

超広視野面分光装置 MUSE による 深宇宙探査：分光赤方偏移の測定

稲見 華 恵

〈広島大学 宇宙科学センター 〒739-8526 広島県東広島市鏡山一丁目3番1号〉
e-mail: hanae@hiroshima-u.ac.jp



超広視野面分光装置 MUSE（ミュージズ）を用いて世界で最も深宇宙探査がされている領域ハッブル・ウルトラ・ディープ・フィールドを観測し、かつてない効率で多数の銀河に対して銀河距離（分光赤方偏移）の測定を行い、精度よく決定した。この研究により、同領域で既知の分光赤方偏移は一挙に8倍にも増えた。以前は明るい銀河に限定されて分光赤方偏移を測定されていたものが、本研究ではハッブル宇宙望遠鏡の検出限界である31等級に迫るほどの暗い銀河の赤方偏移も大多数測定することを可能にした。特に赤方偏移3以上の銀河の測定は、かつては数天体のみに限られていたが、本研究により約100倍に増加し、銀河進化研究の新たな地平線を見出すことができた。

1. 深宇宙探査

1995年に夜空の空白領域にハッブル宇宙望遠鏡を100数時間向けるという無謀だと思われていた観測計画のおかげで、宇宙には多数の銀河が存在することが分かった。北斗七星近くにある満月の見かけの大きさの約1/30というこの小さな領域に望遠鏡を向けたことにより、宇宙の“空白領域”は実は数千個ものカラフルな銀河に埋め尽くされていたことは本誌の読者であればよくご存知かもしれない。この画像のおかげで、銀河の数、光度、形態など、銀河宇宙という天空の新たな側面が照らし出された。

現在に至っても、深宇宙探査は宇宙進化の謎を解く鍵を握っている。そのうちの1つ、ハッブル・ウルトラ・ディープ・フィールド（Hubble Ultra Deep Field (HUDF), ハッブル超深宇宙探査）は特に注目すべき深宇宙探査領域である。人類が最も観測時間を費やした領域であり、地上望遠鏡・宇宙望遠鏡に関わらず様々な波長帯を用いた測光観測も分光観測も行われている。そこに新しく強

力な装置による観測が加わった。

2. 超広視野面分光観測装置 MUSE

Multi Unit Spectroscopic Explorer (MUSE, ミューズ)は欧州南天天文台 Very Large Telescope (VLT) に搭載された可視光線領域の観測装置である。面分光専用の装置、つまり空間方向の撮像観測と視線方向の分光観測が同時にできる。可視光線での面分光の観測装置はMUSE以前でも存在していたが、MUSEの最大の特徴はなんと言ってもその広い視野である。一度の観測で1分角×1分角の領域をカバーしてしまうのだ。広視野の撮像観測に慣れていると、なんだ、その程度か、と思われるかも知れないが、参考までに、2019年から共同利用観測が始まったすばる望遠鏡の観測装置 FOCAS の面分光観測モードの視野は13秒角×10秒角である。おまけに、分光観測でも一度にカバーする波長帯が4,650–9,300 Å ととても広い。だからと言って、波長分解能も妥協しておらず、全波長帯を通して $R \sim 3,000$ を保っているおかげで、捉えられたスペクトル線の輪郭や速度場

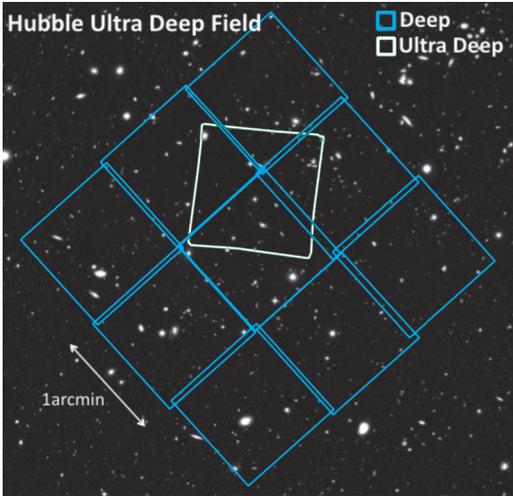


図1 MUSEが観測したハッブル・ウルトラ・ディープ・フィールドのフットプリント。四角1つがMUSEの視野1分角×1分角に相当する。青の四角9つで示された領域がハッブル・ウルトラ・ディープ・フィールドに相当し、1視野につき約10時間の観測を行った。白の四角の領域では合計で約30時間の積分時間をかけた。

を調べることができる。

2.1 MUSEによる深宇宙観測

この画期的な観測装置、特にその巨大な視野と高い感度のおかげで、ついに面分光観測でも深宇宙サーベイ探査ができるようになったのだ [1]。筆者は、MUSEの Guaranteed Time Observation (GTO) チームの一員として、ハッブル・ウルトラ・ディープ・フィールドの深宇宙探査を行った (図1)。観測はMUSEの9視野を用いて、1視野につき約10時間の観測時間をかけ、ハッブル・ウルトラ・ディープ・フィールドのほぼ全域をカバーした。また、この領域内の1視野では超深宇宙探査として約20時間の観測を加え、合計約30時間の露出を行った。

ハッブル・ウルトラ・ディープ・フィールドを観測したMUSEの全てのピクセルでスペクトルが取られていることを考えると、なんだか目まい

を覚えるのはきっと私だけではないだろう。視野の1つ分で約90,000ものスペクトルが取得できるので、その合計は単純計算で約810,000にも及ぶのだ。ただ、天体のない場所など全てのピクセルに有用な情報が含まれているとは限らないので、まずは天体の抽出を行う必要がある。

2.2 MUSE-HUDF領域の天体抽出

先にも述べたように、ハッブル・ウルトラ・ディープ・フィールドは世界で最も多数の多波長観測が行われている領域である。特に、その名前の通りハッブル宇宙望遠鏡では最も深い観測が行われている。その利点を活かし、2種類の方法を用いて天体の抽出を行った。1つ目はハッブル宇宙望遠鏡で検出された (連続光) 天体の位置をもとにする方法、2つ目はMUSEの3次元データで輝線放射を直接的に探し出す方法である。特に、後者を実現するためには新たなソフトウェア開発も行われた [2]。

2.2.1 連続光で観測された天体

ハッブル宇宙望遠鏡を用いた深宇宙探査で作成されたUVUDFカタログ [3] に含まれている9,969天体のうち、7,904天体は我々の観測領域にも含まれていた。これらの天体が実際にMUSEで検出されたかどうかに関わらず、全ての座標でスペクトルを抜き出した。だが、さすがのMUSEでも空間分解能はハッブル宇宙望遠鏡には敵わないゆえ (後に3.4節でも解説するが、一部の天体に関しては実はこれを覆す結果も出ている)、天体間の距離が0.6秒角以下のものは、MUSEのデータでは1つの天体として扱うことになった*1。結果、6,288天体のスペクトルを抽出することができた。

2.2.2 輝線のみで観測された天体

連続光が検出されていなくても輝線放射がある天体の存在も知られている。せっかくの3次元データで、これらの天体を見逃す手はない。ただ、新しい装置による新しいデータであるゆえ、

*1 合体された天体の座標は、それぞれの天体のフラックスで重みを付けた中心位置とした。

新たなソフトウェアが開発された。信号処理を得意とするメンバーが作った ORIGIN [2] と呼ばれるこのソフトウェア*2では、検出が期待される輝線の3次元空間でのモデルを作り、それと合致するものをデータ内で探し出す。その後、信頼度テストを生き残ったものだけが実際の輝線としてカウントされる。この手法により、1,251の輝線を検出することができた。

2.2.3 天体のスペクトル解析と赤方偏移の決定

さて、いよいよ天体のスペクトルも取得し、ついに、上記の2種類の方法により取得した7,000本以上 (!) に及ぶスペクトルの解析に取り組むときがきた。輝線や吸収線を探し出すことが第一の作業である。そして、これらのスペクトル線の種類を特定し、その静止波長と観測波長から天体の赤方偏移、つまり銀河距離を正確に求めることが最初のゴールである。

大量のスペクトルを、かつてのように全て目で見ても精査していくのはさすがに大変なので、半自動でスペクトル線を探り当て赤方偏移を計算してくれるソフトウェア [6] を MUSE 用に改造したものを使用した。それでも、自動判定された結果が正しいかどうか人間が判断する必要があり、また人為的ミスが減らすためにも、1つのスペクトルに対して少なくとも2-3人が赤方偏移の確認をし、最終的な値を決定した。それと同時に、決定した赤方偏移の信頼度 (confidence level, CONFID) を以下のように数値化し与えた。

- CONFID=3: 複数のスペクトル線による信頼できる赤方偏移
- CONFID=2: 特定できる単一のスペクトル線による信頼できる赤方偏移
- CONFID=1: 完全に特定できない単一のスペクトル線による不確実性が高い赤方偏移

この作業のときに $R \sim 3,000$ の波長分解能の恩恵を強く感じた。というのも、酸素イオン [O II]

のダブルレット輝線 ($3,726, 3,729 \text{ \AA}$) も分解されるし、ライマン・アルファ輝線に固有な非対称なプロファイルも捉えることができる。つまり、例えばこれらの輝線しか検出されなくても、その特徴から一意的にどの輝線であるかを決定できてしまうのだ。上記の信頼度で言えば、少なくとも CONFID=2 とすることができる。次章で見られるように、MUSE で求めた赤方偏移の大半以上はこの2つの輝線に頼っているゆえ、 $R \sim 3,000$ 程度の中分散分光器は深宇宙探査する際に非常に重要な要素である。

3. MUSE-HUDF 天体の分光赤方偏移

図2に MUSE-HUDF で得られた赤方偏移の分布を示す。赤方偏移 $z=0.5-1.5$ と $z=3.0-6.0$ で大きなピークが見られるのは、ちょうど MUSE がカバーする波長帯に、前者は [O II] が、後者はライマン・アルファ線が検出できるためである。最右図で見られるように、大半の赤方偏移はこの2つの輝線に頼ることで求められている。赤方偏移 $z=1.5-3.0$ では可視光線領域で放射が強い輝線がなく「赤方偏移砂漠」とも呼ばれる。だが、我々の深宇宙探査では炭素イオン (C III) の輝線やマグネシウムイオン (Mg II) や鉄イオン (Fe II) の吸収線を捉えることができ、ほんの少し「砂漠」に「オアシス」を作ることができた。

また、赤方偏移3以下で CONFID=3 が多く見られるのは、[O II] ダブルレットも含めて複数の輝線が MUSE の波長帯で捉えられるためである。一方で、赤方偏移3以上ではライマン・アルファ線のみで赤方偏移が決まることがほとんどだ。受かった天体の典型例を図3に示す。

本研究では、総じて1,338天体について CONFID が2以上の赤方偏移を得られた。これは HUDF で既知の分光赤方偏移の約8倍にも及ぶ。更に、そのうち132天体は、ハッブル宇宙望遠鏡

*2 他にも TDOSE (Three Dimensional Optimal Spectral Extraction) [4] や LSDCat (Line Source Detection and Cataloging) [5] などというソフトウェアも開発されている。

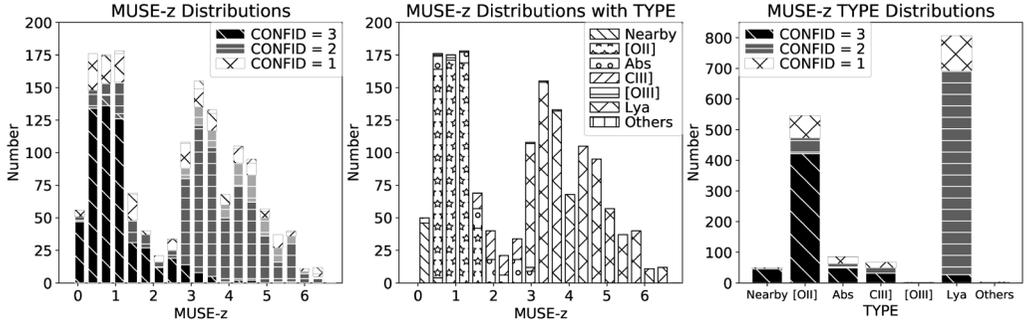


図2 MUSE-HUDFでの分光赤方偏移分布. 左図は測定した赤方偏移の信頼度 (CONFID) を区別して表示している. 色が薄くなっているものは輝線でのみ検出された天体 (第2.2.2項) を示す. 中図は赤方偏移の測定時に主に使用された輝線で区別している. 凡例の上から, 近傍銀河に主に見られる輝線 (Haなど), [O II], 吸収線, C III], [O III], ライマン α , その他. 右図では, 中図で示したタイプ分けをヒストグラムにし, 信頼度で区別を行っている.

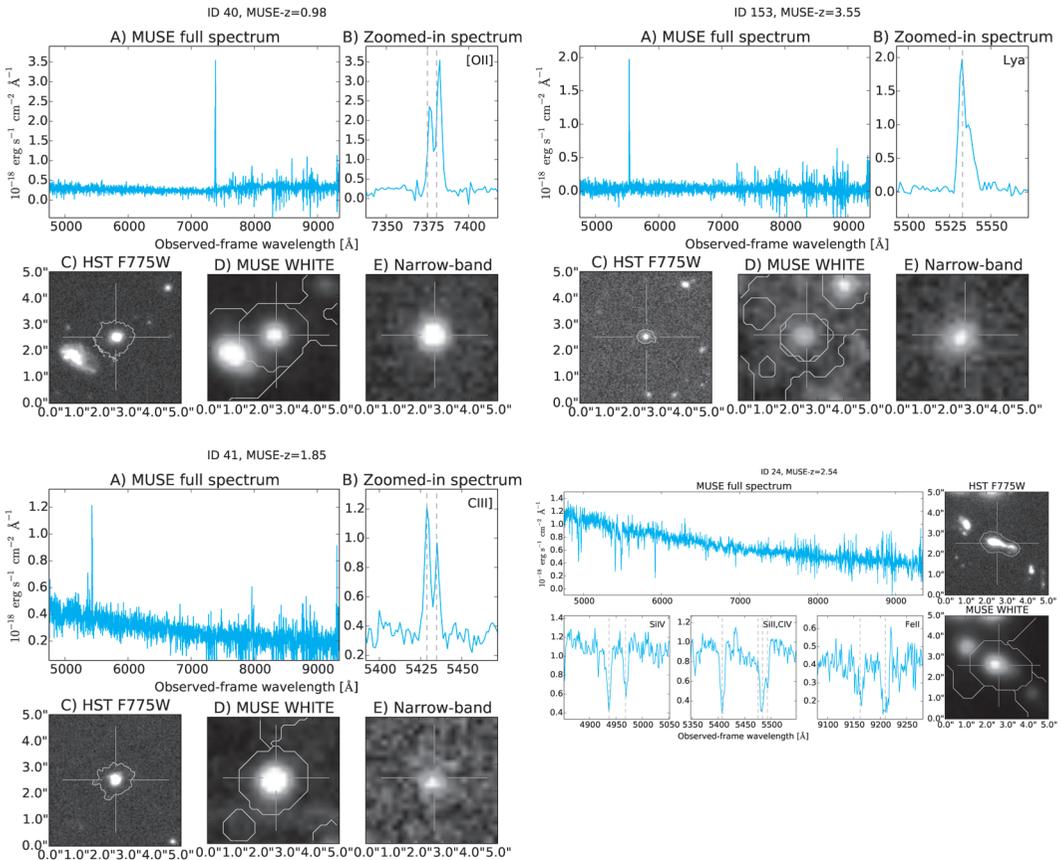


図3 [O II] (左上), ライマン・アルファ (右上), C III] (左下), 吸収線 (右下) を捉えたMUSEのスペクトル. A) ではMUSEの全波長域, B) では赤方偏移決定に主に使用されたスペクトル線にズームしたものを示す. C) から E) の図は, 天体がハッブル宇宙望遠鏡F775Wフィルターで撮像された画像, MUSEの全波長帯を重ねた画像, B) に示したスペクトル周辺の波長帯を重ねた画像である.

でも連続光を捉えられていない、MUSEで初めて見つかった輝線放射しか検出されない天体であった。これらの天体については、他の望遠鏡や観測装置による追観測を目指しており、詳細に議論されている別論文を参考して欲しい [7].

これらの輝線のみで検出された天体を除くと、観測領域中の UVUDF カタログに含まれていた 7,904 天体 (2.2.1 節参照) のうち、我々は 1,206 天体 (15%) の赤方偏移を精度よく決定できた。測定誤差は $\sigma_z = 0.00012 (1+z)$ または $\sigma_v \approx 40 \text{ km s}^{-1}$ である。

3.1 赤方偏移の完全性

求めた赤方偏移のうち $\text{CONFID} \geq 2$ のものは全て正しいと仮定した場合の完全性 (コンプリートネス) をハッブル宇宙望遠鏡の 775 nm 連続光等級の関数として図4に示した。ここでは、UVUDF カタログ中の天体に対し、赤方偏移を $\text{CONFID} \geq 2$ で求められた天体の割合を完全性と定義している。また、図中では約 10 時間積分した観測領域 (mosaic) と約 30 時間積分した観測領域 (UDF10) を区別した。

印象的なことに、UDF10では25等級よりも明るい天体全てについて赤方偏移を求めることができた。一方の mosaic でも 87% という非常に高い完全性が達成された。mosaicでは22.5等級より明るい天体では全て赤方偏移が得られたが、唯一見落とされた 22.5–23.0 等級での 1 天体を除けば、この値は 23.5 等級である。

完全性は等級が大きくなる (天体が暗くなる) につれて減少していき、UDF10 および mosaic それぞれ 26.5 等級と 25.5 等級あたりで 50% となる。どちらについても 25 等級前後で完全性が大きく減少するが、UDF10 は 28–29 等級あたりまで mosaic は 27 等級まで約 20% を維持するのは見事である。

3.2 過去の分光赤方偏移サーベイとの比較

図5に今回 MUSE で得られた分光赤方偏移と、HUDF 領域における過去の大型分光赤方偏移サーベイの結果を比較している。過去の結果は、

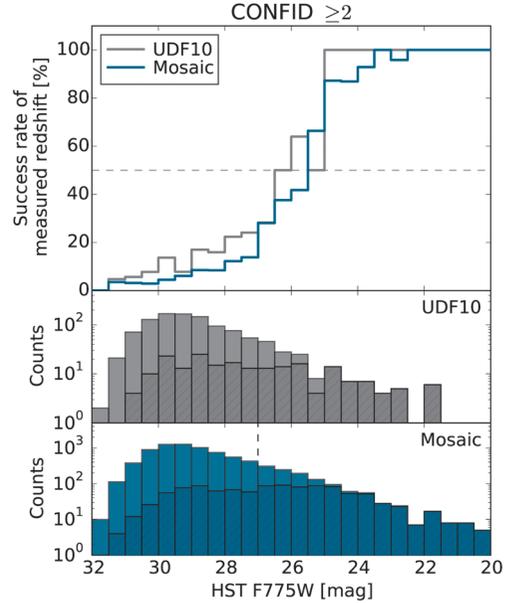


図4 MUSE-HUDFでの分光赤方偏移の完全性。下方2枚の図では、UDF10と mosaic の探査領域で UVUDF カタログに含まれている天体のうち、MUSEで赤方偏移が求められた天体数を斜線で示す。最上図では、その比を示している。水平方向の破線は比が50%であるところを表す。

UVUDF カタログが様々なサーベイ結果を集めた分光赤方偏移 [3] と VUDF サーベイで得られた分光赤方偏移 [8] のうち信頼性が高いものを利用し、161 天体についてのデータを得た。図を見て分かる通り、MUSEにより既知の赤方偏移が爆発的に増えただけではなく、捉えた赤方偏移の範囲が著しく拡大し、スリット分光では狙わないような非常に暗い天体の赤方偏移まで測定できた。過去の観測は $0 < z < 3$ と F775W フィルターでの明るさが 25 等より明るい天体に偏っている。

ただし、赤方偏移 $z = 1.5\text{--}3.0$ の「赤方偏移砂漠」については、過去のサーベイが赤方偏移を求めた天体のうちの 10 天体について、MUSE は赤方偏移を求めることができていない。そのうち 4 天体は地上観測によって得られた赤方偏移であるが、1 つは MUSE がカバーしていない波長帯による観

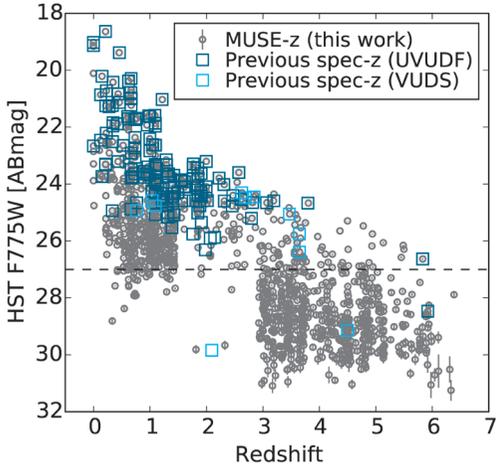


図5 MUSE-HUDFで求められた分光赤方偏移（丸印）と過去の分光赤方偏移サーベイ（四角印）について、可視光線での等級（ハッブルのF775W フィルター）と赤方偏移の分布を比較した図。

測, 1つは過去のスペクトルを見ても赤方偏移が怪しく, 残り2つは吸収線による赤方偏移同定がされていた. 宇宙望遠鏡観測による6天体についても, 主に吸収線の検出によるものであった. そう, MUSEの弱点は吸収線を同定できるほどの高SN比の連続光を取得することなのだ. それゆえ, 輝線があまり見られない赤方偏移砂漠が若干苦手なのである.

3.3 測光赤方偏移との比較

これまでではスペクトル線の特定による赤方偏移の測定（分光赤方偏移）についての話であったが, 多波長による測光観測を使った測光赤方偏移の測定も存在する. 測定精度は劣るが, 原理的には視野内に写っている全ての天体の赤方偏移を求めることができる非常に効率がよい手法だ. 現在の測光赤方偏移の精度 $\Delta z / (1+z)$ は0.05程度である [9]. ただし, 前節で述べた通り, この精度は主に赤方偏移3以下の25等級より明るい天体で調査された結果である. MUSEで初めて赤方偏移6以上の天体と25等級よりも暗い天体について, このような統計的調査が可能となった.

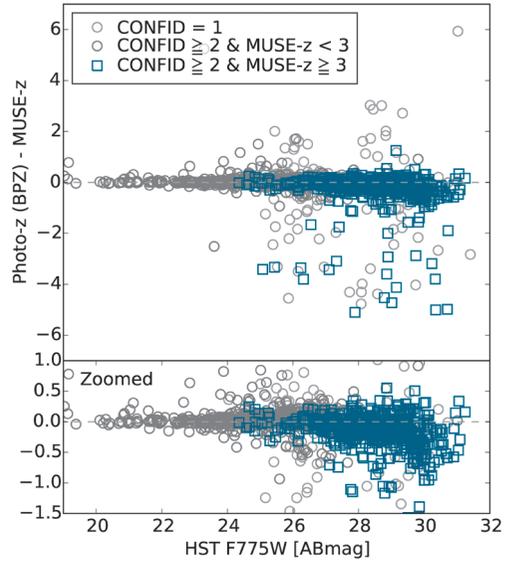


図6 MUSE-HUDFの分光赤方偏移と測光赤方偏移を比較した図. 赤方偏移3以上と以下で四角印（青色）と丸印（黒色）に分けて示している. また, 灰色の丸は信頼度が低い（CONFID=1）赤方偏移である.

図6では, MUSEによる分光赤方偏移とUVUDFカタログの測光赤方偏移を比較している. 赤方偏移3以上と以下で分けて示しているが, 低赤方偏移では分光と測光による結果がよく一致している. 一方の高赤方偏移では, 全体的に測光赤方偏移が小さく見積られる系統的な差異が見られる. 赤方偏移3以上の天体は, ライマン・アルファ輝線による測定であり, この輝線を放出するガスの運動による母天体との赤方偏移からのずれはよく知られている [10]. だが, 図に見られる差異はそれ以上に大きい ($\Delta z \approx -0.13$) ゆえ, 分光赤方偏移の決定にライマン・アルファ輝線を用いたことが原因ではない. どうも暗い天体について, 測光赤方偏移の精度は系統的に落ちているようである. これ以上の議論は, 測光赤方偏移の誤差補正を試みている別論文 [11] にゆずるが, 銀河間物質の吸収モデルに変更を加えることで分光赤方偏移と測光赤方偏移の差異を減少させることができた.

3.4 ハッブルの空間分解能を(ときどき)超える MUSE

赤方偏移の測定をする中で、期待以上のMUSEの活躍があった。検出した輝線を2次元空間で確認することによって、見かけ上の空間分解能を上げることができた。おまけに、場合によっては、ハッブル宇宙望遠鏡でも空間分解できない天体をMUSEでは空間分解を可能にした。

図7でこれらの例を示している。上方の図の例では、ハッブル宇宙望遠鏡では2天体捉えられているが、MUSEで色合成した画像(MUSE WHITEと示された内挿図)ではこの2天体をはっきり分離して撮像できていない。だが、検出されたスペクトルをよく調べると、赤方偏移が異なる2天体のスペクトルが混ざり合っていることが分かる。1つはID 6877の赤方偏移0.734の天体で、水素の再結合線が3つ(H β , H γ , H δ)と酸素イオンの輝線([O III]と[O II])が受かっている。もう1つはID 6878の天体で、ライマン・アルファ輝線により赤方偏移3.609と同定された。これらの輝線の波長帯を取り出して重ね合わせることで、輝線の2次元図([O II] NBおよびLy α NBと示された内挿図)を作ることで、輝線が放射されている空間位置を特定できたのである。つまり、近傍の方の銀河はハッブルの画像の中心にある天体であり、遠方の方の銀河はその北西にある天体だと確実に決めることができた。

下方の図の例では、MUSEがハッブル宇宙望遠鏡の空間分解能を超える一例である。今度は、ハッブル宇宙望遠鏡でも1天体しか捉えられていない。しかし、MUSEのスペクトルを見ると、赤方偏移が $z=2.575$ と $z=1.094$ と異なる2天体からのスペクトルが混ざって受かっている。実際には、視線方向に2つの天体が存在するのだが、ハッブル宇宙望遠鏡でもって分解できなかったのが、MUSEでは分光観測することによって発見することができた。レアなケースではあるが、こうしてときどきMUSEがハッブル宇宙望遠鏡の空間

分解能を(見かけ上)超えるときがあるのだ。

3.5 ハッブルに見えない天体を見る MUSE

第2.2.2項で紹介した輝線のみで観測されている天体は、言い換えると連続光が非常に暗い(または連続光放射がない)天体であるゆえ、ハッブル宇宙望遠鏡でも検出されない。実際の例を図8に示す。ソフトウェアORIGINを用いて3次元データを直接調べることによって、この天体ではライマン・アルファ輝線が波長5,265 Åに検出された(赤方偏移3.33の天体)。同じ空間位置でハッブル宇宙望遠鏡の画像(内挿図C)を調べても、連続光は受かっていない。一方で、ライマン・アルファ輝線の2次元画像図(内挿図E)では、その放射をしっかりと捉えられている。事前に観測ターゲットを選んでから分光を行う今までの分光観測サーベイでは、こういった天体は見つからない。本研究で観測された692のライマン・アルファ輝線天体のうち少なくとも102天体、実に15%の天体はハッブル宇宙望遠鏡で連続光が観測されていないのである [7]。

4. まとめと今後

MUSEを用いたHUDFの深宇宙面分光探索により、1,338天体について精度よく赤方偏移を決めることができた。これは既知のものから約8倍もの増加である。大多数の天体の赤方偏移は、 $z=1.5$ 以下では酸素イオン輝線([O II])によって、 $z=3$ 以上ではライマン・アルファ輝線によって決定された。30時間(10時間)積分した観測領域では25等級よりも明るい天体では100%(87%)の銀河の赤方偏移を求められ、50%となるのは26.5等級(25.5等級)であった。過去の分光赤方偏移サーベイと比較して、MUSEは25等級よりも暗い天体と赤方偏移3以上の天体を圧倒的に多数カバーしている。測光赤方偏移と比較すると、明るい天体が多い赤方偏移3以下に関しては測光赤方偏移の精度はよいが、赤方偏移3以上の暗い天体では統計的な誤差が見られた。また、面分光

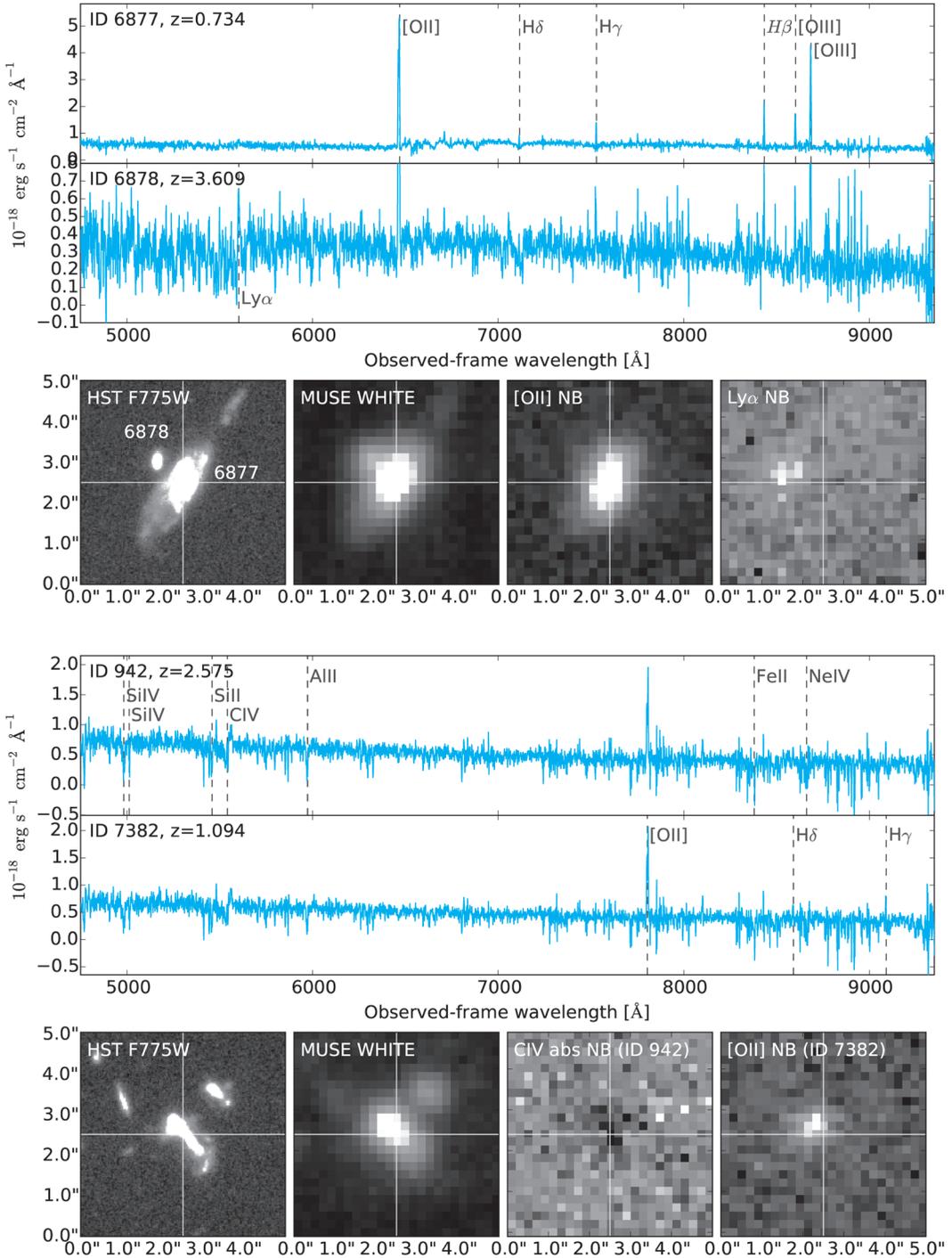


図7 空間分解できなかった天体がスペクトルによって分解できた2例を示す。各図中で、上方2つの図はそれぞれの天体のスペクトルと検出されたスペクトル線の位置を示す。それぞれの画像は左からハッブルF775Wフィルターの画像、MUSEの全波長帯を重ねた画像、それぞれの天体で最も強く検出されたスペクトル線周辺の波長帯を重ねた画像である。

ID 6329, MUSE-z=3.33

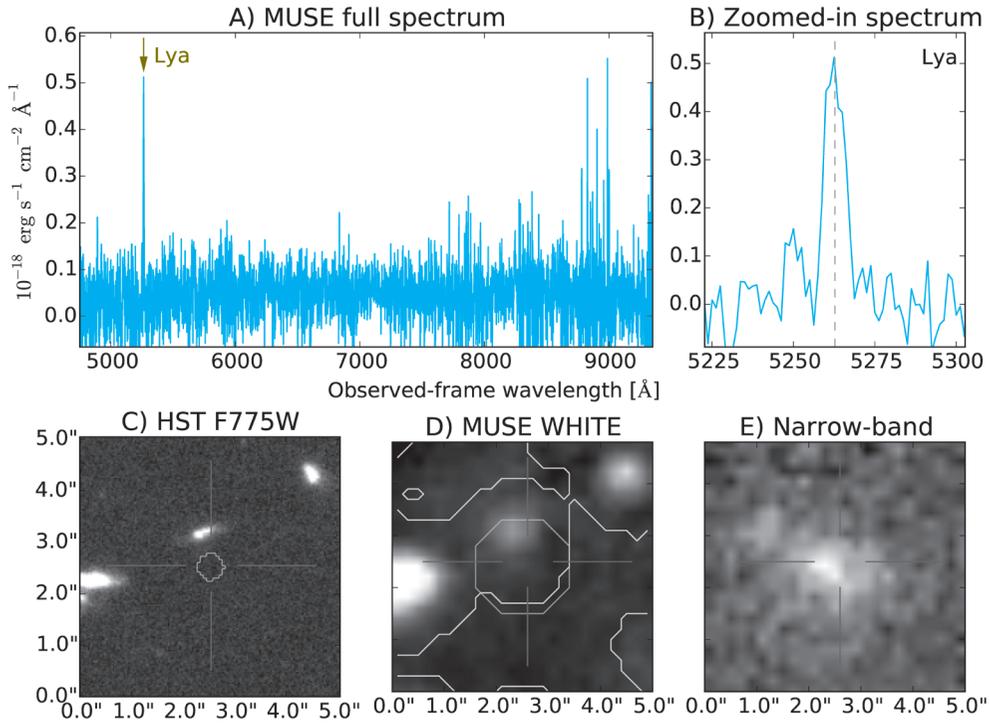


図8 ハッブルでも捉えられない天体をMUSEが輝線を検出することで発見した一例。A)ではMUSEの全波長域、B)では赤方偏移決定に主に使用されたスペクトル線にズームしたものを示す。C)からE)の図は、天体がハッブル宇宙望遠鏡F775Wフィルターで撮像された画像、MUSEの全波長帯を重ねた画像、B)に示したスペクトル周辺の波長帯を重ねた画像である。

観測のアドバンテージとして、連続光では空間分解できない天体を輝線の2次元画像では分解でき、ときにはハッブル宇宙望遠鏡ですら空間分解できない天体をスペクトルから見つけることができた。今回観測された天体の中では、ハッブルで連続光が受かっていない輝線のみで光っている天体も見つかった。ライマン・アルファ輝線天体で顕著で見られ、692天体のうち少なくとも102天体(15%)を占める。

今回の記事では、MUSEを開発するにあたって最大の目的であった深宇宙探査における最も基本的な要素である赤方偏移の調査について紹介したが、他の科学的発見も多数されている。第3.3節でも述べた通り、測光赤方偏移との比較 [11], C III]輝線の統計的調査 [12], 中赤方偏移銀河の空間分

解したガスの運動 [13], ライマン・アルファ輝線の光度関数 [14], ライマン・アルファ輝線の空間的広がり [15], ライマン・アルファ輝線の等価幅と紫外線連続光の関係 [16], 星形成銀河の銀河風 [17], 衝突銀河の存在割合の進化 [18], 宇宙の網目状構造 [19]の研究が行われ、現在も新たな解析が進んでいる。更には、サーベイ領域は減少するが、補償光学を用いた160時間をかけたウルトラ深宇宙探査の観測も2019年の夏に完了し、より高解像度より高感度のデータを用いた成果が待たれる。

謝辞

本稿の内容は筆者の投稿論文 [20]に基づいています。この場を借りて共著者の方々に深く感謝

いたします。また、執筆をお声掛けおよび草稿にコメントをくださった岡部信広編集委員に御礼申し上げます。なお、本研究は欧州研究会議 (ERC) の支援を受けて行われました。

This article is reproduced with the permission of ©ESO and is a translation of a text published as Inami et al. A&A, 608, A2, 2017.

参考文献

- [1] Bacon, R., et al., 2017, A&A, 608, A1 (MUSE UDF SI paper I)
- [2] Mary, D. et al., 2020, arXiv: 2002. 00214
- [3] Rafelski, M., et al., 2015, AJ, 150, 31
- [4] Schmidt, K. B., et al., 2019, A&A, 628, A91
- [5] Herenz, E. C., et al., 2017, A&A, 606, A12
- [6] Hinton, S. R., et al., 2016, Astronomy and Computing, 15, 61
- [7] Maseda, M. V., et al., 2018, ApJ, 865, L1
- [8] Tasca, L. A. M., et al., 2017, A&A, 600, A110
- [9] Beck, R., et al., 2017, MNRAS, 468, 4323
- [10] Shapley, A. E., et al., 2003, ApJ, 588, 65
- [11] Brinchmann, J., et al., 2017, A&A, 608, A3 (MUSE UDF SI paper III)
- [12] Maseda, M. V., et al., 2017, A&A, 608, A4 (MUSE UDF SI paper IV)
- [13] Guérou, A., et al., 2017, A&A, 608, A5 (MUSE UDF SI paper V)
- [14] Drake, A. B., et al., 2017, A&A, 608, A6 (MUSE UDF SI paper VI)
- [15] Leclercq, F., et al., 2017, A&A, 608, A8 (MUSE UDF SI paper VIII)
- [16] Hashimoto, T., et al., 2017, A&A, 608, A10 (MUSE UDF SI paper X)

- [17] Finley, H., et al., 2017, A&A, 608, A7 (MUSE UDF SI paper VII)
- [18] Ventou, E., et al., 2017, A&A, 608, A9 (MUSE UDF SI paper IX)
- [19] Gallego, S. G., et al., 2018, MNRAS, 475, 3854
- [20] Inami, H., et al., 2017, A&A, 608, A2 (MUSE UDF SI paper II)

A Deep Survey with a Wide Field-of-View Integral Field Spectrograph MUSE: Spectroscopic Redshift Measurements

Hanae INAMI

Hiroshima Astrophysical Science Center, Hiroshima University, 1-3-1 Kagamiyama, Higashi-Hiroshima, Hiroshima 739-8526, Japan

Abstract: We conducted a deep unbiased spectroscopic survey of the Hubble Ultra Deep Field using a wide field-of-view optical integral field unit instrument, MUSE. This provided a factor of eight more spectroscopically confirmed secure redshifts in the field. Compared with past surveys, MUSE determined spectroscopic redshifts of much fainter galaxies, reaching the detection limit of the Hubble Space Telescope at 31st magnitude. In particular, the MUSE observations obtained about 100 times more redshifts for galaxies at $z > 3$, broadening the horizon for studies of galaxy formation and evolution.