

# TMT/IRISを用いた高精度astrometry ～1億分の1度を測るために～

2012/12/14

国立天文台TMT推進室

鈴木 竜二

# Thirty Meter Telescope (TMT)



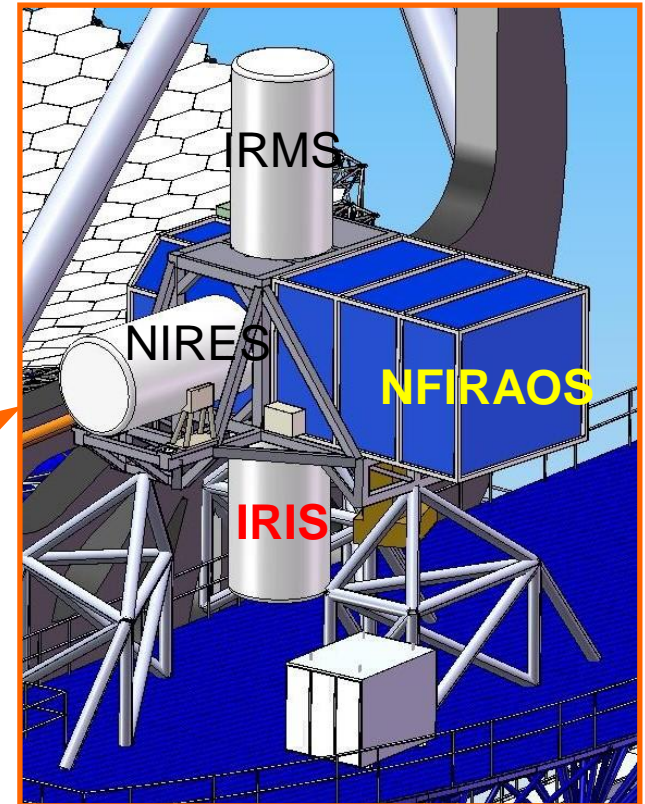
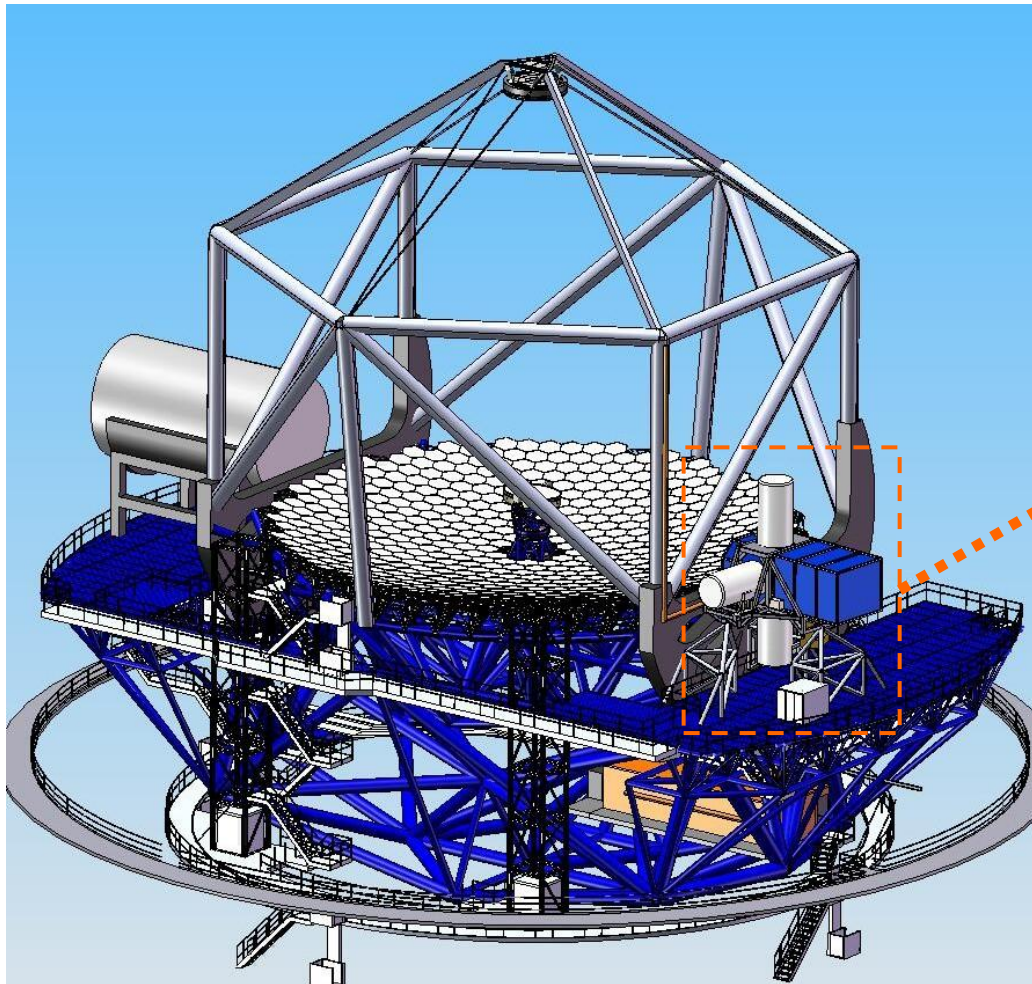
# Thirty Meter Telescope (TMT)

## Quick Facts

- ◆ 口径30mの光赤外望遠鏡
- ◆ 492枚のセグメント鏡で30mの口径を構成
- ◆ 建設予定地はハワイ島マウナケア山頂
- ◆ カリフォルニア大学、カリフォルニア工科大学、カナダ大学天文学連合、中国、インド、日本の国際共同プロジェクト
- ◆ 2004年にdesign phaseがスタート
- ◆ 2014年に建設開始、2021年に完成予定
- ◆ 建設費用：\$1.5 billion

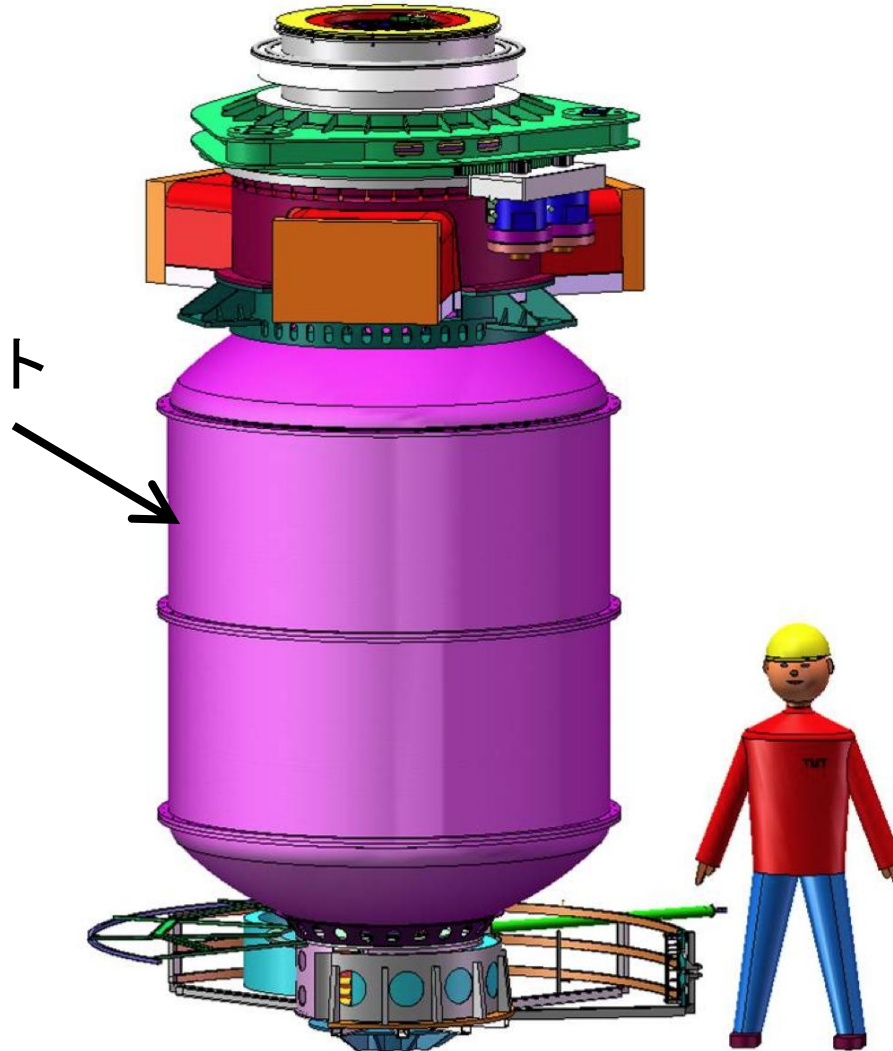


# IRIS on TMT

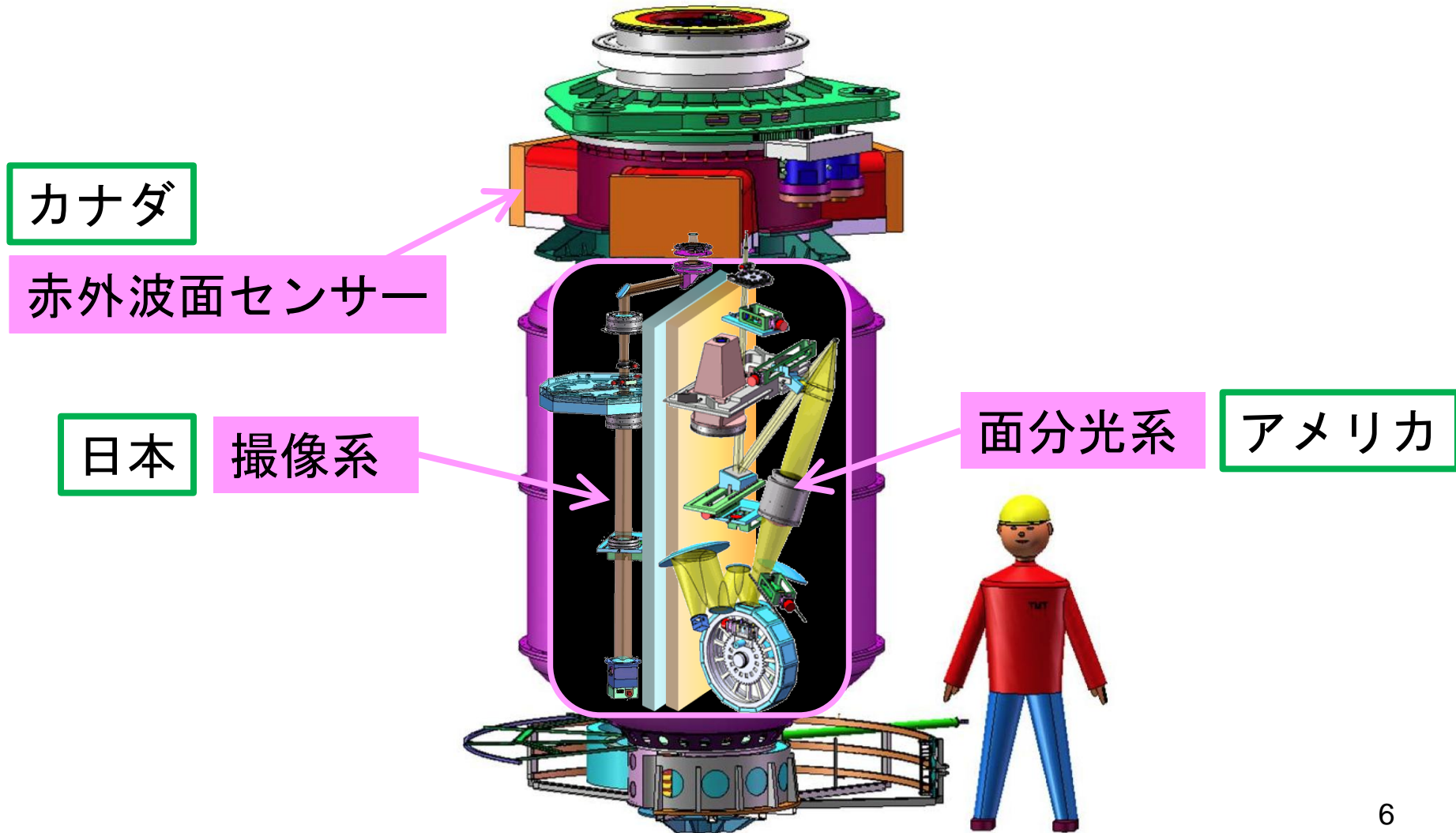


# IRIS instrument layout

クライオスタット  
(77K)



# IRIS instrument layout



- ◆ TMT第一期観測装置の一つ（IRIS, WFOS, IRMS）
- ◆ AOを用いた近赤外域での撮像と面分光
  - NFIRAOSの後段に配置
  - 波長域：0.83 – 2.40ミクロン
  - ストレール比：0.41(J), 0.60(H), 0.75(K)
- ◆ 撮像モード
  - ピクセルスケール：4ミリ秒/ピクセル
  - 視野：16.4秒角
- ◆ 面分光モード
  - 波長分解能：4,000 – 10,000
  - ピクセルスケール：4, 9, 25, 50ミリ秒/スパクセル

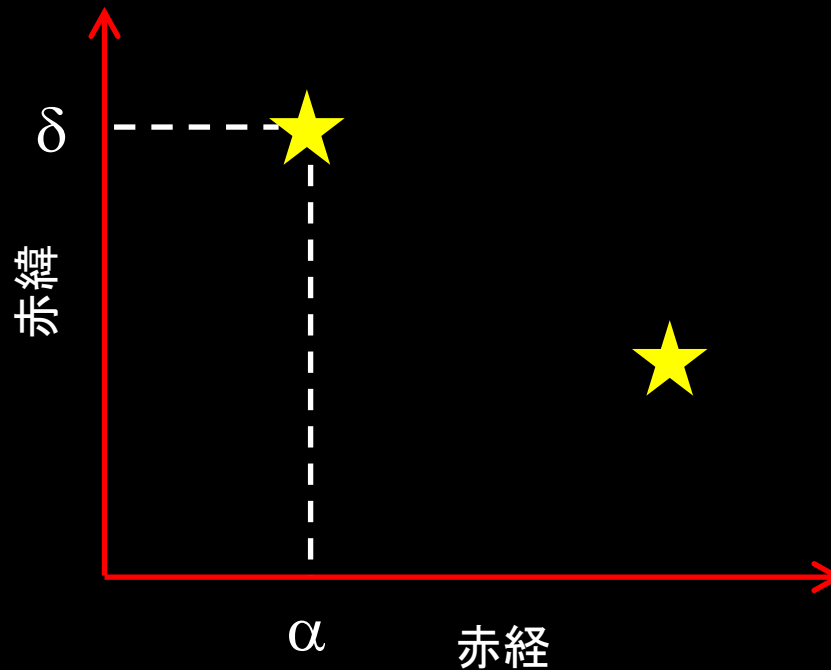


- ◆ 唯一30mの回折限界性能を利用できる観測装置
  - 空間分解能：10 – 25ミリ秒
  - 点源への感度（限界等級） $\propto D^4$ ：すばる望遠鏡の200倍
- ◆ 高精度のアstrometry
  - 30マイクロ秒の相対アstrometry
  - 2ミリ秒の絶対アstrometry
  - TMT/NFIRAOS/IRISでしか達成できないユニークな性能



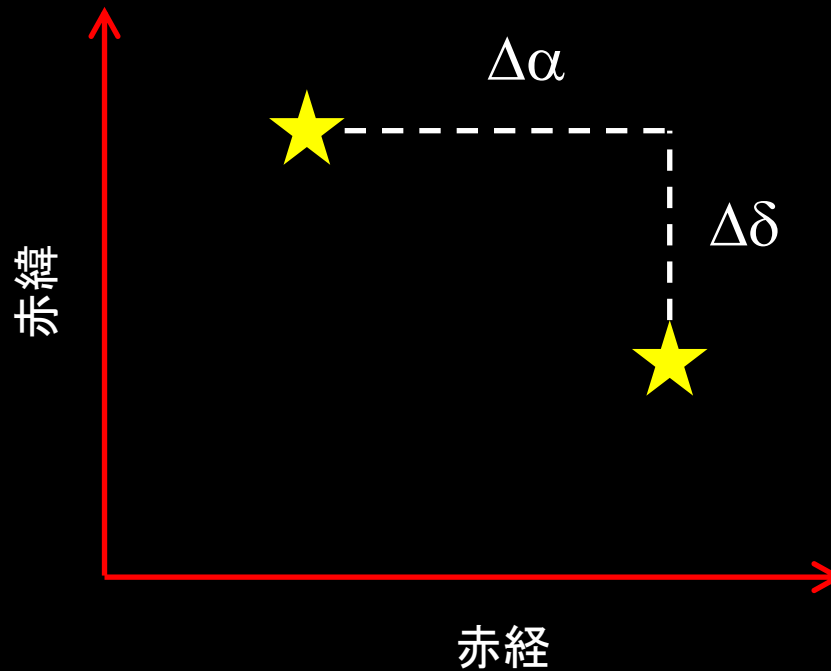
## ◆ 絶対アストロメトリ

- 天球上での天体の位置を正確に決める



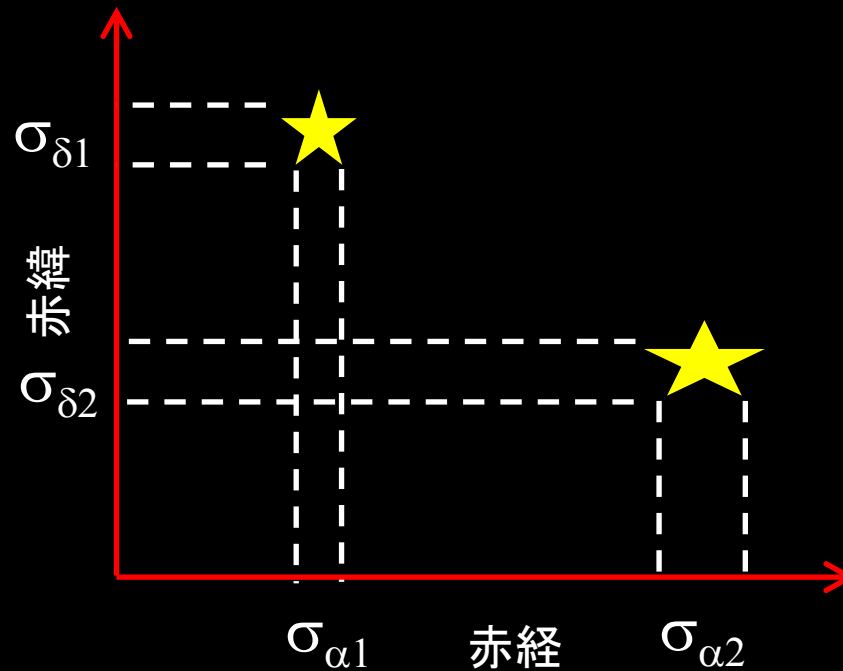
## ◆ 相対アストロメトリ

- 天球上の2つの天体の相対位置を正確に決める



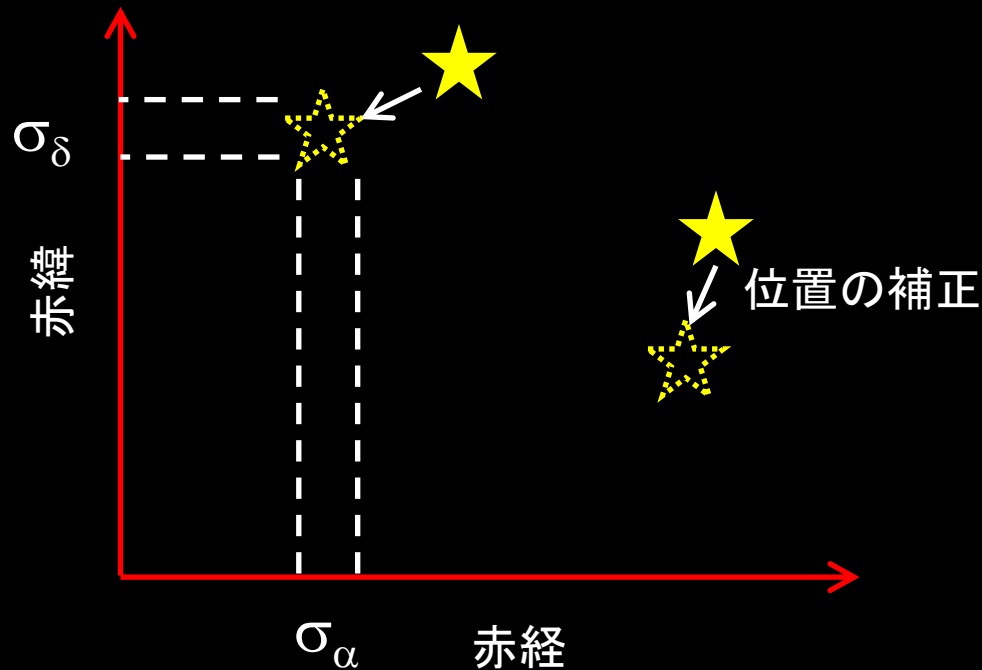
## ◆ 天体位置の決定精度

- PSFの大きさ、PSFの一様性、位置決定の方法



## ◆ 天体位置の補正精度

- カタログ誤差、大気分散、大気のゆらぎ、光学歪み





# なんでTMT/IRISで アストロメトリ？

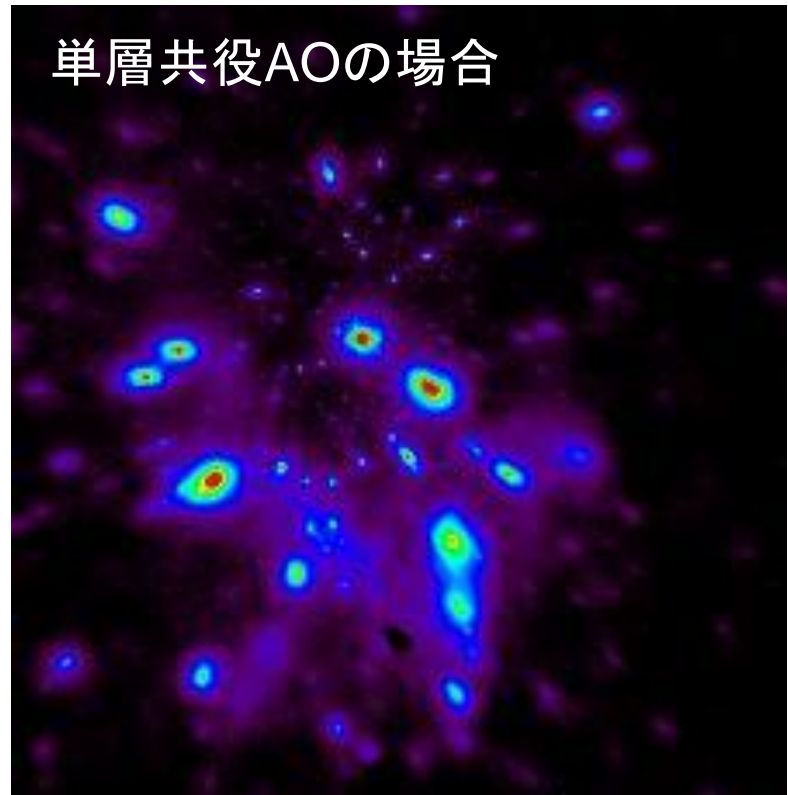
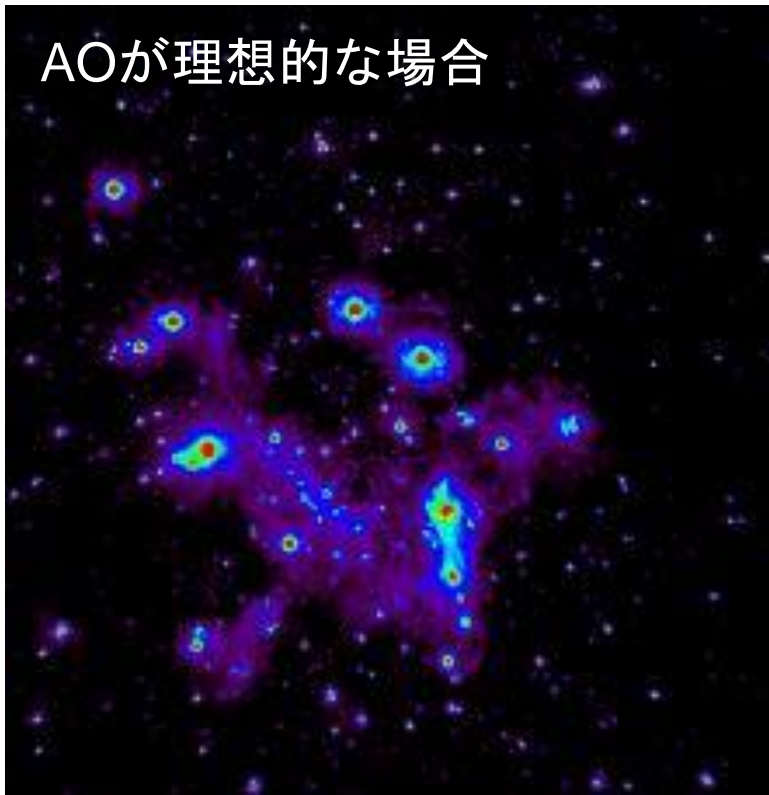
- ◆ 補償光学（AO）が定常的に稼働するようになって、地上望遠鏡でも回折限界の星像が得られるようになった。

- FWHM ~ 30ミリ秒@8m望遠鏡
- FWHM ~ 10ミリ秒@30m望遠鏡

- ◆ 回折限界の時の天体の位置決定精度

$$\sigma_x = \frac{1}{\pi} \frac{\lambda}{D} \frac{1}{\text{SNR}} \quad \text{Lindgren (1978)}$$

- $\sigma \sim 80$ マイクロ秒@8m望遠鏡
- $\sigma \sim 30$ マイクロ秒@30m望遠鏡
- ◆ 現在の単層共役AOでは、視野内のPSFの非一様性がリミット
  - Keck望遠鏡で150マイクロ秒 (Yelda et al. 2010)



Copyright © ONERA

# なんでTMT/IRISで アストロメトリ？

- ◆ 補償光学（AO）が定常的に稼働するようになって、地上望遠鏡でも回折限界の星像が得られるようになった。

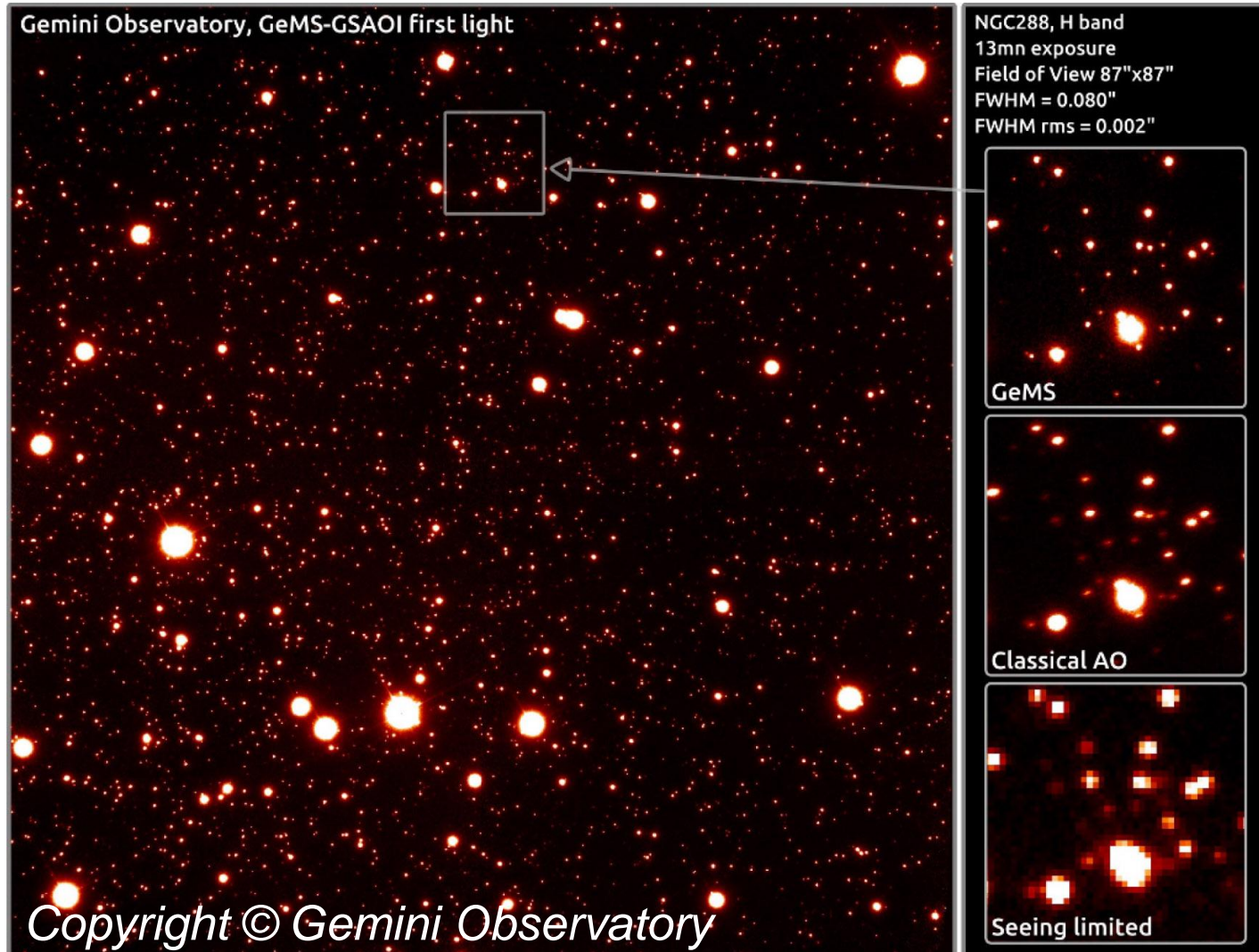
- FWHM ~ 30ミリ秒@8m望遠鏡
- FWHM ~ 10ミリ秒@30m望遠鏡

- ◆ 回折限界の時の天体の位置決定精度

$$\sigma_x = \frac{1}{\pi} \frac{\lambda}{D} \frac{1}{\text{SNR}} \quad \text{Lindgren (1978)}$$

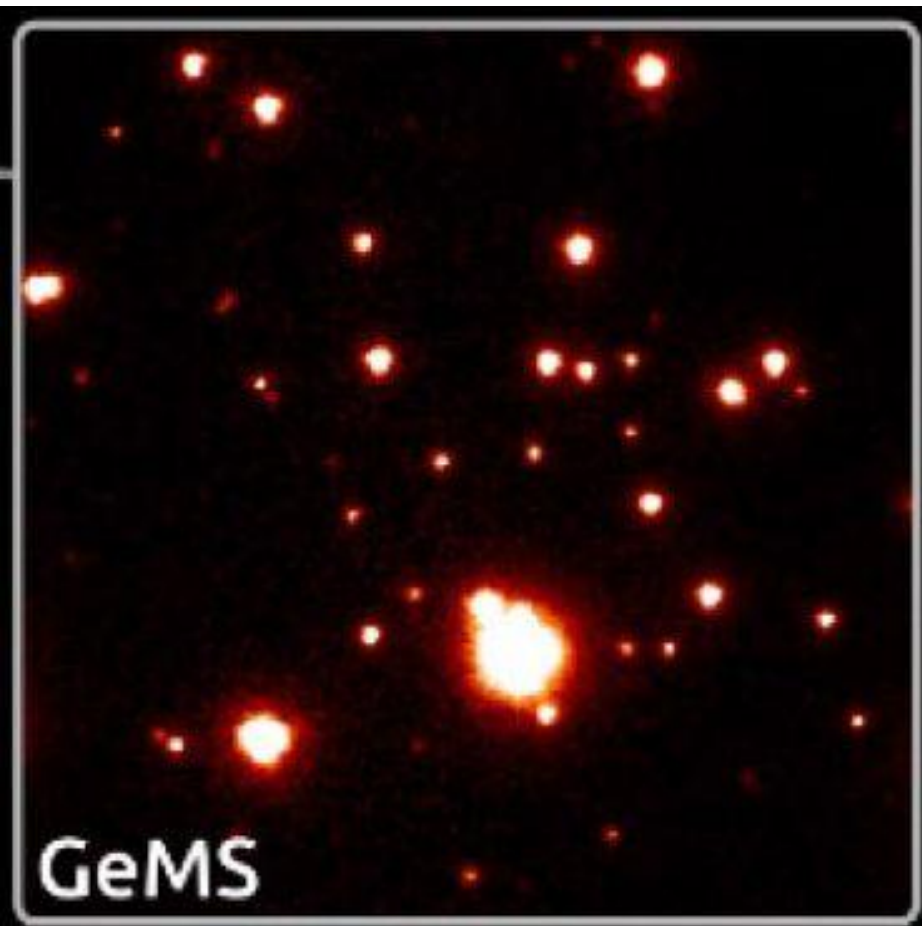
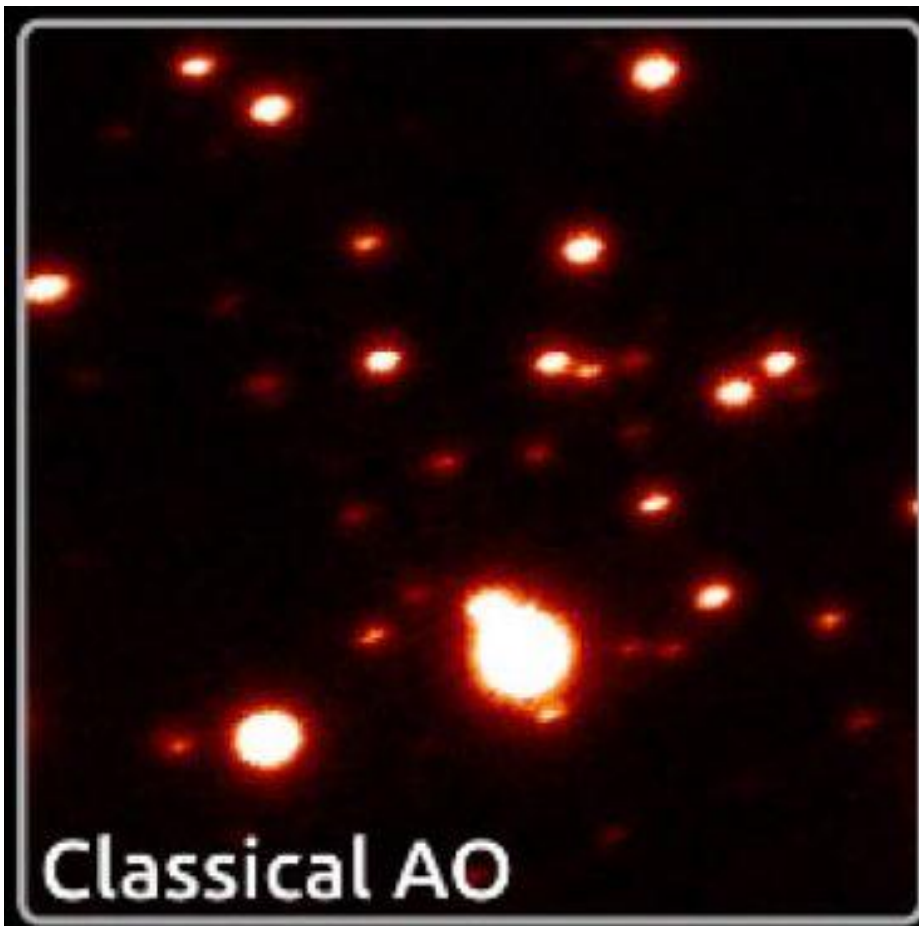
- $\sigma \sim 80$ マイクロ秒@8m望遠鏡
- $\sigma \sim 27$ マイクロ秒@30m望遠鏡
- ◆ 現在の単層共役AOでは、視野内のPSFの非一様性がリミット
  - Keck望遠鏡で150マイクロ秒 (Yelda et al. 2010)
- ◆ TMTは最初から多層共役AOを搭載し、PSFの一様性を劇的に改善 (GeMS at Gemini-S)

# 単層共役AOと多層共役AO





# 単層共役AOと多層共役AO



# なんでTMT/IRISで アストロメトリ？

- ◆ 補償光学（AO）が定常的に稼働するようになって、地上望遠鏡でも回折限界の星像が得られるようになった。

- FWHM ~ 30ミリ秒@8m望遠鏡
- FWHM ~ 10ミリ秒@30m望遠鏡

- ◆ 回折限界の時の天体の位置決定精度

$$\sigma_x = \frac{1}{\pi} \frac{\lambda}{D} \frac{1}{\text{SNR}} \quad \text{Lindgren (1978)}$$

- $\sigma$  ~ 80マイクロ秒@8m望遠鏡
- $\sigma$  ~ 27マイクロ秒@30m望遠鏡

- ◆ 現在の単層共役AOでは、視野内のPSFの非一様性がリミット

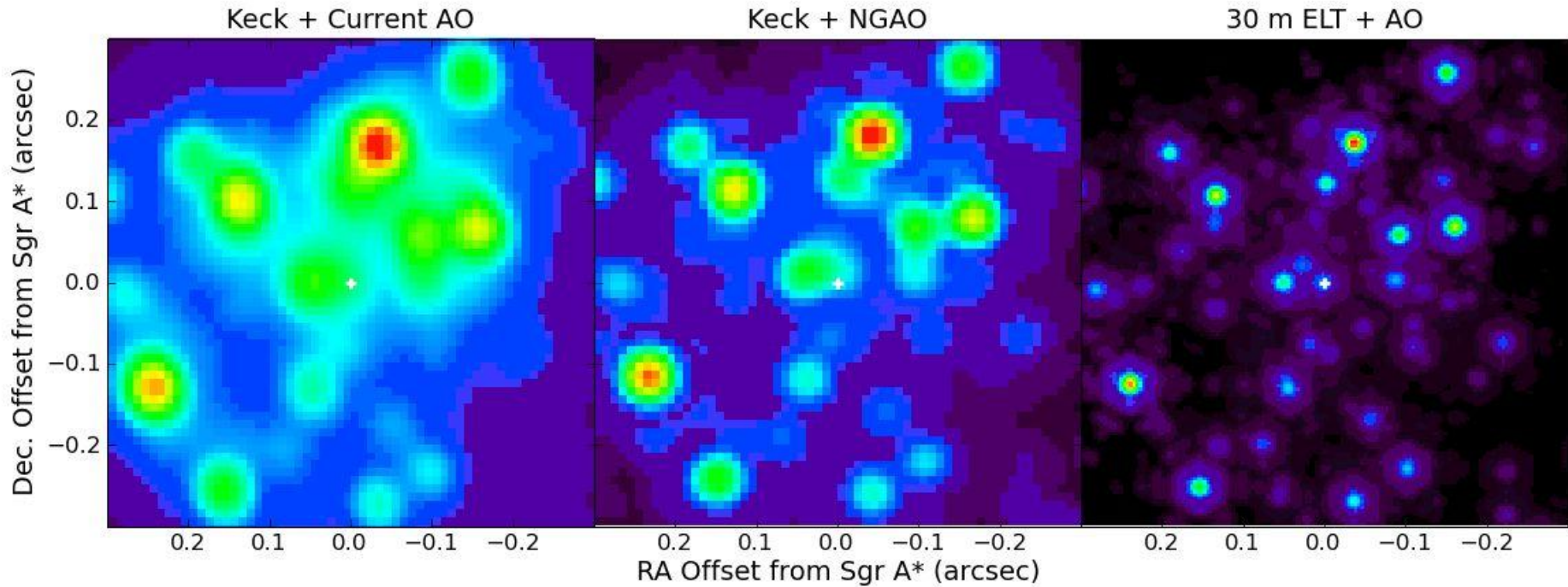
- Keck望遠鏡で150マイクロ秒 (Yelda et al. 2010)

- ◆ TMTは最初から多層共役AOを搭載し、PSFの一様性を劇的に改善 (GeMS at Gemini-S)

- ◆ TMT/IRISでは30マイクロ秒の相対アストロメトリを目標

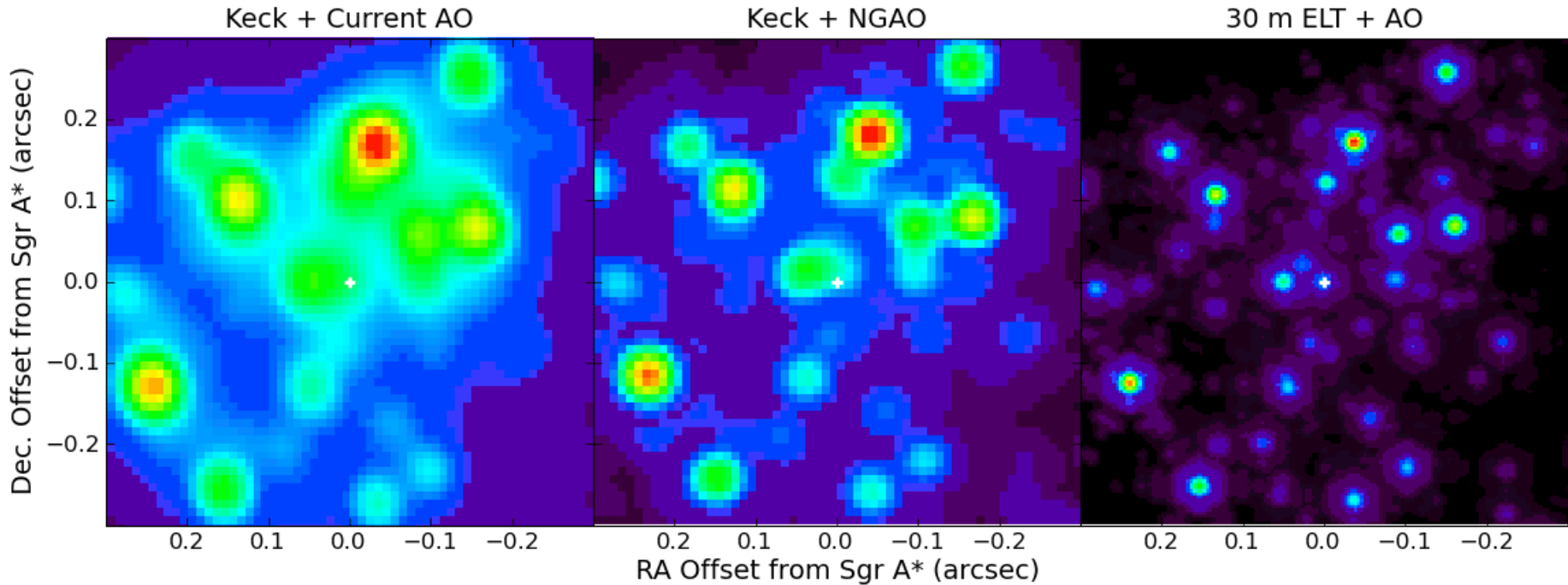
- ◆ 2020年代、最初に30マイクロ秒のアストロメトリを実現するのは TMT/IRIS !

# 銀河系中心のブラックホール 周辺の重力場測定



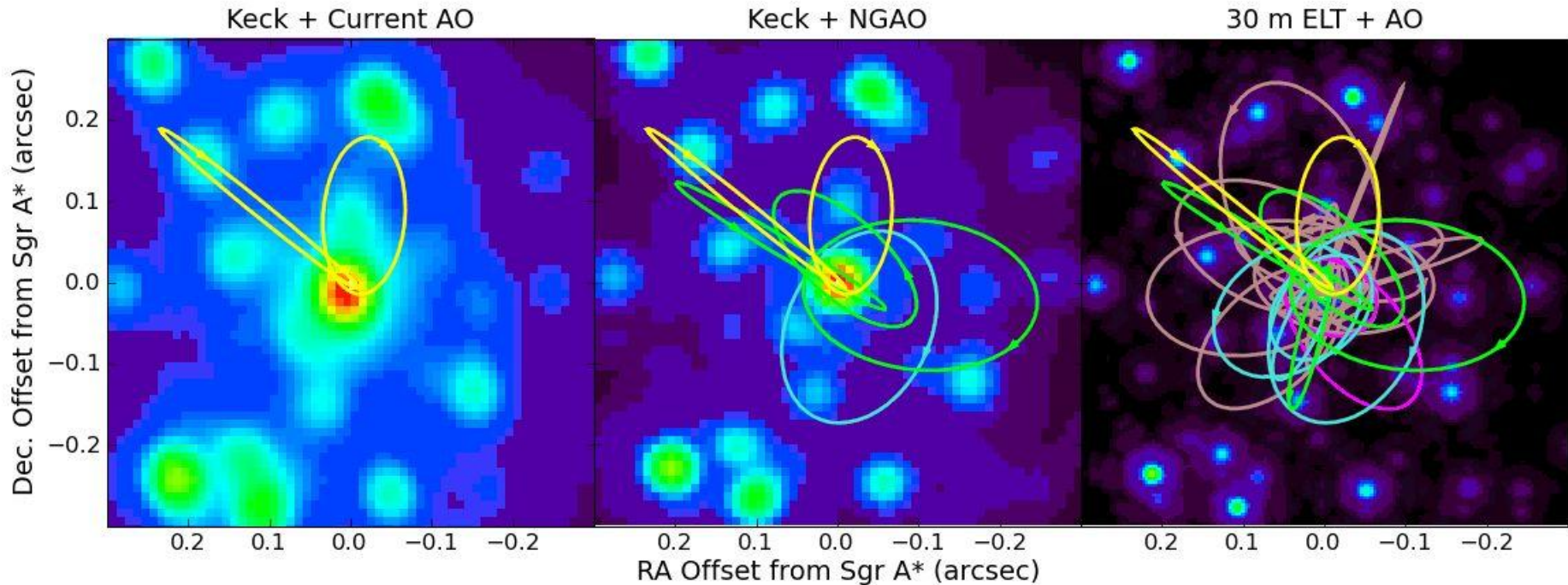
[http://www.astro.ucla.edu/~ghezgroup/gc/pictures/Future\\_GCorbits.shtml](http://www.astro.ucla.edu/~ghezgroup/gc/pictures/Future_GCorbits.shtml)

# 銀河系中心のブラックホール 周辺重力場測定



[http://www.astro.ucla.edu/~ghezgroup/gc/pictures/Future\\_GCorbits.shtml](http://www.astro.ucla.edu/~ghezgroup/gc/pictures/Future_GCorbits.shtml)





[http://www.astro.ucla.edu/~ghezgroup/gc/pictures/Future\\_GCorbits.shtml](http://www.astro.ucla.edu/~ghezgroup/gc/pictures/Future_GCorbits.shtml)

- ◆ 数千億kmスケールでの相対性理論の検証
  - Relativistic Prograde Precession
  - Frame dragging
- ◆ CDM理論 (cup? core?) の検証

## ◆ アストロメトリ

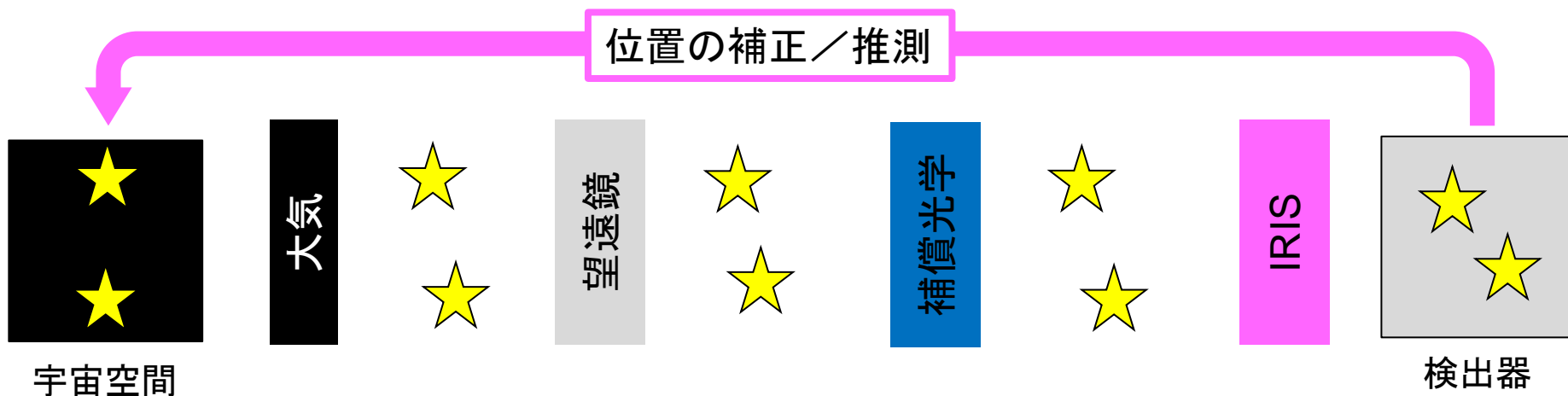
- 絶対アストロメトリ
- 相対アストロメトリ

2ミリ秒

30マイクロ秒  
= **1億分の1度!**

## ◆ 誤差の要因

- 天体の位置決定誤差
- 天体の位置補正誤差

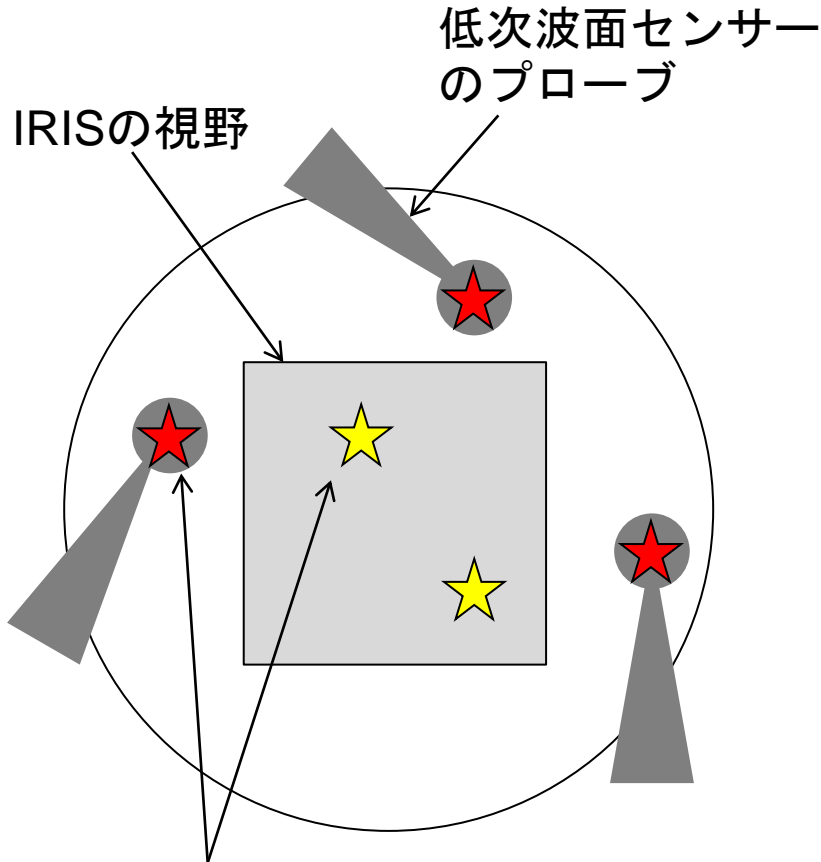


- ◆ ガイド星の誤差
  - 固有運動の誤差
  - 色の誤差+大気分散
- ◆ 大気の擾乱
  - Differential tip/tilt jitter
  - Chromatic anisoplanatism
  - Higher order residual
  - ストレール比の安定性
- ◆ その他の大気の影響
  - Achromatic differential refraction
  - Atmospheric dispersion
  - 透過率の安定性
- ◆ Opto-mechanicsの誤差
  - 波面センサーのガイドプローブ位置の誤差
  - 光学歪みの補正誤差
- 光学歪みの補正方法
- 光学面の形状誤差
- 光束の位置変化+光学面の形状誤差
- Instrument rotator誤差
- 迷光、ゴースト
- ◆ 天体の検出誤差
  - Photon noise
  - Flat field
  - ピクセルサイズの非一様性
  - Non-linearity
  - Confusion
  - PSFの非一様性、推定誤差
  - ピクセル間のクロストーク

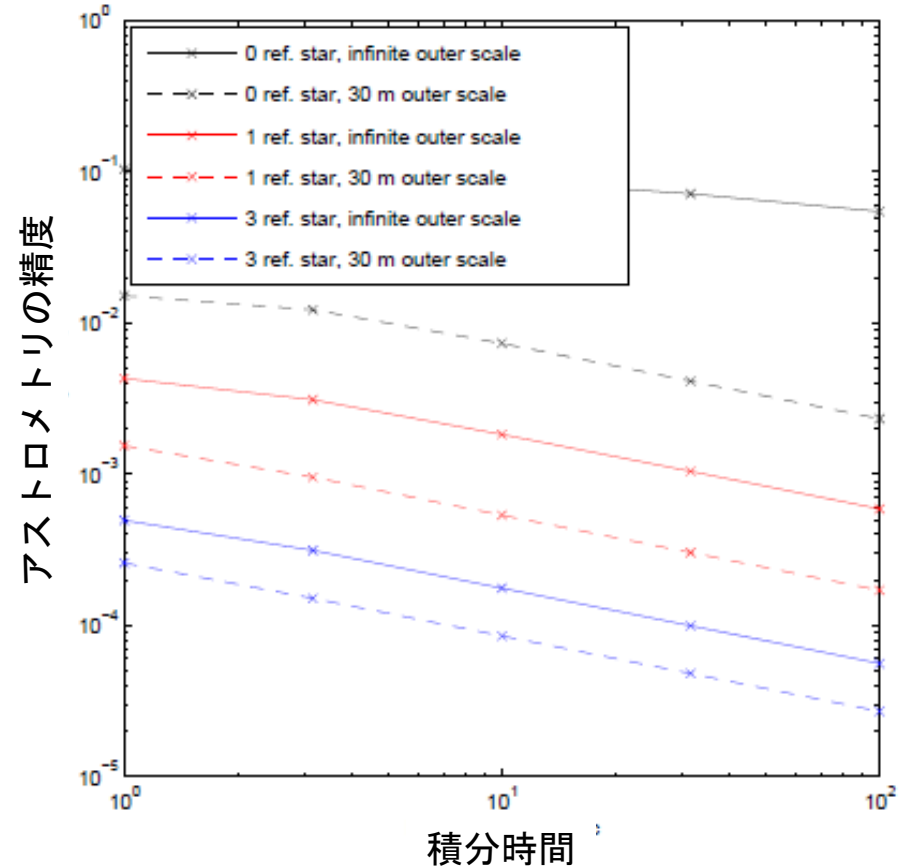


# 大気の影響





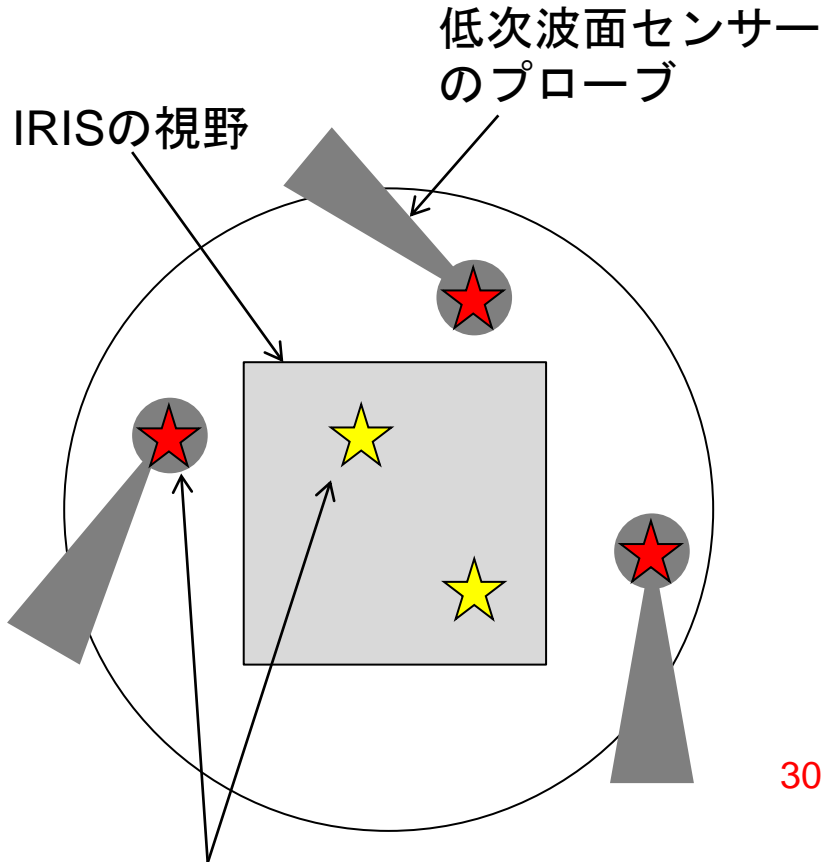
この2ヶ所ではtip/tiltが違う  
違いはランダムなので、 $1/\sqrt{T}$ で  
小さくなる。



Differential tip/tilt jitterによるアストロメトリ精度の積分時間依存性 (Ellerbroek 2007) 25

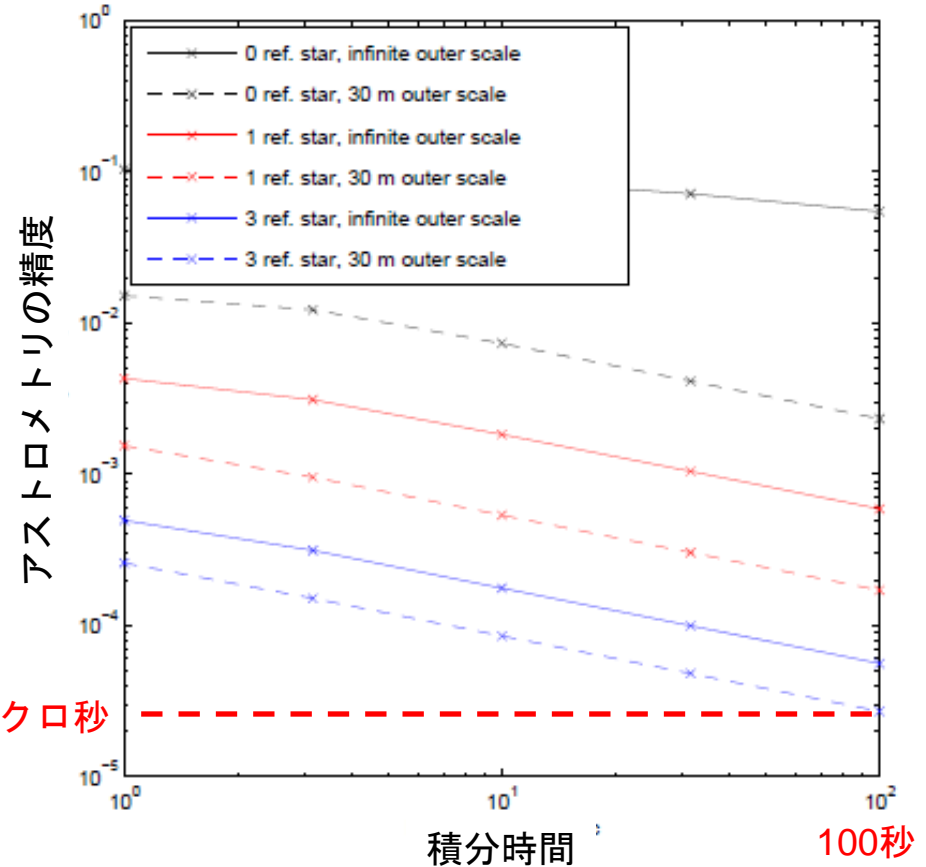


# Differential Tip/tilt Jitter



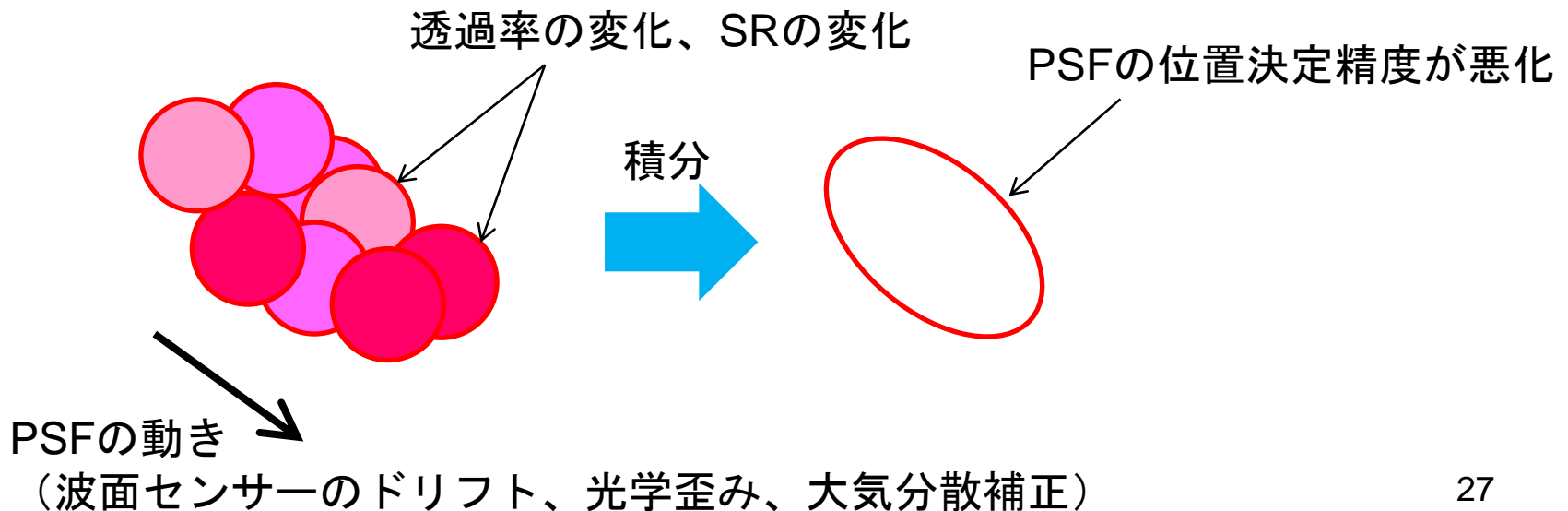
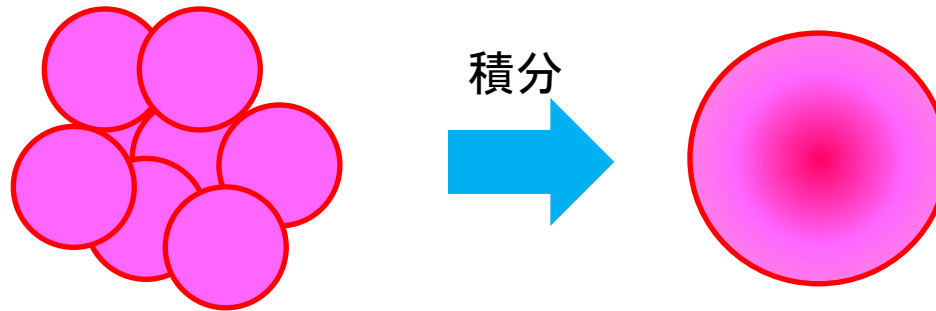
この2ヶ所ではtip/tiltが違う  
違いはランダムなので、 $1/\sqrt{T}$ で  
小さくなる。

30マイクロ秒

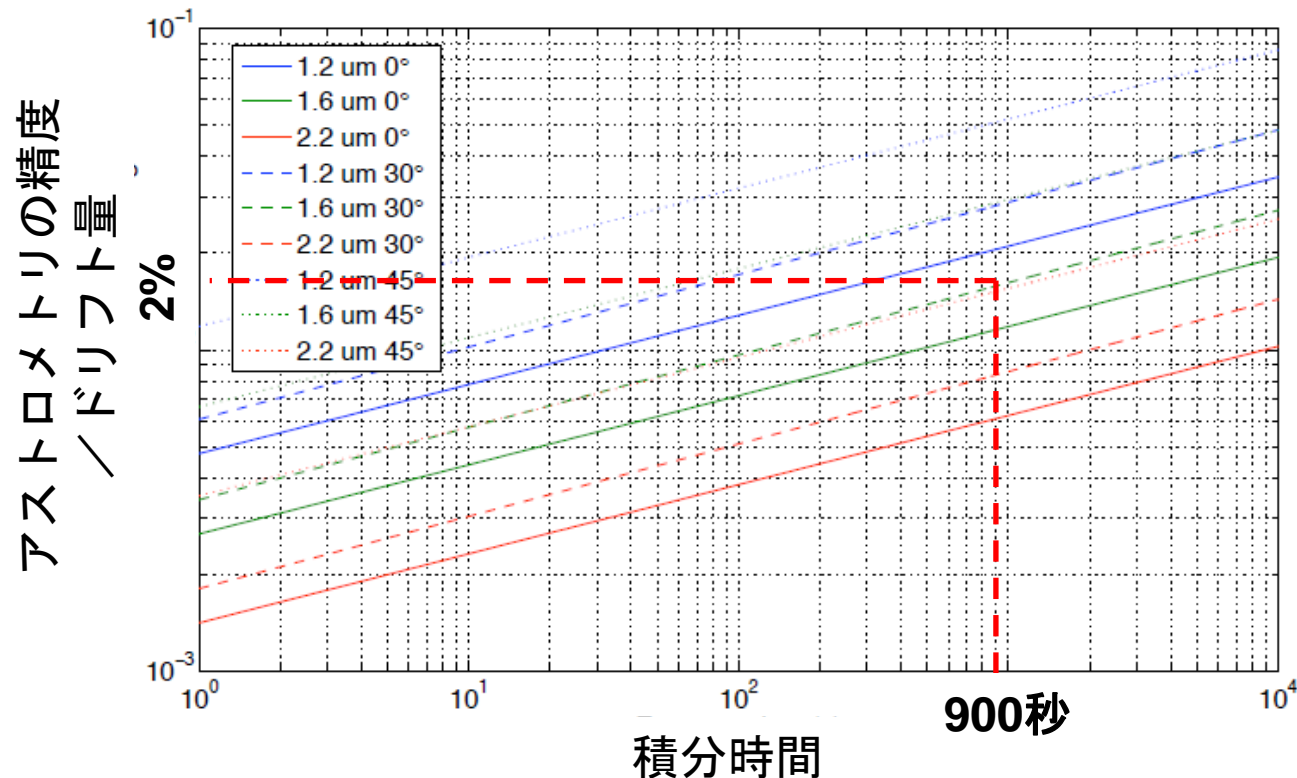


Differential tip/tilt jitterによるアストロメトリ精度の積分時間依存性 (Ellerbroek 2007) 26

# ストレール比の安定性、 透過率の安定性

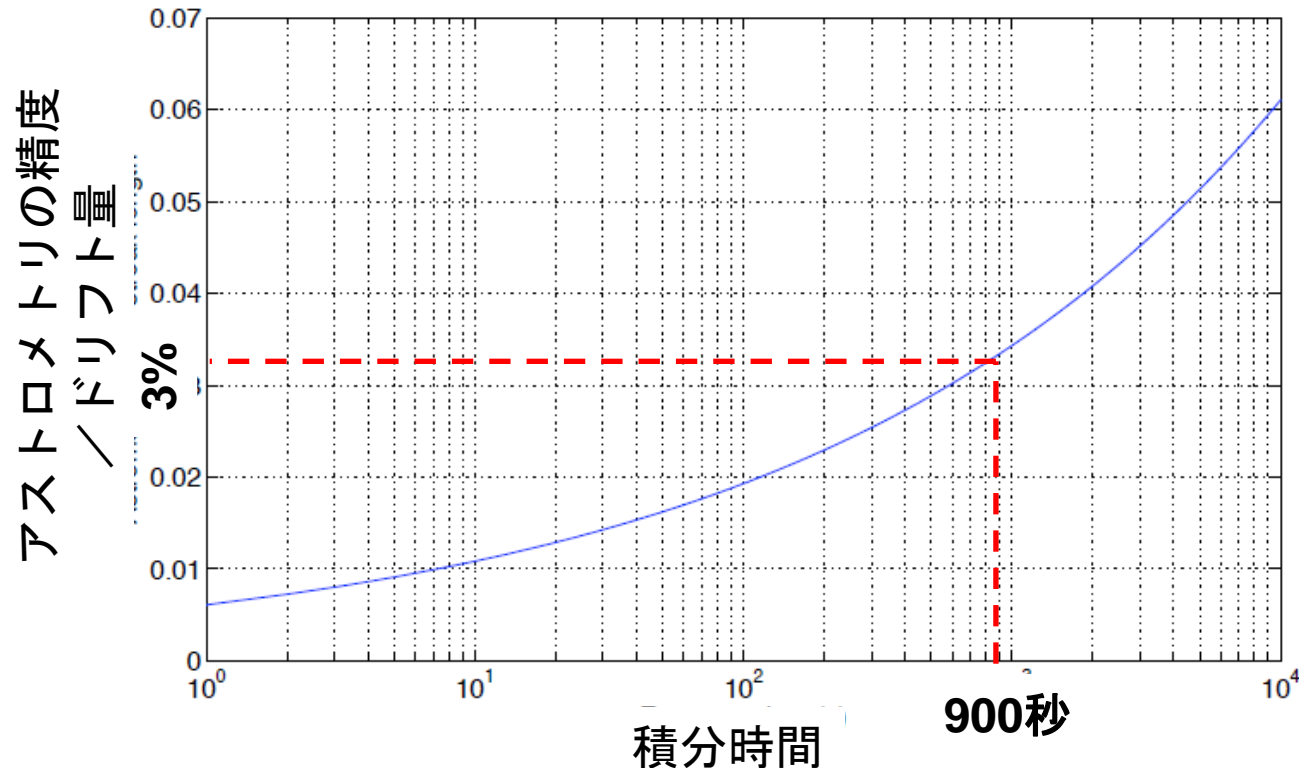


- 星像が一定の速度でドリフトしている時に、大気の透過率が時間で変化すると、積分された星像の位置決定精度が悪化する。
- 一回の露出時間が900秒の時、位置決定精度はドリフト量の約2%



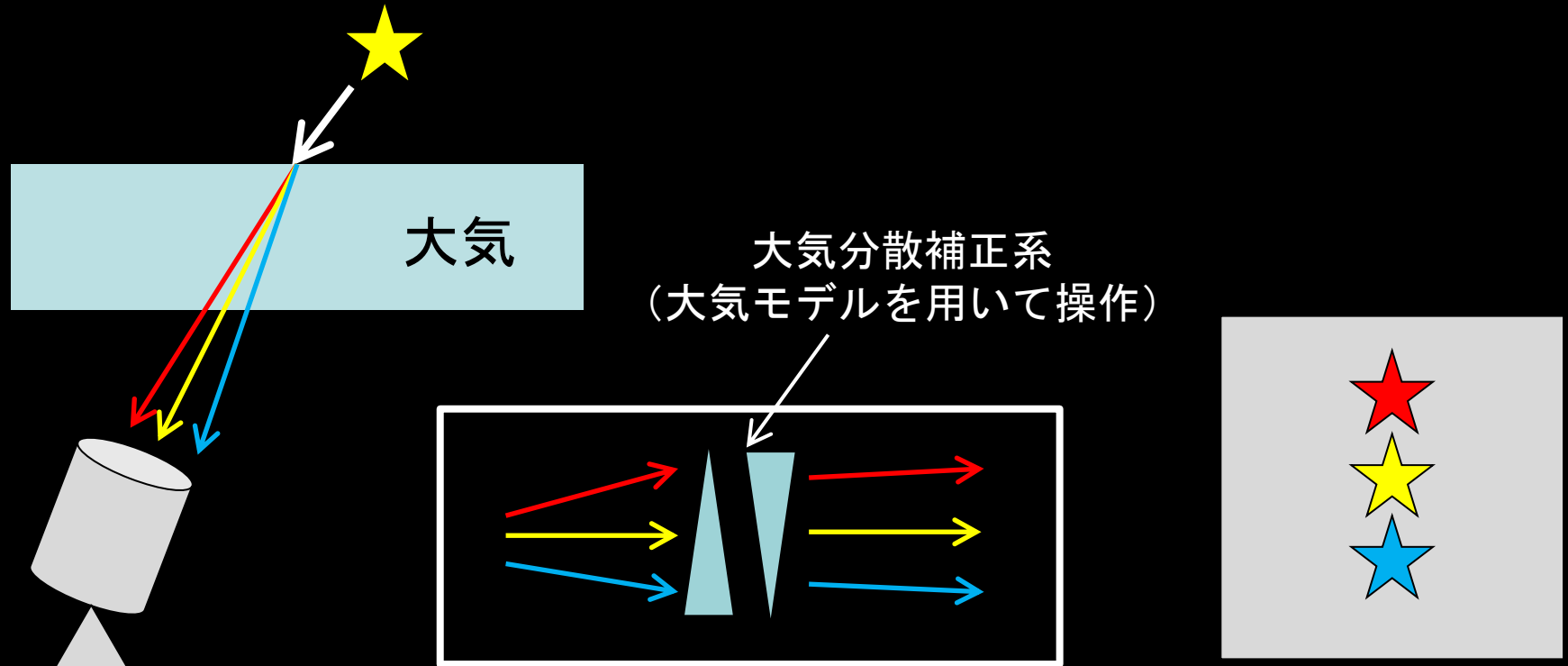
星像が一定の速度でドリフトしている場合の、大気の透過率の変化による積分時間とアストロメトリ精度の関係 (Hickson 2010)。

- ◆ 星像が一定の速度でドリフトしている時に、ストレーン比が時間で変化すると、積分された星像の位置決定精度が悪化する。
- ◆ 一回の露出時間が900秒の時、位置決定精度はドリフト量の約3%

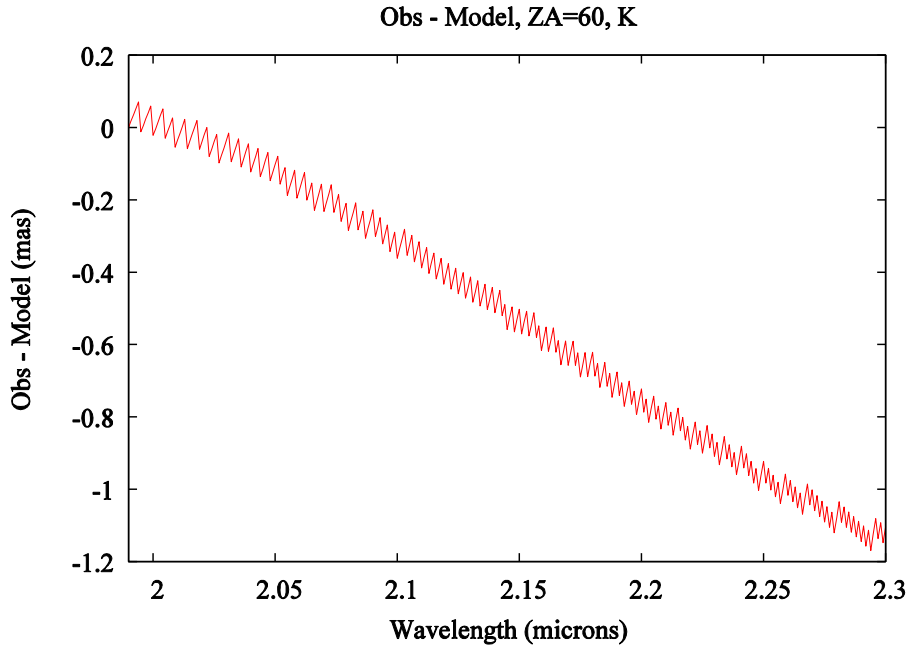


星像が一定の速度でドリフトしている場合の、ストレーン比の変化による積分時間とアストロメトリ精度の関係 (Hickson 2010)。

- Kバンドにおいて、大気分散の傾きが大気モデルと3ミリ秒違うと、20マイクロ秒の誤差  
→ 大気分散を1ミリ秒以下の精度で知る必要がある。
- 大気分散を1ミリ秒以下の精度で測定するには、8m級望遠鏡でAOをかけて分光する必要がある。







大気分散の観測値と大気モデルとの差。天頂角60度、Kバンド (Suzuki 2012)

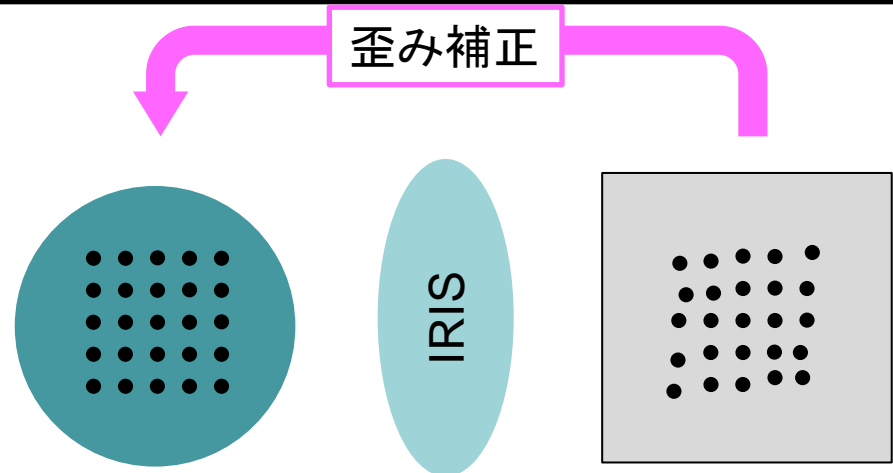
- 測定誤差はKバンドで1ミリ秒。J,Hバンドで3ミリ秒。
- 観測結果と大気モデルの差はKバンドで1ミリ秒、J、Hバンドで3ミリ秒。  
→アストロメトリにはKバンドの方が精度が良い
- **IRISはより細かいサンプリングで、撮像と同時に分光ができるので、アストロメトリの観測と同時に大気分散を測ることが可能。**

# 光学歪みの補正精度



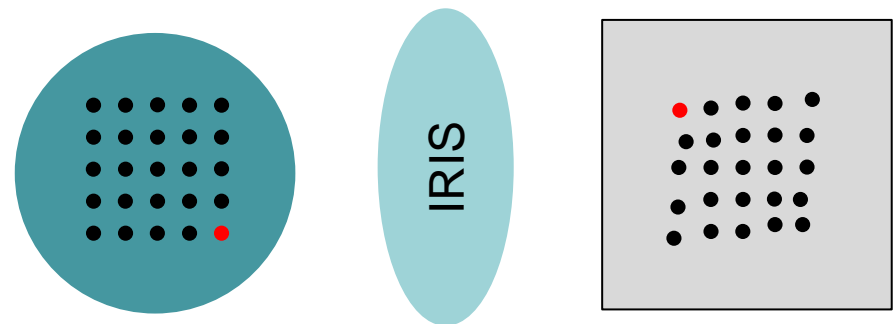
## Reference法

- 位置が正確に分かっている基準物体（天体、ピンホールグリッド）を光学系で測定し比較する。
- 基準物体の精度が必要
- 光学系の倍率も求まる



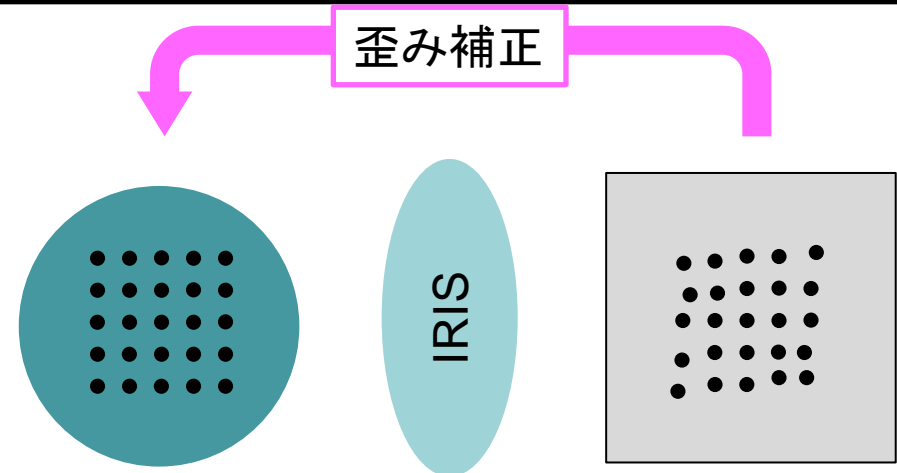
## Self-calibration法

- 物体を平行移動／回転させながら撮像し、測定位置の差分から光学歪みの情報を引き出す。
- 物体を平行移動／回転させる
- 物体の精度は要らない
- 位置決定精度と同じだけの精度が得られる



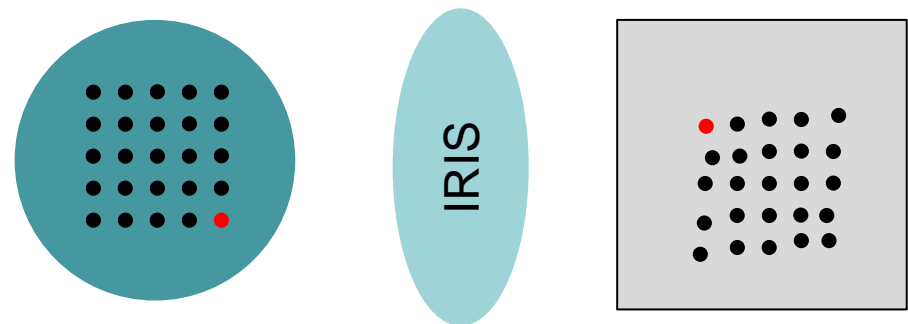
## Reference法

- 位置が正確に分かっている基準物体（天体、ピンホールグリッド）を光学系で測定し比較する。
- 基準物体の精度が必要
- 光学系の倍率も求まる



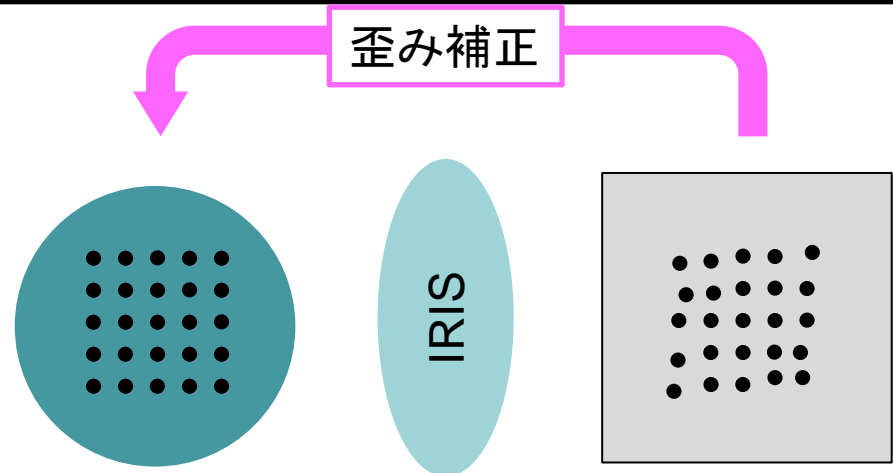
## Self-calibration法

- 物体を平行移動／回転させながら撮像し、測定位置の差分から光学歪みの情報を引き出す。
- 物体を平行移動／回転させる
- 物体の精度は要らない
- 位置決定精度と同じだけの精度が得られる



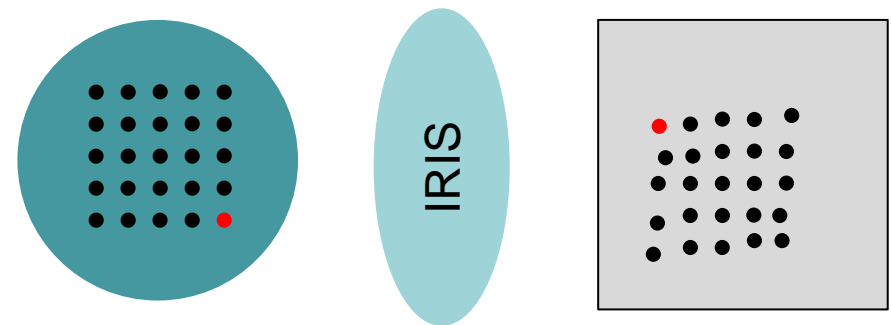
## ◆ Reference法

- 位置が正確に分かっている基準物体（天体、ピンホールグリッド）を光学系で測定し比較する。
- 基準物体の精度が必要
- 光学系の倍率も求まる



## ◆ Self-calibration法

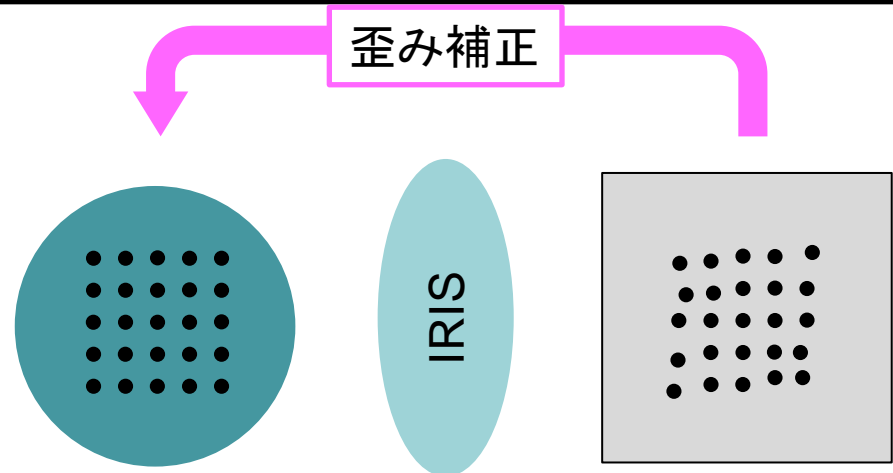
- 物体を平行移動／回転させながら撮像し、測定位置の差分から光学歪みの情報を引き出す。
- 物体を平行移動／回転させる
- 物体の精度は要らない
- 位置決定精度と同じだけの精度が得られる





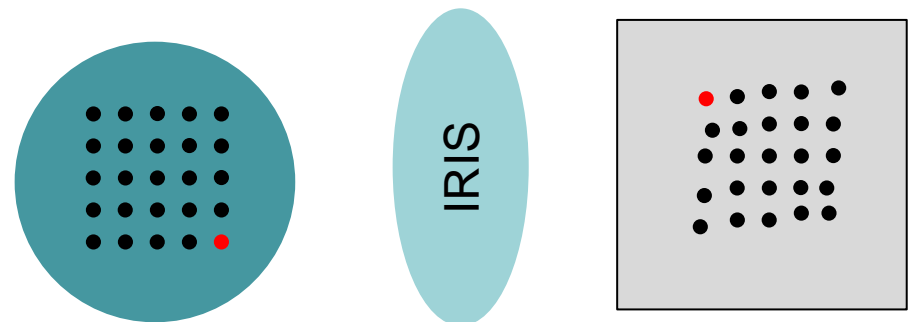
## ◆ Reference法

- 位置が正確に分かっている基準物体（天体、ピンホールグリッド）を光学系で測定し比較する。
- 基準物体の精度が必要
- 光学系の倍率も求まる



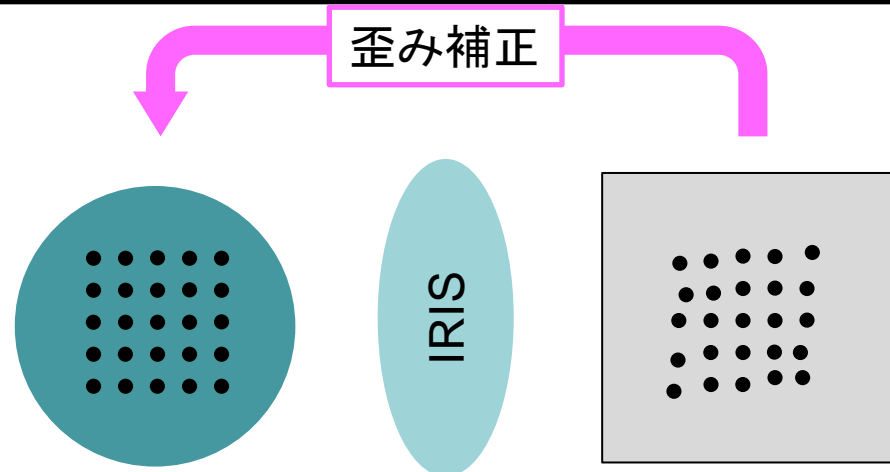
## ◆ Self-calibration法

- 物体を平行移動／回転させながら撮像し、測定位置の差分から光学歪みの情報を引き出す。
- 物体を平行移動／回転させる
- 物体の精度は要らない
- 位置決定精度と同じだけの精度が得られる



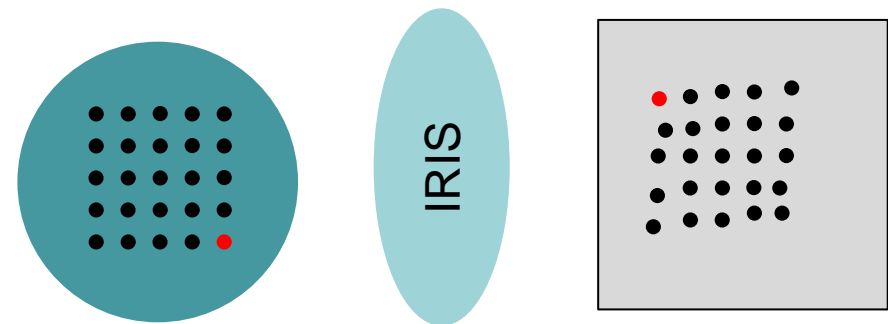
## Reference法

- 位置が正確に分かっている基準物体（天体、ピンホールグリッド）を光学系で測定し比較する。
- 基準物体の精度が必要
- 光学系の倍率も求まる



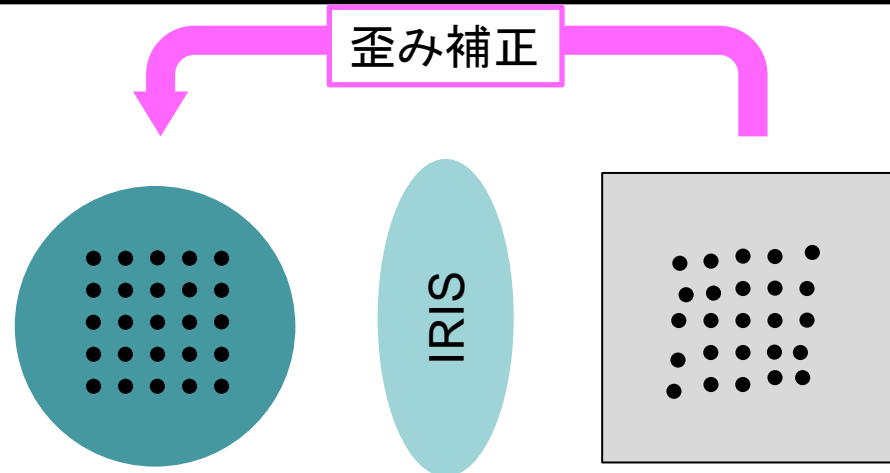
## Self-calibration法

- 物体を平行移動／回転させながら撮像し、測定位置の差分から光学歪みの情報を引き出す。
- 物体を平行移動／回転させる
- 物体の精度は要らない
- 位置決定精度と同じだけの精度が得られる



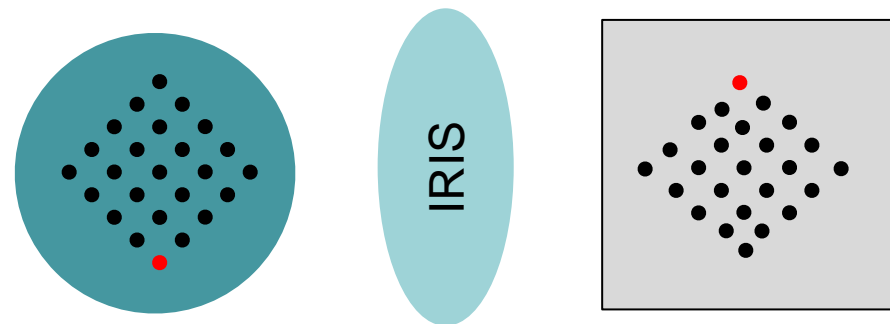
## ◆ Reference法

- 位置が正確に分かっている基準物体（天体、ピンホールグリッド）を光学系で測定し比較する。
- 基準物体の精度が必要
- 光学系の倍率も求まる



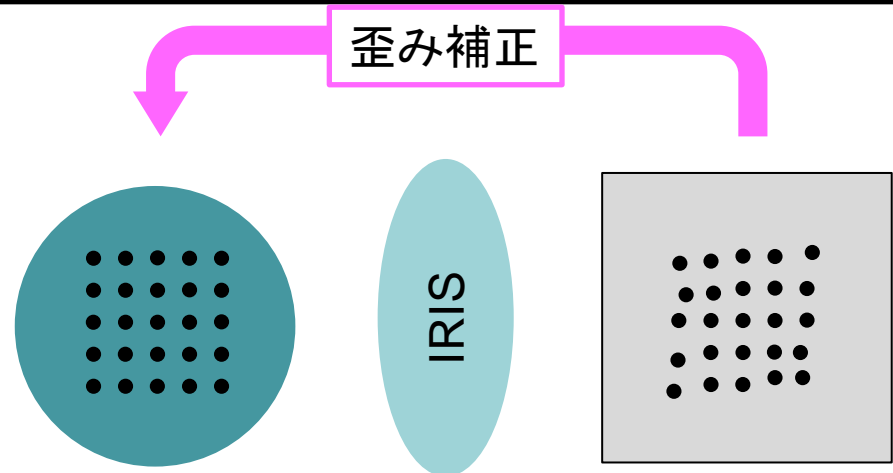
## ◆ Self-calibration法

- 物体を平行移動／回転させながら撮像し、測定位置の差分から光学歪みの情報を引き出す。
- 物体を平行移動／回転させる
- 物体の精度は要らない
- 位置決定精度と同じだけの精度が得られる



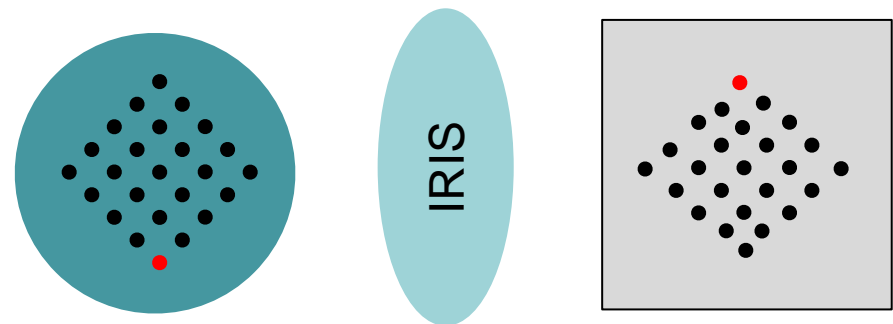
## Reference法

- 位置が正確に分かっている基準物体（天体、ピンホールグリッド）を光学系で測定し比較する。
- **基準物体の精度が必要**
- 光学系の倍率も求まる

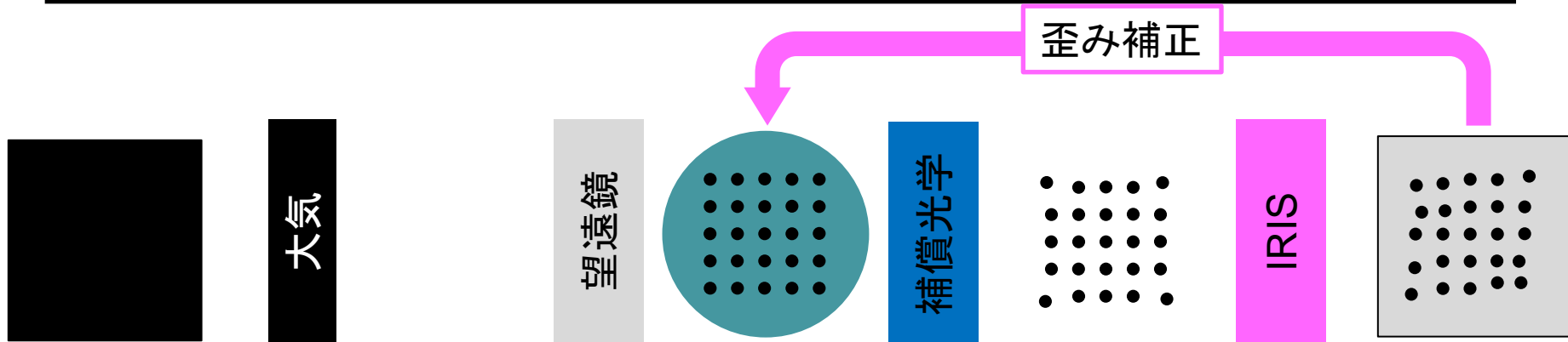


## Self-calibration法

- 物体を平行移動／回転させながら撮像し、測定位置の差分から光学歪みの情報を引き出す。
- 物体を平行移動／回転させる
- 物体の精度は要らない
- **位置決定精度と同じだけの精度が得られる**



## IRISでは両方の方法で光学歪みを測定



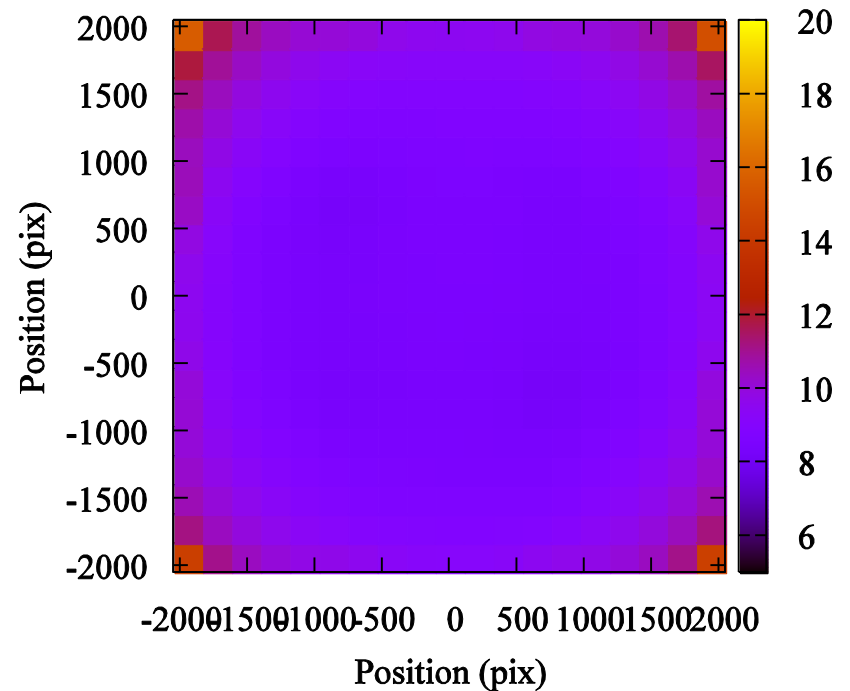
- 30マイクロ秒の精度の相対アストロメトリを実現するために、補償光学+IRISの光学的歪みを10マイクロ秒の精度で測定。
- 10マイクロ秒 = 22nm@望遠鏡焦点面
- $\sigma_d \propto \sigma_{pg} / \text{sqrt}(N_{pg})$
- $\sigma_{pg} = 286\text{nm}$  for  $N_{pg}=169$
- 大きさ $\phi 55\text{mm}$  →  $5 \times 10^{-6}$ のダイナミックレンジ
- 温度-30度に配置される → -30度で位置を測定
- ピンホールグリッドの測定に関しては、次のトークで。



## ◆ 現在の光学系の光学歪みをself calibration法とreference法で求めてみる

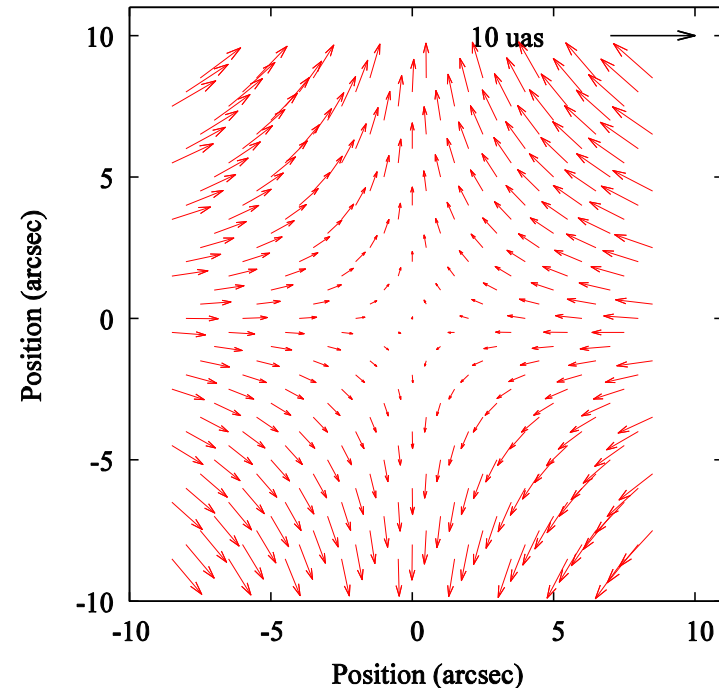
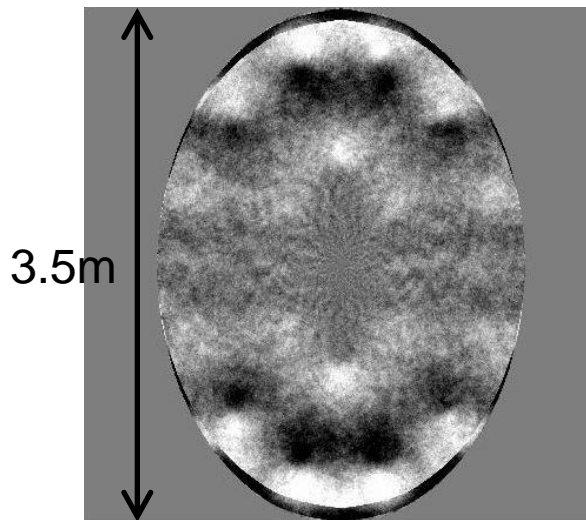
- PSF位置決定精度 : 10マイクロ秒
- 3x3 ディザーパターン、200 pix間隔
- PA誤差 : 0.1 deg
- 13x13個のピンホールグリッド

→ 視野の全域で8マイクロ秒の精度  
を確認

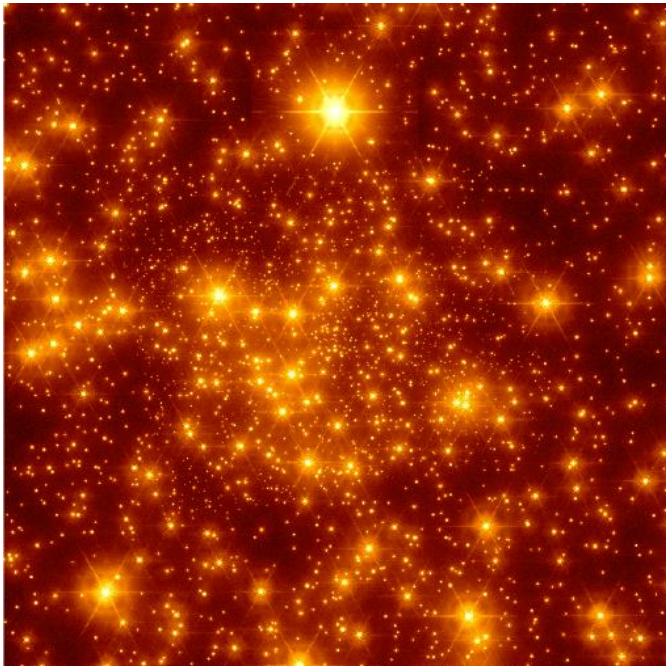


Self calibration法で求めた光学歪みの誤差マップ  
(Suzuki 2012)

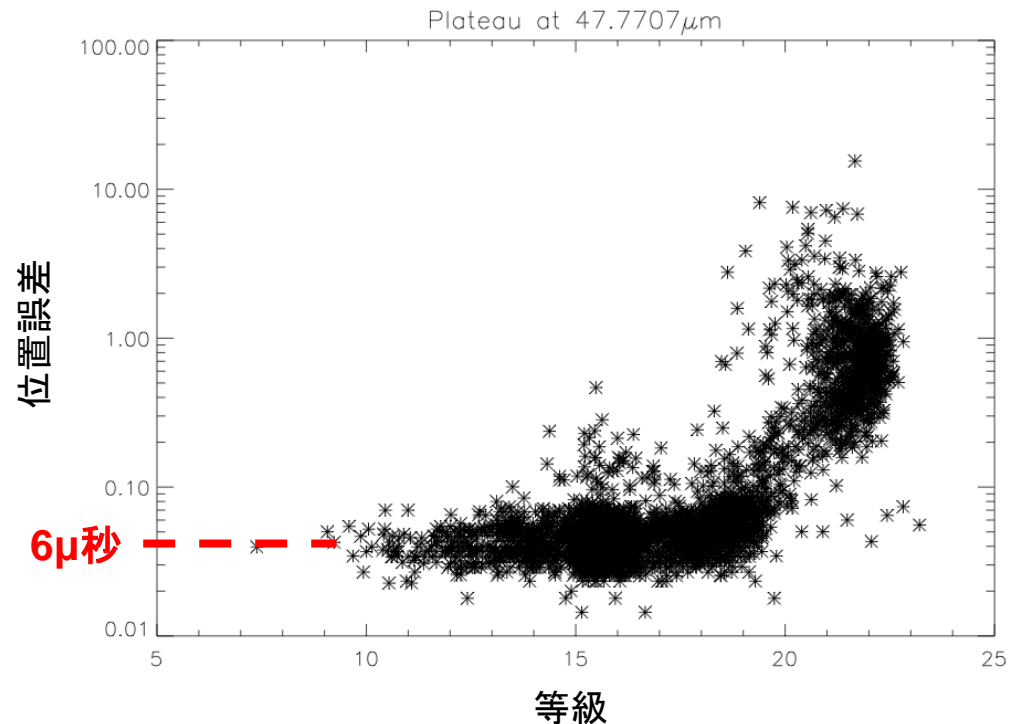
- 理想的な状態での望遠鏡の光学的歪みは、10マイクロ秒よりも小さい。
- 実際の望遠鏡（特に第三鏡）の光学的歪みがどの程度大きくなるか？
  - 重力変形
  - 温度変形
  - 研磨ムラ



- ◆ TMTのAOシミュレータ (MAOS) を用いてPSFの位置決定精度の検証を行なっている。
- ◆ Starfinder (Diolaiti et al.)を用いたPSFの位置決定 (PSFマッチング)  
→ 6マイクロ秒の精度

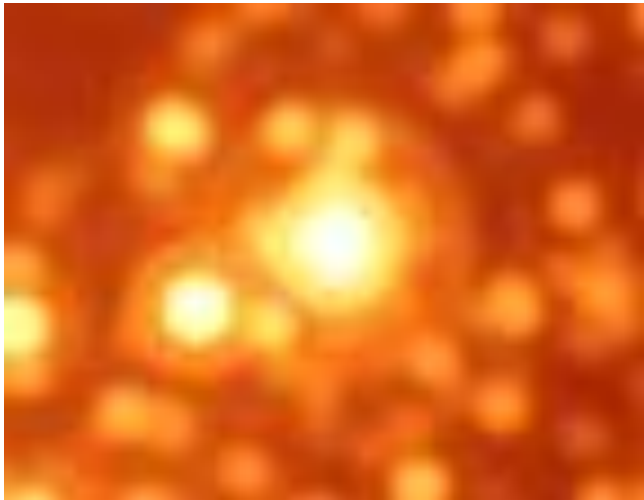


MAOSを用いた銀河系中心のシミュレーション



Starfinderを用いたPSFの位置決定精度 (Leo & Yelda 2012)

- ◆ 天体位置の決定には、PSFマッチングを用いる。
- ◆ 混んだ領域だと、近隣の星とPSF同士が重なって正しいPSFを推定できない。
- ◆ PSF reconstruction
  - 光学系の収差、AOの誤差、大気の情報から、推定されるPSFを作成する
- ◆ Keck, Gemini-Sで実証研究が行われている（Veran et al. 1997, Jolissaint et al. 2012）



- ◆ ガイド星の誤差
  - 固有運動の誤差
  - 色の誤差+大気分散
- ◆ 大気の擾乱
  - Differential tip/tilt jitter
  - Chromatic anisoplanatism
  - Higher order residual
  - ストレール比の安定性
- ◆ その他の大気の影響
  - Achromatic differential refraction
  - Atmospheric dispersion
  - 透過率の安定性
- ◆ Opto-mechanicsの誤差
  - 波面センサーのガイドプローブ位置の誤差
  - 光学歪みの補正誤差
- 光学歪みの補正方法
- 光学面の形状誤差
- 光束の位置変化+光学面の形状誤差
- Instrument rotator誤差
- 迷光、ゴースト
- ◆ 天体の検出誤差
  - Photon noise
  - Flat field
  - ピクセルサイズの非一様性
  - Non-linearity
  - ピクセル間のクロストーク
  - Confusion
  - PSFの非一様性、推定誤差

- ◆ TMT/IRISを用いて、30マイクロ秒（1億分の1度！）の精度で天体の相対位置を測定する。
- ◆ この精度になると、今まで気にならなかった多くの物理過程を検証、補正する必要がある。
- ◆ この業界は比較的新しく、日本では殆どやっていません。
- ◆ 2020年代、最初に30マイクロ秒のアstrometryを実現するのはTMT/IRIS！
- ◆ 誰か一緒にやりませんか！