

# 広帯域分光装置NINJAおよび スリットへの導入手法の開発



Tomoya Yukino  
(Univ. of Tokyo, D1)

Chihiro Tokoku(PM), Takashi Moriya(PS), Michitoshi Yoshida(PI),  
Shinobu Ozaki, Kenshi Yanagisawa, NINJA development team

# NINJA Overview

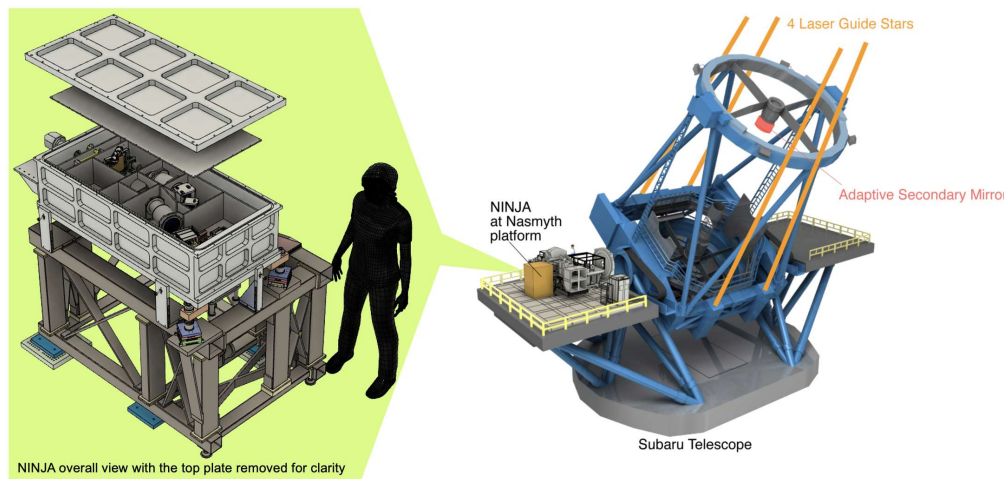


## NINJA (Near-InfraRed and optical Joint spectrograph with Adaptive optics)

- すばる望遠鏡に設置予定の中分散分光観測装置
- 可視光(0.35-0.8 $\mu\text{m}$ )と近赤外線(0.8-2.5 $\mu\text{m}$ )の2つの分光器からなる予定
- 近赤外線分光器が先行して開発中 (ファーストライト: 2026年ごろ)

### ターゲット:

- キロノバ, high-z銀河, etc…  
(暗い天体が多い)
- これらを~0.3"幅スリットで分光



NINJA/すばる望遠鏡の外観

# スリットへの導入手法



NINJAのスリットは~0.3"幅と狭いため、導入手法の検討が必要

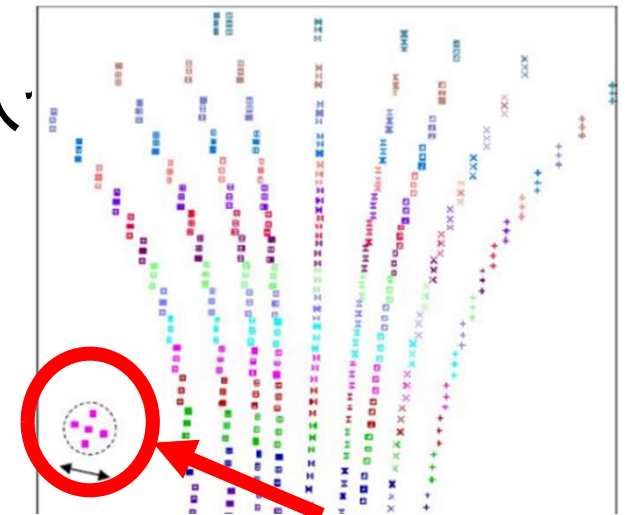
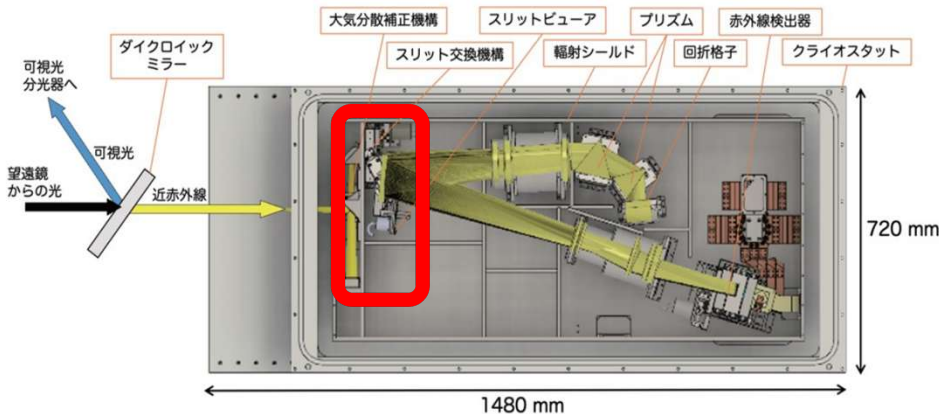
## A) 明るい天体がターゲットの場合

### スリットビューアを利用

- スリット通過前の天体の像を検出器上に映し出す機構
- FoV:  $\Phi \sim 10''$ , 波長範囲:  $1.0 \sim 2.5 \mu m$
- 天体のスリット導入の際はこれを参照しながら導入

エシエルフォーマット

暗い天体は短時間の露光では映らないため、**別の手法が必要**



検出器上でのスリットビューアによる像

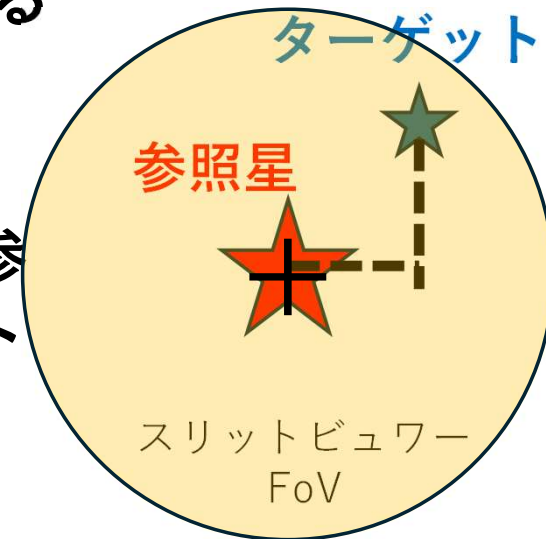
# スリットへの導入手法



## B) 暗い天体がターゲットの場合

- ターゲット付近にある明るい恒星を利用して導入する

1. 同一のカメラ内に映せるほどターゲットに近い、**明るい恒星を参照星としてスリットに導入する**
2. 参照星とターゲットの**相対位置とカメラ上での参照星の位置をもとに望遠鏡を動かし、ターゲットをスリットに導入する**



- スリットビューワーのFoV:  $\Phi \sim 10''$

明るい恒星が都合よくターゲットのすぐ近くにあるとは限らないため、**比較的遠くとも対応できるようにする必要がある**

# 参照星が遠い場合の対策



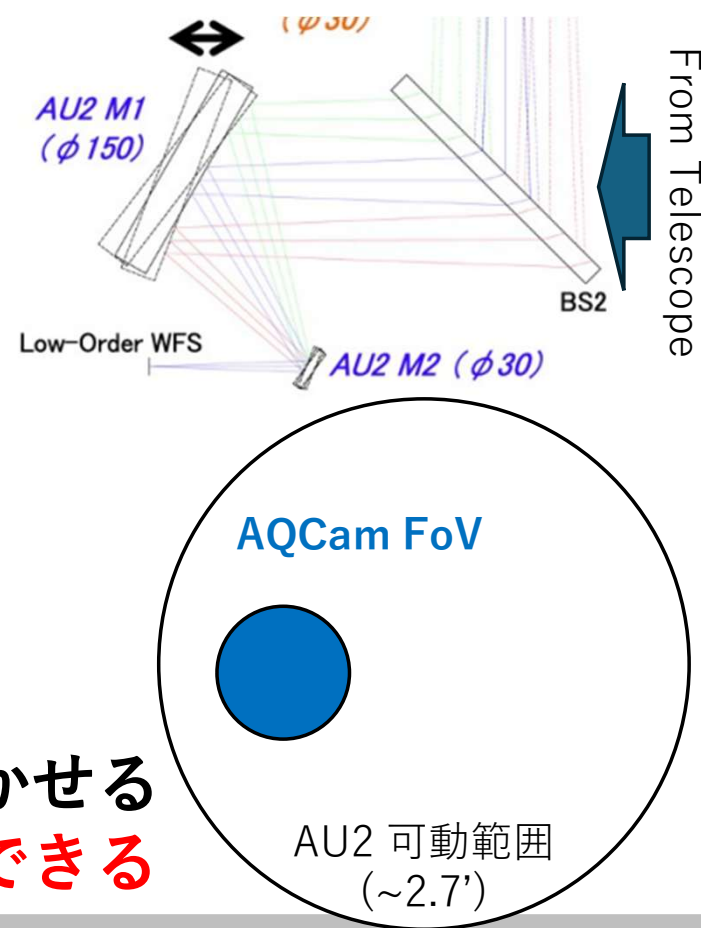
補償光学装置AO188の低次波面センサー側のAcquisition Unitと Acquisition Cameraを使用して導入する

## Acquisition Unit(AU2):

傾きを変化させることで、波面センサーの視野をコントロールできる鏡

## Acquisition Camera(AQCam):

波面センサーの視野を撮影できるカメラ。視野は $\phi \sim 20''$



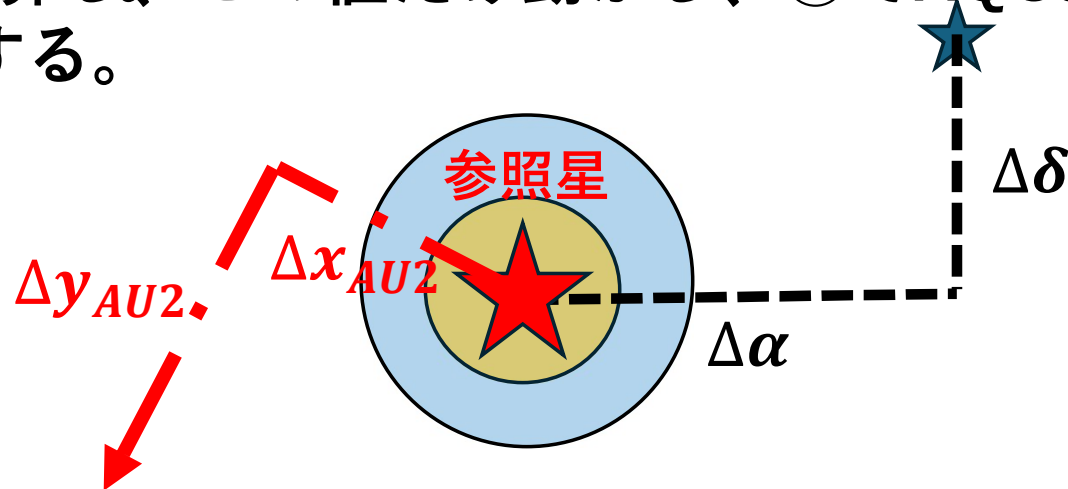
AU2を使うことで、AQCamの視野を最大 $\sim 81''$ 動かせる  
ややターゲットから遠い恒星を参照星として使用できる

# 参照星が遠い場合のスリット導入手順



AU2の移動量( $\Delta x_{AU2}, \Delta y_{AU2}$ )と天球上での相対座標( $\Delta\alpha, \Delta\delta$ )の関係を利用

② 赤十字ゲッターの参照星傾斜鏡座標を、 $\Delta\delta$ をも導入するを動かす値 AU2 (base position)を計算し、この値だけ動かし、①でAQCcam上で参照星があった位置に導入する。



橙:スリットビューワーFoV  
青: AQCcam FoV

## 導入を行う上での問題点



AU2を動かしてAQCamの視野を移動させるため、AQCamの画像を参照に使用するには $(\Delta\alpha, \Delta\delta)$ と $(\Delta x_{AU2}, \Delta y_{AU2})$ の正確な関係式が必要

AO188の内部光源を用いて測定された式:

$$\begin{pmatrix} \Delta x_{AU2} \\ \Delta y_{AU2} \end{pmatrix} = \frac{1}{p} \begin{pmatrix} 0.010985 & -0.000063 \\ 0.000049 & 0.011013 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\Delta\theta & \sin\Delta\theta \\ \sin\Delta\theta & -\cos\Delta\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta\alpha \\ \Delta\delta \end{pmatrix}$$

$\Delta\theta$ : IRCSカメラのPosition Angle( $\sim 0.41$ deg)

$p$ : IRCS(20mas)のpixel scale(0.02042"/pix)

この式は**天球座標上での精度が不明**

**$\Rightarrow$ 試験観測により、0.3"スリット導入に必要な精度の関係式を  
求めることを試みた**

目標:以下の関係式の係数 $a_f, a_g, b_f, b_g$ を求める

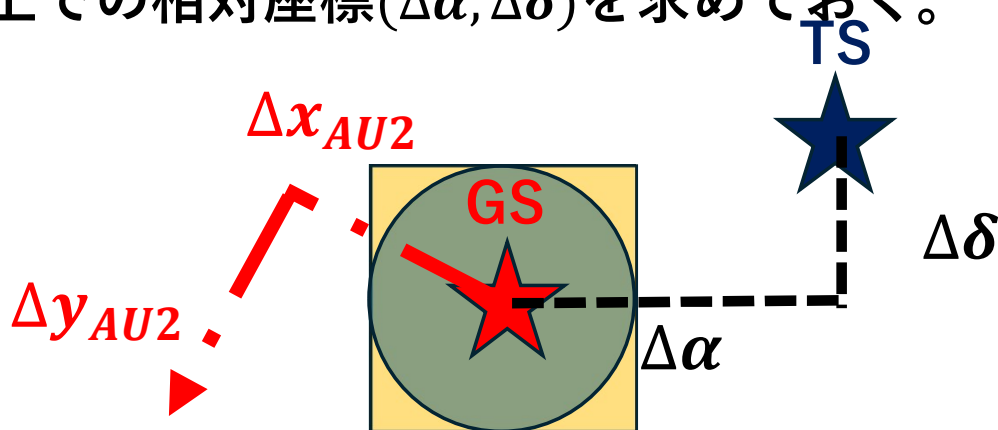
$$\begin{pmatrix} \Delta x_{AU2} \\ \Delta y_{AU2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_f & b_f \\ a_g & b_g \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta \alpha \\ \Delta \delta \end{pmatrix}$$

よって、試験観測によりある $(\Delta \alpha, \Delta \delta)$ に対応する $(\Delta x_{AU2}, \Delta y_{AU2})$ を複数測定し、それらのデータを上式でフィッティングし、係数を求めればよい

# 試験観測の手順



③ 観測対象の恒星は、ICRS 20mas FoVから得られた星表をAQCAMの視野に照らす。またAQCAMの視野の移動量画像(個像)を20個程度Target Star(記録S)として選び、Gaia DR3を参照してGSと各TSとの天球上での相対座標( $\Delta\alpha, \Delta\delta$ )を求めておく。



橙: ICRS 20mas FoV  
青: AQCAM FoV

以上の手順を複数のTSに対して行い、( $\Delta\alpha, \Delta\delta$ )と( $\Delta x_{AU2}, \Delta y_{AU2}$ )の値のセットを得て、フィッティングを行う

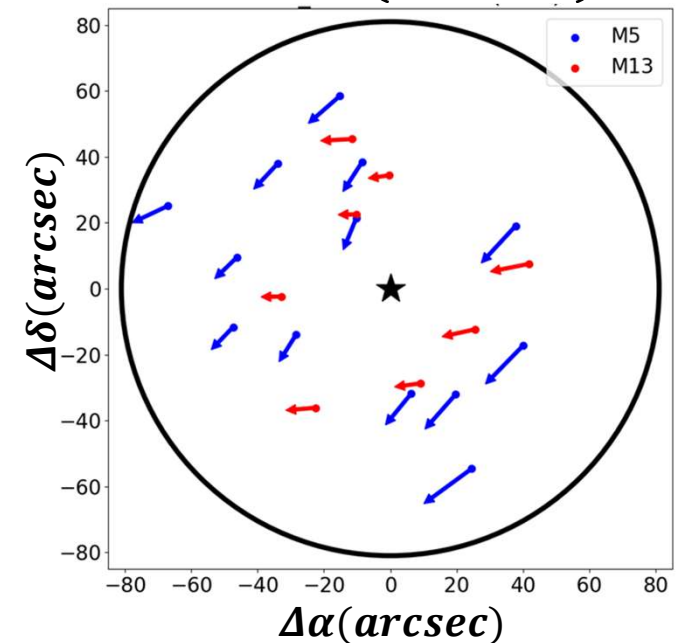
## フィッティング結果:

本観測では、21個のTSを観測した(M5から13個、M13から8個)

求めた関係式をもとに、以下の2つを残差ベクトルを描いて比較

1. カタログから求めたGSとTSの間の $(\Delta\alpha, \Delta\delta)$ (矢印の始点)
2. 観測中に記録した $(\Delta x_{AU2}, \Delta y_{AU2})$ を関係式で変換して求めた $(\Delta\alpha, \Delta\delta)$ (矢印の終点)

矢印の始点を1.に合わせ、1.と2.の差分を矢印の長さとしてプロットした天球座標上での残差ベクトル。なお長さは**10倍**にして示している。中央の★はGSの位置を表す。



- 残差ベクトルが平行移動のようなパターンを示した
- 平行移動の方向は観測した天域ごとに異なっていた

平行移動のような残差ベクトルのパターンがみられた原因・球状星団ごとにパターンが異なる原因は？

⇒  $(\Delta x_{AU2}, \Delta y_{AU2})$  の原点が移動している？

フィッティング結果に対し、データ点は平均で

M5:  $(\overline{\Delta x_{AU2}}, \overline{\Delta y_{AU2}}) = (-0.34, 0.36)mm$

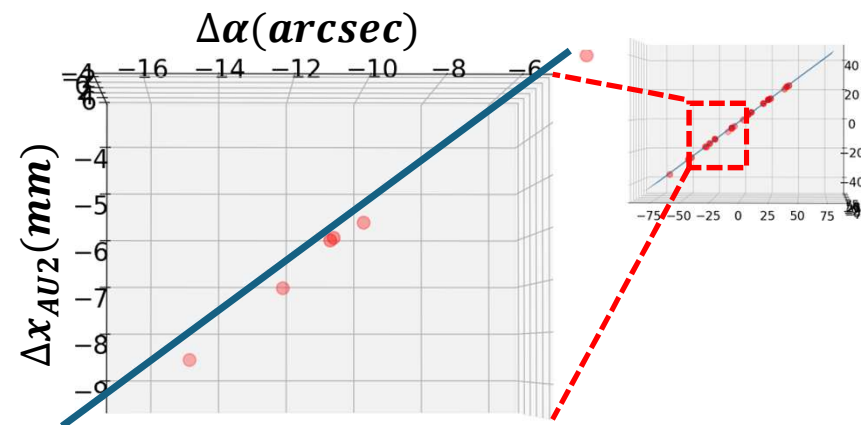
M13:  $(\overline{\Delta x_{AU2}}, \overline{\Delta y_{AU2}}) = (-0.28, 0.04)mm$

だけ平行移動したところに分布

(天球座標上で $\sim 1''$ のズレに相当)

現状、これを引き起こす要因は不明(特定作業の実施中)

一旦、 $(\Delta x_{AU2}, \Delta y_{AU2})$  の記録値から平均値を差し引いて原点移動を補正し、その結果を確認する



$(\Delta\alpha, \Delta\delta, \Delta x_{AU2})$ 空間にプロットしたフィッティング結果(青)とデータ点(赤)

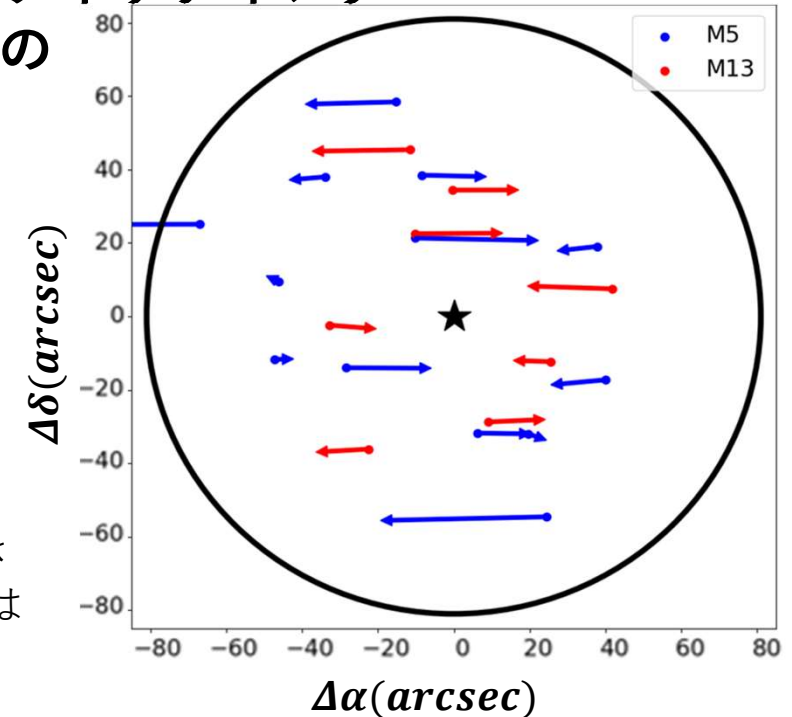
## 結果( $\Delta x_{AU2}, \Delta y_{AU2}$ )の原点移動補正後)



AU2の移動量の原点移動を補正した結果を用いて再度フィッティング  
同様に残差ベクトルをプロットし、スリット導入の際の  
精度の推定も行う

スリット導入の際の精度:  
残差ベクトルの長さ $|l_i|$ の平均をとって推定できる

AU2の移動量を補正した場合の天球座標上での残差ベクトル。なお長さは**100倍**にして示している(p10とは倍率が異なるので注意)。中央の★はGSの位置を表す。



残差ベクトルの長さ平均:0.169arcsec(0.3"幅スリットに導入するうえで精度不足)  
RA方向に大きな残差が残っており、導入の上で大きな懸念点

## 結果のまとめ



- NINJAはAO188の背面に設置されるため、AO188のAcquisition UnitおよびAcquisition Cameraを暗い天体のスリット導入に使用する  
⇒天球上での相対座標からAcquisition Unitの移動量を正確に決める必要がある  
⇒AO188とIRCSを用いた試験観測で正確な変換式を定める
- 残差ベクトルを求めたところ、平行移動のようなパターンがみられる
- AU2の移動量( $\Delta x_{AU2}, \Delta y_{AU2}$ )について原点移動が起きていたように思われるが、その原因は不明のため調査の必要がある
- 原点移動を補正すると、残差の絶対値の平均は0.169”
  - 0.3”幅スリットへの導入には絶対精度は不足している。
  - RA方向の残差が卓越しており、Dec方向のズレは非常に小さい。
  - スリットをRA方向に合わせる運用をすることも考えられるが、そもそもRA方向に大きな残差がみられる原因は不明のため調査の必要がある

## 今後の予定

- 再観測による精度向上

現時点での問題点は以下の3点

- (1) オフセットの精度は0.169"で、要求を満たせていない。
- (2)  $(\Delta x_{AU2}, \Delta y_{AU2})$ の原因不明の原点移動が起きているとみられる
- (3) 原点移動補正後も、RA方向に大きな残差がみられる

⇒光学系の詳しい調査とともに、条件を変えて追加観測を実施し、問題点の原因究明を行う

- スリット導入試験の実施

AU2とAQCamを用いたスリット導入は実際に行われたことがない

⇒正確な関係式を決定後、IRCSカメラを用いた疑似的なスリット導入試験を実施しその信頼性を確認する

- 高次の項を含めたフィッティング

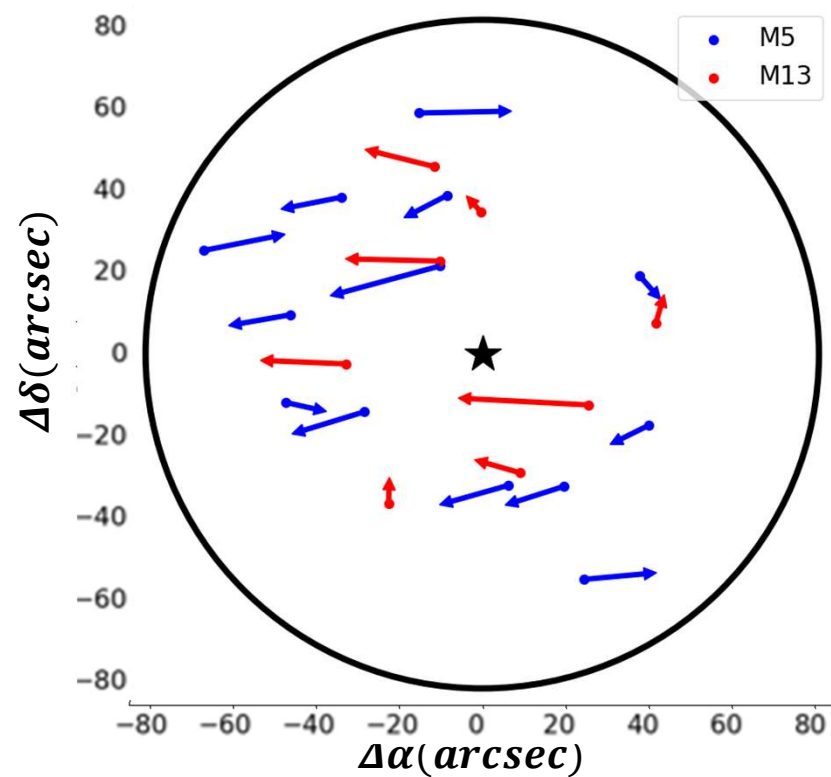
現在の変換式は1次式であり、distortionの効果を考慮していない

⇒distortionの効果を確認するため、追加観測によりデータ点を増やし、高次項を含めたフィッティングを行う

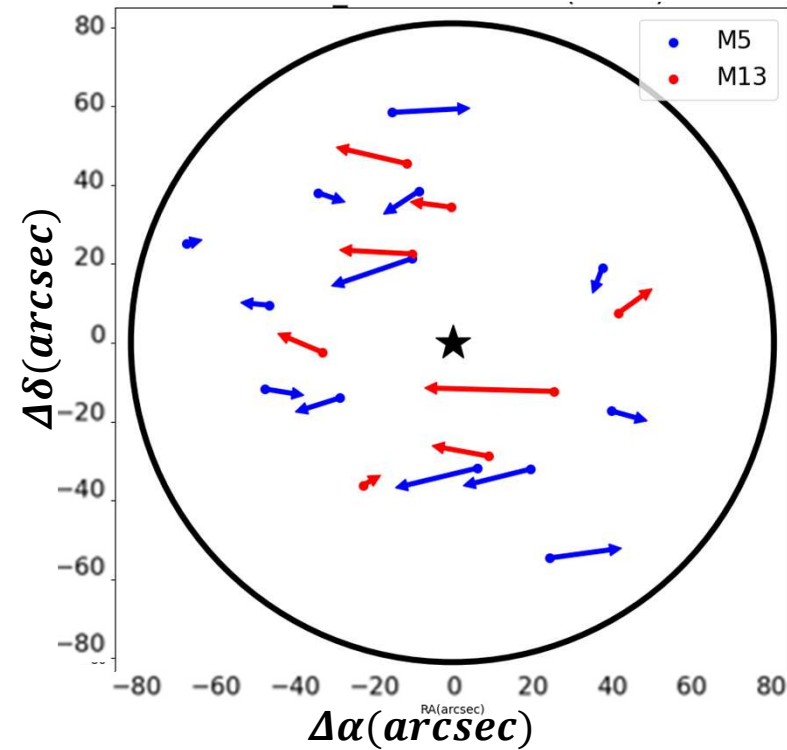
# Appendix: 二次・三次式によるフィッティング(補正前)



## 二次式



## 三次式

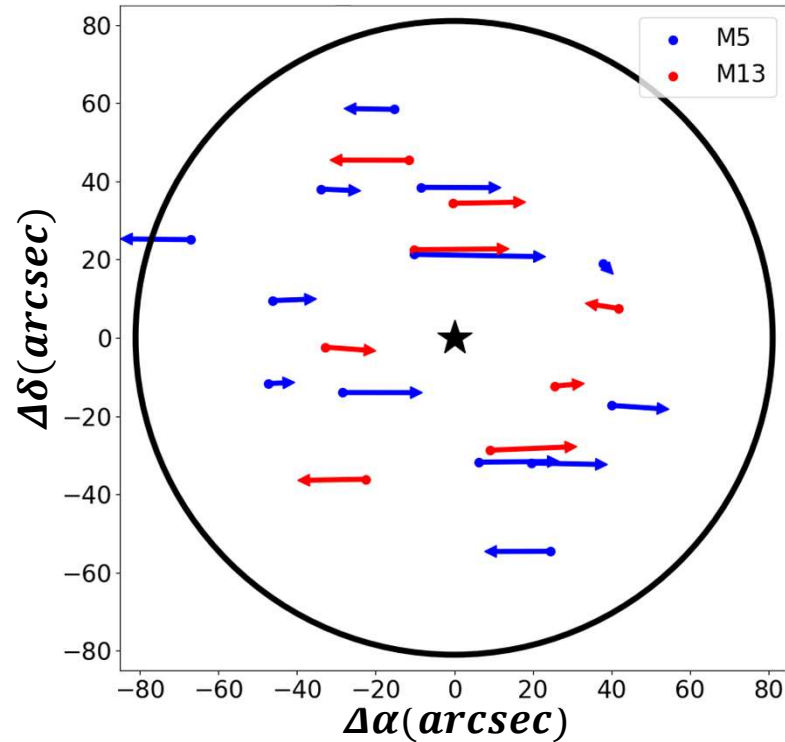


RA方向の残差はマイナス方向(左向き)への偏りがある点是一次式の場合と変わらず

# Appendix: 二次・三次式によるフィッティング(補正後)



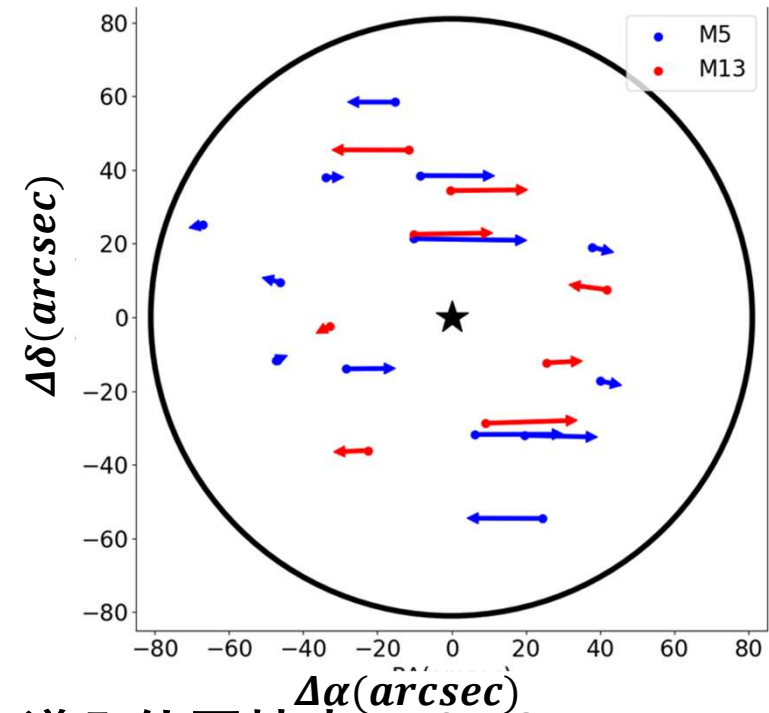
## 二次式



導入位置精度:  $\sim 0.142 \text{arcsec}$

RA方向の残差が大きいのでは解消できず

## 三次式



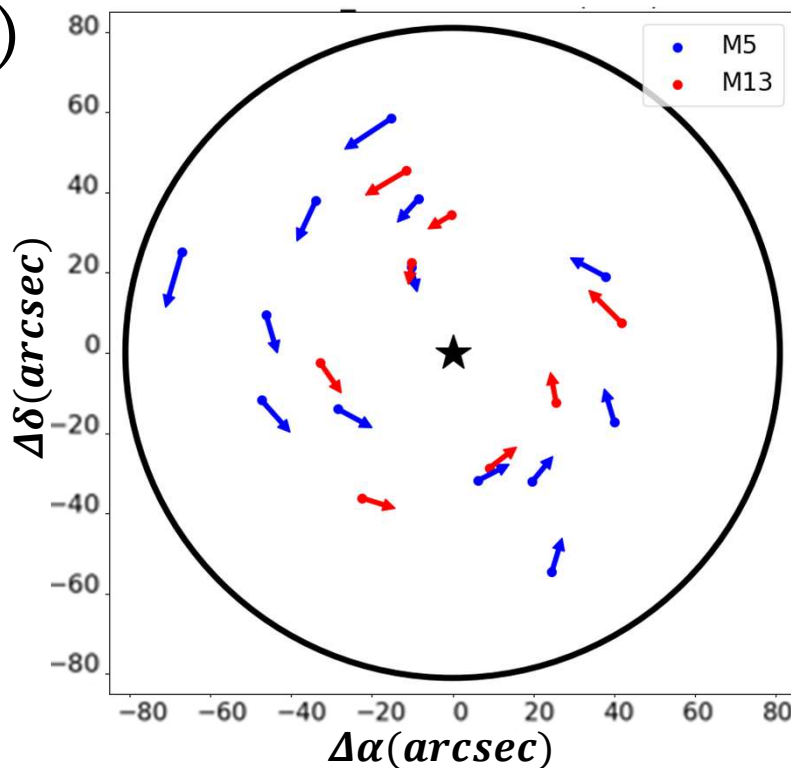
導入位置精度:  $\sim 0.121 \text{arcsec}$

# Appendix: 内部光源による変換式



$$\begin{pmatrix} \Delta x_{AU2} \\ \Delta y_{AU2} \end{pmatrix} = \frac{1}{p} \begin{pmatrix} 0.010985 & -0.000063 \\ 0.000049 & 0.011013 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\Delta\theta & \sin\Delta\theta \\ \sin\Delta\theta & -\cos\Delta\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta\alpha \\ \Delta\delta \end{pmatrix}$$

残差ベクトル(10倍)



座標の回転と思しき成分が補正しきれていない

# Appendix: 1次式フィッティングの結果



$$\begin{pmatrix} \Delta x_{AU2} \\ \Delta y_{AU2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_f & b_f \\ a_g & b_g \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta \alpha \\ \Delta \delta \end{pmatrix}$$

## 原点移動補正前

$a_f$	2.2356e-4	$a_g$	4.6778e-6
$b_f$	3.6442e-6	$b_g$	-2.2349e-4

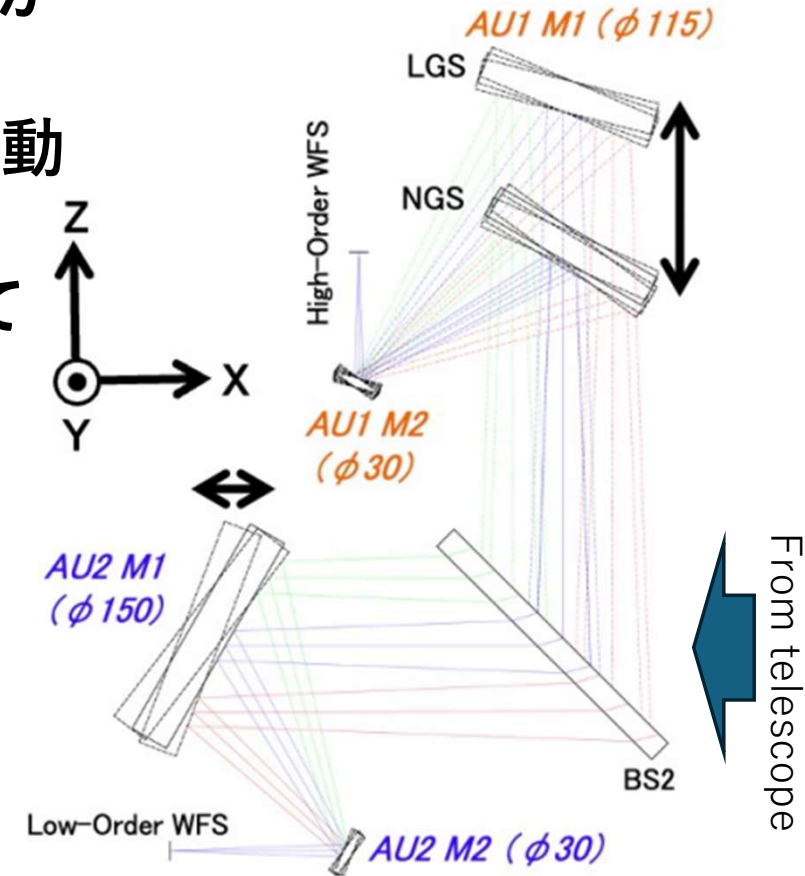
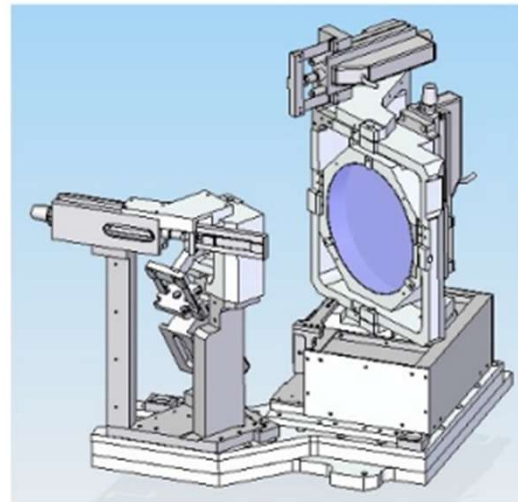
## 原点移動補正後

$a_f$	2.2272e-4	$a_g$	3.7179e-6
$b_f$	3.3729e-6	$b_g$	-2.2360e-4

# Appendix: Acquisition Unitの構造



- Acquisition Unitsは2つのジンバルミラーからなる
- 可動範囲内の天体からの光を、鏡の傾きを動かすことで波面センサーに導入できる
- (AU2には)2つの軸があり、互いに独立して動かすことができる



# A0188の光路図

