

将来のスペース赤外線観測のための 自由曲面光学鏡の光学アライメント手法の開発

名古屋大学 M2 谷内逸華

金田英宏, 國生拓摩, 近藤翼, 小野菖平,
黒田幸(名古屋大学), 和田武彦(国立天文台)

スペース赤外線望遠鏡

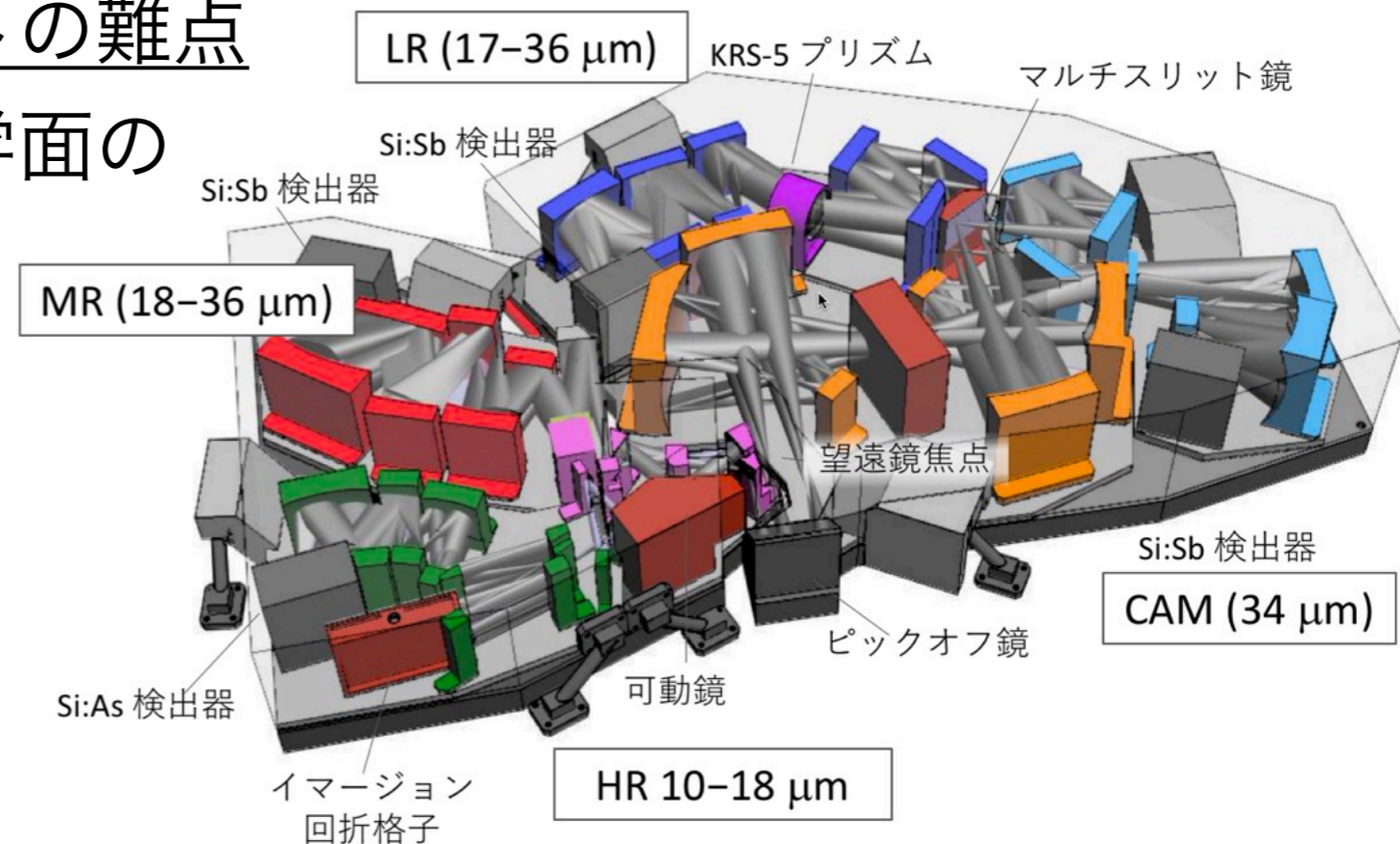
自由曲面鏡を用いた光学系の意義

様々な角度から入ってくる光を、少ない枚数の鏡で、狙った位置(検出器上)に限りなく小さい広がりで焦点に結像できる

- ▶ **軽量・コンパクトな光学系** + **広視野** で **高精度な観測** を実現

自由曲面鏡光学系アラインメントの難点

- 1枚の自由曲面鏡で複数の光学面の役割を担う
 - ▶ 面精度・設置精度に対して **要求精度が高い**
- 光学面の回転対称軸がない
 - ▶ **アラインメントが難しい**



SPICA/SMI 光学系や検出器の配置の模式図

自由曲面鏡光学系のアライメント手法(先行研究)

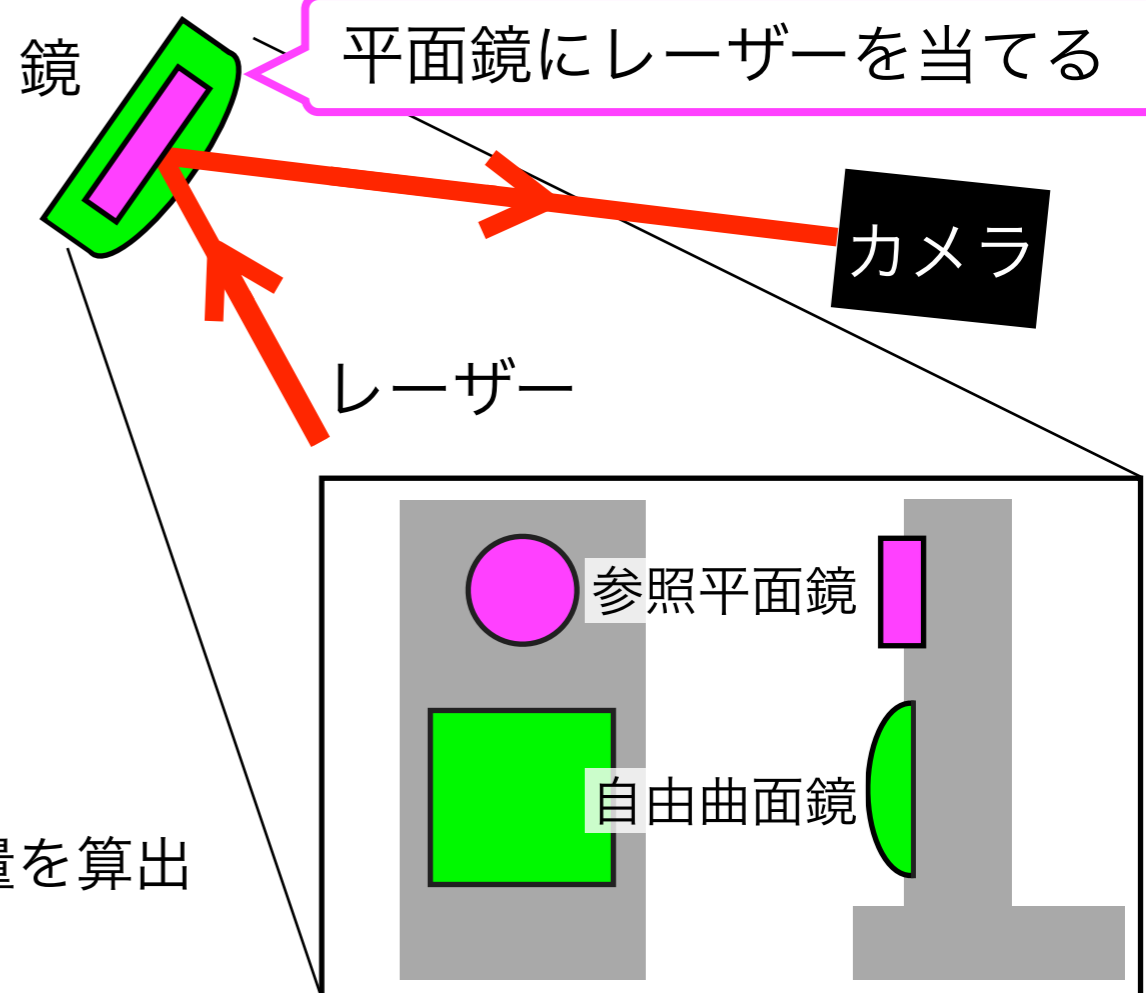
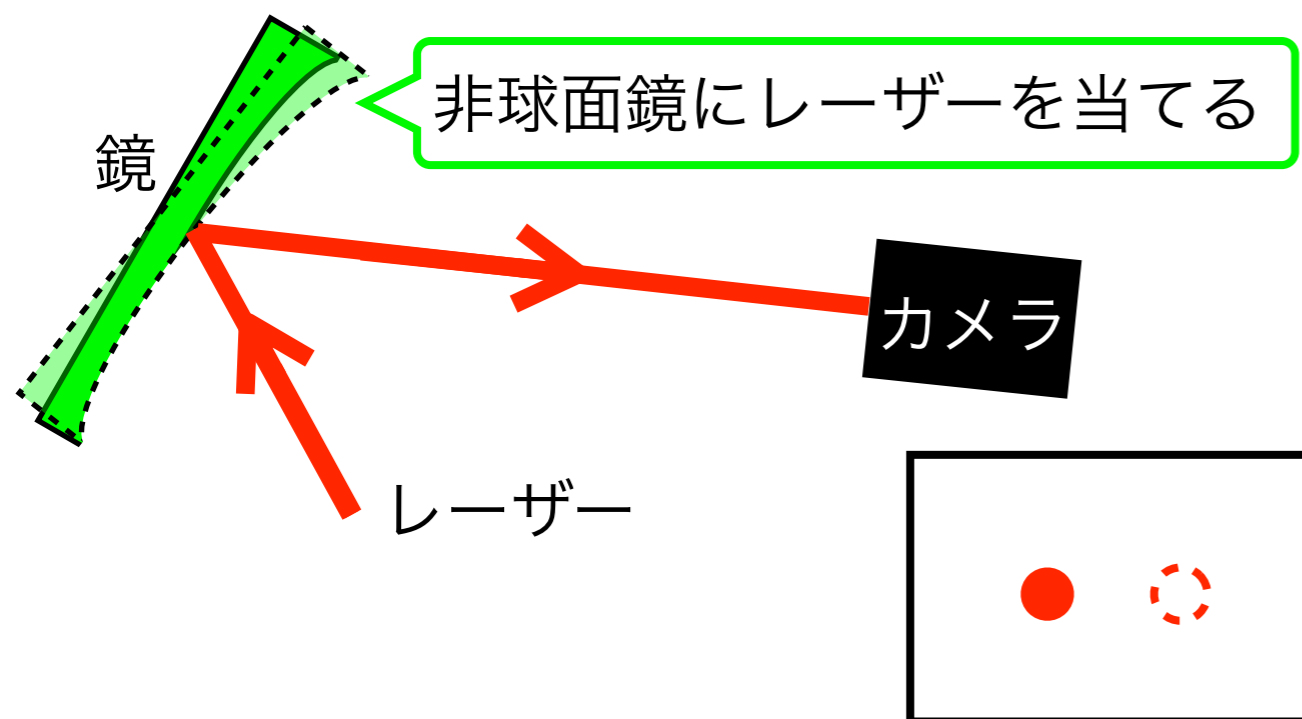
3次元測定器とレーザーを使ったアライメント

3次元測定器で鏡の相対位置を測定

鏡にレーザーを当てスポット位置ずれをモニター

▶TAO/MIMIZUKU(内山修論, 2012)

▶自由曲面と参照平面の一体鏡を使ったアライメント(近藤修論, 2023)



①3次元測定器で鏡の位置を測定

②鏡面にレーザーを当て、スポット位置から鏡の移動量を算出

③スポットを見ながら、鏡を調整

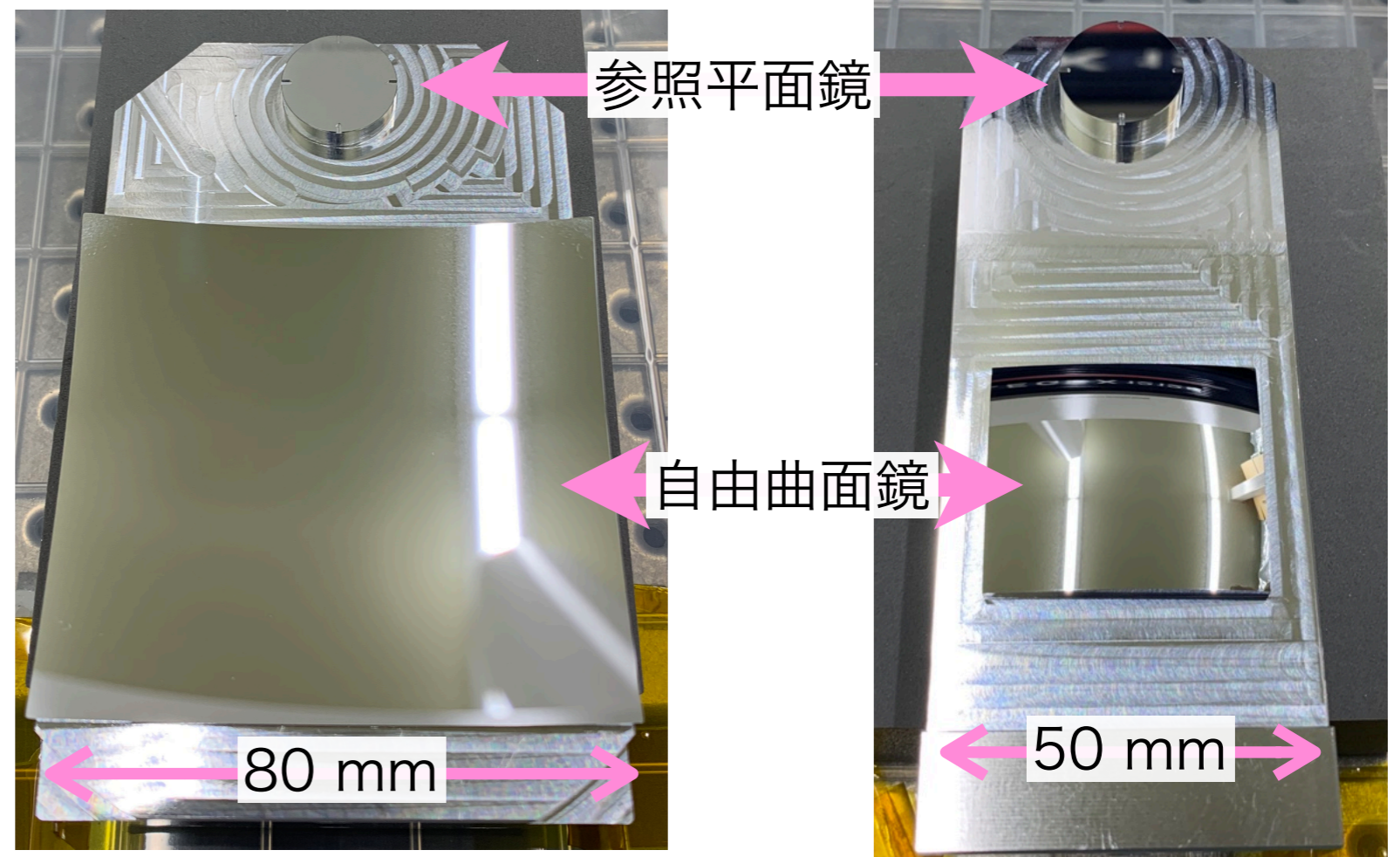
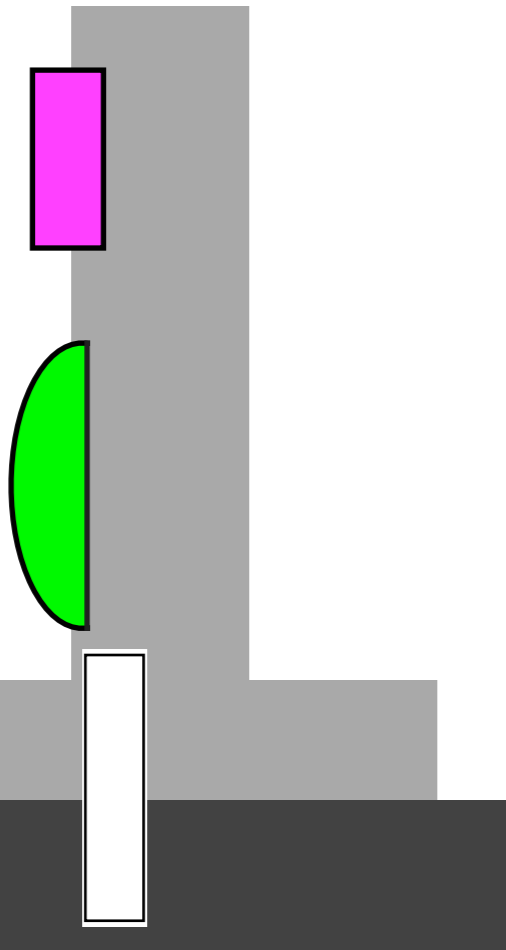
自由曲面鏡光学系のアライメントのアイデア

アライメント方法

3次元測定器を使わずに、レーザー干渉計のみでアライメントを実施

- 位置方向 → 位置決めピンの精度で決定
- 角度方向 → 参照平面鏡とレーザー干渉計を使用

一体型鏡



光学系模式図(横から見た図)

実験で使用する2枚の鏡

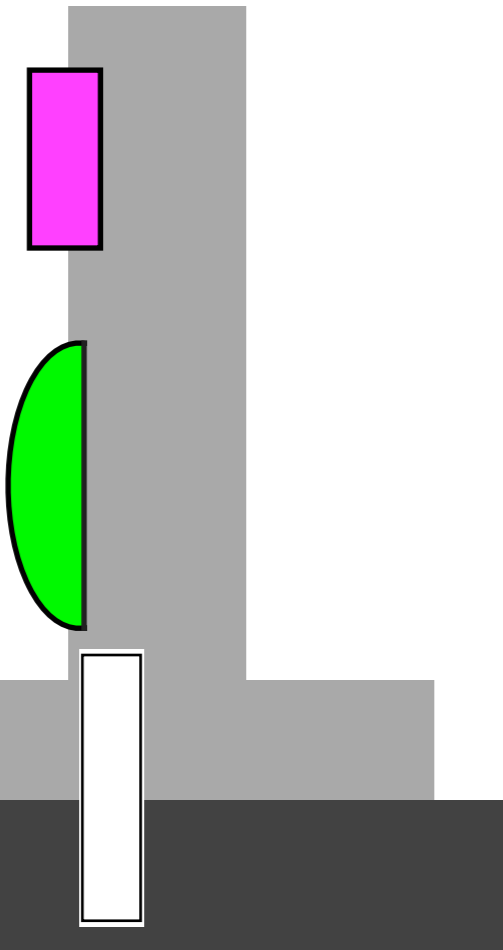
自由曲面鏡光学系のアライメントのアイデア

アライメント方法

3次元測定器を使わずに、レーザー干渉計のみでアライメントを実施

- 位置方向 → 位置決めピンの精度で決定
- 角度方向 → 参照平面鏡とレーザー干渉計を使用

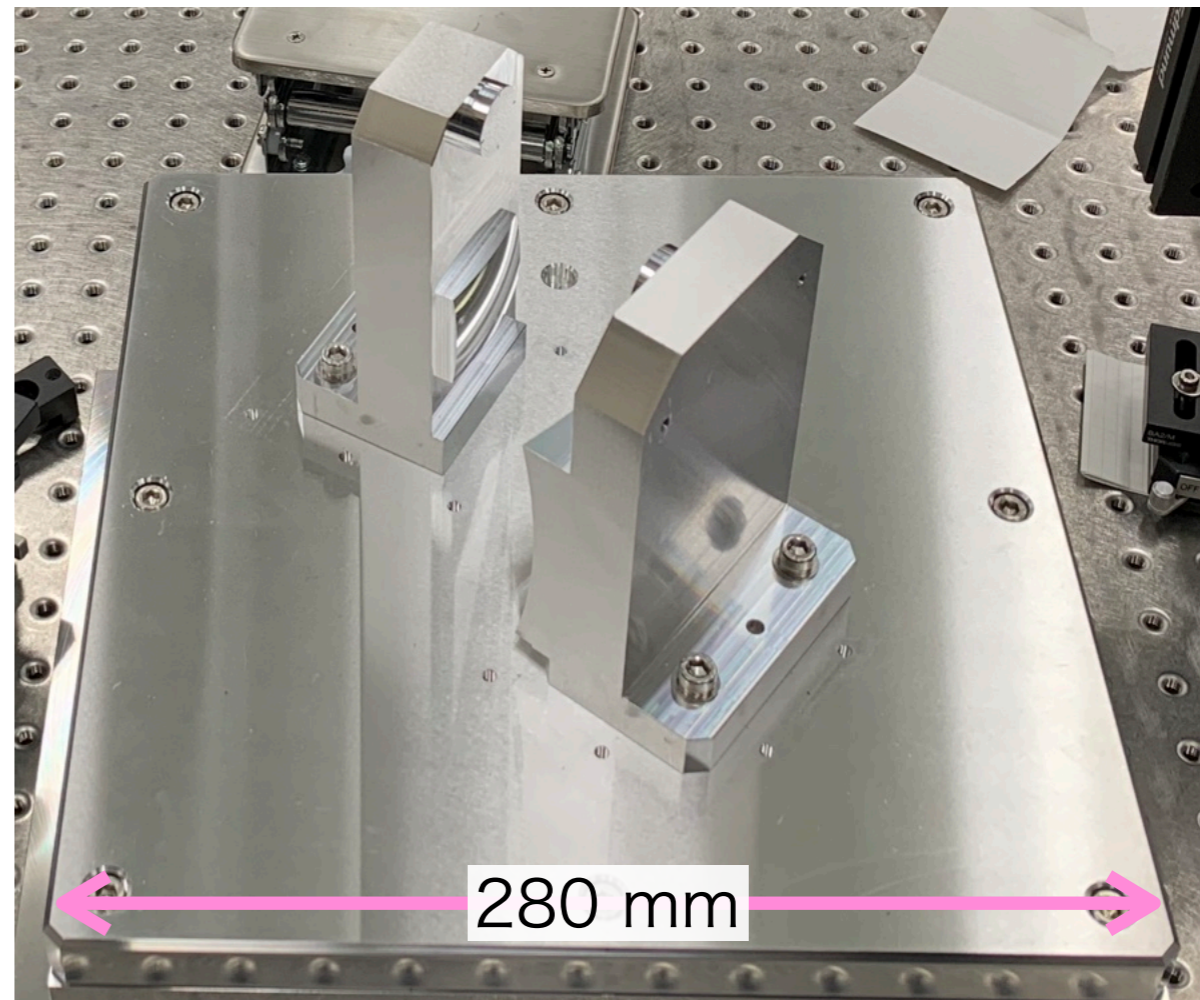
一体型鏡



位置決めピン

アルミ
プレート

光学系模式図(横から見た図)



280 mm

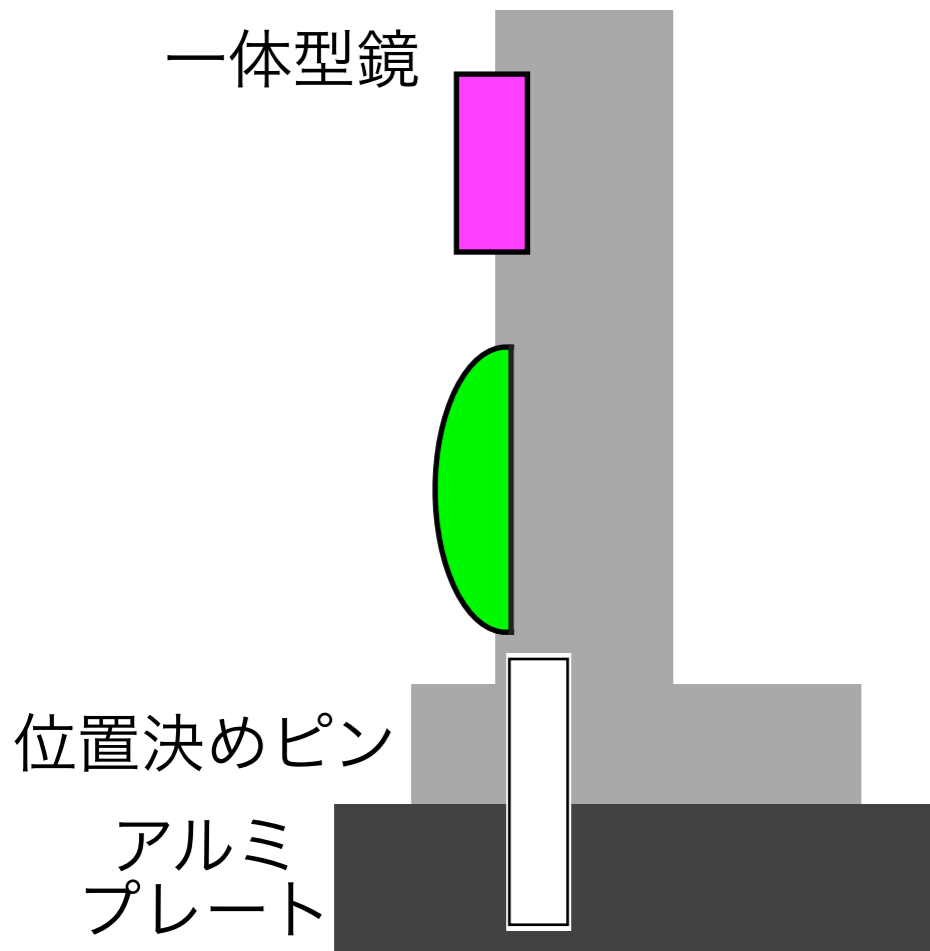
鏡をアルミプレートに設置した様子

自由曲面鏡光学系のアライメントのアイデア

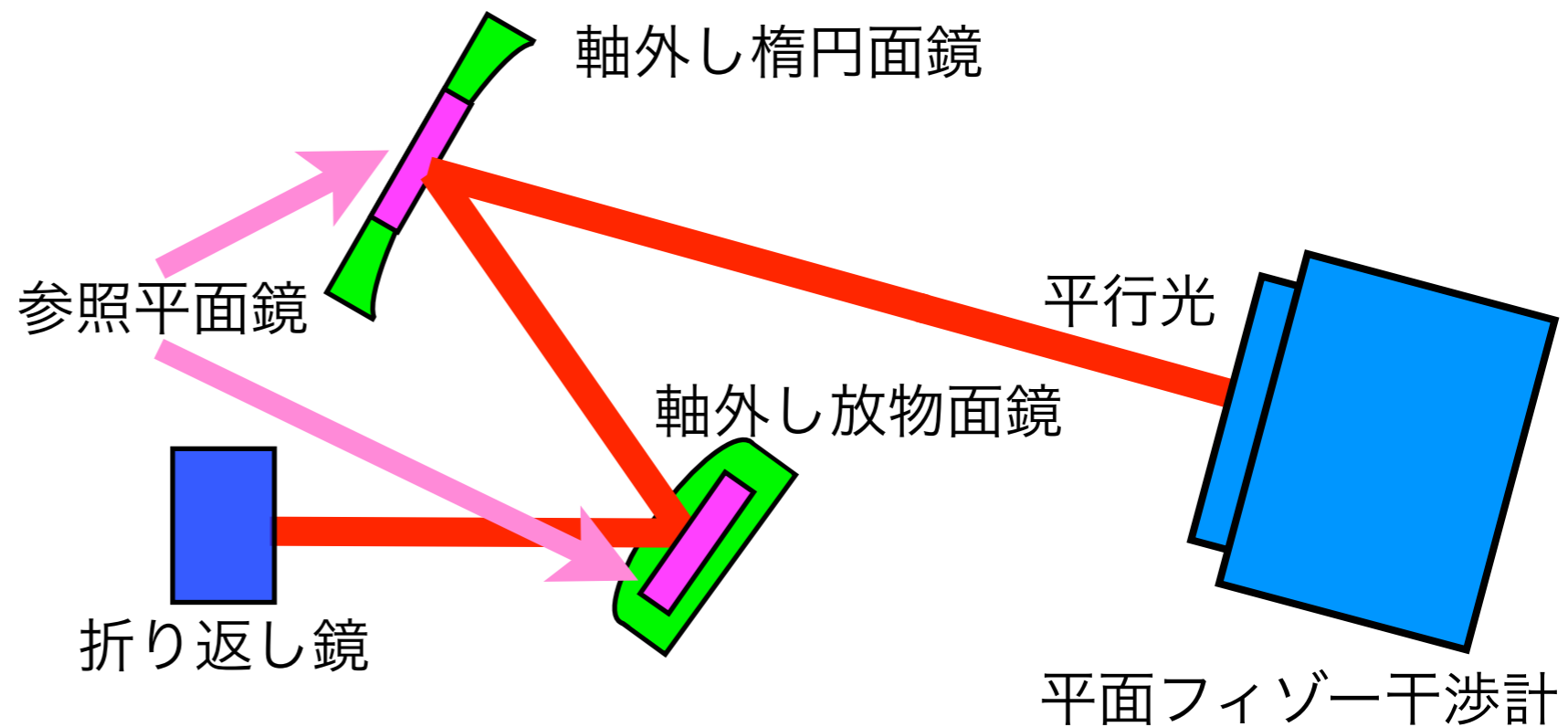
アライメント方法

3次元測定器を使わずに、レーザー干渉計のみでアライメントを実施

- 位置方向 → 位置決めピンの精度で決定
- 角度方向 → 参照平面鏡とレーザー干渉計を使用



光学系模式図(横から見た図)



理想配置のときに参照平面の干渉縞0本

光学系模式図(上から見た図)

自由曲面鏡光学系のアライメントのアイデア

アライメント方法

3次元測定器を使わずに、レーザー干渉計のみでアライメントを実施

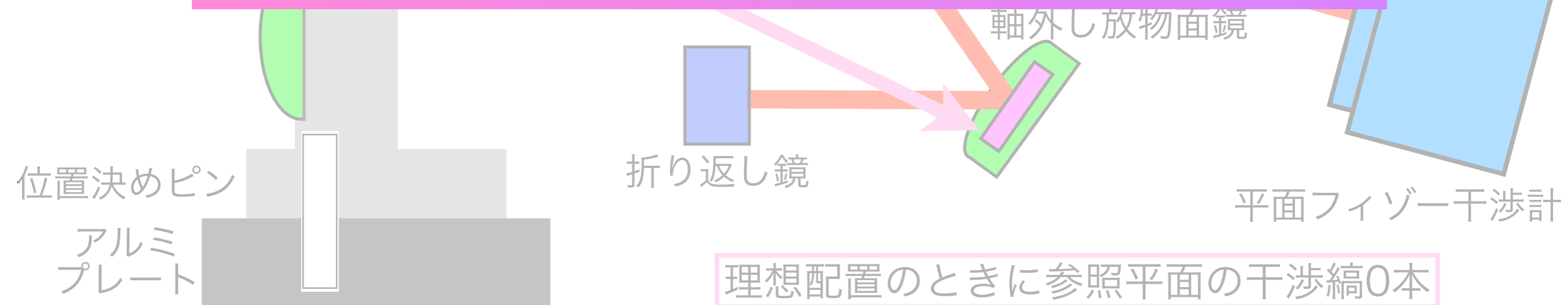
- 位置方向 → 位置決めピンの精度で決定
- 角度方向 → **参照平面鏡とレーザー干渉計**を使用

一体型

要求精度(SPICA/SMIを参考)

波面誤差 **0.12 λ** ($\lambda = 633 \text{ nm}$)

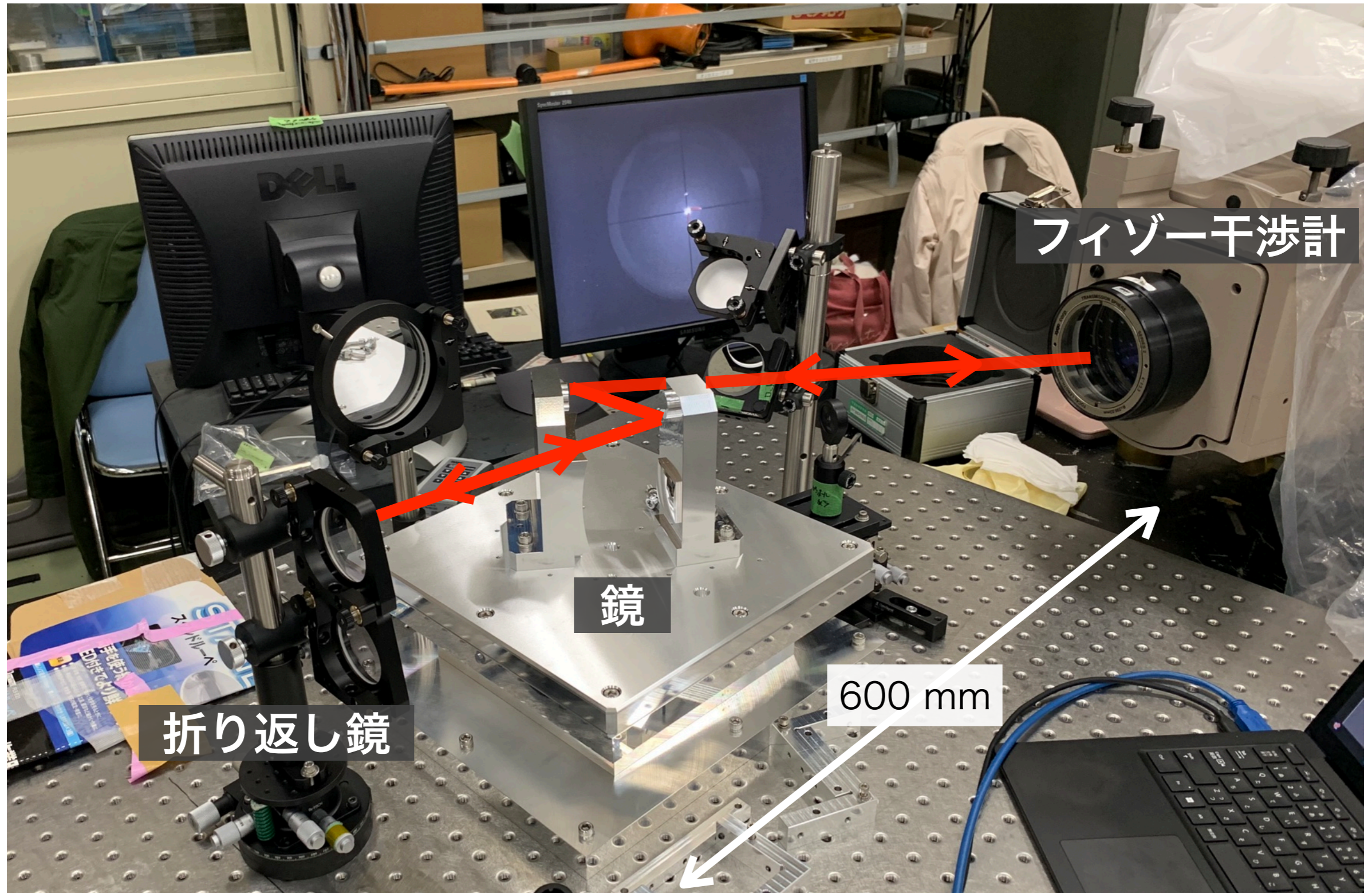
→位置精度 $10 \mu\text{m}$, 角度精度 6 秒角に相当



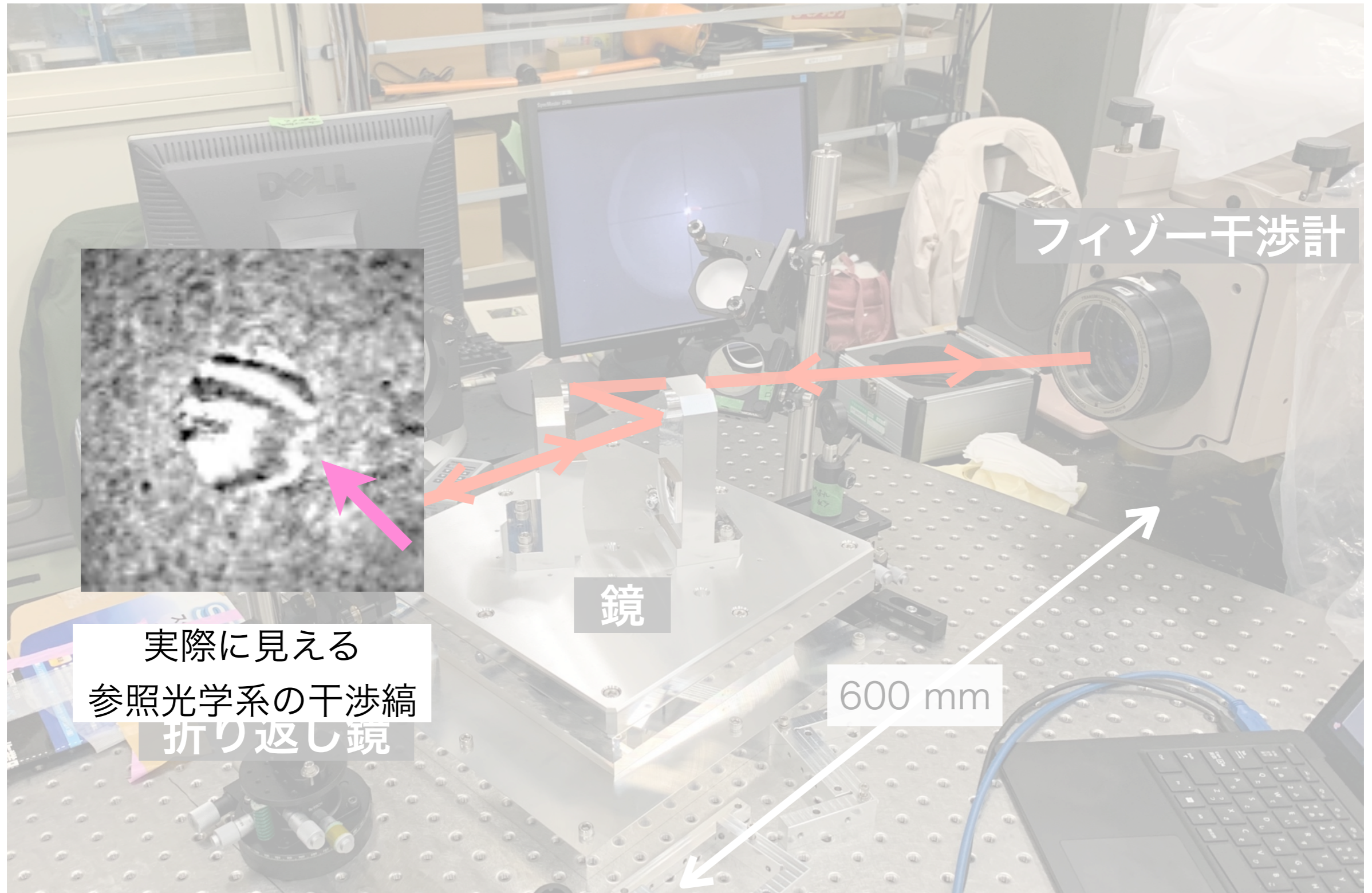
光学系模式図(横から見た図)

光学系模式図(上から見た図)

実際の光学系の外観

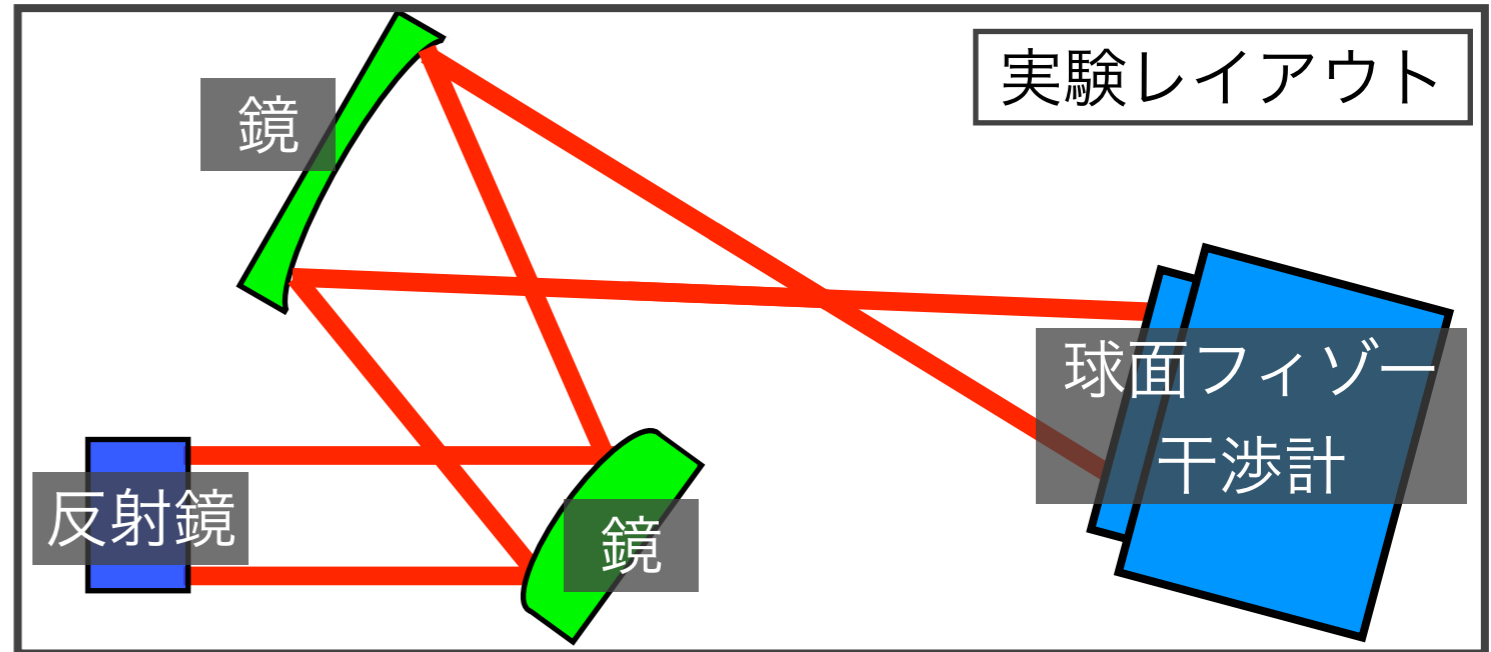


実際の光学系の外観

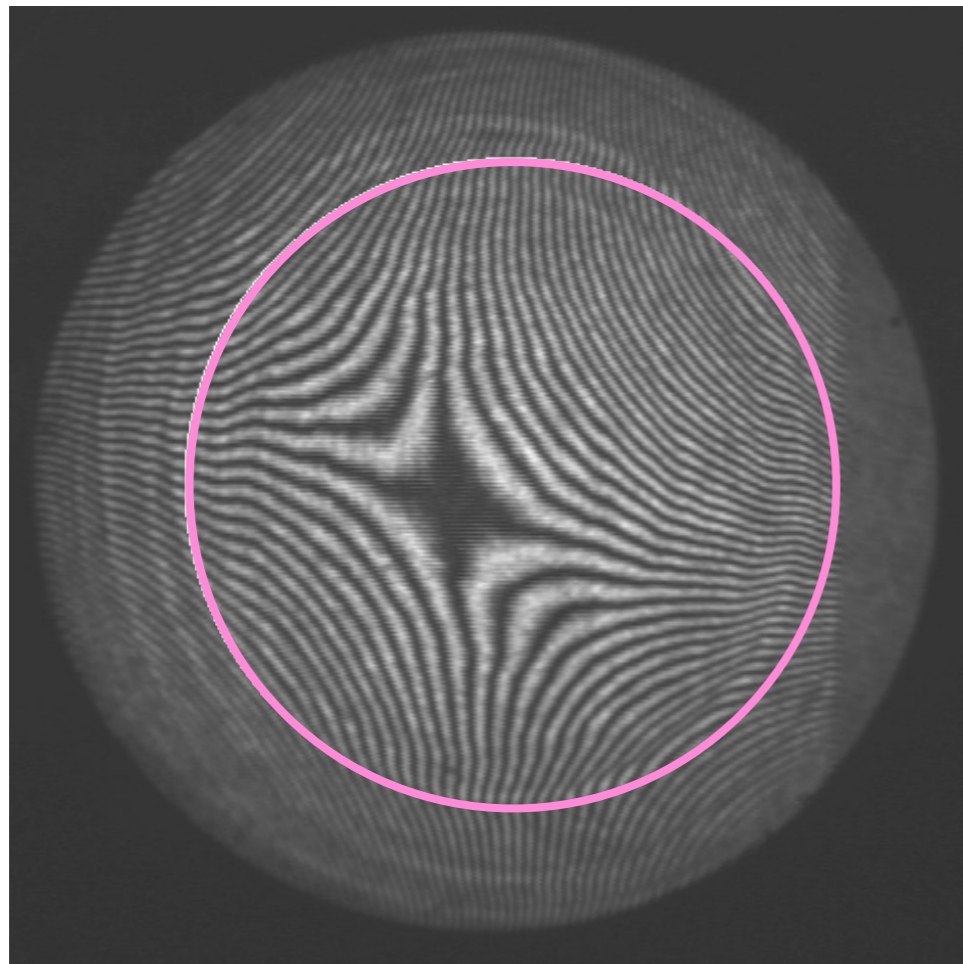


アラインメント結果

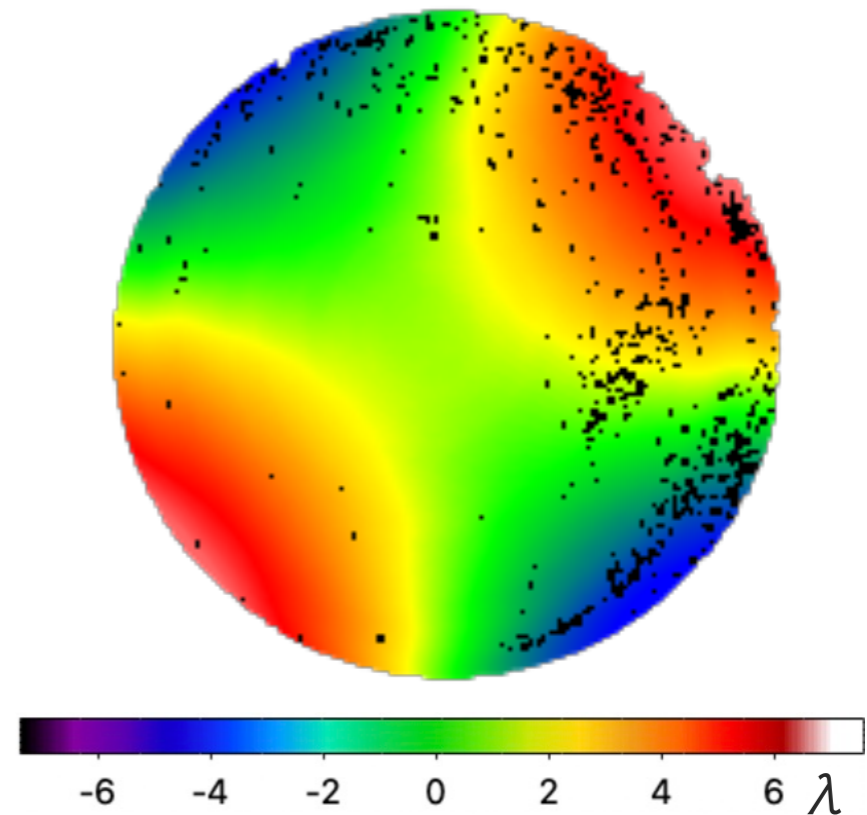
球面フィゾー干渉計で
自由曲面光学系の干渉縞、
波面誤差マップを取得



$RMS = 2.93 \lambda (\lambda = 633 \text{ nm})$



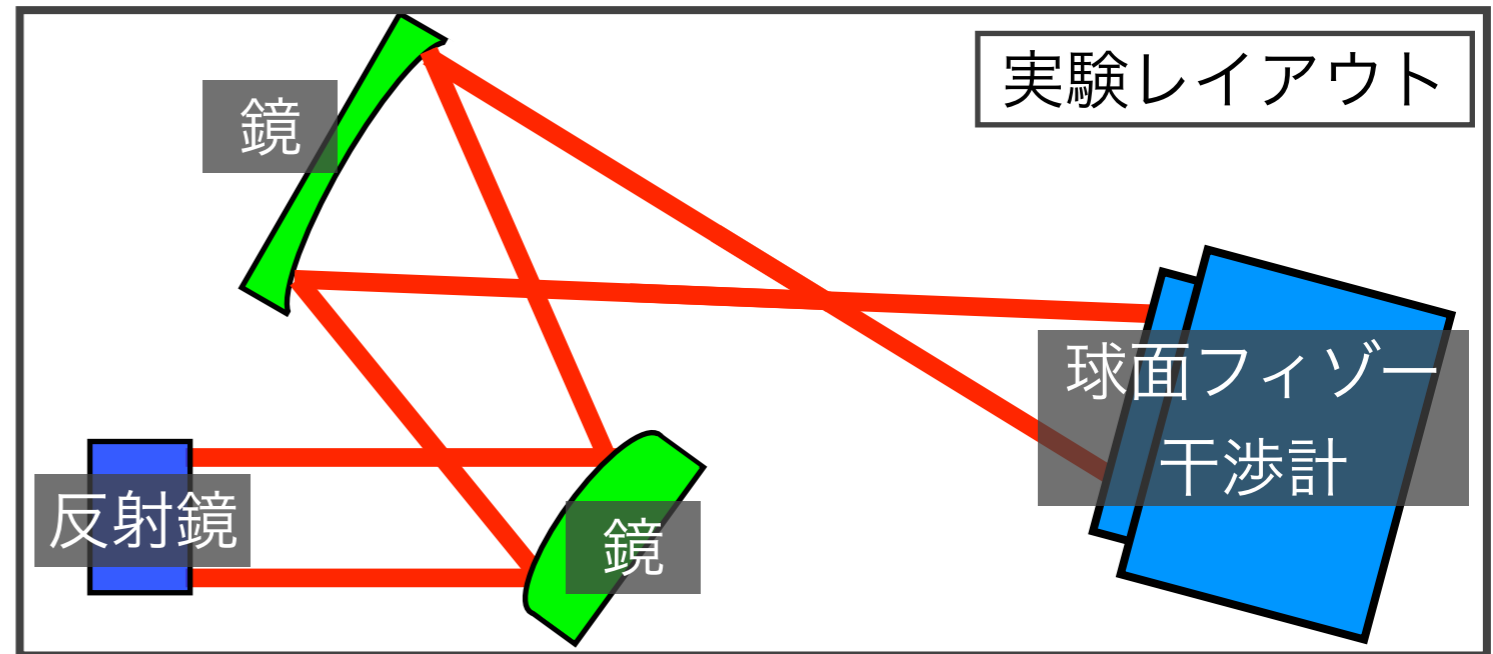
フィゾー干渉計で取得した干渉縞



左図円内の波面誤差マップ

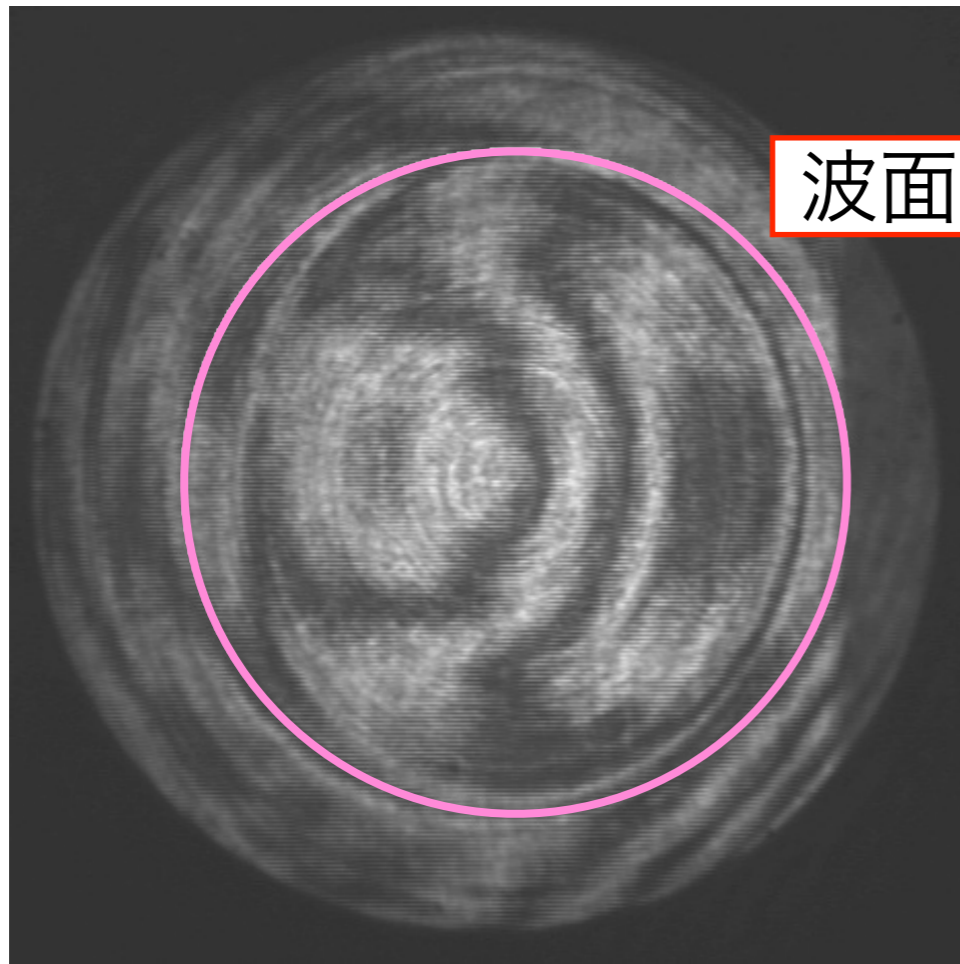
アラインメント結果

球面フィゾー干渉計で
自由曲面光学系の干渉縞、
波面誤差マップを取得
参照平面鏡の干渉縞が少なく
なるようにアラインメント

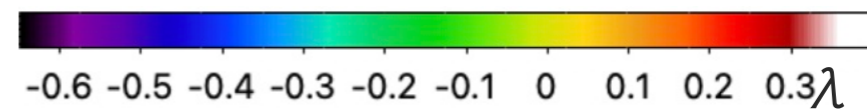
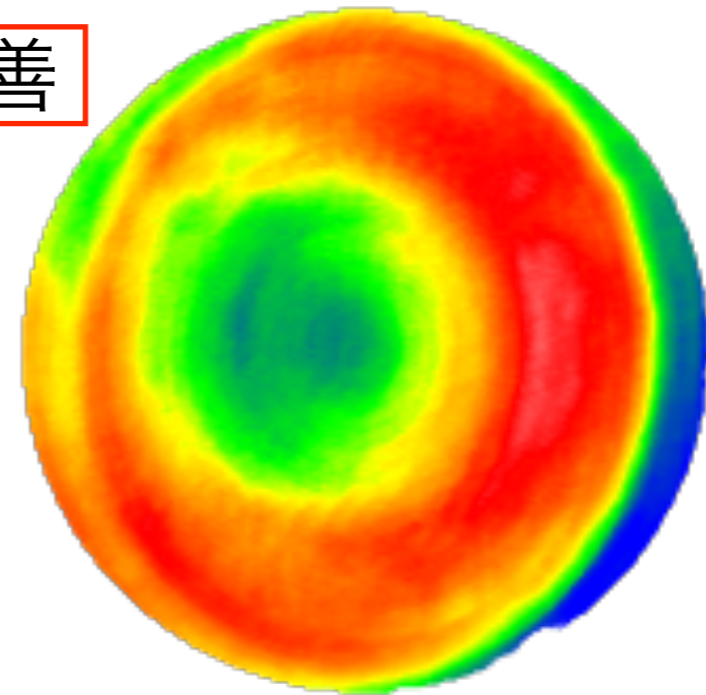


RMS = **0.25 λ** ($\lambda = 633 \text{ nm}$)

波面誤差値が改善



フィゾー干渉計で取得した干渉縞

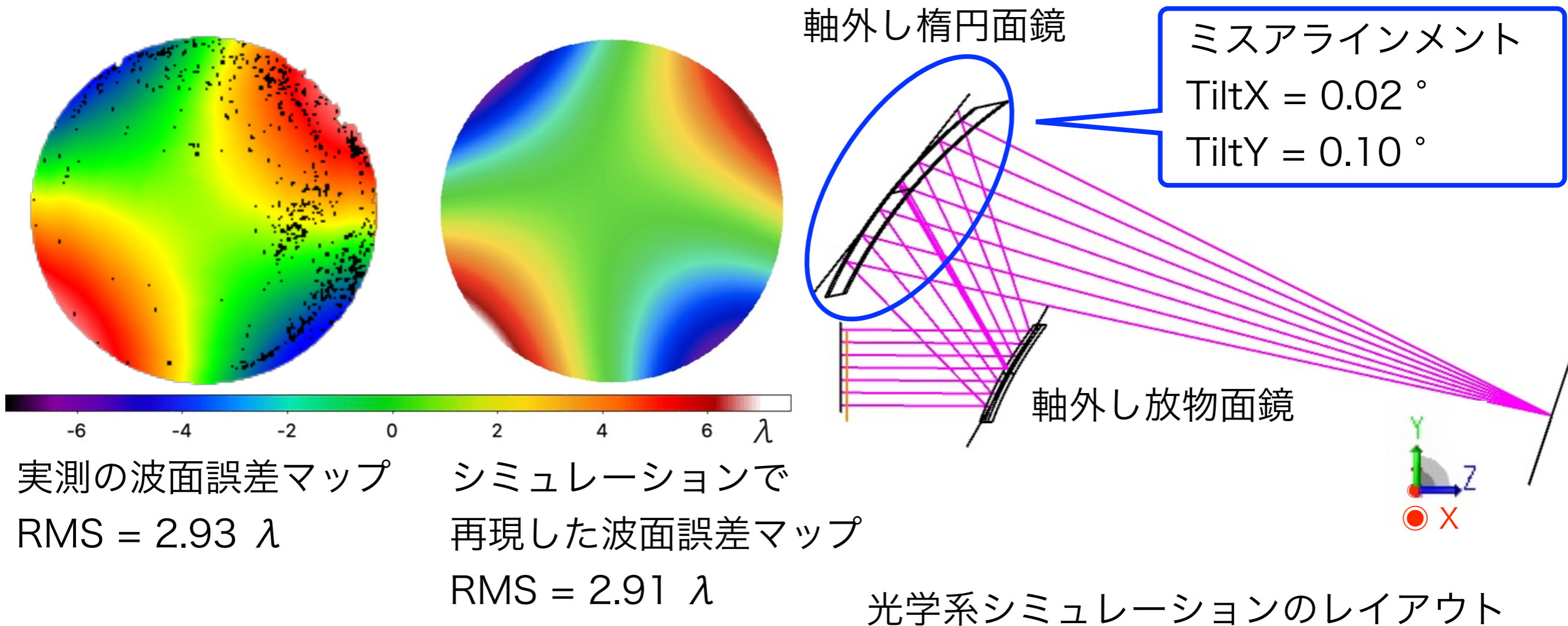


左図円内の波面誤差マップ

光学シミュレーション

光学シミュレーションZemaxでの交差解析の結果、
本実験光学系で自由曲面光学系の透過波面誤差マップにおいて

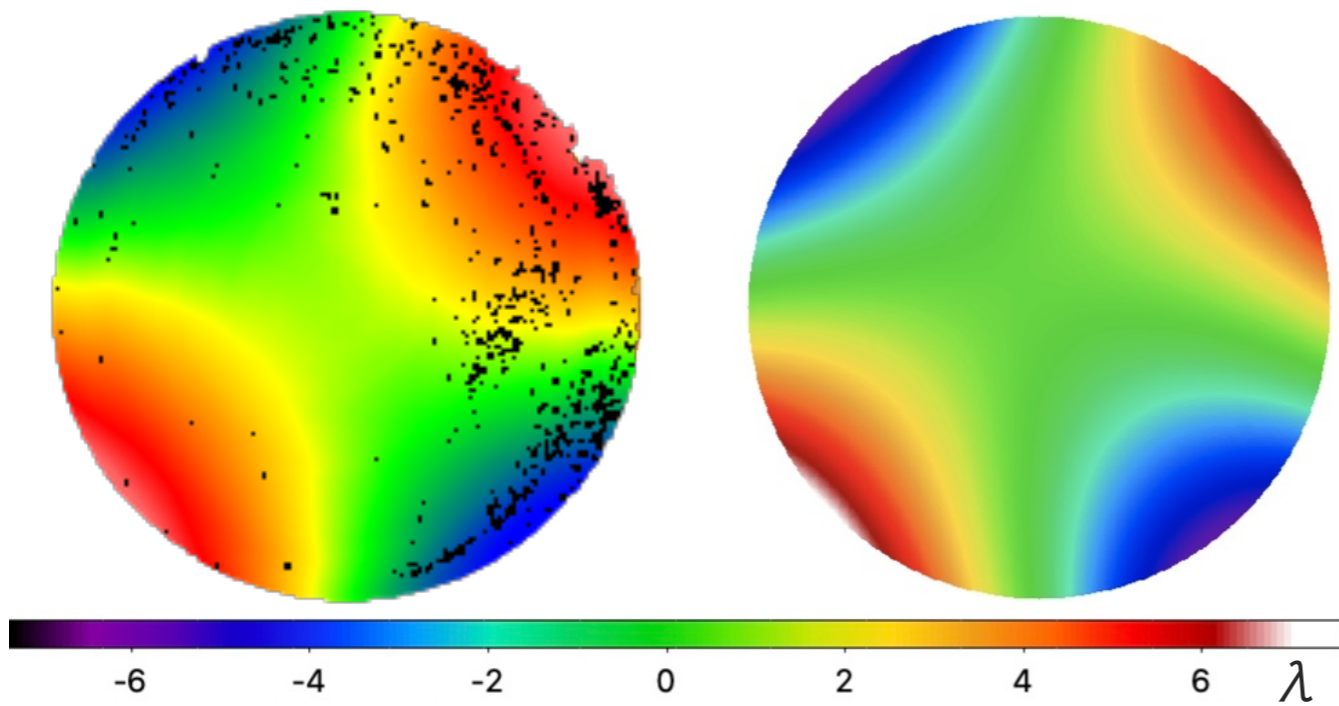
- ・非点収差は鏡のミスアラインメント由来



光学シミュレーション

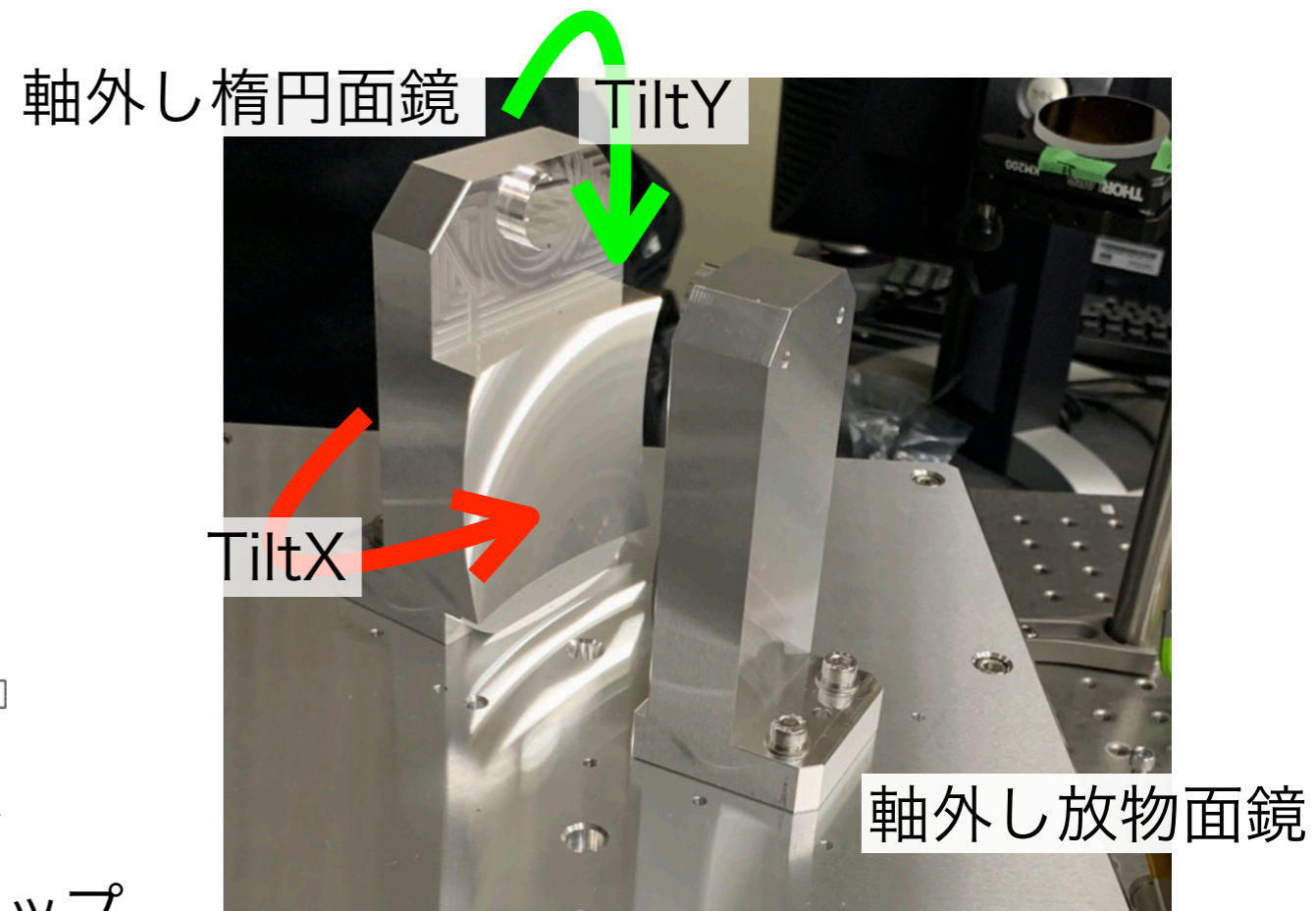
光学シミュレーションZemaxでの交差解析の結果、
本実験光学系で自由曲面光学系の透過波面誤差マップにおいて

- ・非点収差は鏡のミスアラインメント由来



実測の波面誤差マップ
RMS = 2.93 λ

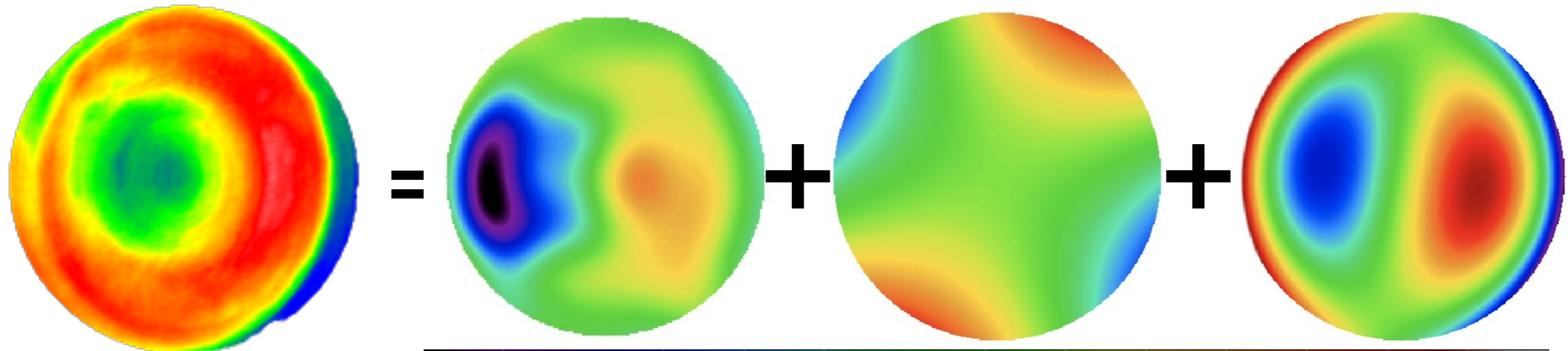
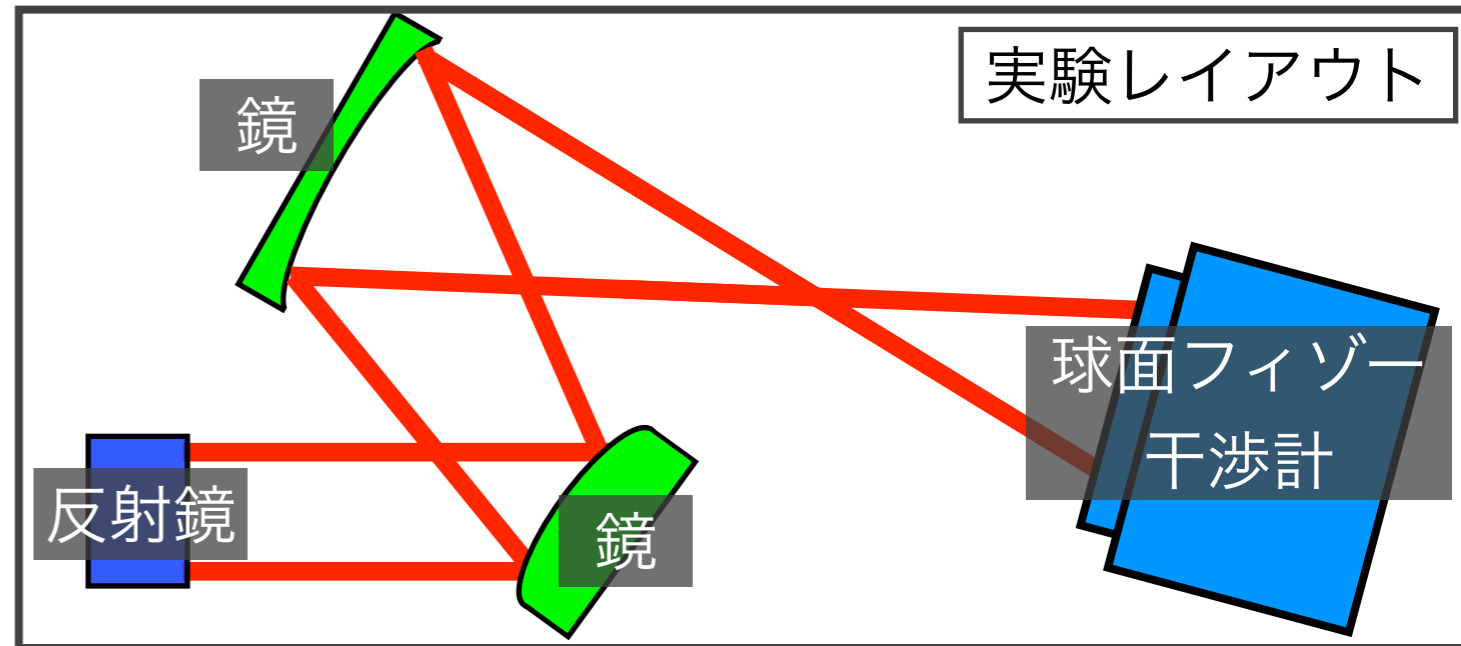
シミュレーションで
再現した波面誤差マップ
RMS = 2.91 λ



鏡のアラインメント補正の方向

アラインメント結果

球面フィゾー干渉計で取得した波面誤差マップを形状誤差、非点収差、コマ収差に成分分解



アラインメント後の波面誤差マップ
RMS = 0.25 λ

鏡の形状誤差
(接触式測定器で測定)
(0.16 λ)

非点収差
(0.11 λ)

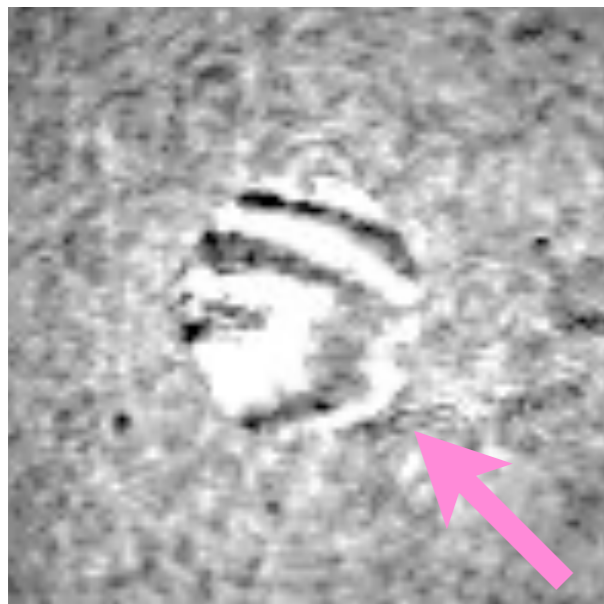
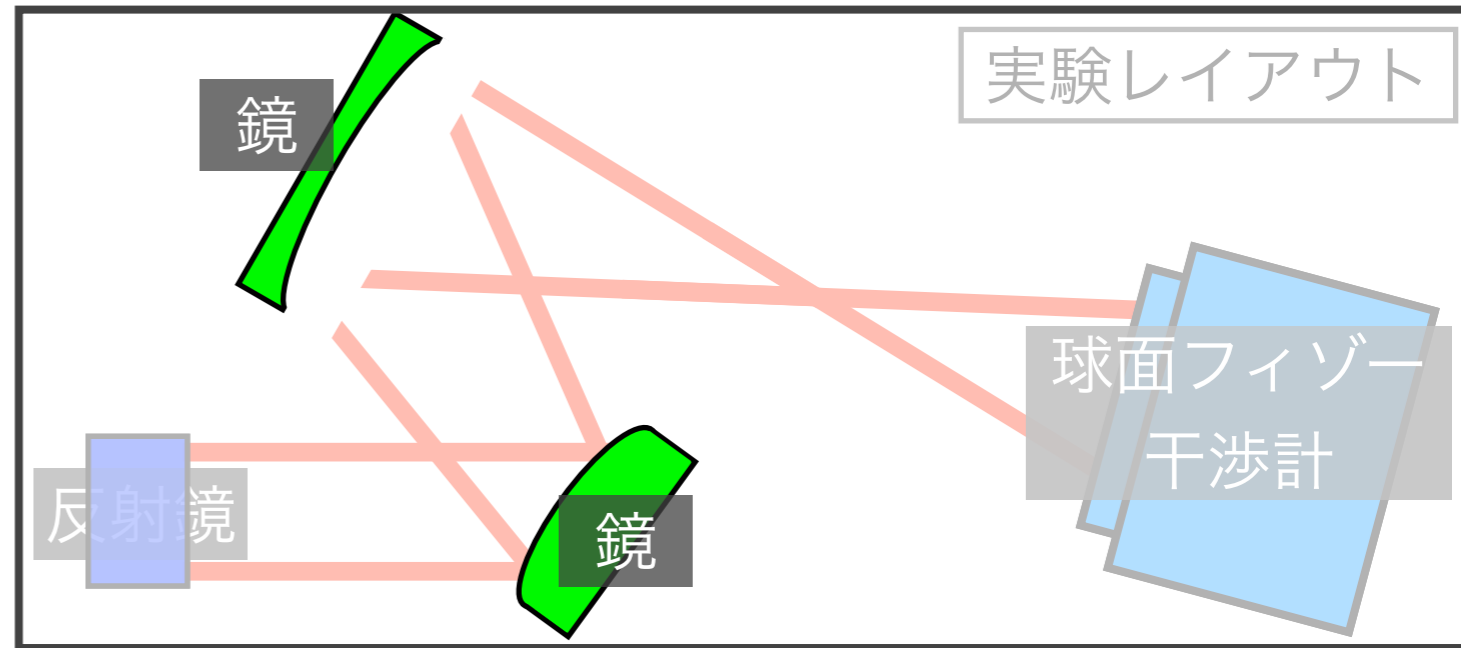
コマ収差
(0.17 λ)

鏡のミスアラインメント

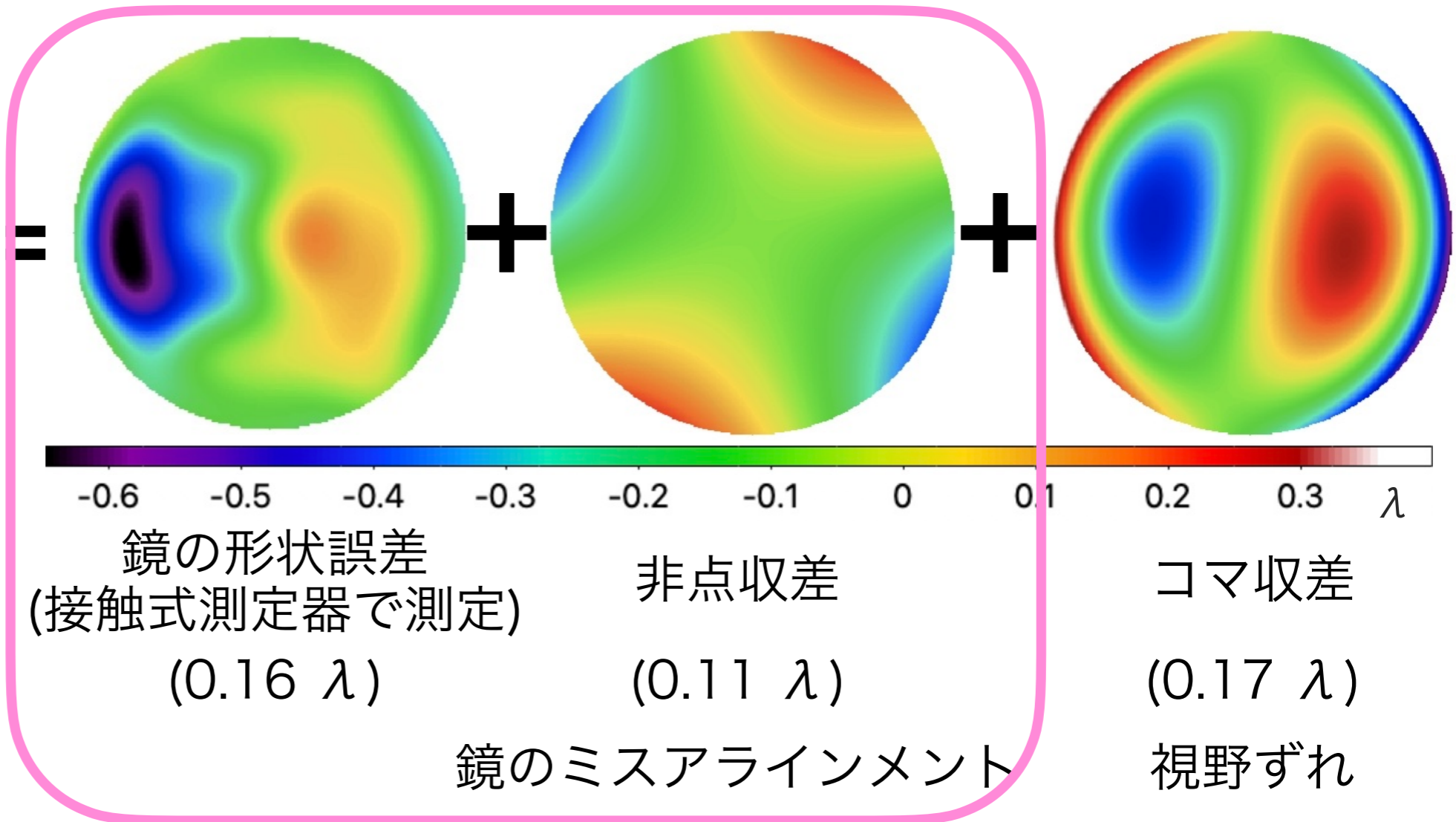
視野ずれ

アラインメント結果

球面フィゾー干渉計で取得した波面誤差マップを形状誤差、非点収差、コマ収差に成分分解

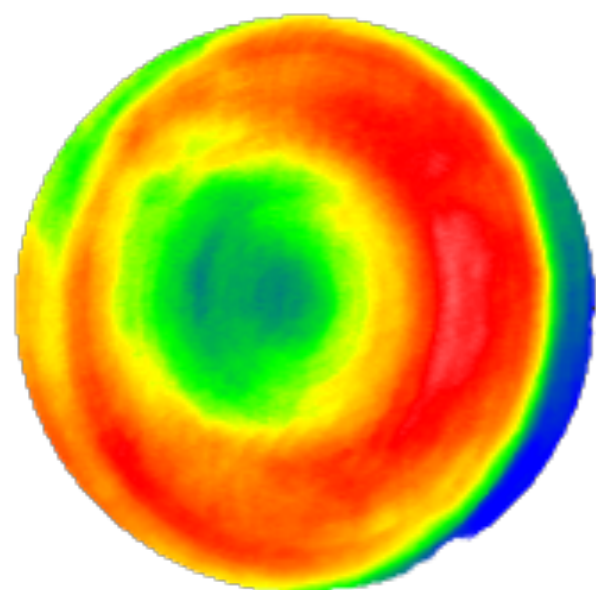
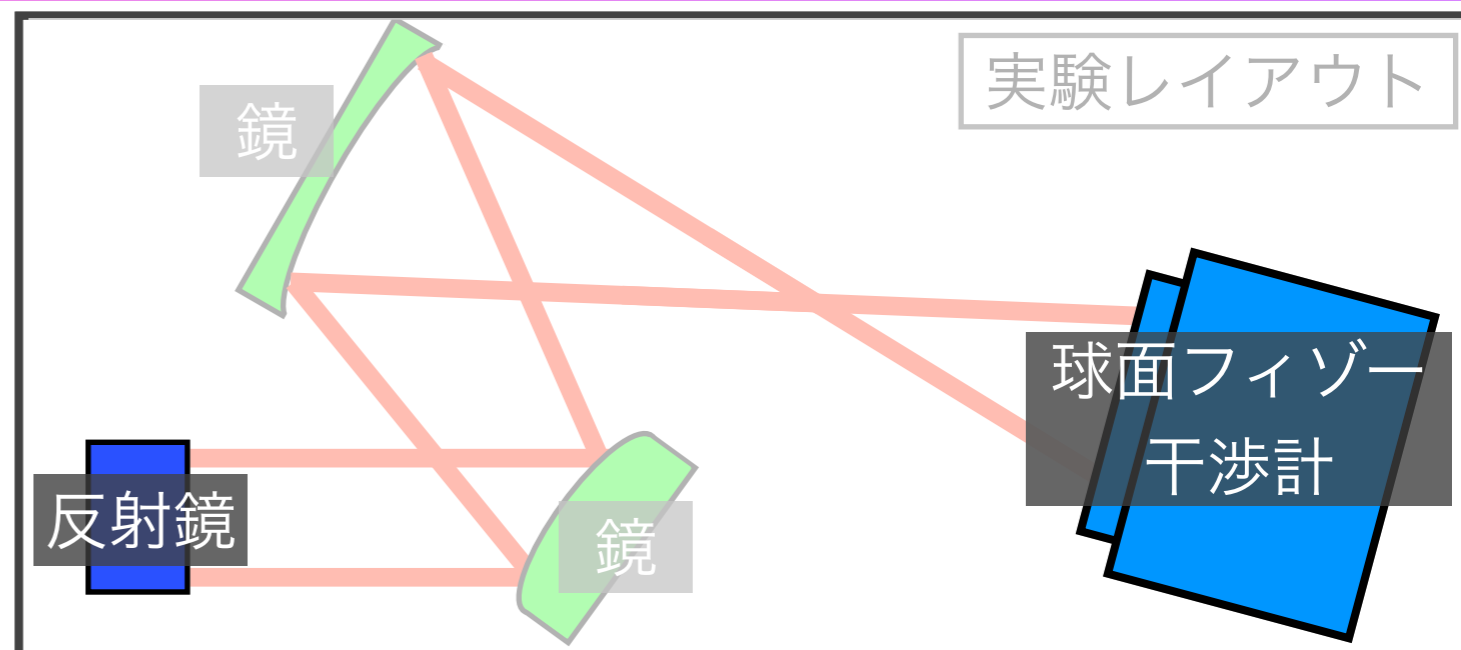


参照平面鏡の干渉縞でアラインメント後の干渉縞画像

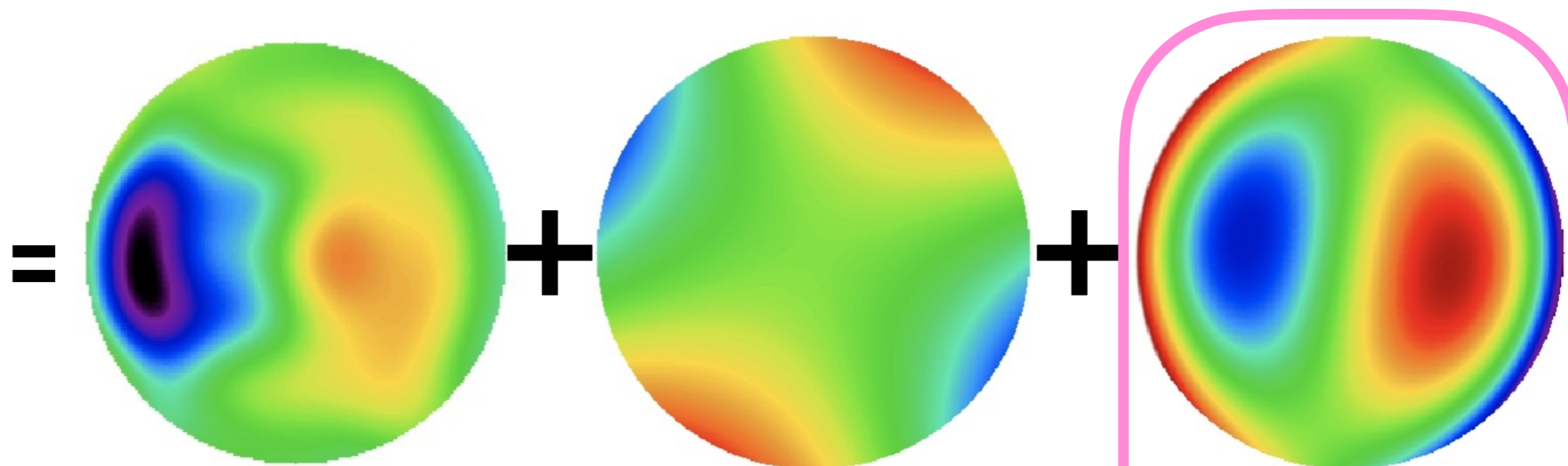


アラインメント結果

球面フィゾー干渉計で取得した波面誤差マップを形状誤差、非点収差、コマ収差に成分分解



アラインメント後の波面誤差マップ
RMS = 0.25 λ



鏡の形状誤差
(接触式測定器で測定)
(0.16 λ)

非点収差
(0.11 λ)

鏡のミスアラインメント

コマ収差
(0.17 λ)
視野ずれ

- スペース赤外線望遠鏡に有効な自由曲面鏡光学系を簡単にかつ高精度にアライメントできる手法の開発
- 自由曲面鏡と参照平面鏡が一体となった光学系の導入
 - ▶ 参照平面鏡とレーザー干渉計で簡単にかつ高精度なアライメントが可能に
- 自由曲面鏡光学系の波面誤差マップの取得に成功
 - ▶ 波面誤差マップの波面誤差値の改善に成功
- 非点収差+コマ収差の波面誤差値の改善させる必要
 - ▶ 波面誤差マップにコマ収差の成分あり、視野精度の向上が必要
 - ▶ 参照光学系の干渉縞の本数が最少で~3本、縞の本数を減らすようアライメントを行う予定