

TMT第一期観測装置IRISの技術的課題

2013/12/18

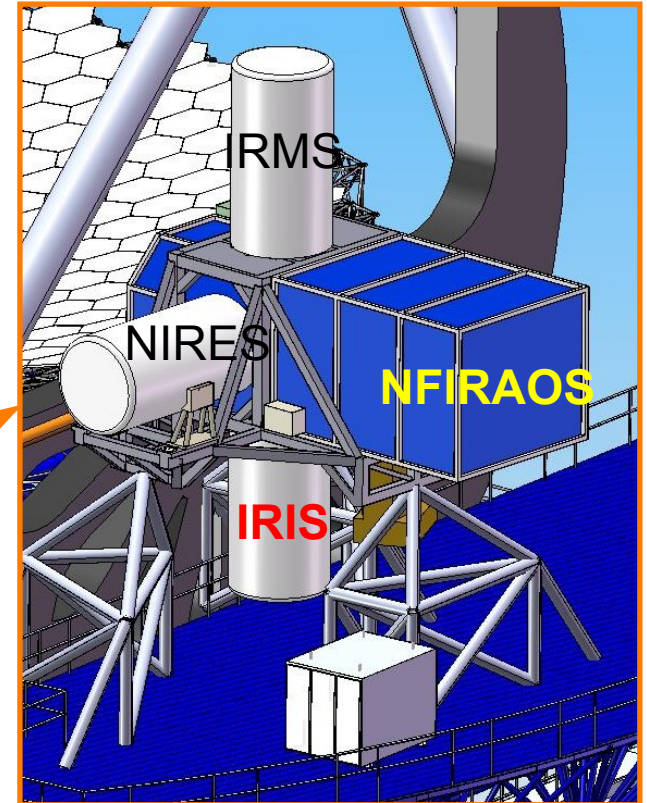
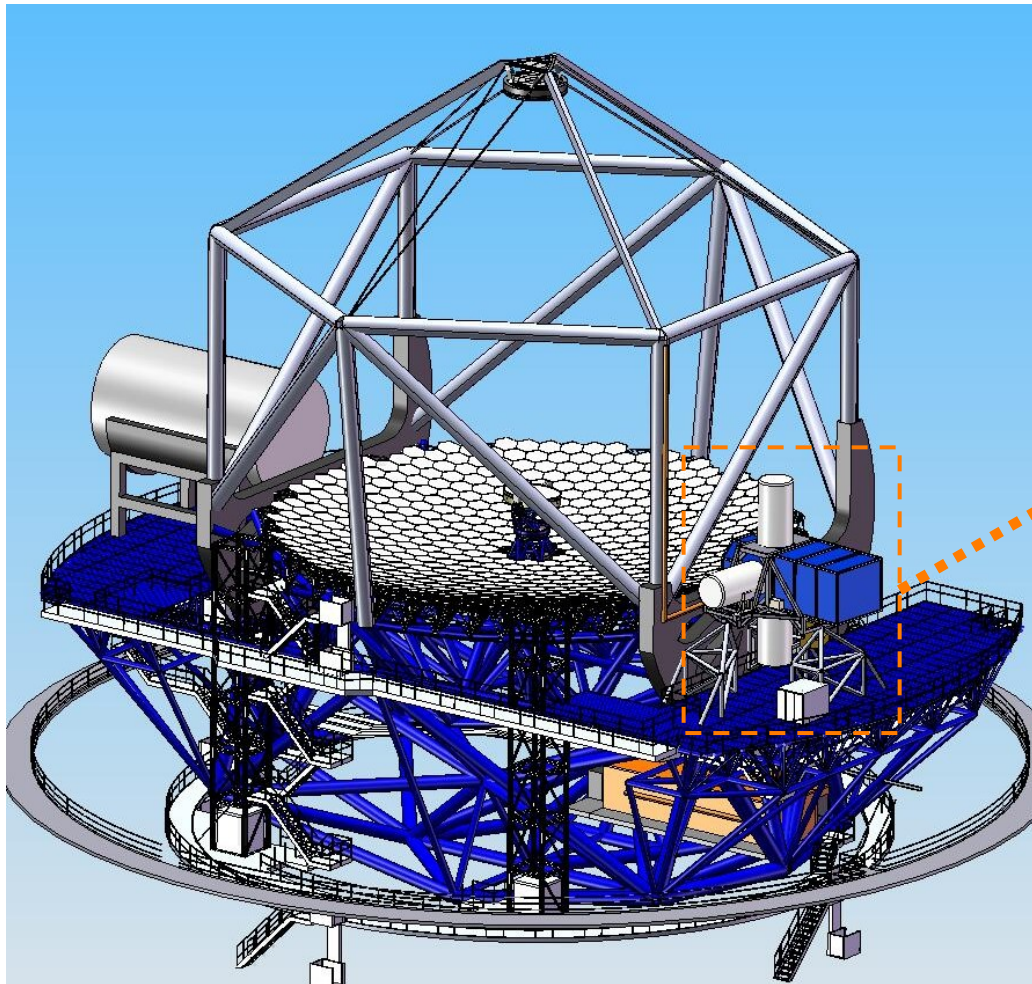
鈴木 竜二(国立天文台)

- ◆ IRISの紹介
- ◆ IRISの抱えている技術的課題
 - システムを通して $\lambda/20$ の波面精度を目指す
 - 1億分の1度の角度精度を目指す
 - 10年間メンテフリーの近赤外線装置を目指す

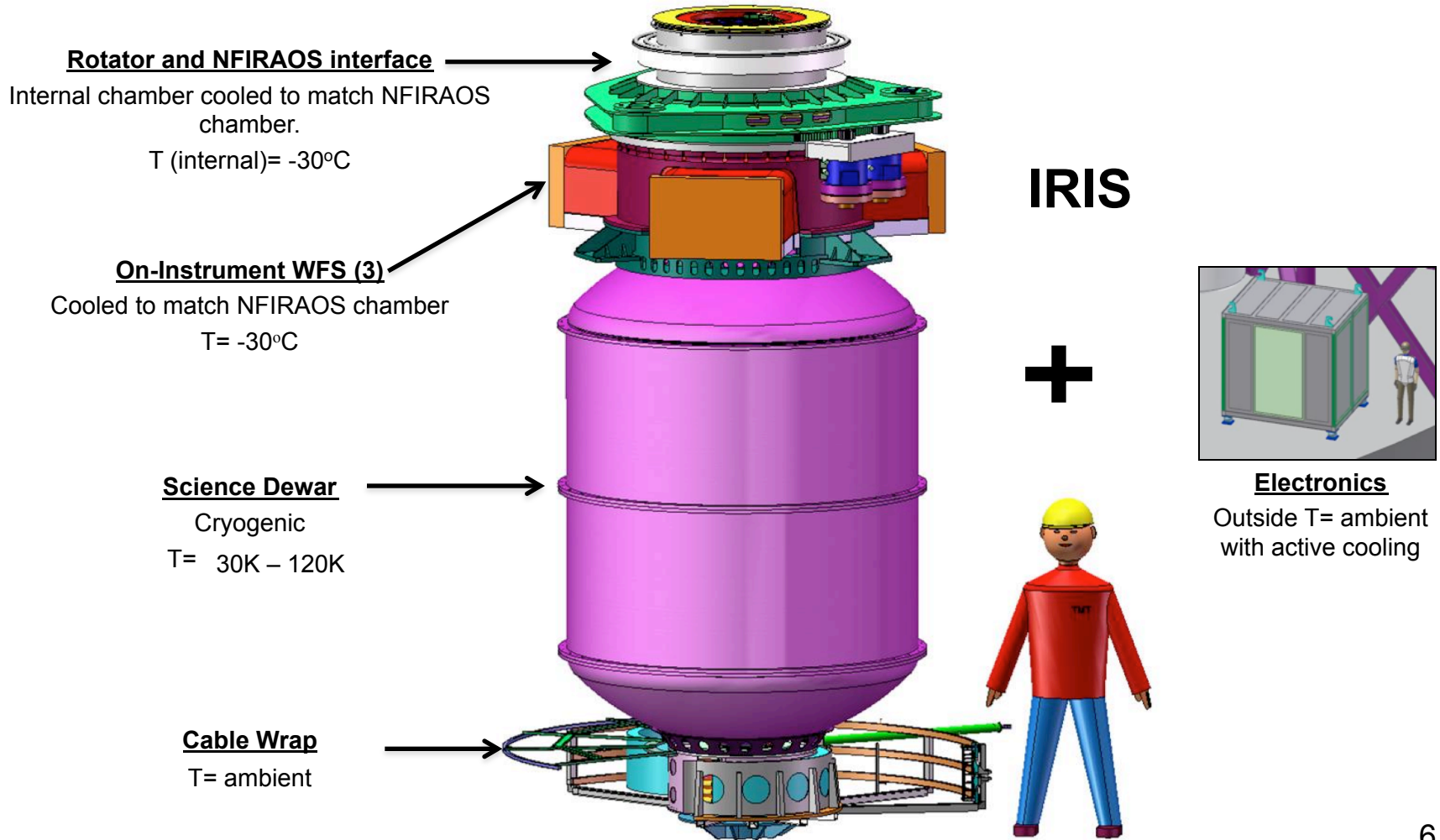
- ◆ TMT第一期観測装置の一つ (IRIS, WFOS, IRMS)
- ◆ AOを用いた近赤外域での撮像と面分光
 - NFIRAOSの後段に配置
 - 波長域: 0.83 – 2.40ミクロン
 - ストレール比: 0.41(J), 0.60(H), 0.75(K)
- ◆ 撮像モード
 - ピクセルスケール: 4ミリ秒/ピクセル
 - 視野: 16.4秒角
- ◆ 面分光モード
 - 波長分解能: 4,000 – 10,000
 - ピクセルスケール: 4, 9, 25, 50ミリ秒/スパクセル

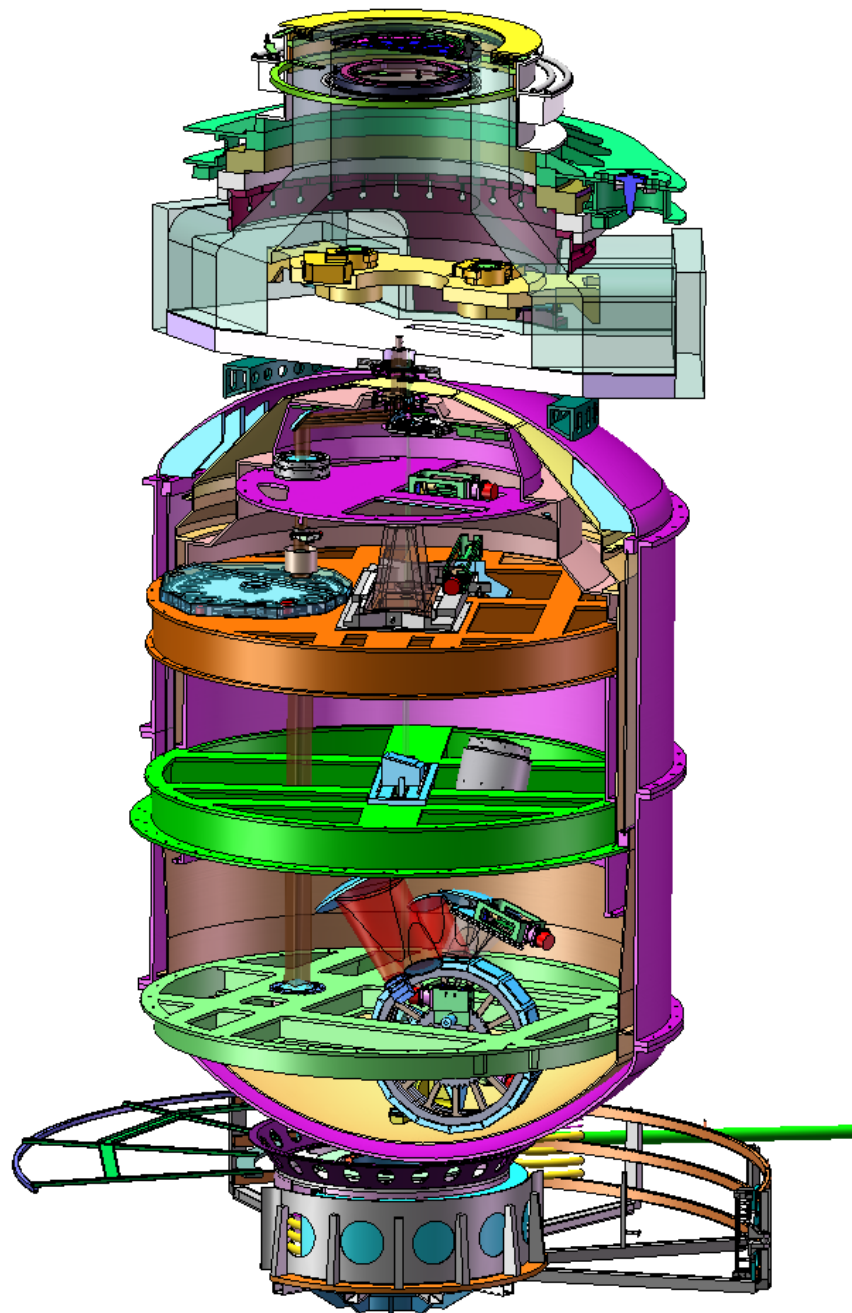
- ◆ 唯一30mの回折限界性能を利用できる観測装置
 - 空間分解能: 10 – 25ミリ秒
 - 点源への感度(限界等級) $\propto D^4$: すばる望遠鏡の200倍
- ◆ 高精度のアstrometry
 - 30マイクロ秒の相対アstrometry
 - 2ミリ秒の絶対アstrometry
 - TMT/NFIRAOS/IRISでしか達成できないユニークな性能

IRIS on NFIRAOS



IRIS instrument layout





OIWFS

Herzberg Institute of
Astrophysics (HIA,
Canada)

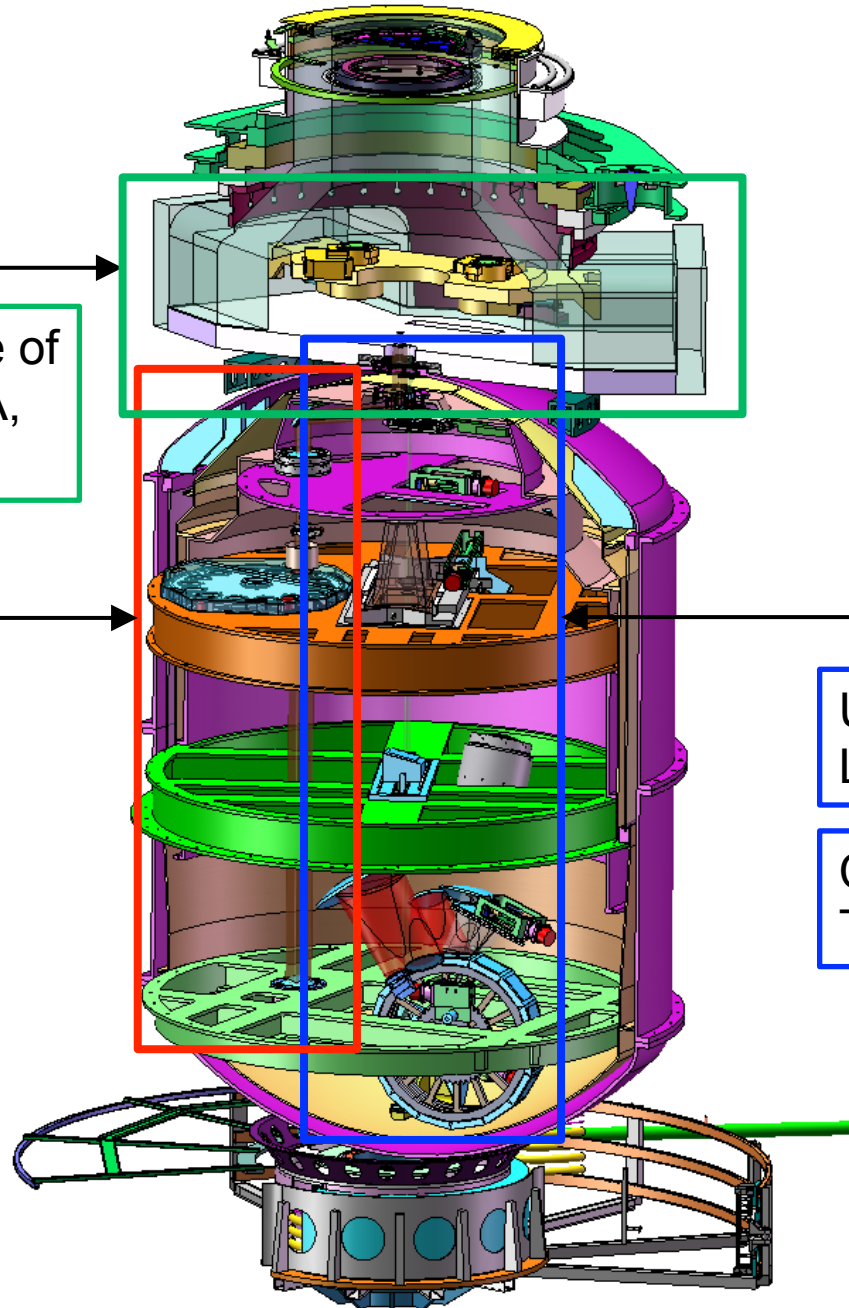
撮像モード光学系

日本

面分光モード光学系

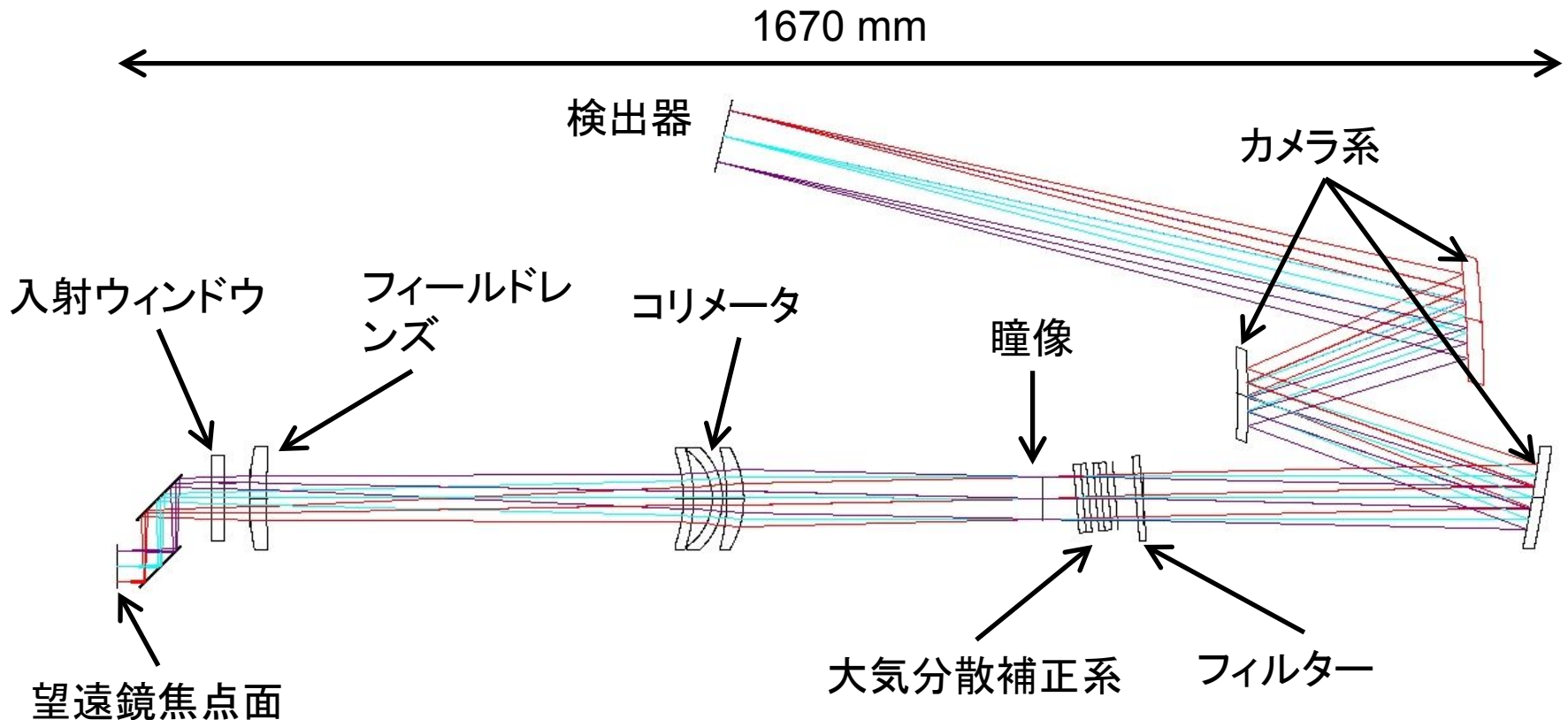
University of California
Los Angeles (UCLA)

California Institute of
Technology (CIT)

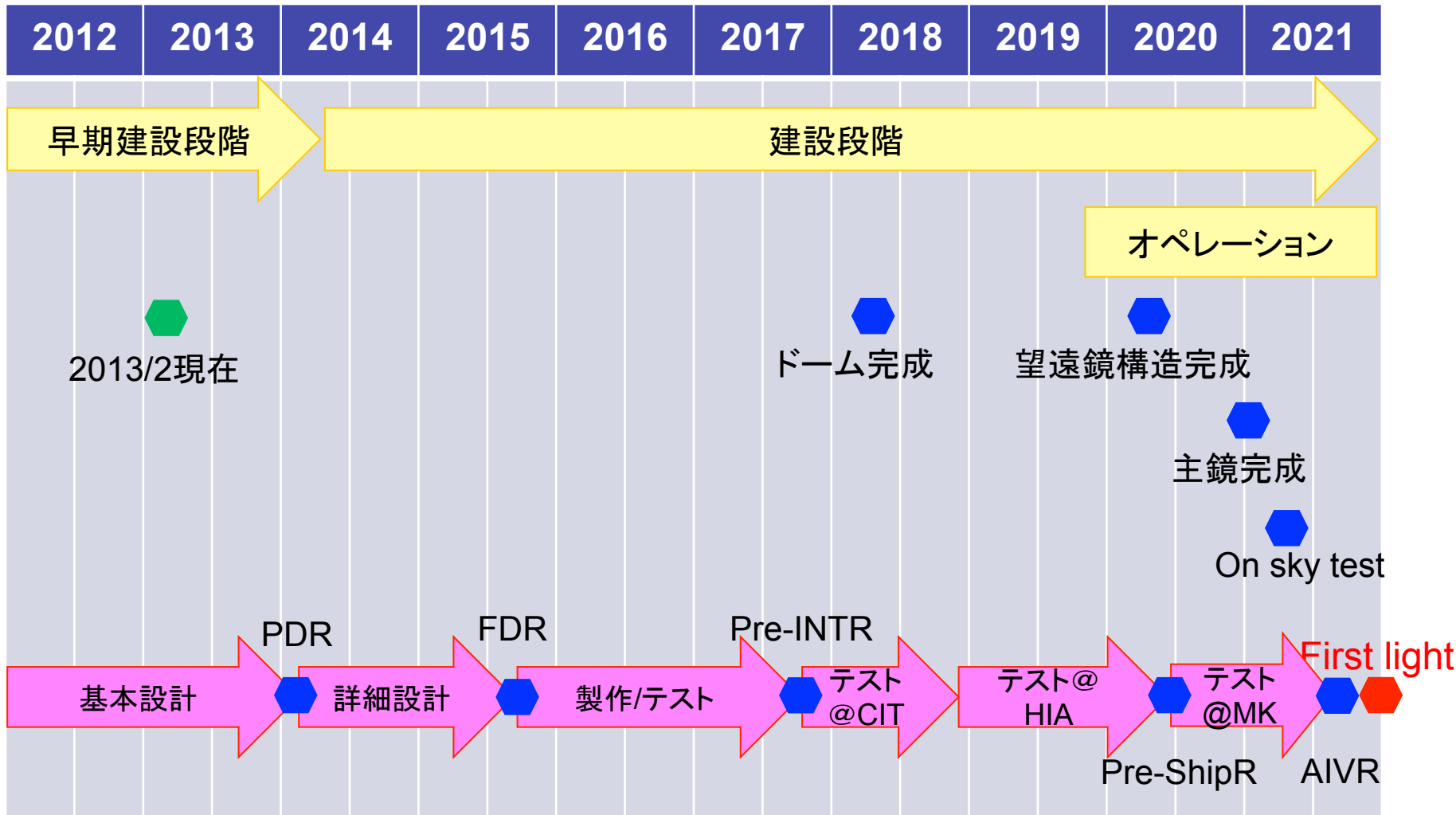


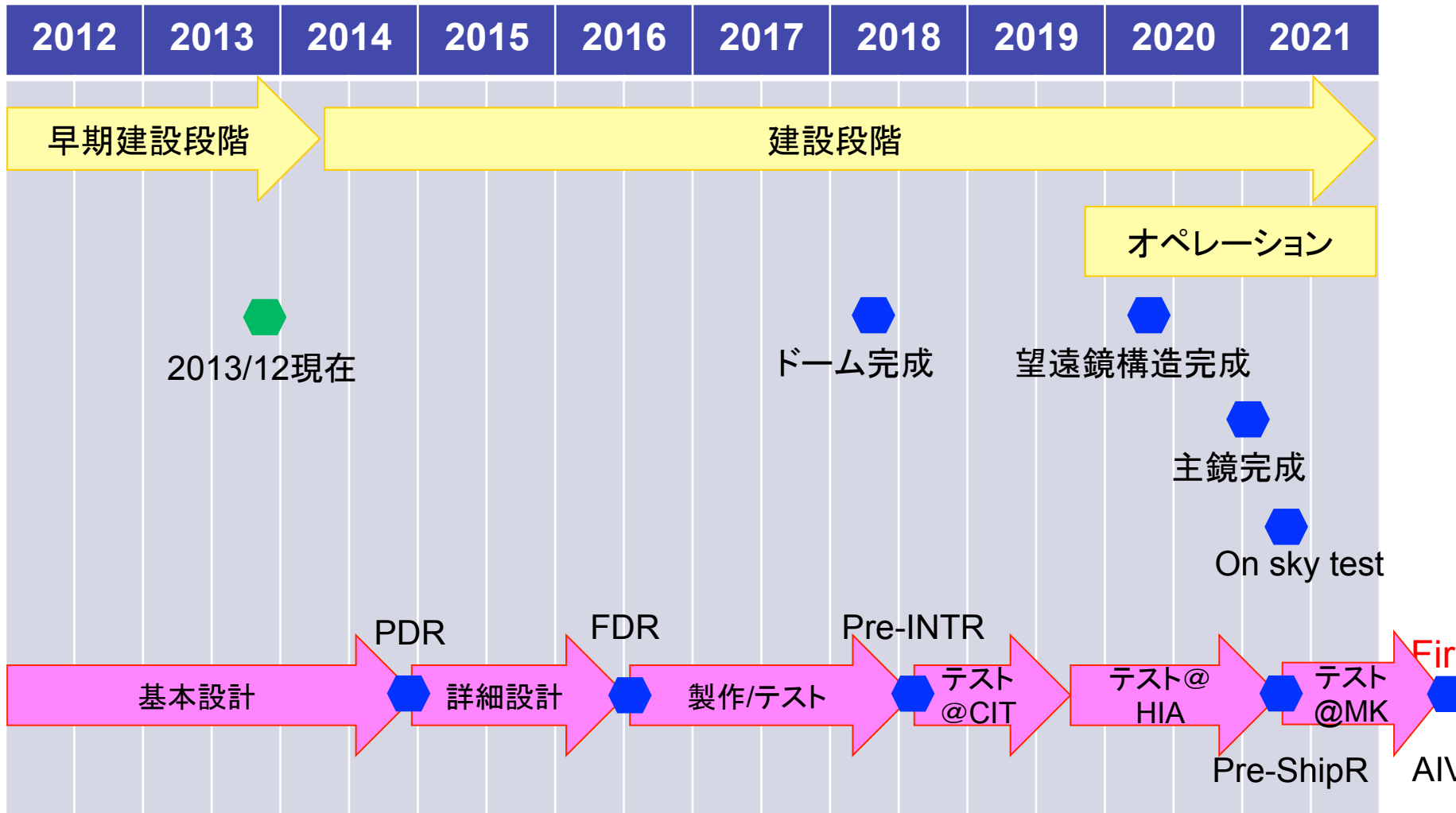
IRIS撮像系レイアウト

- ◆ BaF₂, IRFS, ZnSeの屈折系コリメータ(F/15)
- ◆ 3枚非球面 (Conic面) の反射系カメラ(F/25.8)
- ◆ 瞳径 : 50 mm



TMT/IRISのスケジュール



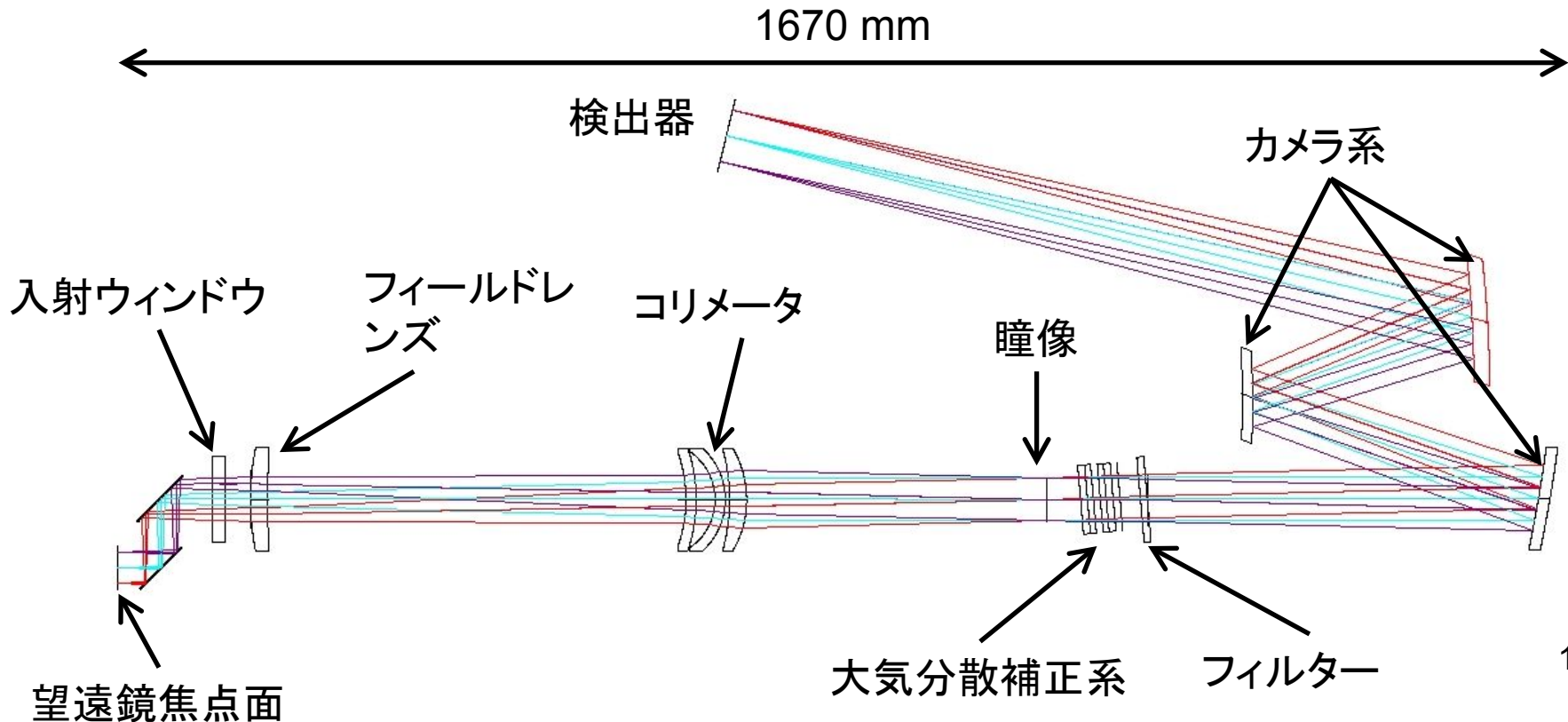


- ◆ システムを通して非常に小さい波面誤差(30nm)を達成する光学系
 - 光学設計、製作
 - 冷却下でのアライメント
 - 振動
 - 30nmの検証方法
- ◆ 30マイクロ秒(1億分の1度)の相対アストロメトリ
 - これまでに達成されたことのない精度
 - 10マイクロ秒 = 1/400ピクセル = 38nmの精度で天体の位置を決定
 - 天体の位置決定に関わる非常に多くの物理過程をモデル化、補正
- ◆ 非常に安定したシステム
 - 高精度のアストロメトリを達成するために、5-10年間は装置を開けない
 - 高い機械的精度を長期間に渡って保持

システムを通して30nmの波面誤差を目指す

IRIS撮像系レイアウト

- ◆ BaF₂, IRFS, ZnSeの屈折系コリメータ(F/15)
- ◆ 3枚非球面 (Conic面) の反射系カメラ(F/25.8)
- ◆ 瞳径 : 50 mm



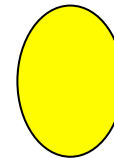
- ◆ 1枚の球面鏡＋2枚の軸外し非球面鏡からなるTMA
- ◆ $\lambda/20$ (5nm rms)で研磨したい。
- ◆ 出来れば安く。海外より安く。

鏡	R (mm)	Conic	OAD (mm)	CA (mm)
Cam1	1500 凹	0		90
Cam2	630 凸	0.1?		80
Cam3	1100 凹	-0.28	405	120

- ◆ 3枚の軸外し非球面からなるTMAは、アライメントが難しい。
- ◆ 精度: 100um, 30arcsec → 0.1um
- ◆ アライメントに関する感度解析
- ◆ 冷却光学系であるため、頻繁な温度サイクルは避けたい
 - 温度サイクルに一週間かかる。
 - 検出器は温度サイクルさせたくない。
- ◆ 常温での精度の追い込み、性能検証(できれば)
- ◆ 常温、低温で変化しない(変化が予測できる)支持方法

- ◆ 実現可能なアライメントのシナリオを作りたい。

- ◆ 露出中に光学素子が振動すると、波面誤差を生む (PSFが振動して像がぼやける)
- ◆ 光学素子が50nm、0.02秒角の精度で安定している必要
- ◆ 光学素子の支持方法とのジレンマ
 - 固い構造: 熱収縮によるストレスを解放できない
 - 柔い構造: 振動に弱い
- ◆ 精度の良い解析と測定による保証



30マイクロ秒の精度のアstrometri

◆ アストロメトリ

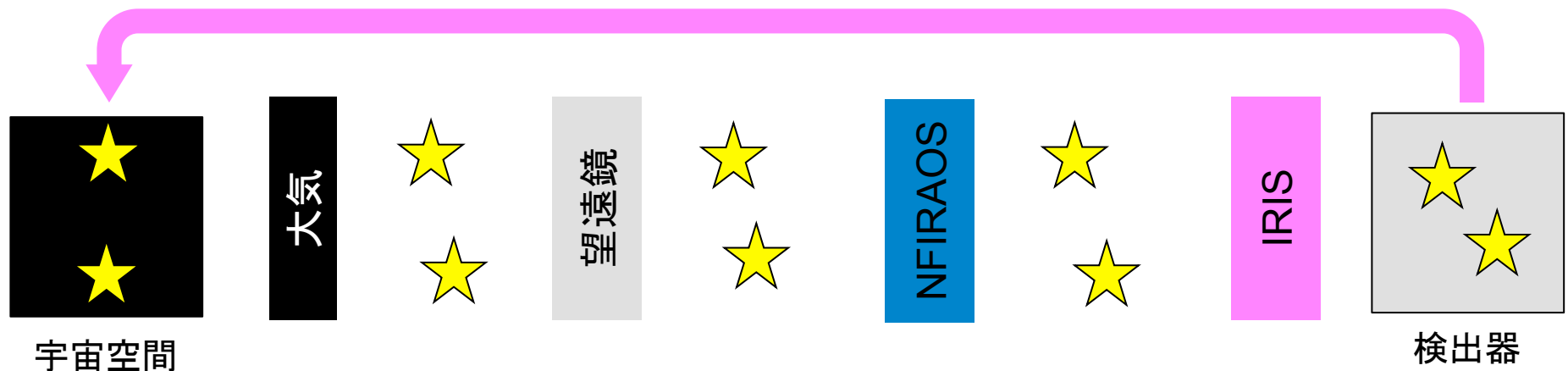
- 天球上での天体の位置を正確に決める(絶対アストロメトリ)
- 天球上の2つの天体の距離を正確に決める(相対アストロメトリ)

2ミリ秒

◆ 誤差の要因

- カタログの誤差、大気分散の誤差と補正誤差、大気の実安定性、AOの性能、**光学系の歪み補正誤差**、天体の位置検出誤差 etc.

30マイクロ秒



- ◆ 10マイクロ秒／17秒角視野＝10⁻⁷のダイナミックレンジ
- ◆ ピンホールグリッドで光学歪みを補正
 - 50mmの範囲でピンホールの位置を20nmの精度で測定
 - -30度の環境下
- ◆ 広いダイナミックレンジ
 - 走査型電子顕微鏡 (SEM) : サブnm精度／100umのレンジ
 - 光学顕微鏡 : 数百nm／数百mmのレンジ
- ◆ -30度での測定
- ◆ Self-calibrationを検討
 - 20nm以下の再現性を持つ測定装置をself calibration

◆ 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な誤差

- 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

- ◆ 単なる誤差伝搬は現実的ではない
 - 相乗効果
 - 複数回観測することによってランダム誤差を減らす
 - 複数回観測することによってシステムティック誤差をランダム化する
- ◆ アストロメトリの観測をシミュレーションすることの重要性
 - どの誤差が効くか？
 - どの誤差は消えるか？
 - どのような観測が必要か？

安定した冷却駆動システムの構築

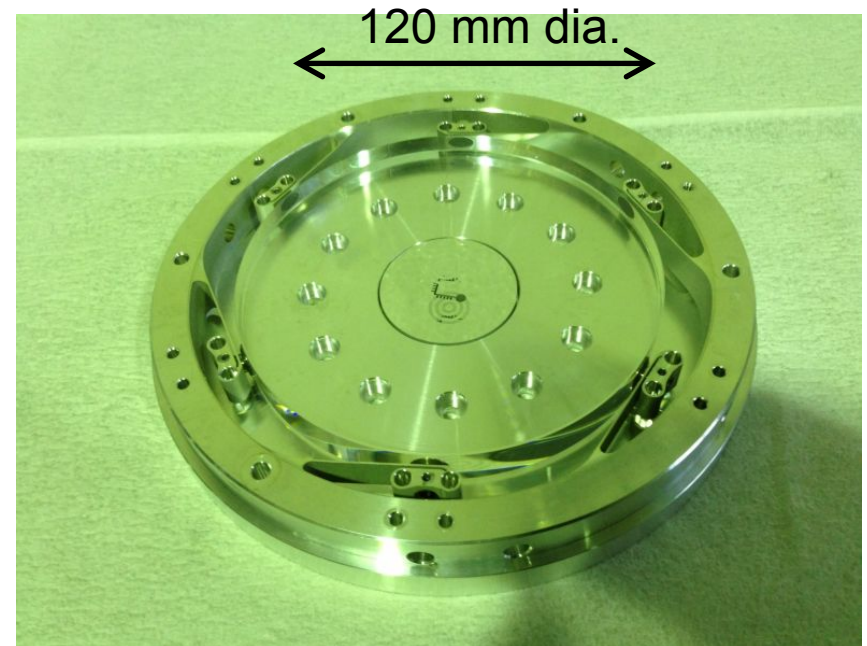
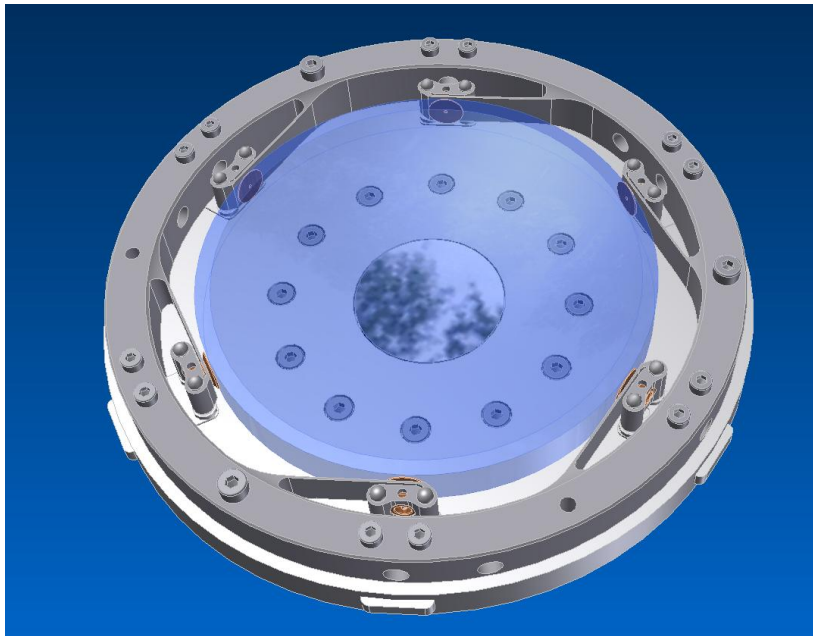
- ◆ 30マイクロ秒の相対アストロメトリ精度を用いたサイエンスの幾つかは長い時間ベースライン(<10年)を必要とする。
 - 銀河系中心の巨大ブラックホール周辺における星の軌道決定
- ◆ IRISは10年間メンテナンスなしで動き続ける
 - ライフタイム回転量: 2,000,000 deg
 - ライフタイム移動量: 4,000,000 mm
- ◆ 冷却駆動系の難しさ
 - 潤滑剤
 - 熱収縮と精度

- ◆ システムを通して30nmの波面誤差の達成
 - 軸外し非球面鏡を $\lambda/20$ で研磨。海外に対抗できるくらい安く
 - TMAのアライメント
- ◆ 30マイクロ秒のアstrometriの達成
 - 10^{-7} の精度で光学歪みを補正
 - アstrometriシミュレータの開発
- ◆ 非常に安定した冷却駆動系の構築
 - 10年間メンテナンスフリーの冷却駆動系
- ◆ 人が足りない！
 - 現在3FTE

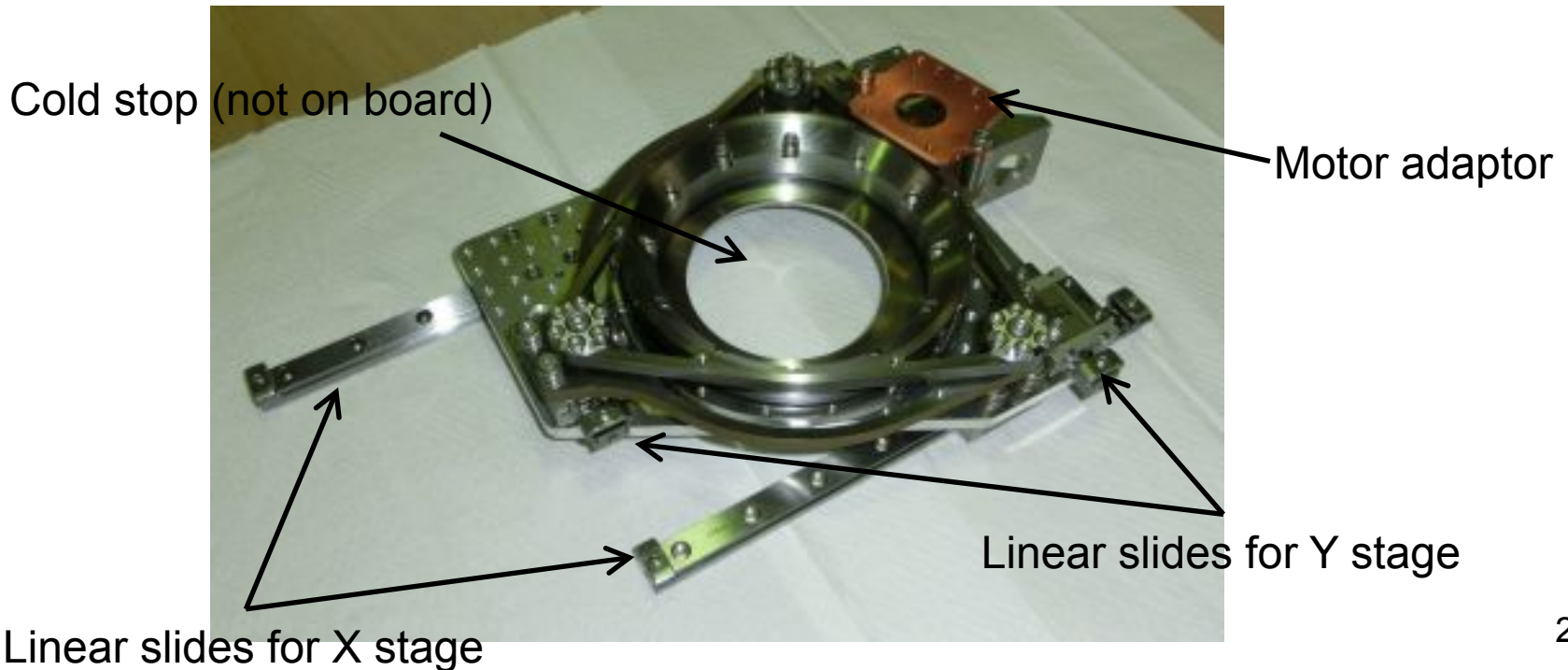
IRISはTMTで最もユニークな装置です

一緒にやりませんか？

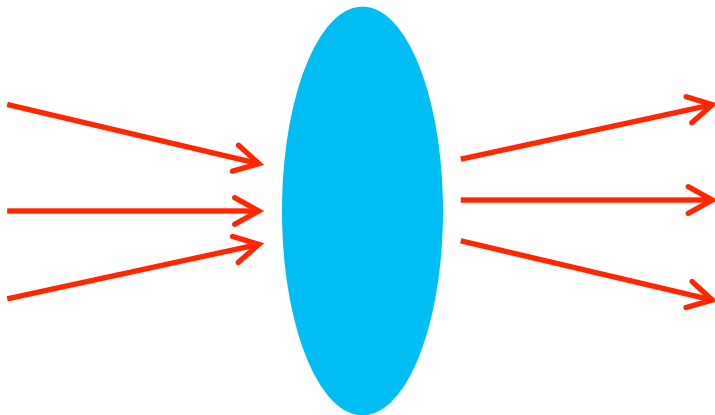
- 熱収縮差による応力と位置変化を板バネで補償するレンズセルを設計
 - 応力解析(接着剤、パッドの素材、形状決定)
 - 接着剤、パッド、レンズの冷却試験
 - レンズのインストール方法検討



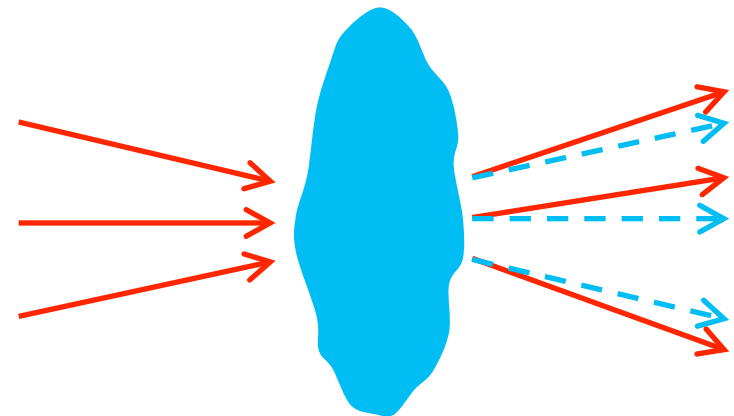
- ◆ 要素技術の低温における特性調査を受け、システムとしての性能を評価
 - リニアスライド、ベアリング、ボールねじ、モーター、センサー
 - 池之上ポスター



- 光学面が理想的な球面の場合、光学歪みは低次(3次、5次)の多項式で表される。
- 実際の光学面は形状誤差を持つ。
→ 光学歪みは形状誤差の空間周波数に対応した不規則な形状になる。
- この影響は焦点面に近い光学系ほど大きい。

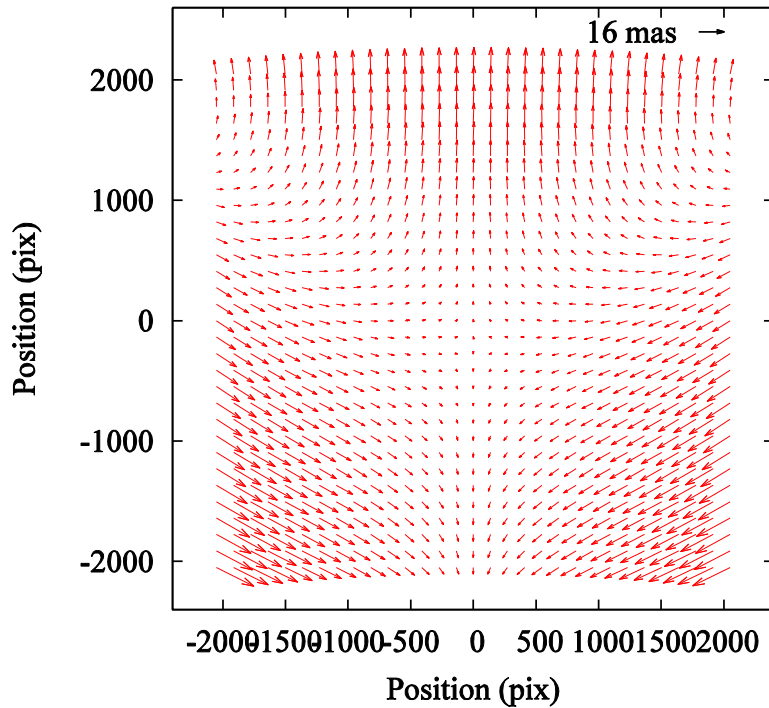


光学面が理想的な球面の場合



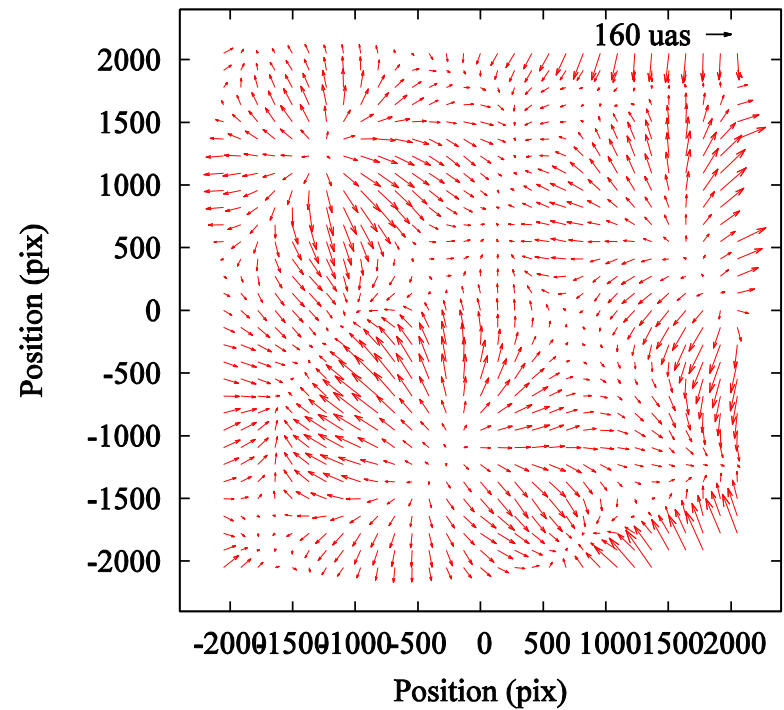
光学面が形状誤差を持つ場合

Distortion Pattern expressed by polynomial



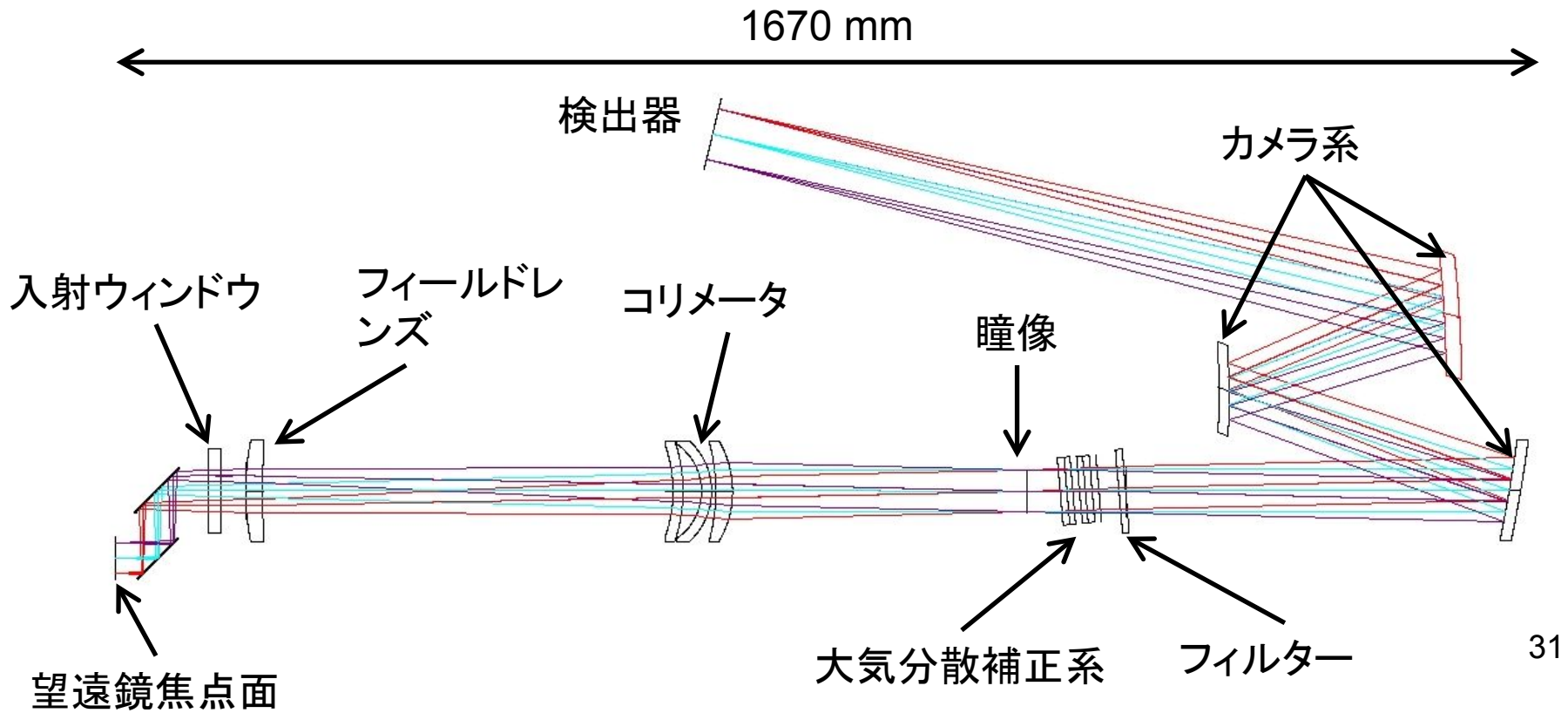
IRIS撮像系の光学歪み

Distortion Pattern due to Surface Quality

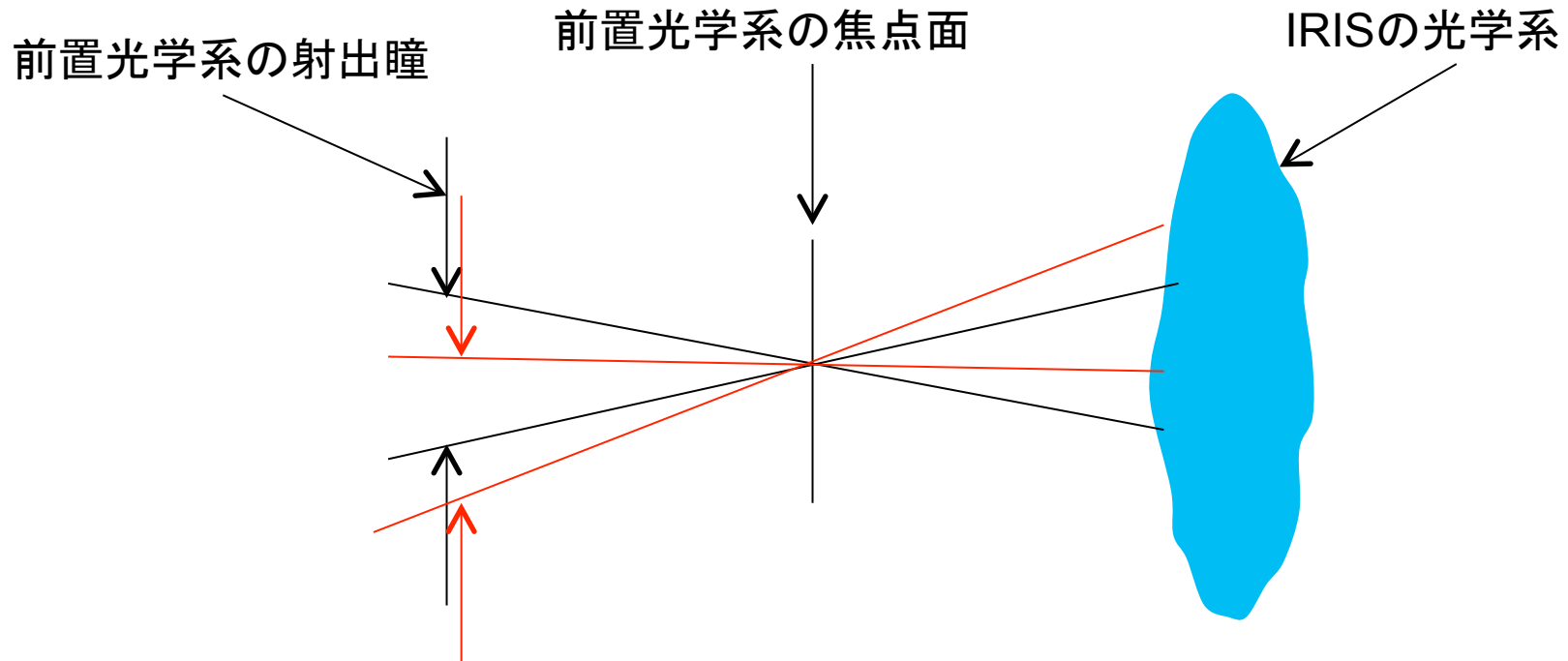


左の光学歪みから3次の多項式で表される
 成分を取り除いた残差

IRIS撮像系レイアウト



- 瞳位置がずれると、像の位置が変わらないのに光学素子上の光束 (beam) がずれる (wander)
→ 光学歪みが一意に決まらない



- ◆ 10マイクロ秒／10秒角視野 = 10⁻⁷
- ◆ ピンホールグリッドで光学歪みを補正
 - 50mmの範囲でピンホールの位置を40nmの精度で測定
 - -30度の環境下
- ◆ 広いダイナミックレンジ
 - 走査型電子顕微鏡 (SEM) : 0.1nm精度／1μmのレンジ
 - 光学顕微鏡 : 数百nm／数百mmのレンジ
- ◆ -30度での測定
- ◆ Self-calibrationを検討
 - 40nm以下の再現性を持つ測定装置をself calibration

- ◆ 一般的に光学表面の形状誤差を指定する公差
 - 「面精度」と「面粗さ」
- ◆ 表面形状誤差の空間周波数の一部の情報しか表さない。
- ◆ Power Spectrum Density (PSD)
 - 要求が厳しく捉えられ、不要に見積もり金額が高くなりかねない。
- ◆ PSDの形は光学面の研磨の方法によるものと思われる。
- ◆ 面精度と面粗さを指定した研磨面のPSDを測定したい。
- ◆ IRIS撮像系で用いる軸外し非球面の一枚(camera 3)を製作

形状誤差と光学歪みの補正誤差 (Ellerbroek 2012)

- 光学歪み (射出瞳における波面のtip/tilt成分)

$$\Theta(\alpha; p) = \left(\frac{\lambda}{D}\right) \left(\frac{32}{\pi^2 D^3}\right) \sum_j \int d\mathbf{r} A(\mathbf{r}) \mathbf{r} p_j(\mathbf{r} + h_j \alpha)$$

- 光学歪みのフーリエ成分

$$F[\Theta(\alpha; p)](\kappa) = \left(\frac{\lambda}{D}\right) \left(\frac{32}{\pi^2 D^3}\right) \sum_j h_j^{-2} F[A(\mathbf{r}) \mathbf{r}](\kappa/h_j) \times F(p_j)(\kappa/h_j)$$

- 光学歪みのパワースペクトル

$$\Phi_{\Theta(\kappa)} = \left(\frac{\lambda}{D}\right)^2 \left(\frac{32}{\pi^2 D^3}\right)^2 \sum_j h_j^{-2} \Phi_{p_j}(\kappa/h_j) F[A(\mathbf{r}) \mathbf{r}](\kappa/h_j) F[A(\mathbf{r}) \mathbf{r}]^*(\kappa/h_j)$$

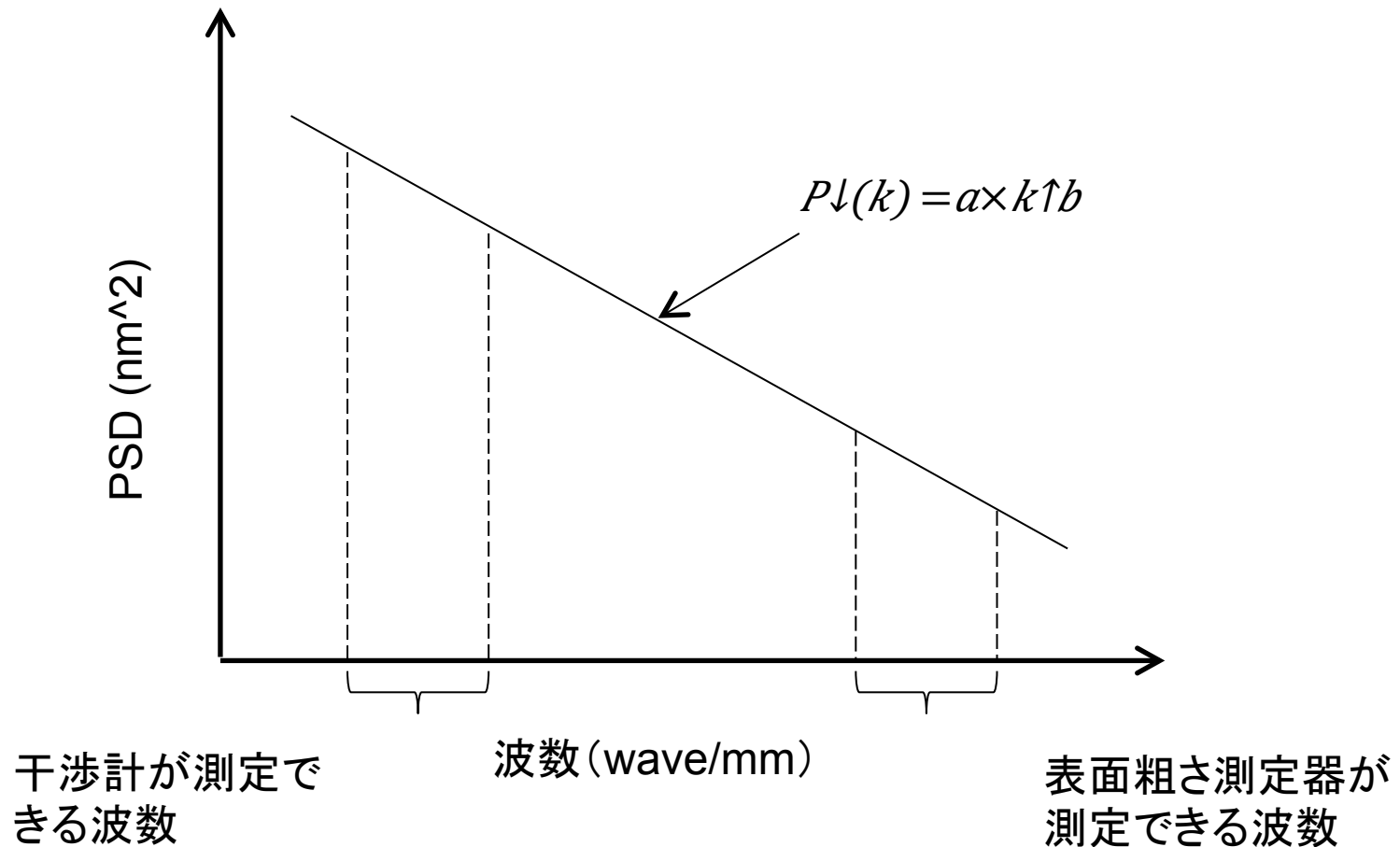
- 光学歪みの補正誤差 (ナイキスト周波数以上の成分)

$$\sigma_{f-f_c}^2 = \int_{\|\kappa\|_{\infty} > (2d)^{-1}} d\kappa \Phi_{\Theta(\kappa)} = 2 \left(\frac{\lambda}{D}\right)^2 \left(\frac{2}{\pi}\right)^2 \iint_{\|\nu\|_{\infty} > (2h,d)^{-1}} d\nu \Phi_i(\nu) \left| \frac{4J_2(\pi D \nu)}{\pi D \nu} \right|^2$$

円形開口のフーリエ変換

ナイキスト周波数

形状誤差のパワースペクトル



Distortion Calibration Error Contribution by Surface

