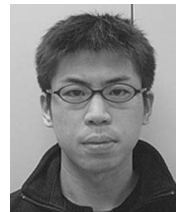


すばる補償光学による遠方銀河の高解像度深撮像

美濃和陽典

〈国立天文台ハワイ観測所 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: minoways@optik.mtk.nao.ac.jp



宇宙の歴史の中で、銀河がいつ形成され、どのように成長して現在ある姿になったのかを調べるには、過去の情報を残している遠方銀河を観測することが重要です。遠方銀河を探るには、天の川銀河の極方向にあるブランクフィールドの、近赤外線波長域での深撮像観測が非常に有力です。筆者らは、この波長域での感度の限界を引き上げるために、地球大気の揺らぎを取り除く補償光学という技術を用いて、すばる深撮像領域の、 K' バンド（中心波長 2.12 ミクロン）における撮像観測を行い、 K' バンドでいままでで最も深く、解像度の高いデータを得ました。補償光学による高解像度かつ高感度の撮像により、 K' バンドで 25 等級までの銀河計数、遠方銀河のサイズ-光度関係の詳細な解析が可能になりました。その結果、赤方偏移 3 程度から現在までの間では、銀河の種族に大きな違いはないことがわかってきました。

1. はじめに

銀河の形成、およびその進化の過程は、天文学において最も興味深い問題の一つです。現在の宇宙での銀河は、さまざまな姿、形をしていて、その色や明るさ、質量などはいろいろですが、おおむね楕円銀河、渦巻銀河、不規則銀河からなる「ハッブル系列」に沿っています。宇宙初期の最初の銀河は、宇宙に漂うガスが冷えて集まり、星が生まれることでできたと考えられています。これらの原始銀河がどのような進化の過程を経て現在ある楕円銀河や渦巻銀河のような立派な銀河の姿になったのかは、さまざまな理論モデルが提唱されていますが、観測的にはまだ解明されていません。現在考えられている銀河進化の理論モデルでは、おおまかには宇宙初期の小さなスケールの原始銀河が階層的合体を経て現在の銀河へと進化した説と、単一の重力収縮により進化した説があり

ます。このような銀河進化過程のモデルを峻別するには、形成段階にある過去の銀河の明るさ、個数密度、形態、サイズ、色、質量、内部運動といったさまざまな物理量を観測により調べる必要があります。

天文学では、このような銀河の歴史を、非常に遠方にある銀河を観測することで明らかにすることができます。なぜなら、光は有限の速さで宇宙空間を伝わってくるため、非常に遠方の銀河からの光は、その銀河の過去の情報をもっているからです。そのため、いろいろな距離（赤方偏移）にある銀河を観測することで、各時代における銀河の物理状態を調べることができます。

2. 遠方銀河の深撮像観測

遠方銀河を探る手法としては、銀河系円盤に対して垂直な銀極方向での深い撮像観測があります。この手法では、銀河系内の星や星間塵に邪魔

されることなく遠くの宇宙を見通せます。ハッブル宇宙望遠鏡では、約0.9ミクロンまでの可視波長域において非常に深い撮像（AB等級で約29等）が行われ、これまでに10,000個以上の銀河が検出されました¹⁾。この観測により、赤方偏移1程度（約80億年前）までの銀河の状態について数多くの手がかりが得られました。しかし、可視光の観測での遠方宇宙の探査には限界があります。遠方にある銀河は、宇宙の膨張に伴いわれわれから遠ざかっているため、そこから出される光はドップラー効果により、実際の波長よりも長く観測されます。例えば、赤方偏移1以上の遠方宇宙からの光を可視光で見ても、実際にはもとの紫外線が長くなったものなので、銀河が出した紫外線を見ていることとなります。銀河からの紫外線は、主に新しい星がたくさん形成される領域から出ています。この光を観測すると、このような星形成領域が目立ってしまい、銀河の個数、形態といった物理情報を正しく得ることができません。銀河の骨格をなす古い星からの光は主に波長0.4ミクロン以上の可視光で出されています。赤方偏移1以上の遠方銀河からの可視光は、地球では波長1ミクロン以上の赤外線として観測されます。そのため、遠方宇宙の銀河探査にはできるだけ長波長の赤外線域での、高感度の撮像観測が重要となります。赤外線での遠方銀河の深撮像観測は、高感度の観測が可能な波長2.5ミクロン以下の近赤外線波長域で主に行われてきました。高感度の深撮像ができる最も長い波長帯であるKバンド（中心波長2.2ミクロン）では、これまで主にアメリカのケック望遠鏡²⁾⁴⁾、ヨーロッパのVLT (Very Large Telescope)⁵⁾、日本のすばる望遠鏡⁶⁾といった地上の大望遠鏡を用いて数十時間に及ぶ長時間の撮像観測が行われてきました。しかし、地上からの観測では、地球大気の揺らぎの影響を受けるため、遠方銀河を検出する感度（限界等級）はすでに限界に近づいてきています。また、遠方銀河は見かけの明るさが暗く、見かけのサイズも

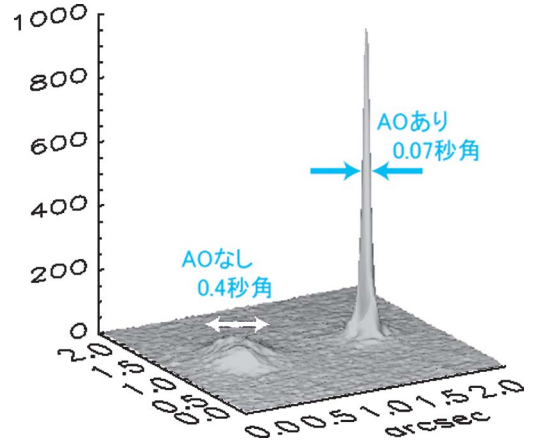


図1 近赤外Kバンド（中心波長2.2ミクロン）で補償光学を用いた場合と用いない場合での星像の違い。補償光学を用いることで、望遠鏡の回折限界に迫る空間分解能を得ることができ、星像のピーク値が上昇することで暗い天体の検出感度も向上します。

小さくなるため、空間解像度がシーイングで制限される地上からの観測では、遠方銀河のサイズ、形態といった内部構造を調べるのは非常に困難です。

そこで、筆者らは、地上望遠鏡による観測の限界を引き上げるために、地球大気による光の波面の揺らぎを補正する「補償光学 (Adaptive Optics; AO)」という技術に着目しました。補償光学では、地球大気により乱された光の波面を「波面センサー」を使って測定し、制御システムを通して「可変形鏡」に電圧を与えることで鏡の形を変え、波面の乱れを補正します。補償光学を用いることで、観測される星像はシャープになるため、空間解像度が良くなり、天体の細かい構造を見分けることができるようになります。また、星像のピーク値が高くなるため、暗い天体の検出感度を大幅に向上させることができます（図1）。補償光学を用いた観測には、乱れた波面を測るために明るい参照星が必要となります。そのため、補償光学装置は、明るい星が数多く存在する銀河系内の天体に対して主に用いられ、遠方銀河の観測にはあま

り用いられることはありませんでした。筆者らは、銀河系の円盤と垂直な方向で、補償光学で波面が測定できる明るい星がある領域を選び、この装置による遠方宇宙の深撮像観測という手法を世界で初めて試みました。

3. すばる補償光学による遠方銀河の観測

すばる望遠鏡（口径 8.2 m）の補償光学は、近赤外域（特に K バンド）で回折限界の空間分解能（約 0.07 秒角）を得ることを目的として開発されたシステムで、望遠鏡の開口を 36 分割して波面の乱れを測定する波面曲率センサーと、同じ素子数で波面を補正するバイモルフ可変形鏡からなっています⁷⁾。筆者らは、カセグレン焦点に取り付けられたすばる補償光学 (AO) と近赤外線撮像分光装置 (IRCS) を用いて、近赤外線波長域で遠方銀河の深撮像観測を行いました。

観測した領域は、銀河系の北側で円盤に対して垂直な方向にある「すばるディープフィールド」の一部の約 1 平方分角の領域 (Subaru Super Deep Field; SSDF) です。この領域を含むすばるディープフィールドでは、すばる望遠鏡の観測所プロジェクトとして可視光から近赤外線までの多波長での重点的な観測が行われています⁸⁾。

今回は、感度と空間分解能の両面で補償光学の恩恵が最も大きい K' バンド（中心波長 2.12 ミクロン）での観測を集中して行い、約 27 時間の長時間積分により、この領域のさらに深く、高い解像度での撮像データを得ることができました。今回達成した限界等級は、 K' バンドで 24.7 等級（ベガ等級, 5σ ）で、これまでアメリカのケック望遠鏡や、ヨーロッパの VLT といった大型望遠鏡で行われている、同様な K バンドの撮像観測と比べて 2 倍以上深く、これまでで最も深い撮像データです。表紙の画像は、今回取得した SSDF の K' バンド画像です。約 1 平方分角の視野内に、約 236 個の銀河を検出しました (5σ 検出限界等級よりも

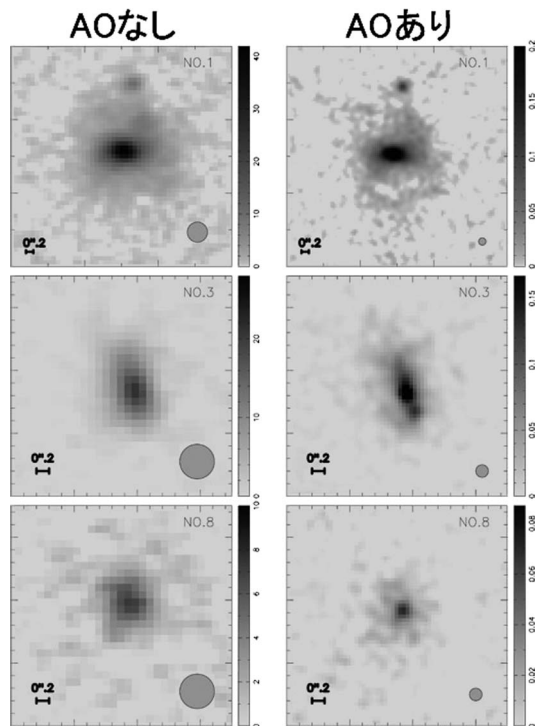


図2 Subaru Super Deep Field (SSDF) での銀河と、補償光学を使わずに K' バンドで観測した同じ銀河⁹⁾の見え方の違い。各画像の左下には、各画像におけるスケールを、右下には点源の半値幅を表しています。

明るいものは 145 個)。空間解像度については、星像の半値幅で約 0.18 秒角を達成し、ハッブル宇宙望遠鏡の近赤外カメラ (NICMOS) をしのぐ高解像度のデータを得ることができました。図2では、この観測で受かった個々の銀河のモニター画像を表しています。比較のために、補償光学を用いていない観測で得られた同じ銀河の画像⁹⁾を横に並べていますが、補償光学を用いた今回の観測では解像度が大幅に改善されていることが見て取れます。銀河のサイズを観測により求めようとする場合、赤方偏移が大きくなるにつれて見かけのサイズは小さくなるため、高い空間解像度が必要となります。また、銀河の表面輝度は赤方偏移が大きくなるにつれて暗くなるため、外縁部までを検出するためには非常に高い感度も必要

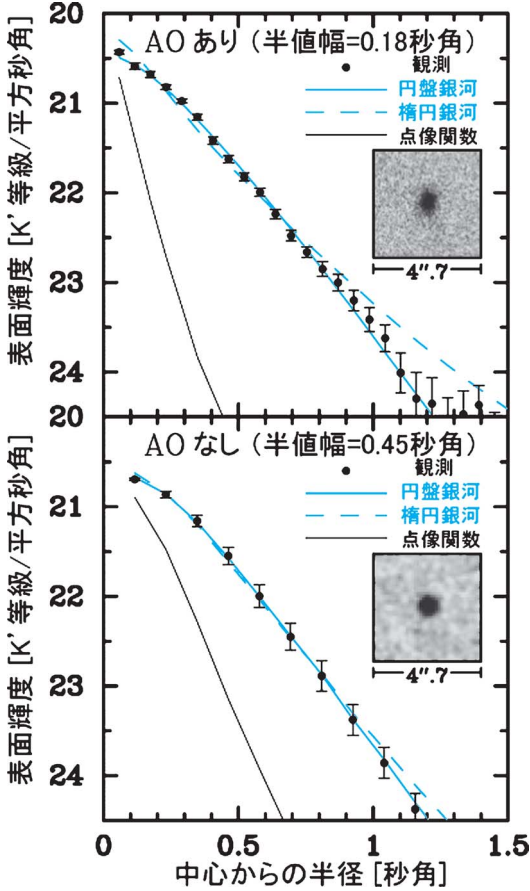


図3 Subaru Super Deep Field にある赤方偏移 1.46 の銀河 ($m_{K'} \sim 21.3$ 等級) の光度プロファイル (上図). 比較のために, 補償光学を使わないで取得した同じ銀河の光度プロファイル (下図) も表しています. 銀河のプロファイルは, 楕円銀河 (青破線), 円盤銀河 (青実線) のモデルプロファイルでフィットしました. 黒線は各観測での点像関数を表しています.

となります. 今回取得したデータは, 補償光学により, 高解像度, 高感度の両方を達成しており, 遠方銀河のサイズの解析に非常に適しているといえます. 図3は, 補償光学を用いた今回の撮像 (上) と, 用いない撮像 (下)⁶⁾ により得られた赤方偏移 1.46 の同じ銀河の光度プロファイルの比較をしています. 各データの銀河のプロファイル

に対し, それぞれのデータの点像関数を用いてたまたみ込みをした楕円銀河 ($r^{1/4}$ 則) と円盤銀河 (指数関数則) のモデルプロファイルのフィットを行いました. 補償光学を用いたデータでは, この銀河の形態は円盤銀河であるとはっきり分類できませんが, 補償光学を用いていないデータでは, 二つの銀河形態のモデルをはっきり区別できません.

以下では, 今回取得した高解像度, 高感度の近赤外線撮像データを用いて行った, 銀河計数, 遠方銀河のサイズ-光度関係の解析詳細と結果を紹介します.

4. 銀河計数

筆者らは, K' バンドの深撮像データから検出された銀河の測光データをもとに, これまでの観測より 0.5 等級以上深い $m_{K'} < 25$ までの銀河計数を見積もりました (図4). 銀河計数の見積もりは, 限界等級に近い最暗部では, 銀河の検出率が下がり信頼性が低くなりますが, 今回の観測データでは, シミュレーションの結果, $m_{K'} < 25$ の最暗部であっても点源検出の完全性が 50% 以上あることがわかりました. そのため, この銀河計数の見積もりは, 最も深く信頼性の高いものと言えます. 近傍銀河の光度関数から, 現在の銀河の典型的な明るさは, $M_V^* \sim -21$ 等級程度と見積もられています⁹⁾. この明るさの銀河が赤方偏移 3 (約 100 億年前) にある場合, K バンドの見かけの明るさで $m_K \sim 22.7$ になります. そのため, 今回見積もった $22 < m_{K'} < 25$ の範囲の銀河計数では, 赤方偏移 3 以上の銀河からの寄与が大きいと考えられます.

この銀河計数から傾き ($\alpha = d(\log N)/dm$) を求めた結果, $22 < m_{K'} < 25$ の範囲での傾きは $\alpha \sim 0.15$ であり, $m_{K'} < 22$ での傾き ($\alpha \sim 0.28$)⁶⁾ と比べて若干緩やかになることがわかりました. これまで, いくつかの銀河進化モデルでは, 高赤方偏移での銀河の個数密度の増加¹⁰⁾や, 高赤方偏移で形成された青い矮小銀河の存在¹¹⁾が示唆されてお

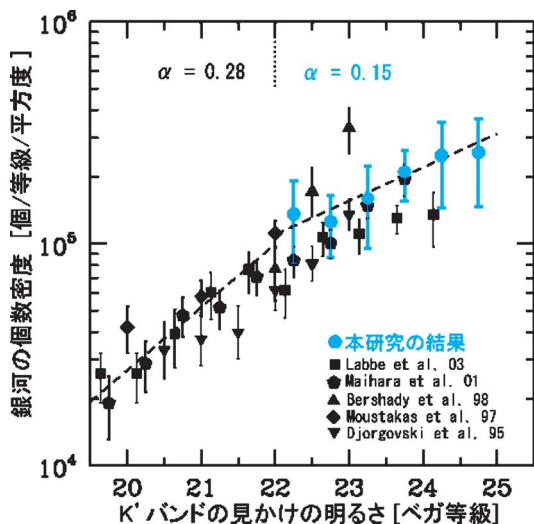


図4 K'バンドの深撮像から見積もった $m_{K'} < 25$ までの銀河計数. 比較のために, 過去の文献 2-6 にある $m_{K'} < 24.5$ までの銀河計数の結果を同時にプロットしています.

り, $m_{K'} > 23$ で銀河計数の傾きが急になることが予測されていました. しかし, 筆者らの見積もった銀河計数では, このような傾向は見られず, 赤方偏移 3 程度の時代においても, 現在の銀河とはそれほど変わらない種族の銀河が主であると考えられます.

5. 銀河のサイズ-光度関係

近傍銀河では, 銀河のサイズと光度の間には強い相関があることが知られています. 現在の銀河が, 衝突合体により階層的につくられてきたとすると, 銀河のサイズは赤方偏移が大きくなるほど小さいと予測されます¹²⁾. そのため, 銀河のサイズ-光度関係の赤方偏移に伴う進化を追うことで, 銀河の進化過程に制約をつけることができます.

筆者らは, 銀河のサイズ-光度関係を, K'バンドの見かけのサイズと見かけの明るさの関係を使って表しました. 図5では, 銀河の見かけのサイズを等輝度線 (23.6 等級/平方秒角) 内の面積で表し, その面積と K'バンドの見かけの明るさの

関係を示しています. 従来の補償光学を使わない場合, 点源の大きさは暗い銀河のサイズと比べて大きくなってしまったため, 銀河を空間分解できていなく, 暗い遠方銀河のサイズの情報を正しく得ることができませんでした. それに対し, 今回のデータでは, 点源のサイズは暗い銀河のサイズと比べて小さく, 銀河を空間分解してサイズの情報を得ることができました.

この見かけのサイズと明るさの関係を, 近傍銀河のサイズ-光度関係を, 銀河の形態タイプ (gE, dE, Sab, Sbc, Scd, Sdm) ごとに光度進化させたモデル^{13), 14)}と比較しました (図5a). このモデルでは, ある見かけの明るさをもつ銀河の光度は赤方偏移により変わるため, サイズも赤方偏移ごとに変わりますが, すべての赤方偏移での銀河のサイズを, 光度関数から予測される個数密度により重みを付けて平均を取り, 見かけのサイズを計算しています. このモデルと観測結果を比較した結果, すべての形態タイプの平均値が観測とよく一致することがわかりました. 次に, 銀河のサイズ進化を検証するために, 光度だけではなく, サイズも赤方偏移に伴い進化させるモデルとの比較をしました (図5b). このモデルでは, ある赤方偏移 z にある銀河のサイズは, 近傍銀河のサイズの $(1+z)^\zeta$ 倍 ($\zeta = -1, -2, 0, 1, 2$) になると仮定しています. その結果, $\zeta = 0$ のサイズ進化がない場合が観測結果と最も合うことがわかりました¹⁵⁾.

さらに, K'バンドの見かけの明るさで 23 等級までの 43 個の銀河に対し, 図3のような光度プロファイルのフィッティングを, Sérsic モデル ($I(r) \propto \exp\{- (r/r_e)^{1/m}\}$) を使って行い, 有効半径 (r_e ; 銀河の全フラックスの半分を含む半径) を求めました. また, この観測で得た K'バンドの測光データと, すばるディープフィールドの観測で得られた多色測光データ⁸⁾を用いて SED のフィッティングを行い, それぞれの銀河の赤方偏移を求め, 絶対等級, 実スケールでのサイズを見積もりました. この方法では, 銀河の赤方偏移, 絶対等

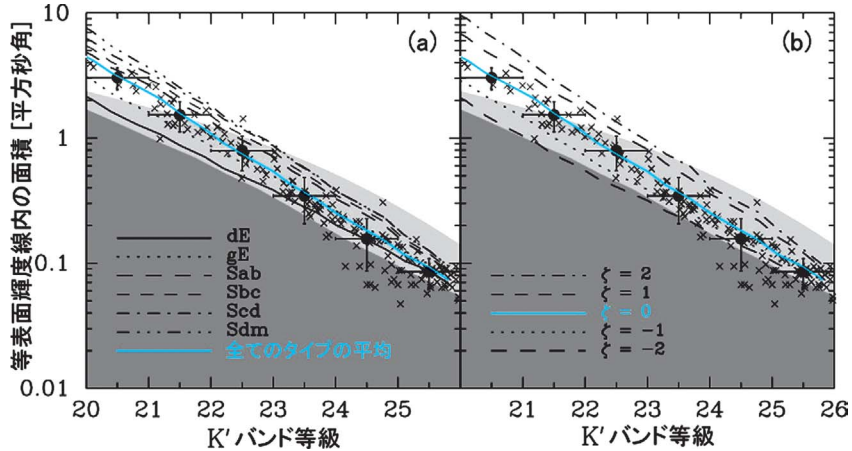


図5 銀河の見かけのサイズと明るさの関係。見かけのサイズは23.6等/平方秒角の等輝度線で囲まれる面積、見かけの明るさは K' バンドの等級で表しています。×印が観測結果を表しており、黒丸は横軸の誤差棒で表した等級範囲内での平均の面積を表しています。縦軸の誤差棒は観測点の分散 (1σ) を表しています。濃いグレーの領域の上端の境界線は補償光学を使った今回の観測における点源のサイズに対応し、それ以下の領域のサイズは空間分解できません。薄いグレーの領域の上端は、補償光学を使わない通常の観測の場合の点源のサイズに対応していますが、22等級より暗い銀河では点源のサイズのほうが大きくなり、空間分解できないことがわかります。(a) では理論モデルで予測される銀河の形態タイプごとの見かけのサイズと明るさの関係を、(b) では (a) のモデルの平均値に対して、赤方偏移に伴うサイズ進化 ($r(z) \propto (1+z)^{\alpha}$) を許した場合の関係を表しています。

級、サイズをフィッティングにより求めているため、見かけの明るさ、サイズと比べて観測値の不定性は大きくなりますが、モデルを介することなく、より直接的にサイズ-光度関係の赤方偏移に伴う進化を議論できます。その結果、Sérsicモデルの n が2以下のディスク成分の強い銀河（晩期型銀河）、 n が2以上のバルジ成分が強い銀河（早期型銀河）のどちらのタイプの銀河でも、 $z < 3$ において、サイズ-光度関係の進化は銀河の固有サイズを変えずに、光度進化だけで説明できることがわかりました¹⁶⁾。この結果は、見かけのサイズと明るさの関係から得られた結果を支持しています。以上のことから、 $z < 3$ において、銀河は赤方偏移に伴って、固有サイズに大きな進化はなく、光度のみ進化してきたことが示唆されます。

6. まとめと今後の展望

筆者らは、補償光学による深撮像観測という新しい手法に取り組み、近赤外線 K' バンドにおいてこれまで最も深い撮像感度を、ハッブル宇宙望遠鏡を超える高い空間分解能で達成しました。 K' バンドで25等級までの銀河計数の解析では、遠方銀河からの寄与が大きいと思われる最暗部の傾きに大きな増加が見られず、むしろ小さくなっていることがわかりました。サイズ-光度関係の解析から、赤方偏移が3程度での関係は、現在と比べて、サイズ進化はなく、光度進化のみで説明できることがわかりました。これらの結果から、深撮像観測で検出されるような典型的な銀河では、赤方偏移3程度から現在までの間では、銀河の種族に大きな違いがないことがわかりました。

ただし、筆者らが今回行った遠方銀河の深撮像

観測は、 K' バンドだけで、視野も1平方分角に限られており、サンプル数の面ではまだまだ不十分です。今後、さらに視野を広げサンプル数を増やすことが重要になります。しかし、これまでの補償光学では、地球大気により揺らいだ波面を測定するために、観測天体の近く(半径数十秒角以内)に明るい参照星が必要であるため、観測できる銀河の数も限られており、これ以上視野を広げることや、遠方の星形成銀河などの任意のユニークなターゲットを観測することは困難でした。

この制限を取り除くために、すばる望遠鏡では高度90 kmのナトリウム層に地上からレーザーを打つことで、人工的な星をつくり、これを参照星として波面測定を行うというレーザーガイド補償光学系の開発が進められています。これにより、観測できる視野が大幅に広がります。また、波面揺らぎを補正する性能をさらに向上させるために、新しい188素子のAOシステムの開発も同時に進められており、これまで K バンド以外では困難であった高解像度かつ高感度の観測が、より短い H バンド(1.65ミクロン)、 J バンド(1.2ミクロン)においても可能となります。これにより、近赤外線すべてのバンドで、星像の半値幅が0.1秒角以下というハッブル宇宙望遠鏡を凌駕する空間分解能が得られると期待できます。この新しい補償光学は、2006年10月の試験観測で、ファーストライトに成功し、 J, H, K バンドでこれまでの補償光学を大幅に上回る性能が得られることが確認できました。現在は、来年度からの本格的な観測に備え、さらなる開発を進めていま

す。この新しいレーザーガイド補償光学により、広視野、多波長のデータを取得できるようになります。これにより、本研究で議論した銀河のサイズについてだけでなく、形態、色分布、速度分散といった「内部構造を詳細に観測」することができると期待しています。

謝 辞

この研究は、2002年にすばる望遠鏡の初めてのインテンシブ観測として採用されたものでした。悪天候やさまざまな失敗を乗り越え、2005年によりやく初期成果の論文が出版されました。本稿は、この観測の初期成果の論文¹⁵⁾、および筆者の博士論文¹⁶⁾の一部をまとめたものです。

本研究は多くの共同研究者の協力のもとに進められてきました。本観測プロポーザルのPIである東京大学の吉井 譲氏には、本研究を始める機会を与えていただき、論文執筆にあたっては多くの有益なコメントをいただきました。筆者の大学院の指導教員であった東京大学の小林尚人氏には、観測、解析、論文執筆のすべてにおいて一貫してサポートをしていただきました。京都大学の戸谷友則氏には、理論モデルを提供していただき、結果の解釈にあたって多くのコメントをいただきました。すばる望遠鏡のAO, IRCSグループの皆様には観測、データ解析において多大なサポートをしていただきました。これら共同研究者の皆様には、この場を借りて感謝の意を表します。最後に、本稿を執筆する機会を与えていただいた国立天文台の今西昌俊氏に感謝いたします。

参考文献

- 1) Beckwith S. V. W., et al., 2006, AJ 132, 1729
- 2) Djorgovski S., et al., 1995, ApJ 438, 13
- 3) Moustakas L. A., et al., 1997, ApJ 475, 445
- 4) Bershadsky M. A., Lowenthal J. D., Koo D. C., 1998, ApJ 505, 50
- 5) Labbe I., et al., 2003, AJ 125, 1107
- 6) Maihara T., et al., 2001, PASJ 53, 25
- 7) Takami H., et al., 2004, PASJ 56, 225
- 8) Kashikawa N., et al., 2004, PASJ 56, 1011
- 9) Folkes S., et al., 1999, MNRAS 308, 459
- 10) Tomita K., 1995, ApJ 451, 1
- 11) Babul A., Ferguson H. C., 1996, ApJ 458, 100
- 12) Baugh C. M., Cole S., Frenk C. S., Lacey C. G., 1998, ApJ 498, 504
- 13) Totani T., Yoshii Y., 2000, ApJ 540, 81
- 14) Totani T., et al., 2001, ApJ 559, 592
- 15) Minowa Y., et al., 2005, ApJ 629, 29
- 16) 美濃和陽典, 2006, 東京大学博士論文

High-Resolution Deep Imaging of Distant Galaxies with Subaru Adaptive Optics

Yosuke MINOWA

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

Abstract: Observations of distant galaxies are very important for investigating when primordial galaxies formed and how they evolved into present-day galaxies. Near-infrared deep imaging of a blank field towards the galactic pole is a vital method of exploring the distant galaxies. To push the limit of ground-based near-infrared imaging, we performed deep K' -band imaging of the Subaru deep field using adaptive optics that removes the blurring of starlight caused by the atmospheric turbulence, and we obtained the deepest K' -band image ever achieved. High-resolution and high-sensitivity AO image enabled the detailed analyses of the number count and luminosity-size relation of faint galaxies down to $m_{K'} \sim 25$. We found that the number density and the structure of galaxies at $z \sim 3$ are not very different from those of present-day galaxies.