

TMT 第一期観測装置 IRIS

鈴木 竜二

〈国立天文台先端技術センター 〒181-8588 東京都三鷹市大沢2-21-1〉

e-mail: ryuji.suzuki@nao.ac.jp



IRISは近赤外線の撮像と分光という基本的な機能をもつ観測装置ですが、世界最高の感度と測定精度をもつことで、遠方の宇宙から太陽系天体まで幅広い天文現象について、新しい発見やこれまでにない精度のデータを提供します。本稿では、世界最高性能をもつIRISが見せてくれる新しい宇宙の姿と、そのような観測装置がどのように作られているのかを紹介します。

1. 観測装置の概要

1.1 巨大な赤外線デジカメ

IRISはInfraRed Imaging Spectrographの略で、日本語名は近赤外線撮像分光装置です¹⁾⁻⁵⁾。前の記事で紹介されたように、IRISは三つあるTMT第一期観測装置のうちの一つで、NFIRAOSという補償光学とともに用いることで0.84-2.4ミクロンの観測波長域で回折限界の赤外線画像と面分光画像を取得することができます。図1にIRISの外観を示します。IRISは直径2 m、高さ3.5 mの巨大な真空冷却容器とその上に位置する波面センサー

から構成されます。真空冷却容器の中には赤外線画像を取得する撮像部と面分光画像を取得する面分光部が配置されます。真空冷却容器の中は 10^{-6} Torrの真空度、摂氏-240度から-150度の温度に保たれます。IRIS単体の基本的な機能は赤外線の画像（空間画像と分光画像）をとることで、その意味では市販されているデジカメの赤外線版と言えますが、望遠鏡が大きいためデジカメ自体も巨大になっています。

表1, 2にIRISの仕様と期待される性能をまとめました。撮像モードでは、検出器一つ当たり 17×17 秒角の視野の画像を4ミリ秒角のピクセ

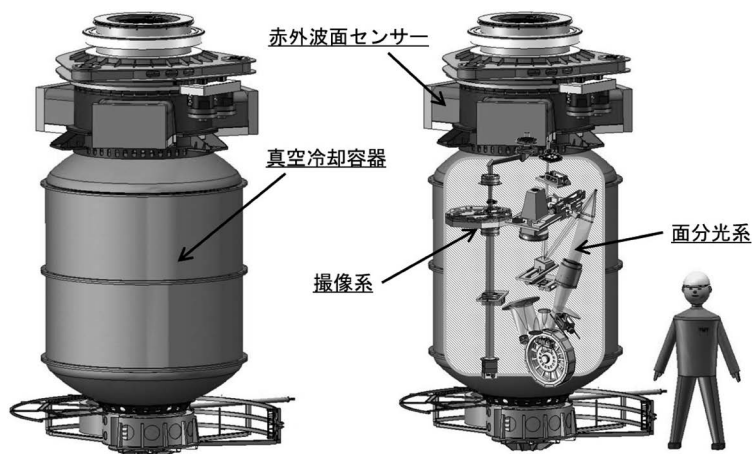


図1 IRISの外観（左）。真空冷却容器の内部を表示したのが右の図。

表1 IRISの仕様まとめ.

	ピクセルスケール (mas/pix)	視野 (arcs×arcs)	波長分解能	バンドパス
撮像モード	4	34×34		Y, z, J, H, Kフィルター 狭帯域フィルター
面分光モード				
レンズレットアレイ	4	0.064×0.51	8,000-10,000	20%
	9	0.144×1.15	8,000-10,000	20%
	4	0.45×0.51	4,000	5%
	9	1.01×1.15	4,000	5%
イメージスライサー	25	2.2×1.125	4,000, 8,000	20%, 10%
	50	4.4×2.25	4,000, 8,000	20%, 10%

表2 IRISの期待される性能まとめ.

ストレール比	0.41 (J) 0.60 (H) 0.75 (K)
Airy直径 (FWHM)	21 mas (J) 28 mas (H) 37 mas (K)
アストロメトリー精度	相対アストロメトリー: 30マイクロ秒 絶対アストロメトリー: 2ミリ秒
点源に対する限界等級 撮像モード	27.8 (J) 27.3 (H) 26.9 (K)
面分光モード, 4 mas/pix	25.8 (J) 26.0 (H) 25.2 (K)

ルスケールで取得することができます。光学系自体は34×34秒角の視野を提供する大きさで作られていますので、準備できる検出器の数によって、最大34×34秒角まで視野を広げることができます。

1.2 ハイブリッド面分光器

次に面分光モードの仕様ですが、まず面分光について説明しましょう。銀河などの広がった天体を分光する場合、「銀河のいろんな部分を一度に分光したい」ことがあります。このように、二次元の空間情報（つまり“面”の情報）と波長情報を同時に取得することができる分光方法が、面分光です。面分光器には、主にイメージスライサー型、レンズレットアレイ型、ファイバー型、ファブリペロー型があり、それぞれに利点、欠点があ

るため用途によって使い分けられています。通常は上記のどれか一つの型を使用しますが、IRISではイメージスライサー型とレンズレットアレイ型の二つの型から選択することができます。

図2にイメージスライサー型とレンズレットアレイ型の原理を示しました。図2からわかるように、イメージスライサー型の面分光器は検出器が効率よく使われています（検出器がスペクトルで埋め尽くされています）。したがって、一般的にレンズレットアレイ型に比べて視野を広く取ったり、波長範囲を広く取ったりすることができます。一方で、レンズレットアレイ型は原理的にイメージスライサー型よりも結像性能が格段に良くなる利点があります。つまり、結像性能（つまり空間分解能）は要らないが視野と波長範囲を広く

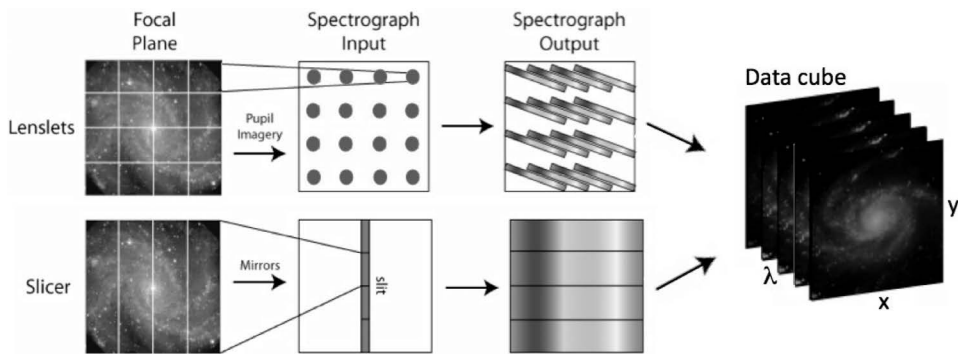


図2 レンズレットアレイ型面分光（上）とイメージスライサー型面分光（下）の原理⁴⁾。一番左は分光したい天体の画像。左から二番目は分光する前の画像。左から三番目は分光された後の画像（得られる画像）。得られた画像を解析すると一番右のように二次元の空間情報と波長情報が得られます。

取りたい場合はイメージスライサー型、視野と波長範囲は要らないがとにかく空間分解能を優先したい場合はレンズレットアレイ型、という役割分担になります。IRISという観測装置を考え始めた当初、多くの天文学者が「これまでにないサイエンスを実現するには、どんな性能の観測装置が必要か？」について議論しました。そこから導かれた結論は、「視野も波長範囲も広く取りたいし、空間分解能も欲しい」という、何とも欲張りな観測装置に対する要求でした。この要求に応えるために、IRISでは今までにない二つの型の面分光器を組み合わせたハイブリッド型面分光器を採用しました。面分光モードでは4, 9, 25, 50 ミリ秒角という4種類の空間サンプリングができ、レンズレットアレイ型は4, 9 ミリ秒角、イメージスライサー型は25, 50 ミリ秒角を提供します。

2. 世界最高の性能

2.1 TMT+NFIRAOS+IRIS=すばる200台

望遠鏡の口径を大きくすることのメリットは、観測の感度を良くすることと望遠鏡の視力（空間分解能）を良くすることです。望遠鏡の口径を大きくすると、光を集める面積は口径の2乗で大きくなります。さらに回折限界の観測装置の場合、視力は口径の1乗に比例するため、点源に見える天体の天球上での大きさ（立体角）は口径の2乗

に反比例します。したがって、天体と一緒に観測されるバックグラウンドの量が口径の2乗で小さくなります。これら二つ（光を集める面積とバックグラウンドの量）の影響の掛け合わせとして、回折限界の観測装置の場合、感度は口径の4乗に比例します。一方、回折限界でない観測装置では視力は口径にほぼ関係なく、感度は口径の2乗で良くなりますので、望遠鏡の口径を大きくすることの最大のメリットは回折限界の観測装置にもたらされます。例えば、TMTとNFIRAOSとIRISを組み合わせた観測は、すばる望遠鏡の同等の観測装置よりも $(30 \div 8.2)^4 \sim 200$ 倍の感度を持ちます！ また、空間分解能はすばる望遠鏡の約4倍良くなり、人間の視力に換算すると6,000になります。これは、沖縄から北海道にあるリングが識別できる視力になります！ 表3にこの空間分解能で識別できる天体の例を地球からの距離ごとにまとめました。例えば、太陽に一番近い星（ケンタウリ座アルファ星）までの距離は1.35 pcです。おとめ座銀河団の銀河の星々を分解して識別できることになります！

2.2 1億分の1度の精度の相対アストロメトリー

IRISのユニークな性能として、30マイクロ秒角の精度で天体の位置を測る高精度相対アストロメトリーが挙げられます。30マイクロ秒角は約1億分の1度に相当します。これは人類がこれまで

表3 10ミリ秒角の空間分解能が地球からのさまざまな距離に対してどれくらいのスケールに対応するかをまとめた表.

地球からの距離	10ミリ秒に対応するスケール	この距離にある主な天体
5 AU	36 km	木星
5 pc	0.05 AU	太陽近傍の星
100 pc	1 AU	近傍の星生成領域
1 kpc	10 AU	銀河系天体
1 Mpc	0.05 pc	近傍の銀河
20 Mpc	1 pc	おとめ座銀河団
$z=0.5$	0.07 kpc	太陽系が誕生した頃の宇宙
$z=1.0$	0.09 kpc	宇宙が現在の半分の大きさだった頃
$z=2.5$	0.09 kpc	クエーサーの活動の最盛期
$z=5.0$	0.07 kpc	銀河が生まれ始めた頃, 宇宙の再電離時期

達成したことのない精度で、現在計画されている超大型望遠鏡計画の中ではTMT+NFIRAOS+IRISでしかできない性能です。電波干渉計(VLBI)や宇宙望遠鏡(GAIA)を用いて数十マイクロ秒角の精度の達成を狙う計画もありますが、観測できる天体の種類、明るさ、視野、空間分解能が異なるため、IRISはこれらの計画と相補的な関係にあると言えます。この世界(そして史上)最高の精度を用いて、後で述べるようにこれまでにないサイエンスが提案されています。ちなみに1億分の1度の角度というのは先ほどの例でいくと、沖縄から北海道にあるリングが0.1 mm(人間の髪の毛の幅程度)動いたのがわかる精度になります。

3. IRISで拓くサイエンス

では次に、先述した世界最高の性能を使ってIRISがどんな宇宙を見せてくれるのか、二つの例を紹介します。

3.1 宇宙の一番星を探す

天文学の歴史の中で大きい望遠鏡を作る大きなモチベーションの一つは人類の「より遠くの宇宙を見たい」という欲求でした。すばる望遠鏡はその大集光力と広い視野で多くの遠方にある銀河を発見し、最遠方の銀河探査レースとそれらの銀河を通した最遠方宇宙の研究で世界をリードしています⁶⁻⁸⁾。すばる望遠鏡は138億年の宇宙の歴史の中で120億年以上前に存在した銀河を多数発見

しましたが、その銀河の放つ光を調べるとすでに小型の銀河ほどに成長していることがわかりました。つまり、その銀河を構成している星々、つまり宇宙で最初に生まれた星々がいつどのようにして誕生したかを知るには、さらに昔(遠く)の宇宙を見る必要があるのです。宇宙で最初に生まれた星がどのような光を放つかは理論的な研究がされており、特徴的な青色と輝線がIRISの感度波長域である近赤外線として観測されるであろうと予測されています⁹⁾。しかしながら、これらの星々の光は周りにある中性水素ガスに阻まれてしまうため、とても弱い光です。この微弱な光をとらえるためにはTMTの大集光力とIRISの高い感度が不可欠になります。

3.2 ブラックホール周辺で一般相対性理論を検証する

IRISを使った全く新しいサイエンスも提案されています。その一つがブラックホールの周辺での一般相対性理論の検証です。われわれの住む銀河系の中心には太陽の460万倍の質量をもつ巨大ブラックホールが存在すると考えられています。ブラックホールそのものは光を發しませんので直接見ることはできませんが、ブラックホールの周りを回る星の軌道を測定することで、間接的にブラックホールの存在を示し、その質量を求めることができます。カリフォルニア大学銀河中心研究室のホームページ¹⁰⁾に観測で得られた星の軌道

が動画で紹介されていますので是非見てみてください。これまでの観測では、感度が足りないため観測できる天体が最も明るい星数個に限られていました。これらの星の軌道周期は最も短いもので11年ですので、観測には10年以上の月日がかかります。また軌道を求める精度（アストロメトリーの精度）は150マイクロ秒でした。一方で、ブラックホール周辺のような強い重力場での物体の運動を正確に記述するには、一般相対性理論を考慮する必要があります。一般相対性理論を銀河系中心のブラックホール周辺に当てはめると、(1) 相対論的效果、(2) ブラックホールのスピンによるフレーム引きずられ効果、(3) 星やダークマターの分布の効果、により周回する星の軌道が周回を重ねることに少しずつずれていくことが予想されます(図3)。またそのほかにも(4) 観測した時刻と光が放出された時刻のずれが軌道位置で変化する効果、(5) 星と星の相互作用によって、軌道に局所的なパターンが出ます¹²⁾。しかしこの軌道のずれは非常に小さく、30マイクロ

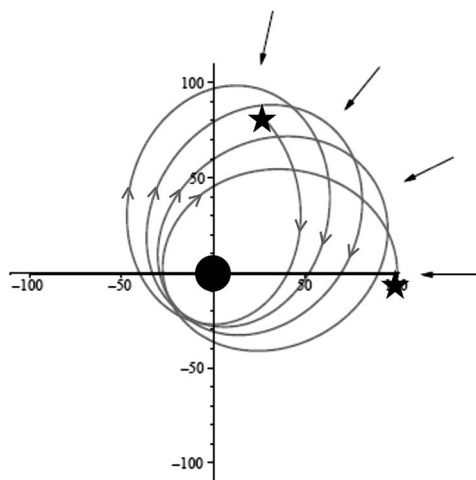


図3 銀河中心にあるブラックホールを周回する星の軌道が、相対論的效果やブラックホールのスピンによって変化する様子を表した模式図(Rubilar & Eckart 2001の図を改変)。中心の黒丸がブラックホールのある場所を示しています。

秒程度の精度で軌道を決定する必要があるため、これまでのアストロメトリーの精度と観測できる星の数では一般相対性理論の効果を検証することはできませんでした。IRISは高い感度と30マイクロ秒のアストロメトリー精度を実現することでより多くの暗い天体まで、より精度良く軌道を求めることができるようになります。また、多くの暗い天体のうちのいくつかはより短い軌道周期をもつと期待されるため、同じ10年間で複数の周回を観測することができます。このように多くの天体について、複数の周回軌道を30マイクロ秒の精度で求めることで、一般相対性理論から期待される軌道のずれを測定することができます。

一般相対性理論はわれわれの身近な世界や銀河団スケール、宇宙全体のスケールでは成り立つことが示されていますが、巨大ブラックホール周辺という特殊状況において成り立つかどうかはわかっていません。IRISが実現する世界最高の感度とアストロメトリーの精度で、ブラックホール周辺での一般相対性理論の検証という全く新しいサイエンスが可能になることはとても楽しみです。

4. 技術的なチャレンジ

先ほど述べたように、IRISは世界最高の性能を提供する観測装置ですが、もちろん、その実現には技術的な課題があります。ここではIRISを実現するに当たって克服しなければならないいくつかの技術的なチャレンジについてお話しします。

4.1 30ナノメートルの波面精度

世界最高の感度と空間分解能を達成するために光学系の結像性能には「撮像部単体で30ナノメートルの波面誤差を達成すること」という厳しい要求が課されています。光学素子に詳しい方は想像しやすいと思いますが、一般的に光学素子(レンズ、鏡、プリズムなど)の表面精度は $\lambda/4$ (市販品)から $\lambda/20$ (特注品)です。 $\lambda/20$ (最大値)は大体6ナノメートル(rms値)になるため、

レンズ1枚につき4から13ナノメートル、鏡1枚につき12ナノメートルの波面誤差が生じます。また、IRISは全長が2メートルある長い光学系で、光学系はすべて摂氏-200度まで冷やされます。このような大型冷却光学系では、冷却時の材質の特性、熱収縮の違いによる光学素子の移動や構造体の歪み、温度ムラを考慮した設計が必要となります。設計性能（レンズが設計どおりにできたとしても生じる波面誤差）に加えて、製作誤差、組み上げ誤差を考慮しても30ナノメートルの波面誤差を達成できるかどうか、詳細な性能評価解析と組み上げプランの作成が必要になります。

4.2 1億分の1度の角度精度

1億分の1度の角度精度はこれまで人類が達成したことのない精度です。この精度の世界になると、これまでの精度では問題にならなかった多くの誤差要因が問題になります。アストロメトリーの観測は複雑で、天体の性質、地球大気、望遠鏡、補償光学、観測装置など、アストロメトリーの精度に影響する誤差要因が30以上あります。ここではその中でも大きな誤差要因の一つである光学歪みについて紹介します。

光学歪みを測定する一般的な方法は、すでに位置のわかっている物体（原器）の画像を目的の光学系を通して取得して、得られた位置と原器の位置とを比較するやり方です。1億分の1度は望遠鏡の焦点面では20ナノメートルに対応しますが、一方で、IRISの視野（34×34秒角）は望遠鏡焦点面で74×74 mmになります。したがって、上記の方法を使って光学歪みを測定しようと思うと、74×74 mmサイズの物体の位置が20ナノメートルの精度であらかじめわかっていないといけません。さらに望遠鏡の焦点面は-30度まで冷やされるため、この温度で位置がわかっていることが必要です。残念ながらこの大きさで精度を両立する測定器はこの世に存在しません。-30度となればなおさらです。つまり、これまででない

精度を目指しているために、参考にする原器がないのです。そこでわれわれはセルフキャリブレーション法という方法を用いて、自分たちで世界最高精度の原器を作ること考えています。これまでコンピューターシミュレーションによって10マイクロ秒以下の精度で原器を作製できることを示しましたが、得られた結果が正しいかどうか保証はできませんし、測定できていない成分があるかもしれません。今後は、実測とシミュレーションを合わせてこれら不明な成分の影響をいかに見積もるかが課題になります。

4.3 メンテナンス不要の10年間保証

先述した銀河系中心にある巨大ブラックホール周辺での一般相対性理論の検証には、星の軌道を30マイクロ秒角の精度で10年間にわたってモニターする必要があります。このためには10年間観測装置を安定した状態に保つ必要があり、「10年間メンテナンスなしで駆動すること」という仕様が装置に課されています。10年間駆動し続けることは、常温、大気圧下で稼働する観測装置でも容易ではありませんが、液体潤滑剤を使えない赤外線観測装置ではなおさらです。適切な潤滑剤の使用、接触面の皮膜による保護、適切なクリアランスの設定、きれいな環境での組み上げなど、細心の注意を払う必要があります。

5. IRISの作り方

5.1 国際協力で行われる開発

IRISの開発は日本、アメリカ、カナダ、中国が分担して行っています。先述のように、IRISは主に、波面センサー部、撮像部、面分光部というそれぞれ独立した機能をもつモジュールが統合されます。それぞれのモジュールは異なる国で開発されていて、波面センサーはカナダのHIAという研究機関、面分光部はカリフォルニア大学ロサンゼルス校とカリフォルニア工科大学、そして撮像部は国立天文台先端技術センターが中心となって開発をしています。また、IRISを使って行い

たいサイエンスから装置の仕様を決めるための IRIS サイエンスチームが日米加中印の天文学者によって構成されており、トロント大学がそのまとめ役を行っています。

IRIS の開発プロジェクトは TMT の前身となる CELT 計画の始まりとともに、2005 年に始まりました。そして 2007 年に白田氏と筆者らが加わり、撮像モードを担当することになりました。開発プロジェクトは 2007 年に実現可能性検討段階、2011 年に概念設計段階を終了し、執筆している 2014 年 8 月現在、基本設計段階に進んでいます。ここではこれまで各国の機関で行われてきた開発の成果を紹介します。

5.2 カナダ、アメリカでの開発状況

カナダにある HIA という研究機関では波面センサーを開発しています。波面センサーは IRIS の検出器上のどこに目的の天体を配置するかを決め、その天体が検出器上に焦点が合うように補償光学に指令を出すためのセンサーです。このセンサーの位置が動くとき天体の位置が動いてしまうため、センサーの位置の再現性や観測中の安定性がとても重要になります。波面センサーは摂氏 -30 度で運用されますが、位置の再現性は 2 ミクロン以下、安定性は 1 ミクロン以下が必要とされます。摂氏 -30 度では液体潤滑剤は使用できないため、

数ミクロンの精度を達成するのは容易ではありません。HIA では、波面センサーの試作機を製作してこの精度の実現性を検証するほか、IRIS を移動する際のカート的设计も行っています。

カリフォルニア大学ロサンゼルス校では、レンズレット型面分光器の開発を行います。レンズレット型の面分光器では、14,000 本ほどの細かいスペクトルが検出器上に並ぶため、スペクトルの位置が観測毎に異なるとスペクトルを取り出す作業が非常に難しくなります。そのため、光を分散させる分散素子（グレーティング）の位置を 2 ミクロンの再現性で決める必要があります。そこで

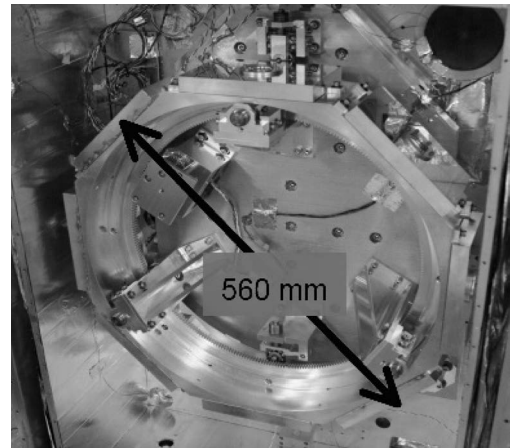


図4 グレーティング交換機構のプロトタイプ⁴⁾。

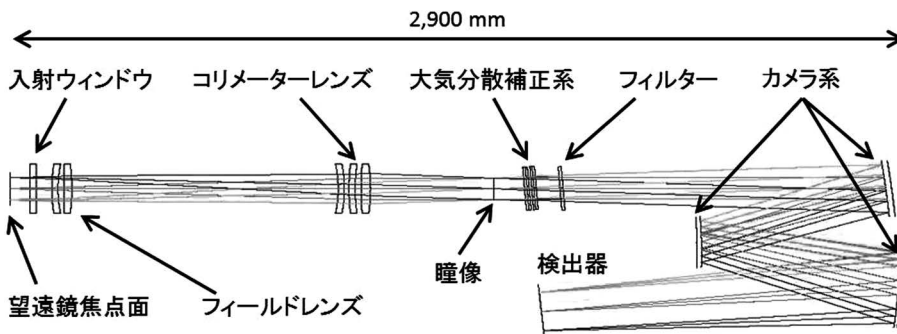


図5 IRIS 撮像部の光学レイアウト。天体からの光は望遠鏡と NFIRAOS を通って望遠鏡焦点面に像を結びます。望遠鏡焦点面を通った光はフィールドレンズ、コリメーターレンズによって平行光にされたあと、3 枚の鏡からなるカメラ光学系によって検出器上に結像されます。入射ウィンドウよりも右側は真空冷却容器内に配置され、摂氏 -200 度に冷やされます。

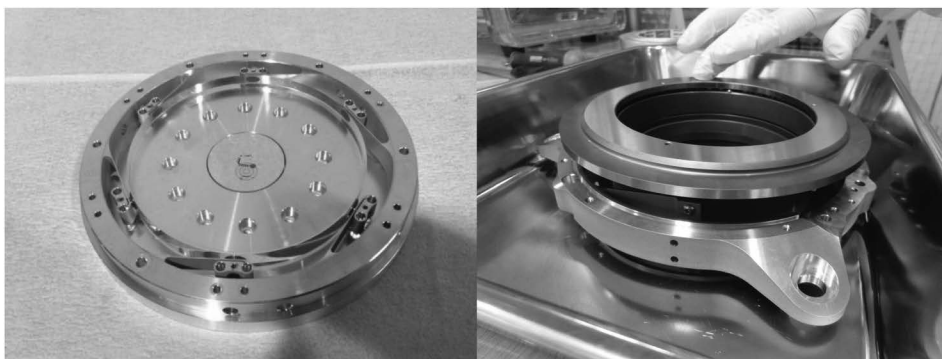


図6 レンズ支持機構のプロトタイプ（左）と大気分散補正光学系用回転ステージのプロトタイプ（右）。レンズ支持機構は板バネと接着剤でレンズを支えていて、温度が変わってもレンズに無理な力を加えず、レンズの位置を保つことができます。回転ステージはベアリングを自作することで、揺動を測定限界以下まで抑えることができます。

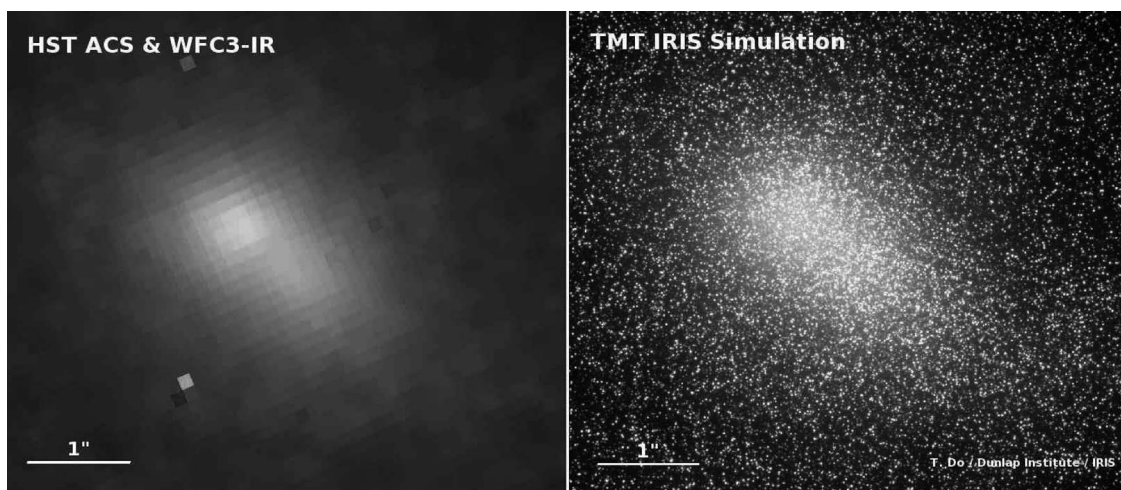


図7 ハッブル宇宙望遠鏡で撮られたアンドロメダ銀河中心部の画像（左）と IRIS simulator で作成された同じ領域の画像（右）（トロント大学 Tuan Do 氏提供）。

HIA 同様、グレーティング交換機構のプロトタイプを製作し精度の検証を行っています（図4）。

5.3 日本での開発状況

それでは次に日本で行ってきた撮像部の開発の成果を見ていきます。まず最初に開発の基礎になる光学設計です。先述のように30ナノメートルの波面誤差を達成することは、設計、製造、組み上げ、性能評価をよく吟味しなければならず、容易ではありません。また、TMTで集められた天

体の光はとても貴重（かつ高価！）ですので、一つの光子も無駄にたくありません。したがって、できる限り高い透過率が求められます。これらの事を念頭に、さまざまなタイプの光学デザインを提案し、その性能を総合的に評価した結果が図5に示す光学レイアウトです。

次に、この光学設計を実現するためのレンズ支持機構（オプトメカ）と駆動機構（メカトロ）のプロトタイプ製作と設計を紹介します。図6(左)

はレンズを摂氏 -200 度で精度よく支持するための機構で、常温から摂氏 -200 度に冷やしてもレンズに無理な力を与えず、なおかつレンズを 10 ミクロンの精度で保持できます。図6(右)は光学素子を回転させる際に起こる回転軸の角度ぶれ(揺動)を極力抑えた回転ステージで、揺動角は 8 秒角以下です。このステージは大気分散補正プログラムを回転させるステージとして使用され、回転させる際に起こる光学歪みを測定限界以下まで抑えることができます。

5.4 IRIS 開発の今後

先述したように、執筆している現在 IRIS の開発は基本設計段階にあります。2015年12月に基本設計のレビューを行い、ここで基本的な設計は固定されます。その後2017年6月まで詳細設計段階として製作開始準備を行います。IRIS のそれぞれのモジュールはそれぞれの国の機関で独立に製作、組み上げ、性能評価試験を行った後、まずカリフォルニア工科大学において撮像モードと面分光モードの統合試験が行われます。その後、2020年にカナダの HIA に移送され、波面センサーと NFIRAOS との統合試験を行います。そして2022年には晴れて TMT の建設サイトであるマウナケア山頂に移送され、統合試験とファーストライトを迎える予定です。

6. 最後 に

最後に IRIS の期待される性能として、TMT, NFIRAOS, IRIS の現在の予想性能を考慮した IRIS simulator で作成したアンドロメダ銀河の中心部の画像を図7に示します。ハッブル宇宙望遠鏡の画像と比べると、TMT+NFIRAOS+IRIS のすご

さが一目瞭然です。しかも、ここに写っている一つ一つの星のスペクトルが一度にとれるのです！2020年代初頭にはこのような画像を皆さんにお届けできるよう頑張りますので、ご期待ください。

参考文献

- 1) Larkin J. L., et al., 2010, Proc. SPIE, 7735-87
- 2) Barton E., et al., 2010, Proc. SPIE, 7735-208
- 3) Suzuki R., et al., 2010, Proc. SPIE, 7735-214
- 4) Moore A. M., et al., 2014, Proc. SPIE, 7735-87
- 5) Moore A. M., et al., 2014, Proc. SPIE, in press
- 6) Kodaira K., et al., 2003, PASJ 55, 17
- 7) Iye M., et al., 2006, Nature 443, 186
- 8) Shibuya T., et al., 2012, ApJ 752, 114
- 9) Tumlinson J., et al., 2001, ApJ 550, 1
- 10) <http://www.galacticcenter.astro.ucla.edu/pictures/index.shtml>
- 11) Rubilar G. F., Eckart A., 2001, A&A 374, 95
- 12) Weinberg N. N., et al., 2005, ApJ 622, 878

InfraRed Imaging Spectrograph (IRIS) for Thirty Meter Telescope

Ryuji SUZUKI

*National Astronomical Observatory of Japan,
2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan*

Abstract: IRIS is an infrared imager and spectrograph being developed as one of the three first generation instruments for the Thirty Meter Telescope. Although IRIS is a versatile instrument which is applicable to various astronomical interests from distant universe to Solar system objects, it is expected to provide unexpected discoveries and unprecedented quality data with its highest ever sensitivity and accuracy. This article introduces some exciting sciences that IRIS will explore and how such instrument has been (and will be) developed.