

# X10b (改訂版): 30m望遠鏡による銀河形成の研究のための超広視野AO多天体分光器の提案

秋山 正幸(東北大天文), 高見 英樹(国立天文台ハワイ), 菅井 肇(京都大),  
ほか多天体赤外線面分光器検討グループ同

すばる望遠鏡やハッブル宇宙望遠鏡などによる観測は、宇宙誕生から30億年から50億年の間に銀河は大きく進化する成長期にあったこと、宇宙誕生から7億年までの間に銀河の誕生期があったことを示唆する。現在の銀河の成り立ちを知る上で成長期にある銀河においてどのような物理過程で進化が引き起こされているか、誕生期においてはどのような物理過程が支配的になっているか、を明らかにすることは鍵になっている。

これらを明らかにするためにはすばる望遠鏡の性能を大幅に凌駕する望遠鏡が必要であり、そのような次世代の光赤外線地上望遠鏡として口径20-40mクラスの望遠鏡計画が検討されている。このような計画の1つにアメリカ、カナダを中心としてスタートした30m望遠鏡プロジェクトがある、われわれは銀河形成期を明らかにするために、この望遠鏡に取り付ける観測装置として、1)30mの口径が持つ回折限界に近い空間分解能で、2)視野直径5分角程度に存在する、3)多数(20個程度)の天体の同時面分光観測ができる、装置を提案している。このような装置が実現すれば、30mの集光力と、「すばる」望遠鏡を格段に上回る空間分解能(Kバンドで0.02秒角、遠方銀河の200pcに相等する)による背景光の低減で、すばる望遠鏡の200倍の効率が達成される。さらに多数の天体を同時観測することによって、理想的には4000倍の観測効率を実現することができる。

## 提案する仕様とJWSTとの比較

30m望遠鏡(TMT)に取り付ける装置として、我々のグループでは多天体補償光学系(下を参照)と複数の面分光ユニットを組み合わせた多天体赤外線分光器の検討を進めている。現在考えている仕様は以下のとおりである。

- 1) 20天体程度を同時に分光するように、20個の面分光器を用意する。各面分光器は独立なユニットとして独立に稼働なものとする。
  - 2) 面分光の各素子は0.05"サンプリング。多天体補償光学系による補償によって、点源の場合、50%のエネルギーが1素子に落ちるPSFを目指す。
  - 3) 各面分光素子は20x20素子で1"程度の視野をカバーすることを目指す。
  - 4) 多天体補償光学系で補償される視野サイズは直径5分角程度を目指す。望遠鏡の最大視野サイズは直径15分角あるが補償光学系の性能を考えると5分角程度が限界である。
  - 5) 近赤外線波長域をR=1,000-3,000程度でカバーする。
- 2)に述べたPSFが実現できた場合、R=1000, SN=10, 1時間積分, 装置の効率30%で点源の検出限界を見積もると JAB=25.6mag(0.2uJy), HAB=25.9mag(0.2uJy), KAB=25.9mag(0.2uJy) となる。この検出限界はJWSTで同等の分散の観測を行った場合の検出限界 ~1uJy に比べて1桁深い。

## 30m望遠鏡時代の補償光学システムの困難

上で述べたような検出限界を達成するには補償光学による補正がカギとなるが、技術的には困難な点も多い。図1の右には補償光学系(的可変形鏡)の素子数と補償後の波面誤差の関係を実験データを用いて計算した結果を示す。横軸は各素子のカバーする開口面積を取って、口径を固定すると補償光学系の素子数に対応する。上の軸には30mの口径の場合の素子数を示している。縦軸はこの素子数の可変形鏡を用いて補償した後の波面誤差の量をとっている。これは波長域を仮定するとストレル比に対応する。右の軸には対応するKバンドでのストレル比を示す。波面誤差の大きさは開口面積あたりの素子数で決まり、8mで実現しているストレル比(すばる新AO188でKバンド0.6)を実現するためには30m望遠鏡の場合には単純に14倍の素子数が必要になることがわかる。

図1左にはさまざまなストレル比のPSFのエンサークルエネルギーを回折限界で規格化したアパーチャー半径の関数として書いている。上の太線は回折限界象の場合のエンサークルエネルギーでその下の実線は上からストレル比が0.91,0.85,0.78,0.65,0.39,0.22,0.0002のPSFを用いて計算したエンサークルエネルギーを示す。装置の仕様として提案している0.05"直径に50%エネルギーが落ちるという条件(黒四角で示す)を実現するためにはストレル比で0.5程度の補償を実現しなければならない。左図と合わせて考えると3000素子程度の補償光学システムが必要になることがわかる。TMTで「そこそこ」の補償を実現するためには8m望遠鏡でExtreme-AOとして想定される程度の素子数が必要になる。

また口径が大きくなることにより、レーザーガイド星でサンプルされる体積(図2のオレンジ色の三角錐)とターゲットの波面が通過する体積(黄色の円筒)の違いによってレーザーガイド星ではサンプル出来ない体積(コーン効果)の割合が大きくなる影響も無視できない。ターゲット星方向のレーザーガイド星を使って求まる波面を用いてターゲットの波面を補正した場合、口径8mの場合には波面残差がRMS=170(nm)であるのに対して、口径30mの場合にはRMS=400(nm)に達する。このことは口径30mの場合には一つのレーザーガイド星を用いた補償光学システムでは十分な補正ができないことを意味している。

## 次世代補償光学システムとその実現に向けた要素技術の開発

このような問題点を解決するために、30m望遠鏡では多数のレーザーガイド星をターゲットの方向に打ち上げ(図3のオレンジ色に加えて3個の緑色の三角錐)、ターゲットの波面が通過する体積をサンプルし、測定されたレーザーガイド星の波面を用いて、ターゲット方向の大気乱流の3次元構造をマッピングする方法が提案されている(トモグラフィーによる波面推定、e.g., Tallon and Foy 1990, A&A, 235, 549)。多数の天体を観測する場合には、測定された乱流の3次元構造をそれぞれのターゲットの方向を考慮して積分し波面補正を行う多天体補償光学系(Multi-Object AO:MOAO)の概念が提案されている。我々はTMTで広視野の高感度の赤外線多天体分光を行うために、多天体補償光学系を実現することを目指している。この補償光学系を実現するための要素技術の確立のために、

- 1) トモグラフィーによる波面推定のシミュレーションと
- 2) MEMS技術による大ストローク多素子可変形鏡の開発、を進めようとしている。

トモグラフィーによる波面推定のシミュレーションは大気乱流構造とそこを通過する波面の乱れを扱うC++ライブラリ(Arroyo: Britton et al. 2004, SPIE, 5497, 290)を用いて行っている。具体的にはターゲットから30"離れた4個のガイド星の波面(図2にGS1 wavefront phase, GS2 wavefront phaseとして示す)を用いてターゲット方向の波面(Target WFP)を推定するシミュレーションを進めている。図2の下左側は4個のガイド星の波面を単純に平均してターゲット方向の波面を推定した場合を示している。ターゲット方向の波面との差は大きい。右側の上下2枚のパネルはトモグラフィーによる推定を行い、ターゲット方向に再構築した結果を示している。まだ十分な精度で推定できておらず、アルゴリズムの確認を進めている段階である。

多天体を観測するために3000素子程度の可変形鏡を積んだ多数の面分光ユニットを用意することを想定している。ユニット化するためには多素子かつ小型の可変形鏡が必要であり、MEMS技術で作成される可変形鏡が有力候補になっている。ただ、10ミクロン程度の変移量が必要であるのに対して、現状では多素子数の可変形鏡では3ミクロン程度の変移量しか実現していない。我々のグループでは大ストロークの多素子可変形鏡の実現のために、東北大学工学研究科の光MEMSグループと連携してマイクロマシニングによる可変形鏡の開発を進めることを検討している。今のところ、補償光学系のシミュレーション結果をまとめて必要となる仕様の検討を進めているところである。図3には補償光学系のシミュレーション結果から求めた64x64素子の可変形鏡を用いて口径30mでの補償光学を行った場合に必要になる可変形鏡の変移量(左)、可変形鏡の隣り合う素子同士の変移量の差(中)、可変形鏡の変形速度(右)を書いている。変移量で+10ミクロン程度必要であり、隣り合う素子同士では3ミクロン程度の差が作れば良い計算になっている。このような計算結果に基づいて仕様を確定し、可変形鏡の開発を始める予定である。

