ光で測る

$$L_A = 0.1\text{-}0.01 \text{ ppm} \text{ [A.C.Boccarda et al., Opt. Lett. 5 (1980) p.377]}$$

- 散乱計測 — ex. ペア鏡の共振器＋積分球

$$L_S = 118 \text{ ppm}(\text{マップ平均}) \text{ [A.Ueda et al., Laser Phys. 8 (1998) p.697]}$$

# 表面荒さに起因する散乱

透過のない反射面の TIS (total integrated scattering, 全ての方向への散乱光強度を積分したものは、

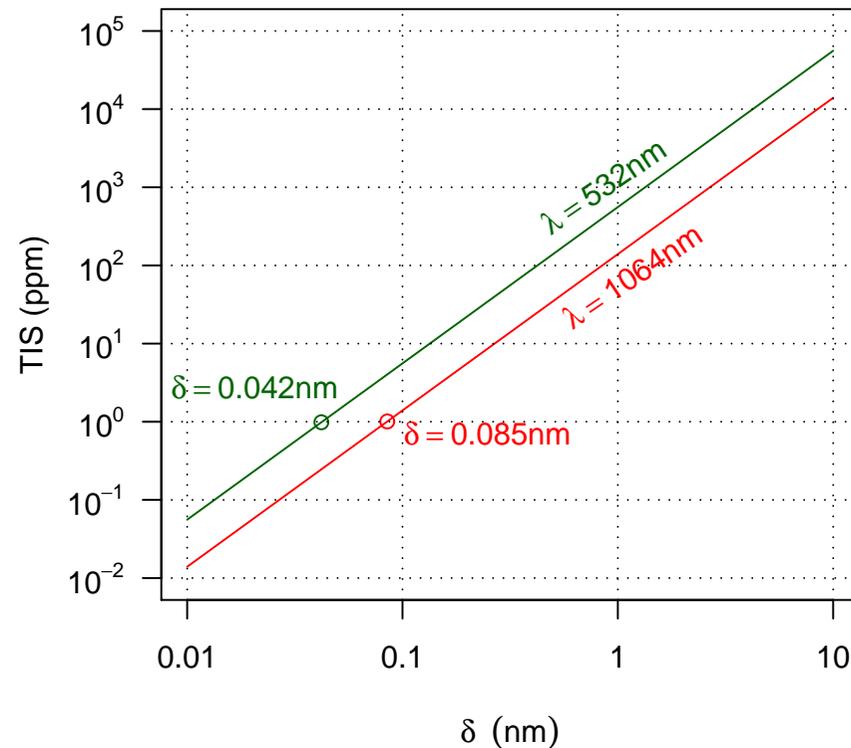
- 表面形状の自己相関関数が相関長  $\sigma$  の指数型で、
- 相関長  $\sigma$  が波長  $\lambda$  より十分長い、

という場合に

$$\text{TIS} = \left( \frac{4\pi\delta}{\lambda} \right)^2$$

$\delta$ : rms 表面荒さ

と表される . [J.M.Elson et al., Appl. Opt. 22 (1983) p.3207]



スーパーポリッシュ (超平滑研磨) が必要となる

# 散乱計測の目的

---

散乱と吸収の量を個別に知ることで、

- 蒸着膜に問題があるのか研磨に問題があるのか、手がかりが得られる
- 干渉計での熱の問題の見積りができる

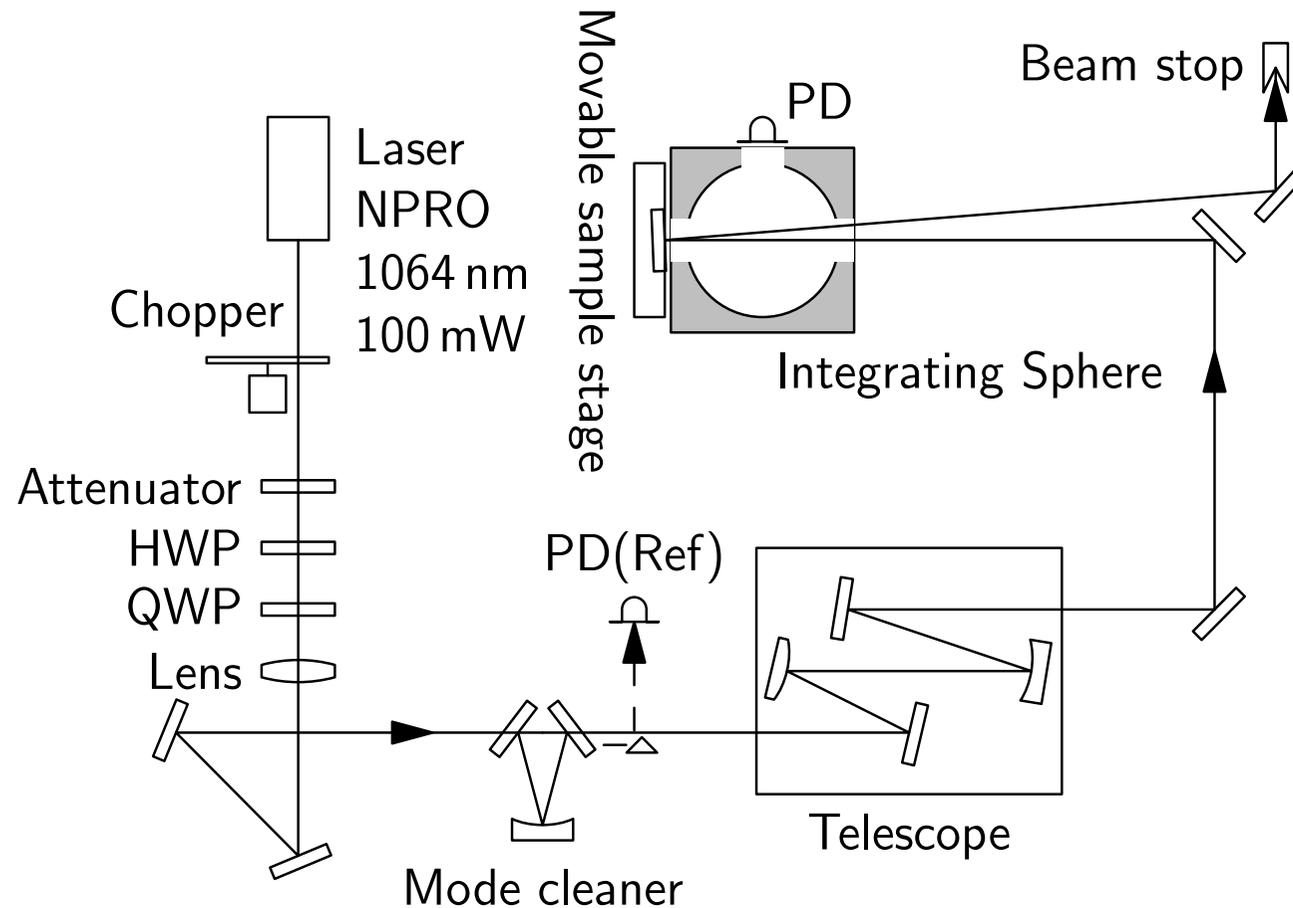
このため 鏡単体で散乱の空間情報（マッピング）を得たい

→ **積分球による散乱計測**

太齋 徹，東京大学新領域 修士論文（2005-2007）

徳田 祐太郎，東京大学物理工学科 卒業論文（2007-2008），修士実験（-2009）

# 実験装置

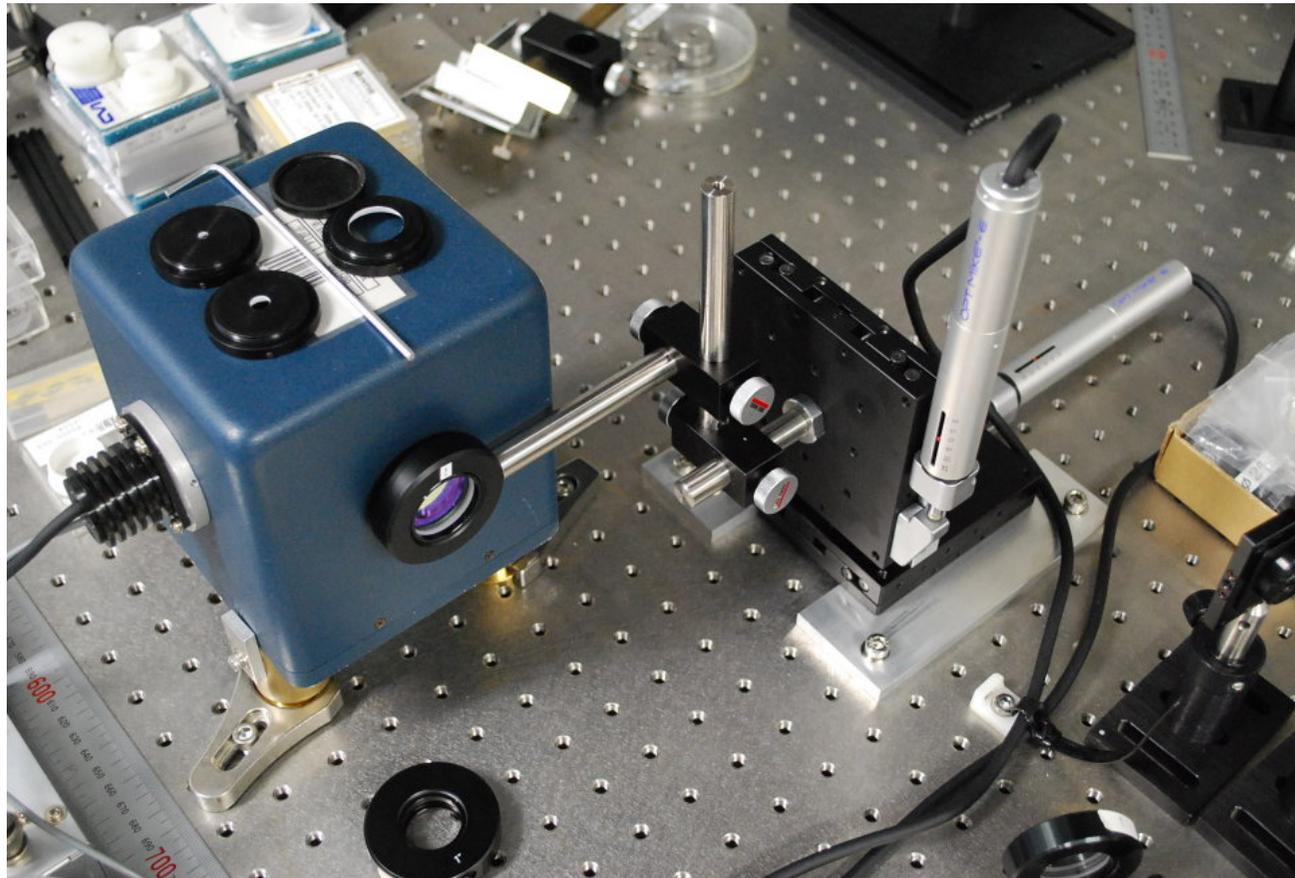


機械式チョッパーによる on/off 強度変調, 290 Hz .  
サンプル位置で直径  $350 \mu\text{m}$  のガウスビーム .

ビームプロファイルの裾野にある前方散乱光により測定限界が制限される .

## マッピングのための走査ステージ

---

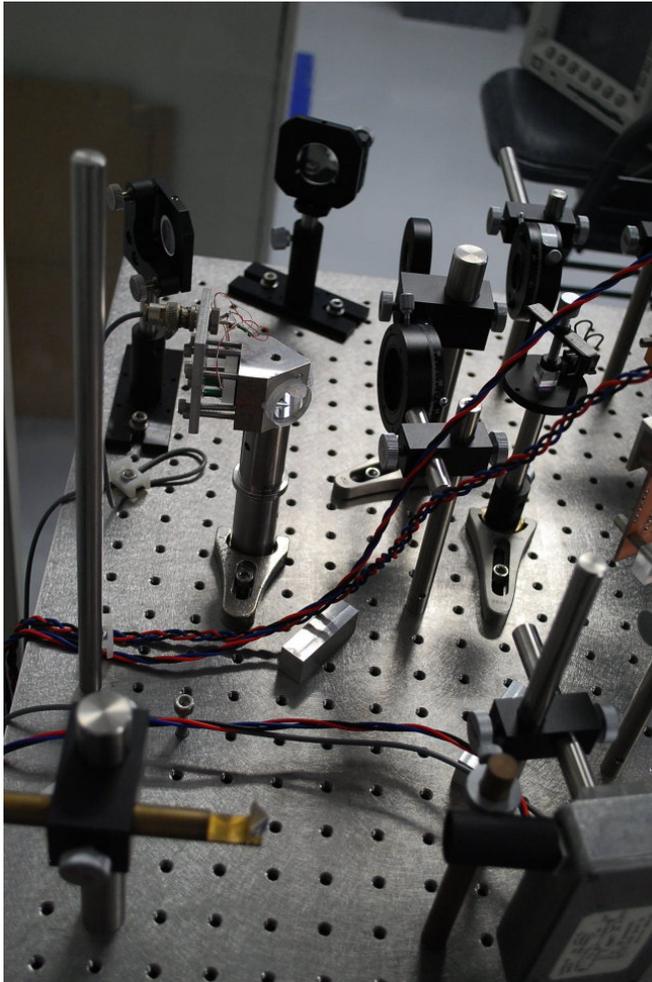


LabSphere 社積分球 .

サンプルミラーの走査はエンコーダつき自動マイクロメータ , シグマ光機オプトマイク .

# リング型モードクリーナー

---



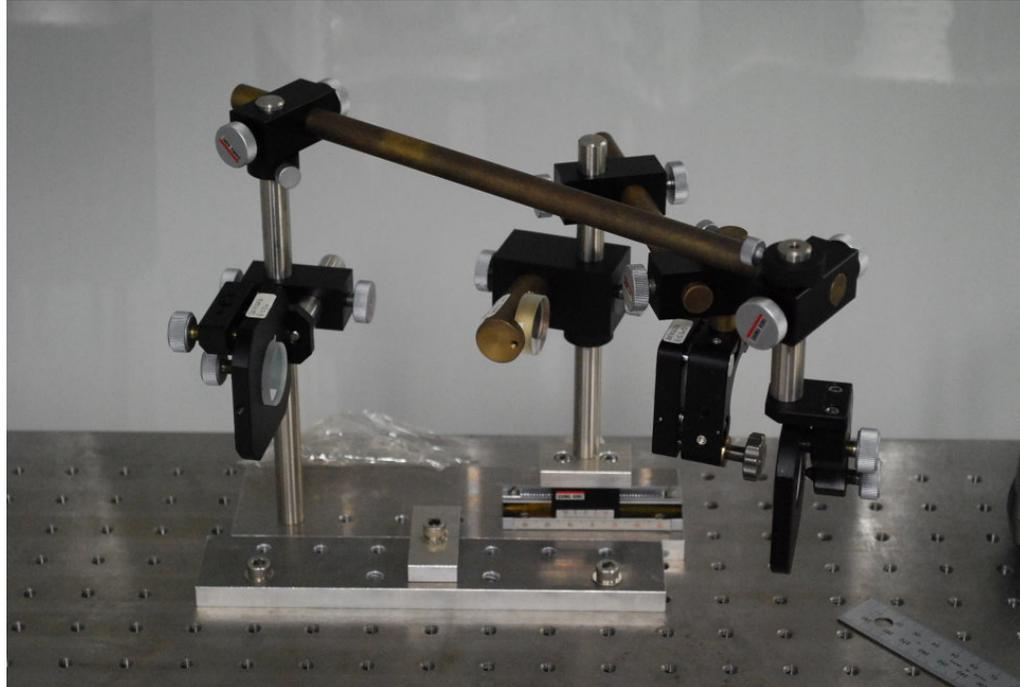
周回光路長 72 mm のリング共振器，ピエゾにより光路の制御が可能．

メカニカル光チョッパーのエッジの散乱光を MC で除去したいので，チョッパーは MC の上流に置き，MC 入射光はチョップされた断続光となる．

反射光の偏光解析により誤差信号を得て通常のアナログ制御でロック．

# 反射型モードマッチングテレスコープ

---



凸面鏡と凹面鏡のペアを用いる。

入射角の比を焦点距離の平方根の比にとると非点収差が最小になる [P.Hello et al., Appl. Opt. 35 (1996) p.2534] .

光軸方向に 2 自由度のスライド機構を持ち，非点収差最小となる入射角を保ったままビームウエストの位置とサイズを変えられる。

# 光学系配置の調整方針

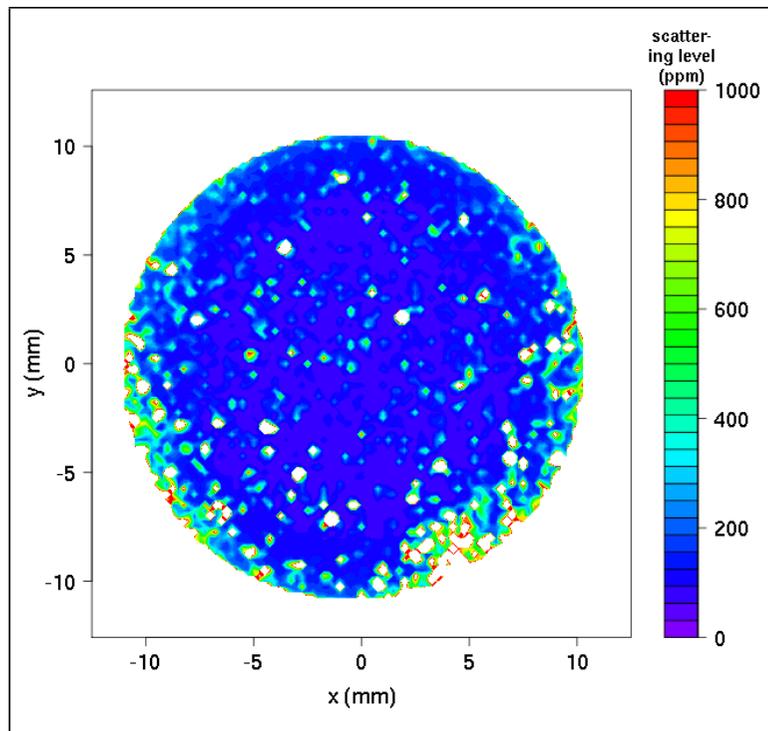
---

必要とされる空間分解能よりビーム半径を決めたら、**測定限界が最小**となるように配置を調整する。

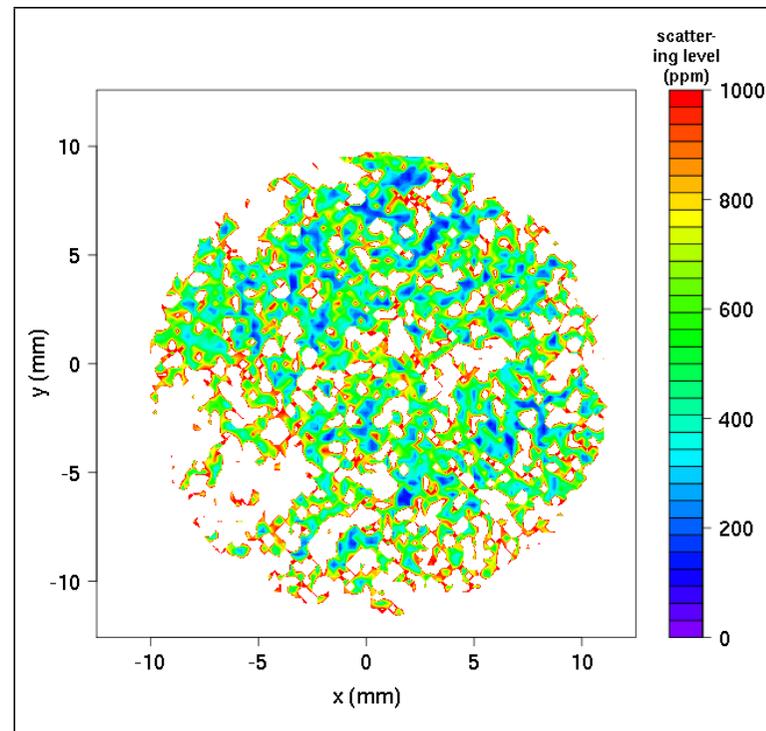
- モードクリーナーより下流にレンズを置かない。  
ビームの集光は反射型望遠鏡により行う
- モードクリーナーと積分球の距離をはなす。
- 積分球とその直前のステアラー鏡の距離をはなす。
- 良質のビームストップを使って反射光を吸い取る。

# 電子ビーム蒸着による高反射鏡の散乱マッピング像

未使用品



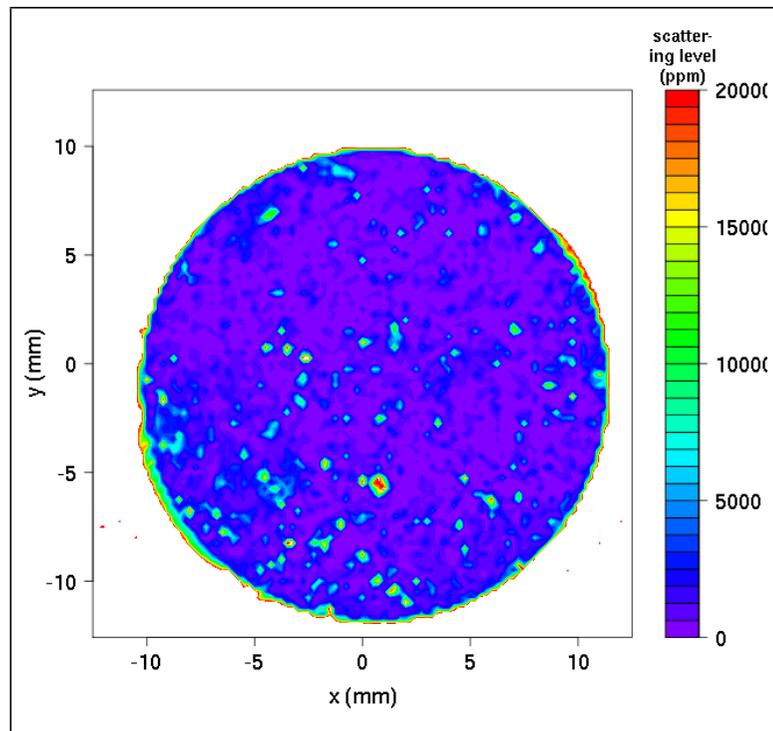
100W レーザー共振器で長期間使用



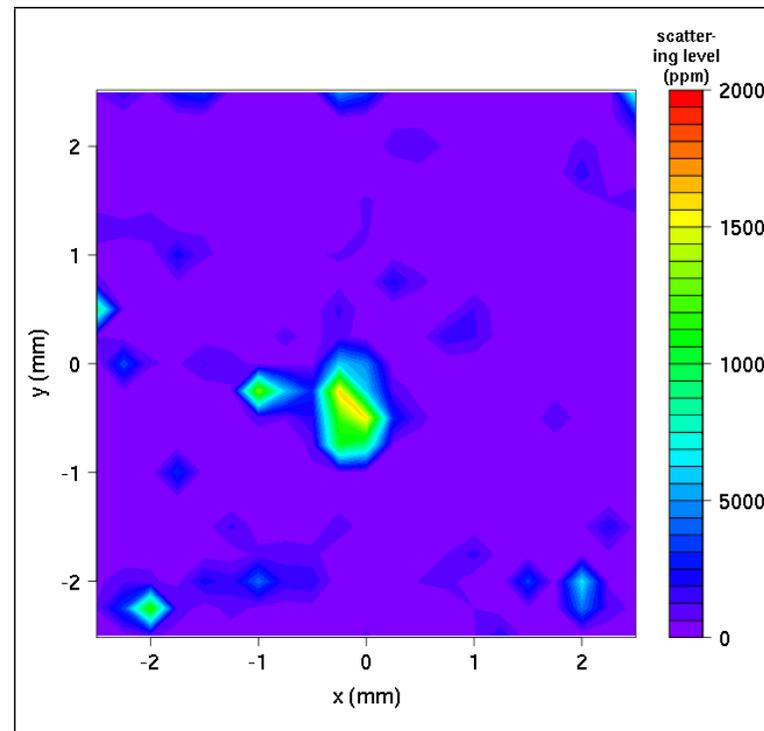
長期使用していた鏡は散乱が多い

# 長期間 高パワーにさらされた鏡のスポット痕跡

100W レーザー共振器で長期間使用の鏡



中央の高散乱点の拡大マップ



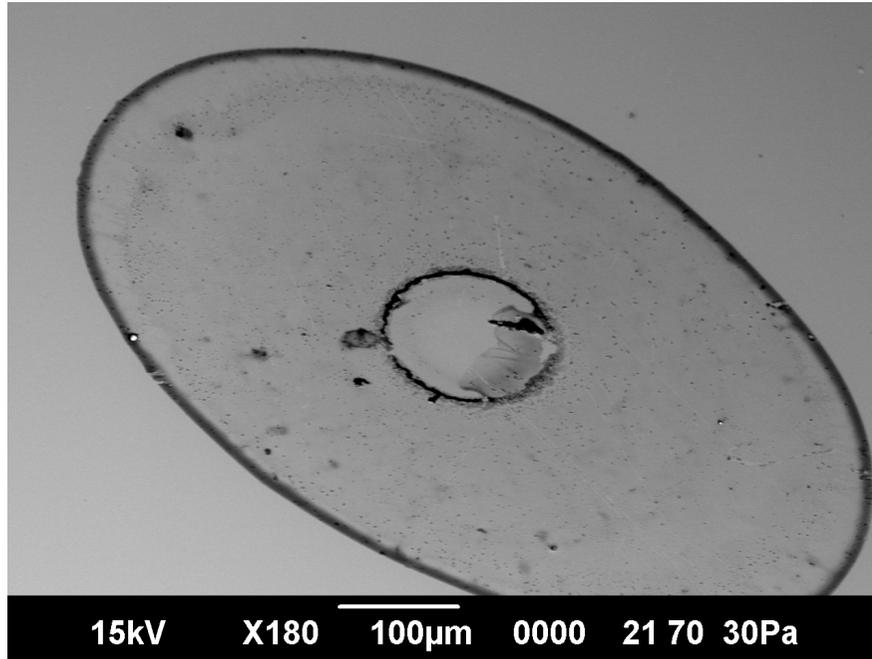
中央付近に一点だけ光散乱の大きい点がある

→ 成分分析のできる SEM で観察する試み (次ページ)

# 高パワースポット痕跡の SEM 像

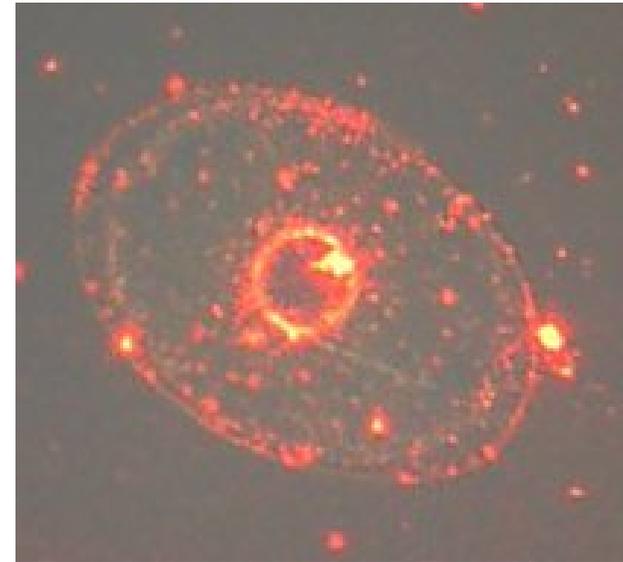
## SEM による残痕の観察

協力: 東大新領域 山本剛久 准教授



## 光学顕微鏡による残痕の像

三尾研保有のオリンパス実体顕微鏡  
赤色レーザーポインタで照明



- 一般に SEM で導電性のないサンプルを見る場合，導電性コーティングが必要になるが，やってみるとコーティングなしで撮像できた．
- Energy Dispersion Spectroscopy (EDS) により，残痕中央部で炭素が多いことが分かった．成膜物質に Ta が使われていることも確認できた．

## 成膜法の違いによる散乱量の傾向

---

サンプル種別	散乱 (平均)	散乱 (最小)
サンプル 1 (電子ビーム蒸着)	329 ppm	75 ppm
サンプル 2 (電子ビーム蒸着)	1246 ppm	84 ppm
サンプル 3 (イオンビームスパッタリング)	163 ppm	40 ppm
サンプル 4 (イオンビームスパッタリング)	447 ppm	12 ppm

イオンビームスパッタリングの方が緻密な膜ができるため散乱が少ないと予想していたが、散乱量に顕著な差がない。

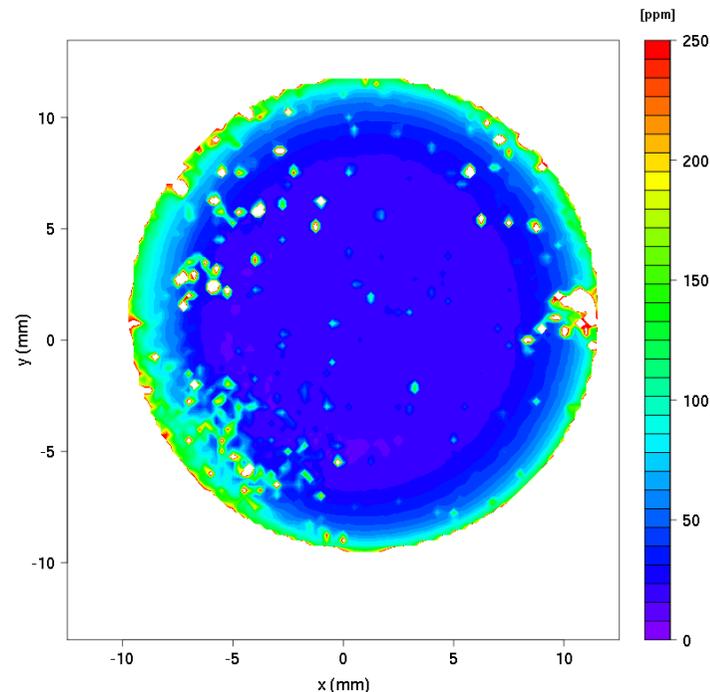
過去に報告されている散乱量よりかなり大きめ

→ 測定環境の問題？

## 成膜法の違いによる散乱量の傾向 (2)

サンプル種別	散乱 (平均)	散乱 (最小)
サンプル 1 (電子ビーム蒸着)	329 ppm	75 ppm
サンプル 2 (電子ビーム蒸着)	1246 ppm	84 ppm
サンプル 3 (イオンビームスパッタリング)	163 ppm	40 ppm
サンプル 4 (イオンビームスパッタリング)	447 ppm	12 ppm
サンプル 5 (イオンビームスパッタリング)	22 ppm	14 ppm

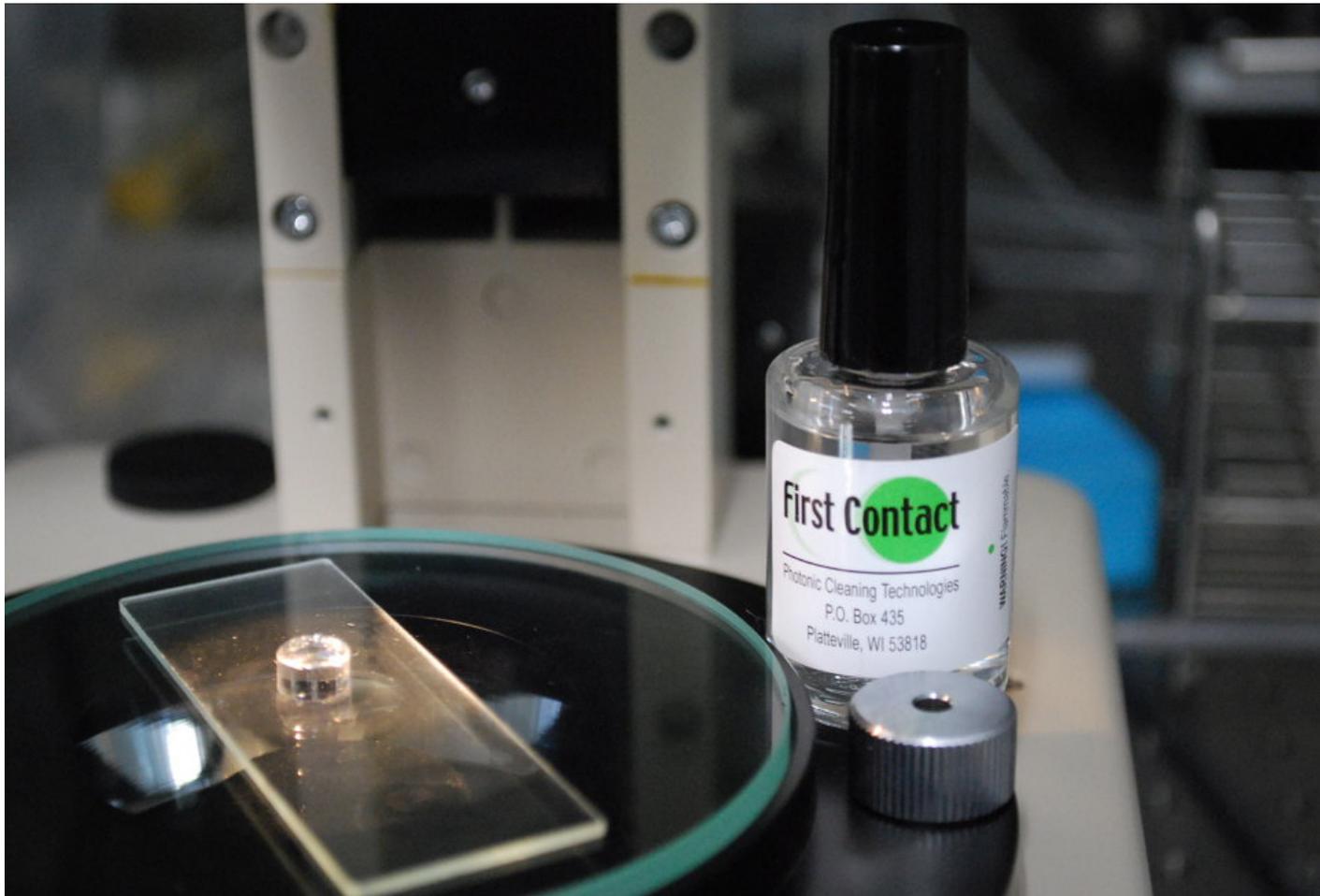
別の製造元のイオンビームスパッタリングのサンプルで散乱の少ないものが現れた。



# 光学素子用の粘着清浄剤

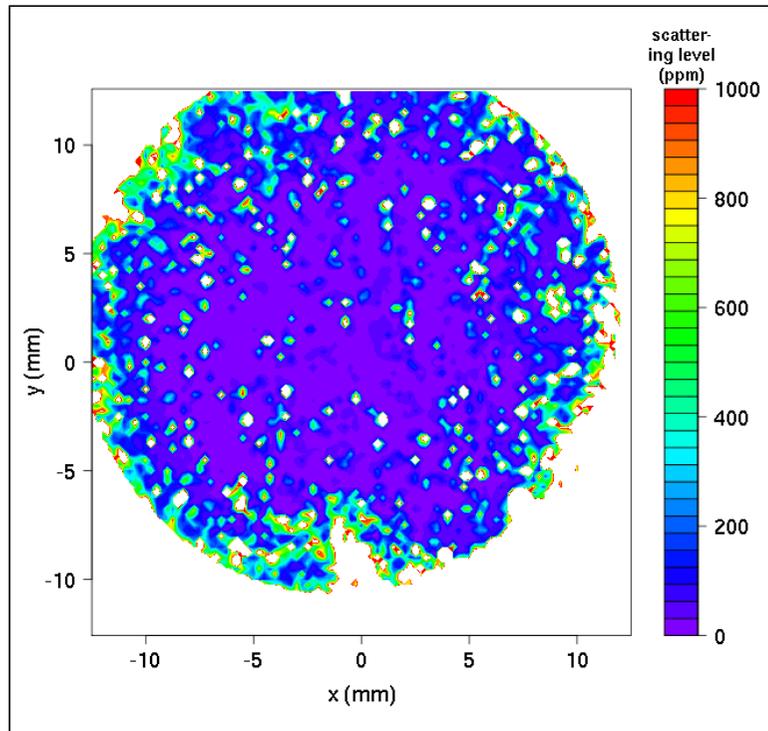
---

Optics Cleaning Technologies 社 First Contact  
ハケ塗り，乾燥固化，テープで剥離

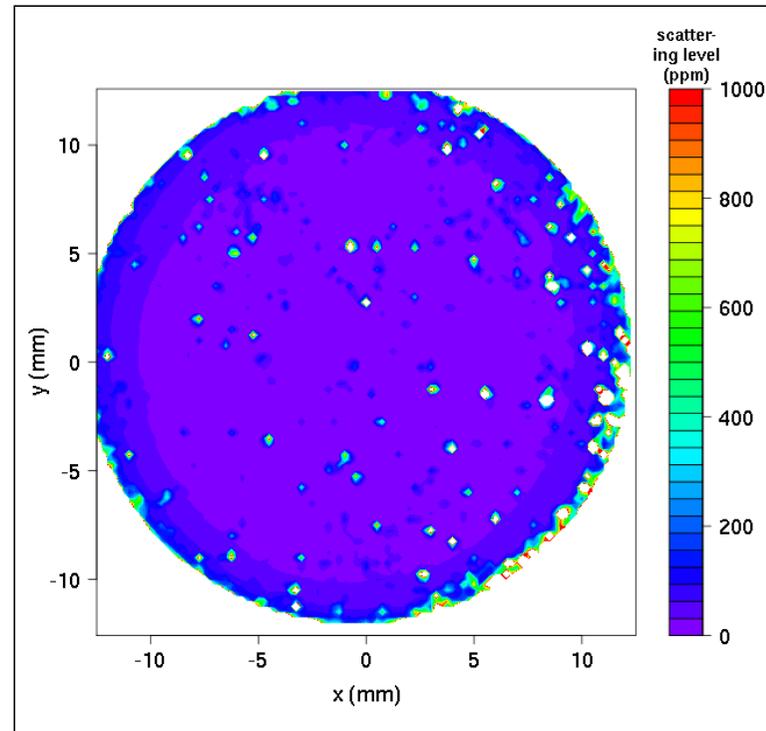


# 散乱マッピング像でみる粘着清浄剤の効果

処理前



処理後



散乱パーティクルの量を相当減らすことができる。

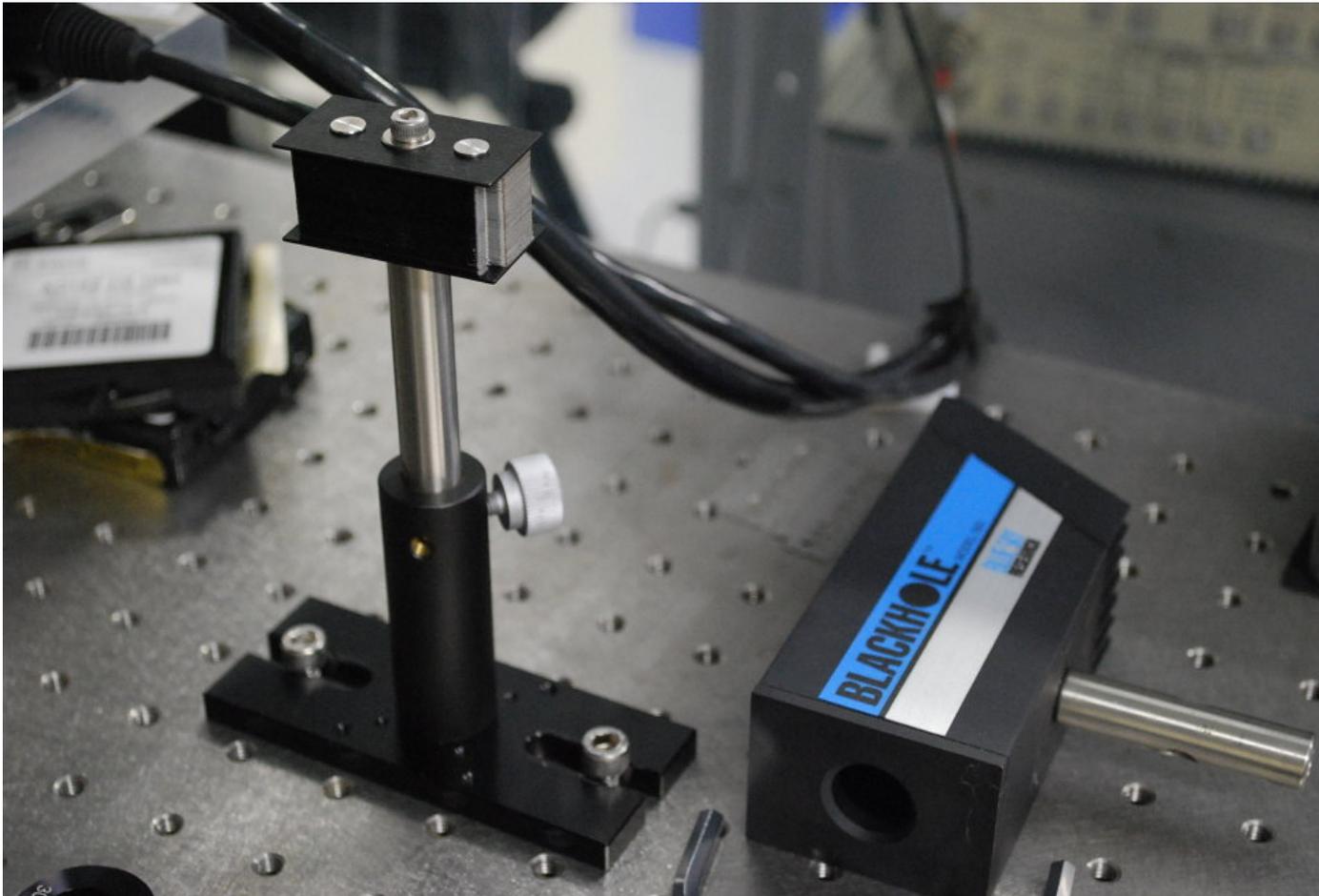
処理後のパーティクル状の散乱体の像は処理前の像に対応物がない

→ 粘着清浄剤により散乱体は一旦なくなるが、そのあとのハンドリングで汚れている？（クリーンブースの公称クリーン度 1000）

# 後方散乱の小さいビームストップの選択

---

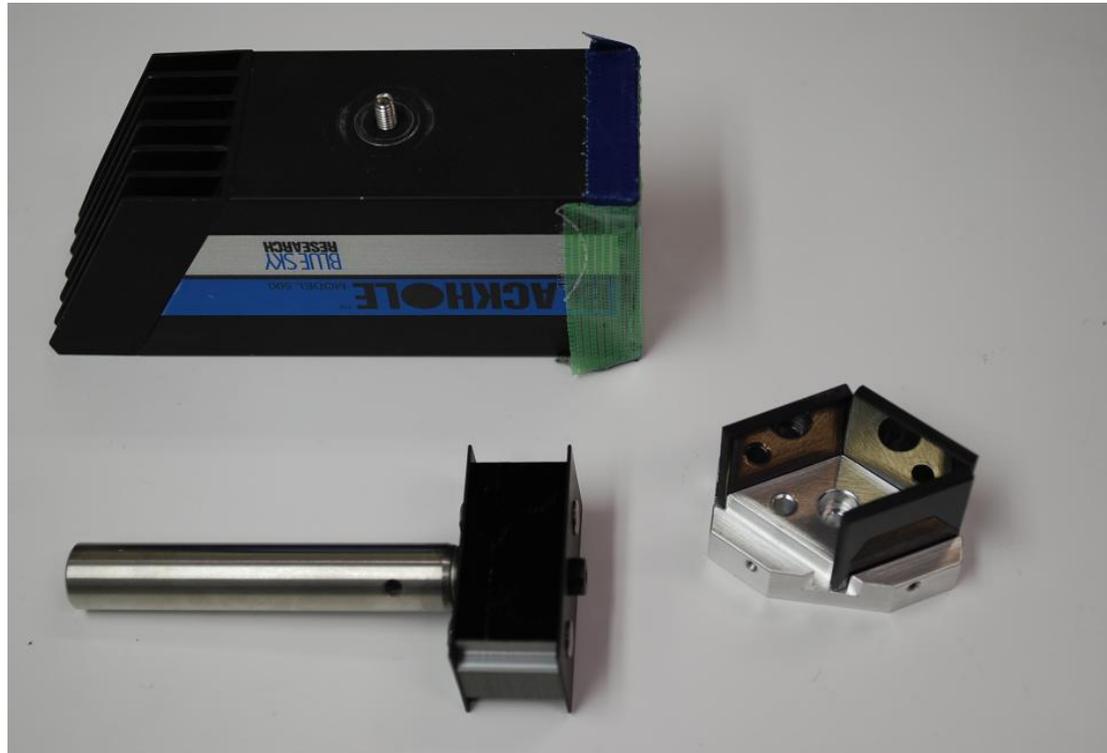
Thorlabs 社 ビームブロック LB1 (左):  
(2008年の時点で) 手元のビームストップの中では最良



# TAMA で使用されているビームストップ

---

ビームストップ 3種を借りる (国立天文台のご厚意による)



- (左上) Bluesky Research 社 Blackhole Model 500
- (左下) Thorlabs 社 LB1 (安全カミソリを束ねた製品)
- (右) TAMA 型ビームストップ (ND フィルタ利用, 新井氏設計)

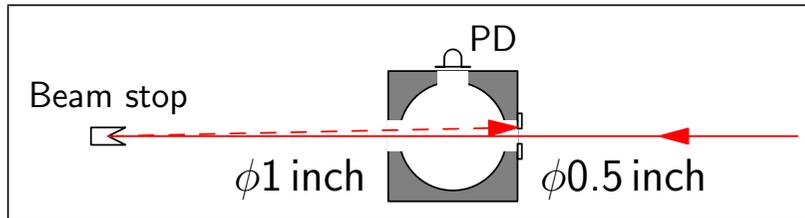
# CLIO で使用されている NiP 無電解メッキの遮光板

---

NiP 無電解メッキサンプル 3種を借りる (宇宙線研究所のご厚意による)



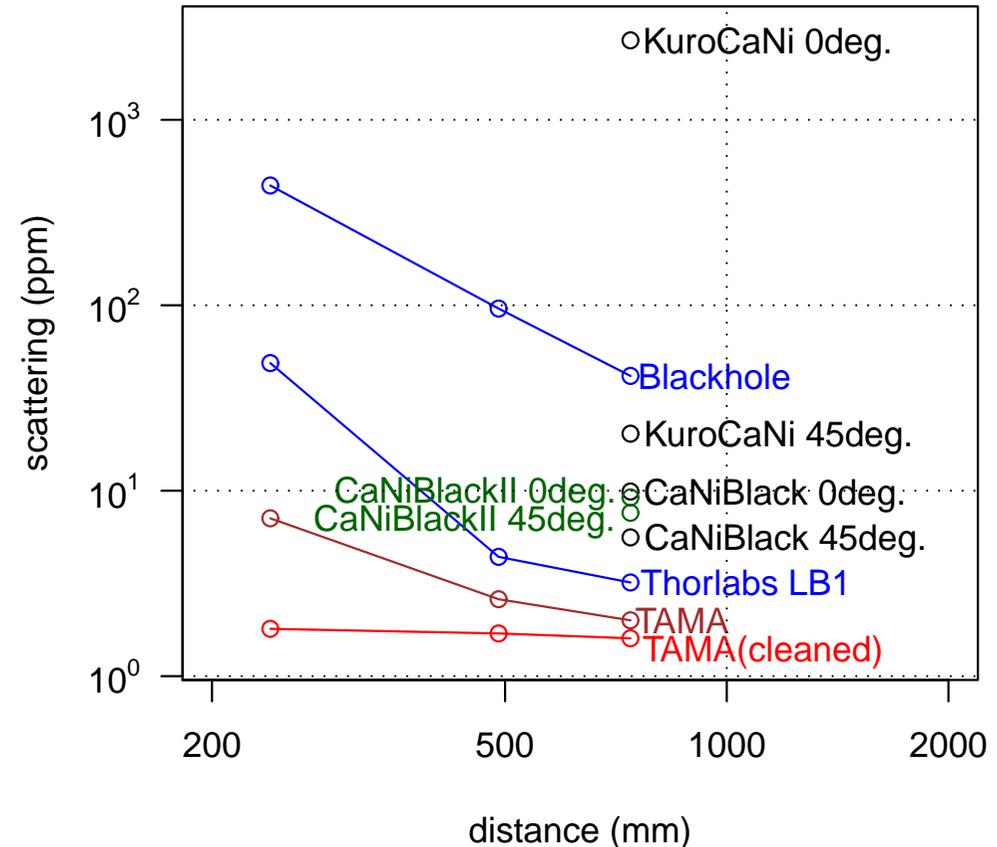
# 各種ビームストップの後方散乱の比較



積分球の入射側ポートのみポートリデューサーで開口を絞っている。  
→ ビームストップの後方散乱の相対量を比較できる。

TAMA 型ビームストップは、移動の際の汚染物がついたままでも、他のどれよりも性能が高かった (右図 茶)。

アセトン超音波洗浄により、さらに性能が上がった (右図 赤)。



TAMA 型ビームストップについては、測定系の限界に達して、散乱の上限しか測れていない

## まとめ・課題

---

- 積分球と可動ステージを組み合わせ、25mm 四方の領域の散乱のマッピング画像を得る装置を構築。
- 入射光プロファイルのサイドローブが問題となることが分かり、ピンホールフィルタとモードクリーナーを試す → モードクリーナーを採用。
- サンプル鏡のある状態での測定バックグラウンド 12 ppm を達成。
- 市販の粘着清浄剤はパーティクル状散乱体を除去するのに効果的。
- ND フィルタ利用の TAMA 型ビームストップは高性能。

## 課題

- 像から汚れの原因を推定できるようにクリーニングとマッピング観察の経験を積む。
- マッピング走査時間の短縮（現状 8 時間）。