

MIMIZUKU Field Stacker で可能となるサイエンス

内山 允史 (東京大学大学院 天文学教育研究センター)

Abstract

TAO Project(The university of Tokyo Atacama Observatory Project) とは、標高 5640m の南米チリ共和国北部アタカマ砂漠チャナントール山頂に 6.5m 赤外望遠鏡を建設する計画である。これは世界最高高度の望遠鏡であり、TAO site は大気の影響が少なく乾燥していて、赤外線波長の透過率が高い。TAO にはこの優れた大気透過率を活かす 2 つの装置が搭載され、そのうちの 1 つが中間赤外分光撮像装置 MIMIZUKU(Mid-Infrared Multi-field Imager for gaZing at the UnKnown Universe) である。

MIMIZUKU は、波長 2-38 μm の広範囲を 1 台でカバーし、大口径 6.5m の望遠鏡によって 30 μm 帯で 1 秒角と言う世界最高の解像度を実現する。そして世界初の試みである、中間赤外域での視野内相対測光を可能とする「Field Stacker」を搭載する。

Field Stacker は、望遠鏡内の 2 つの視野を可動式のピックアップミラーで選択し、それを 1 つの検出器上に落とし込むことにより、離れた 2 つ (以上) の天体を同時に測光することができる機構である。中間赤外域の観測では可視や近赤外域でのそれとは違い、視野内に見える星がとても少なくなり、相対測光することが困難であった。そのためこれまでの観測では対象と参照天体を往復して観測を行っていたが、その精度は良くても 5%、悪ければ 10%ほどの測光誤差を含んでいた。しかし MIMIZUKU では Field Stacker によって観測対象と参照天体を同時観測することができ、相対測光の実現によって誤差 1%以内での観測を目指す。中間赤外域の時間変動の高精度モニタ観測はこれまで例がなく、TAO/MIMIZUKU with Field Stacker の実現によってこれまでに知られていた変光天体の詳細な解明と新たな変光現象の発見が進むことが期待される。

今回の発表では、Field Stacker 開発の進捗状況と、それによって可能となるサイエンスについて紹介する。

1 Introduction

地上からの中間赤外域の観測は、大気中の分子、特に水蒸気のラインの存在によって観測感度や精度が低下する。そのため地上観測を精度よく行うには水蒸気量が少ないサイトからの観測が必須となる。この点において大気の影響を全く受けない衛星観測は有利であるが、口径が大きな望遠鏡を打ち上げることは難しいため、空間分解能において地上望遠鏡が勝る。また、衛星観測は装置寿命が短く、望遠鏡占有時間も限られているため思うように観測が進められないため、長期間運用され望遠鏡時間も比較的フレキシブルである地上観測は、変光観測を進める上で重要なカギを握る。

これまで地上中間赤外線観測では、中間赤外域での星は相対的に暗くなるためカメラの限られた視野内に他の天体が入ることは極めてまれで、近赤外線が使われるような視野内相対測光が不可能であった。

そのためこれまでの観測では対象と参照天体を往復して観測を行っていたが、大気変動の影響を受け、5~10%ほどの測光誤差を含んでいた。この大きな測光誤差のため、変光現象のモニタ観測は難しかった。

2 TAO Project

TAO Project(The university of Tokyo Atacama Observatory Project) とは、東京大学理学系研究科天文教育研究センターが進めている、世界最高水準の口径 6.5m の赤外望遠鏡を標高 5640m の南米チリ共和国北部アタカマ砂漠チャナントール山頂に建設する計画である。

標高 5640m は世界の望遠鏡の中で最も高い場所であり、この TAO サイトは非常に乾燥した気候で、宇宙からの赤外線を吸収してしまう水蒸気が大気中に少なく、天体が放つ赤外線を観測するのに適してい

る。また晴天率が高く、南半球にあるので北半球からは見ることのできない天体を見ることができる利点もある。

3 MIMIZUKU

TAO サイトの優れた大気透過率を活かすものとして、TAO 望遠鏡の第一期装置には近赤外と中間赤外の 2 つ装置が予定されている。そのうちの中間赤外装置を担当するのが MIMIZUKU (Mid-Infrared Multi-mode Imager for gaZing at the UnKnown Universe) である。

MIMIZUKU は、1 台で 2-38 μm という広い波長範囲をカバーする装置で、TAO 望遠鏡の持つ中間赤外域での観測ポテンシャルを最大限活かした設計となっている。特に 26-38 μm は TAO/MIMIZUKU だけが地上観測できる新しい波長帯である。これにより、衛星諸計画よりも格段に高い空間分解能を達成することができ、惑星進化や物質の起源などに迫る観測が可能となる (図 1)。

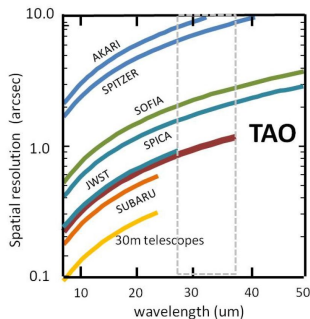


図 1: 中間赤外域における宇宙/地上望遠鏡の空間分解能の比較

そして MIMIZUKU には、世界初の試みである、中間赤外域での視野内相対測光を可能とする Field Stacker が搭載される。これによって赤外線の高精度モニタ観測することが可能となる。以下に MIMIZUKU 光学系の構造の概略を示す (図 2)。Field Stacker は光学系の中で一番前の常温部に置かれる。

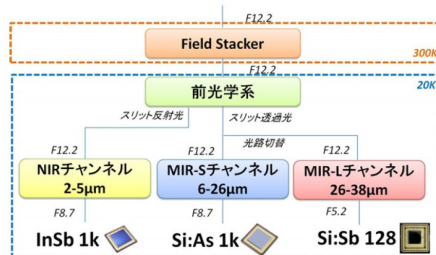


図 2: MIMIZUKU 光学系概略

4 Field Stacker (F/S)

MIMIZUKU の重要な機能の一つが、変光などのモニタ観測精度を向上させる二視野同時観測機能であり、これを実現するための機構が Field Stacker ユニット (以下 F/S) である。ユニットの概念図を以下の図 3 に示す。

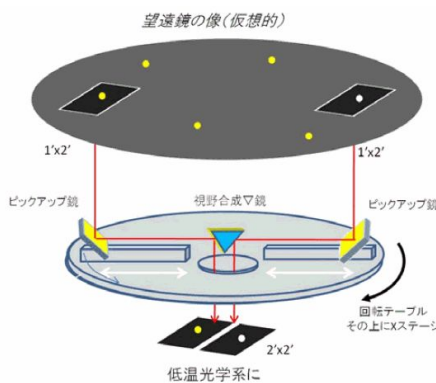


図 3: Field Stacker ユニット概念図

ユニットは 2 つのピックアップミラーと 1 つの視野合成▽鏡から成っている。ピックアップミラーは 1 軸ステージの上に乗っており、さらにそれが回転式のテーブルの上に搭載されている。これによって 2 つの離れた視野を視野合成▽鏡に集め、さらに低温光学系へと導く。望遠鏡焦点を▽鏡下端にあわせることで、視野のつなぎ目をできるだけ小さくしている。またピックアップミラーはそれ自身の傾きを変えることができ、光軸が常に望遠鏡副鏡中心を見るように制御される。これらユニットは MIMIZUKU の真空チャンバー上面に設置されている。ほりりよけカバーを外した状態の内部写真を図 4 に示す。

なお、視野合成▽鏡は電動で光路から退避させるこ

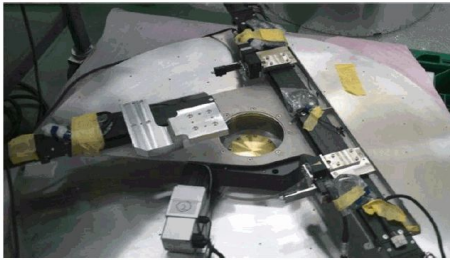


図 4: Field Stacker ユニット写真

とも可能である。その場合は Field Stacker は用いられず、通常のカメラとして機能させることができる。

4.1 F/S の開発状況

現在、図 4 のように F/S 本体の骨格は完成している。しかし、肝心のピックアップミラーや 1 軸ステージ、回転式テーブル等の可動部の開発が残っており、その開発を担当することとなった。F/S に求められる性能である測光誤差 1% 以内を達成するため、これらの機構の許容誤差について考察していく。今回の発表ではピックアップミラーについて取り上げる。

4.2 ピックアップミラーに求められる許容誤差

F/S ユニットの一部分 (図 3 参照) であるピックアップミラーの制御について考察する。ピックアップミラーは傾きをうまく制御し常に望遠鏡副鏡中心を向くようにするのが理想である。しかし、制御がきちんとできていないと見る方向が中心から外れ、光を受ける範囲 (S とする) は副鏡からずれた場所を見ることとなり、得られる光量が減ってしまう (図 5, 図 6)。この光量の減少によって明るさが変わり、測光誤差に影響を与える。

そこで S を小さくし、図 7 のように副鏡より狭い範囲を見ることを考える。F/S のピックアップミラーの制御誤差が発生して S がずれた際に、例えば図 6 のように S が副鏡の大きさと同じだった場合は、わずかなずれで副鏡外部が S 内に入り、明るさが暗くなって測光誤差に影響を与える。しかし図 7 のように S を狭くすることで、ある程度のずれでも S 全体

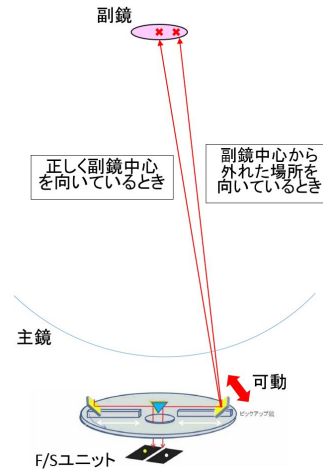


図 5: ピックアップミラーの制御

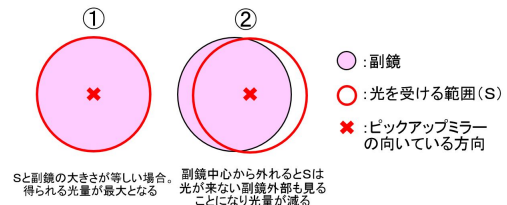


図 6: 副鏡と光を受ける範囲 1

は副鏡内に収まり、測光誤差を生じにくくすることができる。

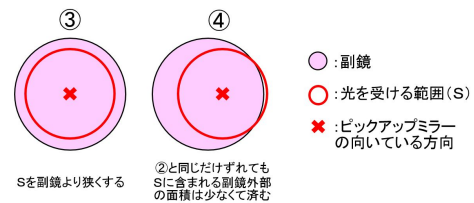


図 7: 副鏡と光を受ける範囲 2

しかし、S を狭くすると視野全体で得られる光量が減り、せっかく望遠鏡で集めた光の一部を無駄にすることになる。そこでこの減光量の大きさを気にしつつ S を狭くしていき、測光誤差を 1% 以内に抑えられる条件を計算によって求めることを考えた。

以下の図 8 が、ピックアップミラーの制御エラーに対する、S 内の光量の減少を表したグラフである。横軸はピックアップミラーの角度 (制御エラー) を表しており、正しく副鏡中心方向を見ていれば 0 度で、値が大きくなるにつれてエラーが増し、副鏡中

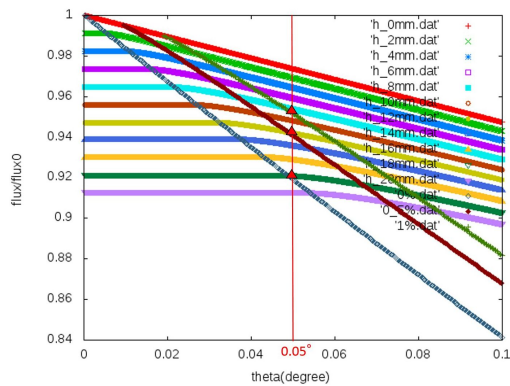


図 8: ピックアップミラーの制御エラーと得られる光量の変化

心方向から離れた場所を向いていることに対応する。縦軸は得られる光量を、受ける光が最大となる場合の値 (S が副鏡の大きさと等しく副鏡中心を見ているときの光量) で規格化した値である。

縦方向に 10 本積み重なっている線は、下に行くにつれて S の半径を 2mm ずつ小さくして計算した場合の S 内に入る光量の変化を表している。一番上の赤い線は S が副鏡の大きさと等しい場合 (図 6 の場合) の光量の変化を表している。下に行くほど横軸に平行な部分が長くなっているのは、前述の S を狭くすることである程度ずれても S 全体は副鏡内に収まり測光誤差を生じない 範囲 (図 7 参照) が増しているためである。

3 本の斜めの線はそれぞれの S の大きさと計算した場合に対しての、測光誤差が 0%, 0.5%, 1% となる角度をつなげた線である。

この図 8 からピックアップミラーの制御エラーと測光誤差、光量の減少の兼ね合いを考える。ここで、ピックアップミラーの位置決め精度は、用いるパーツのメーカーの公称値が ± 0.05 度以内となっている。この値が S の振幅 (制御エラー) の最大値となるので、このときの測光誤差と光量の減少値、S の狭め幅をグラフより読み取る。読み取った値は以下の表 1 にまとめた。

この表から我々の目指す 1% 以内の測光誤差での観測に必要な条件は、S を副鏡上で半径約 8mm 小さくすることで達成できる。このときの光量の減少は 5% ほどで済み、望遠鏡で得られた光をほとんどロス

表 1: 制御エラーが 0.05 度のときの各測光誤差に対する光量の減少と S の狭め幅

	光量の減少	S の狭め幅
測光誤差 0%	8%	18mm
測光誤差 0.5%	6%	12mm
測光誤差 1%	5%	8mm

することなく観測できることが分かった。さらに条件を厳しくして測光誤差 0% の場合を見ても、光量の減少は 8% で済む。この結果は、0.05 度の制御エラーならば、光量の減少よりも測光誤差を小さくすることを優先すべきであることを示している。

5 今後の展望

今回の計算では、ピックアップミラーの位置決め精度が ± 0.05 度としたが、この値は販売メーカーの公称値であり、実際に動かしてみた場合にこの値と異なる精度になることが考えられる。今後は、実際の天体導入時に用いる動かし方を想定したプログラムを作成し、そのプログラムを用いた実験によって正しい位置決め精度を測定する。実験は、離れた場所からピックアップミラーにレーザーを当て、反射した光がどれほど細かく動くのかを測って精度を求める方法を考えている。

また、実際の副鏡には製造過程でどうしても生じてしまう精度の悪い 'フチ' の部分 (厚さ 10mm) ができてしまう。フチは通常の研磨面より放射率 ϵ が大きく、この部分が S 内に入ると測光誤差が生じて、MIMIZUKU の測光精度が悪くなる。このフチ構造を考慮した thermal な放射量の計算をし、再度 S の狭め量を算出する必要がある。

さらに、ピックアップミラー以外にも F/S ユニットには 1 軸ステージや回転式テーブル等の可動機構が存在し、それらから生じうるエラーがどれほど測光誤差に響くのかについても検討していく。

6 参考文献