

星形成銀河の星間物質の電離状態

中島 王彦

〈ジュネーブ大学・ジュネーブ天文台 51 Ch. des Maillettes, 1290 Versoix, Switzerland〉
e-mail: kimihiko.nakajima@unige.ch



星形成銀河の星間物質を特徴づける重要な性質として気相の重元素量と電離パラメーターがある。本稿ではこれまで十分に研究が進められていない電離パラメーターに着目し、 $z=0-3$ の銀河に対して行ったその系統的研究を紹介する。筆者らは、赤方偏移によらない傾向として、小質量、高い星形成活動、および／または低い重元素量をもつ銀河ほど高い電離パラメーターをもつことを観測的に明らかにした。遠方銀河ほど平均的に高い電離パラメーターをもつ傾向は、遠方ほど質量の割に効率良い星形成活動をもつ銀河が豊富に存在する結果と捉えることができる。さらに、電離パラメーターが重元素量測定に与える影響や、電離光子の銀河外脱出との関連についても議論をする。

1. 星形成銀河を特徴づける物理的性質

近傍から遠方の宇宙にかけて、銀河の星間物質の物理状態を知ることは銀河進化を理解するうえで欠くことができない。特に、星形成銀河の電離水素ガス領域（H II領域）を特徴づける気相の重元素量と電離パラメーターは重要な性質と言える。本稿の導入として、まずこれら二つの性質の重要性について紹介していきたい。

1.1 重元素量

重元素（ヘリウムより重い元素）は星の内部で主に生成されるため、星間物質中の重元素量はその銀河のこれまでの星形成活動の歴史を反映する。また、超新星爆発などによって大きなエネルギーを得たガスの風（銀河風）による銀河外へのガスの流出や、原始ガスの銀河内への流入も重元素量に影響を与えると考えられている^{1), 2)}。したがって、重元素量の測定によってもたらされる銀河の化学進化や、その質量、星形成率依存性を理解することは重要だと言える。

広視野銀河サーベイ Sloan Digital Sky Survey

(SDSS) や大型望遠鏡に搭載された可視・近赤外の強力な分光装置の登場により、この10年で重元素量の研究は飛躍的に進んだ。とりわけ、星質量-重元素量関係は近傍から $z\sim 3$ に至るまで研究が拡張され、同じ質量でも遠方銀河ほど低い重元素量をもつ傾向が明らかになってきた³⁾。また最近では、星質量-重元素量関係の星形成率依存性についても研究が進み、高い星形成率をもつ銀河ほど質量の割に低い重元素量をもつ傾向があることが観測的にわかってきた⁴⁾。興味深いことに、この星質量-星形成率-重元素量関係は近傍から $z\sim 2.5$ の銀河まで無進化で成り立つことが示唆されている。遠方ほど高星形成率の銀河を選択的に調べていたため、質量-重元素量関係に進化が見られていたのだと捉えることができる。その普遍性から、この星質量-星形成率-重元素量関係はFundamental Metallicity Relation (FMR) と呼ばれている。もしこのFMRが普遍的な関係である場合、星形成活動とガスの流出・流入を支配する共通の物理が銀河の進化に働いている可能性がある。重元素量を通じて銀河進化を支配するこれらの重要な物理過程を理解することができるのだ。

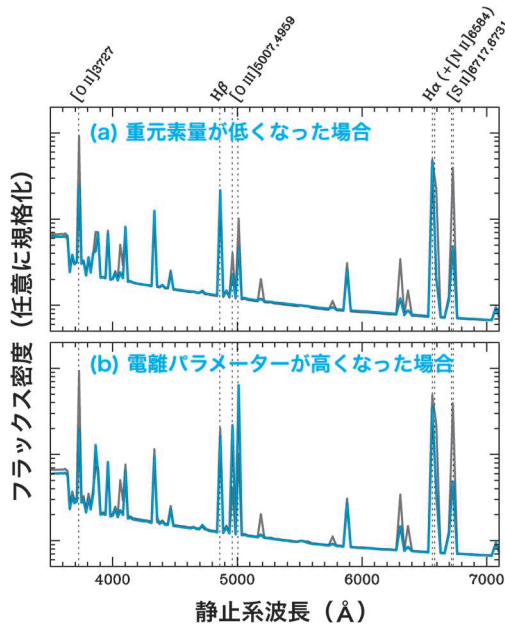


図1 H II領域から観測される静止系可視輝線スペクトル。基準となるスペクトル（灰色）に比べ、(a) 重元素量のみ低い場合と (b) 電離パラメーターのみ高い場合のスペクトルが青色で表示されている。

ただし、 $z \sim 3$ の銀河はこのFMRの予想よりも低い重元素量をもつことが唆されている⁴⁾。この点については本稿の後半で再考したい。 $z \lesssim 2.5$ の銀河も含め、FMRの普遍性はまだ検証段階であることを強調しておきたい。

気相の重元素量はH II領域由来の輝線から推定することができる。ガス温度を用いて推定する方法が最も信頼性が高いのだが、観測的困難さから、強い金属輝線と水素輝線の輝線比を用いた方法が広く利用されている。図1aを見てほしい。これは、重元素量の異なるH II領域から観測される静止系可視輝線スペクトルの違いを表している。重元素量が低くなるにつれ、代表的な金属輝線である

[O II] λ3727や [O III] λλ4959, 5007, [N II] λ6584, [S II] λλ6717, 6731が弱くなる様子がわかる^{*1}。一方、水素のバルマー輝線であるHαやHβの強さは変わらない。([O II] + [O III])/Hβ(R23-index)や [N II]/Hαの輝線比が重元素量の指標として使えるのだ。近傍銀河で決められたこれらの輝線比-重元素量関係が遠方銀河の重元素量推定にも力を発揮している⁵⁾。

1.2 電離パラメーター

次に、もう一つの重要な性質であり、本稿で注目する電離パラメーターについて説明していきたい。電離パラメーターとは、H II領域における電離光子の水素原子に対する個数比を指す量である。したがって、H II領域の電離状態を定量化する量と捉えることができる。電離光子は若い大質量星から供給されるため、星形成活動性と電離パラメーターは密接に関連している。

ここで図1bを見てもらいたい。重元素量を固定したまま電離パラメーターを高くした場合に見られる輝線スペクトルが表されている。注目してほしいのは、金属輝線の中でも輝線によってその強弱の変化が異なる点である。電離パラメーターが高くなるにつれて、[O III]輝線のような高電離輝線（電離させるために高いエネルギーが必要な輝線）が強くなる一方、[O II]や [N II]、[S II]といった低電離輝線が弱くなる傾向が見とれる。このように、[O III]/[O II]比のような電離状態の異なる輝線の強度比が電離パラメーターに敏感である。

図1から、H II領域由来の輝線スペクトルを正しく解釈するためには重元素量だけではなく電離パラメーターも必要不可欠であることがわかる。言い換えると、先に述べたような、強い輝線を用いた輝線比-重元素量関係から重元素量を推定す

*1 これは重元素量が太陽重元素量程度以下の場合である。重元素量が十分高い場合は、逆に重元素量が高くなるほどこれらの金属（特に酸素）輝線は弱くなる。重元素量が高くなるにつれてガスの温度が下がり、可視域よりも低エネルギーで励起できる赤外域での輝線放射がより効率良く起こるためである。輝線比-重元素量関係には、この効果も織り込まれている。

る方法には、電離パラメーターの不定性があることになる。また、近傍銀河で構築された輝線比-重元素量関係を使うということは、近傍銀河に見られる平均的な電離パラメーターを暗に仮定して重元素量を求めていることに相当する。遠方銀河に対してこの輝線比-重元素量関係を適応できるかどうか、その妥当性は実はよく検証されてきていないのだ。実際、遠方銀河ほど高電離輝線のより強いスペクトルが観測されてきており、遠方銀河ほど平均的に高い電離パラメーターをもっている可能性が議論されてきていた⁶⁾。ただし、従来の遠方銀河サンプルは少なく、また重元素量に対して行われてきているような質量・星形成率との関係性や進化に特化した研究はいまだなされていない。星形成銀河の性質を正しく知るためにも、電離パラメーターにスポットライトを当てるときがきたのだ。

2. $z=0-3$ における銀河の電離状態

2.1 電離状態の赤方偏移進化

電離パラメーターと重元素量の系統的研究を行うべく、筆者らは $[\text{O III}]/[\text{O II}]$ 比と $([\text{O III}] + [\text{O II}])/H\beta$ 比 (R23-index) を用いた輝線比図を用いることにする (図2; ダスト補正済み)。図1からわかるように、 $[\text{O III}]/[\text{O II}]$ 比は電離パラメーターに、R23-indexは重元素量に、それぞれ特に敏感である。図2に描かれている黒曲線が電離パラメーターと重元素量を振った場合の光電離モデルの予想する輝線比を表す⁷⁾。なるべく純粋な観測量で比較を行うために、輝線比図上で話を進めてみることにする。図2には、約140,000個のSDSSで得られた近傍銀河、約70個の $z\sim 1$ 銀河、そして約40個の遠方銀河 ($z\sim 2-3$) が含まれている。遠方銀河は、 $\text{Ly}\alpha$ 輝線を強く放射する $\text{Ly}\alpha$ 輝線銀河 (LAEs) と、UV光で選択されたLyman Break銀河 (LBGs) に大きく分けられる。特に、本稿の議論で重要な役割を果たすLAEsサンプルの構築には筆者らの観測が大きく貢献している⁸⁾。

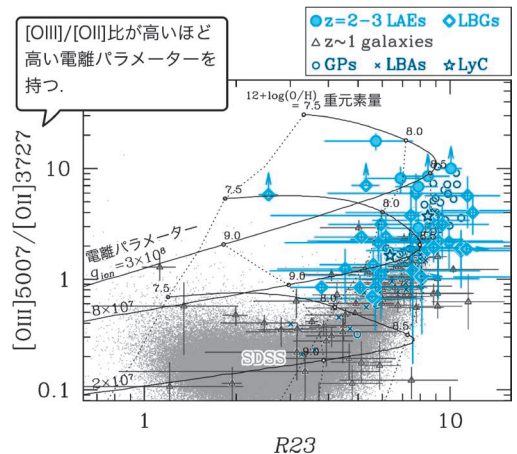


図2 $[\text{O III}]/[\text{O II}]$ 対 R23-index の図。近傍の SDSS 銀河 (灰色) に比べ、 $z=2-3$ の遠方銀河 (特に LAEs; LAEs が青●, LBGs が青ダイヤ) の高電離パラメーター・低重元素量が示唆される。黒曲線は光電離モデル計算結果。

また、近傍で知られている遠方銀河の対応天体として、非常に強い $[\text{O III}]$ 輝線を放射するコンパクトな星形成銀河である Green Pea 銀河 (GPs)⁹⁾、UV 光で選択された Lyman Break Analogs (LBAs)¹⁰⁾、そして電離光子 (Lyman-continuum) 放射の見られる LyC 銀河^{11), 12)} も明示してある。

ここでは特に遠方銀河に着目してみる。図2から、遠方銀河ほど典型的に高い $[\text{O III}]/[\text{O II}]$ 比と R23-index を示すことがわかる (青●とダイヤ)。これは、遠方銀河ほど典型的に高い電離パラメーター、低い重元素量をもつ傾向があることを意味する。電離パラメーターの赤方偏移進化が示唆されるわけだが、注意しなければいけないのが、図2だけでは銀河の星質量や星形成率の違いを見ることできず、近傍と遠方とで公平な比較ができているかどうか不明瞭な点である。実際、近傍の遠方対応天体である GPs, LBAs, LyC 銀河に着目すると、この図上で遠方銀河と同程度の高い $[\text{O III}]/[\text{O II}]$ 比と R23-index をもつことがわかり、近傍の典型的な銀河とは系統的に異なる電離パラメーターと重元素量をもつことがわかる。GPs や LBAs, LyC 銀河は近傍銀河の中で最も質量が小さ

く、かつ活発に星形成を行う部類に属しており、銀河のグローバルな性質によって星間物質の物理状態も大きく異なることが予想できる。この点をさらに詳しく調べるために、次の章では、質量や星形成率の異なる銀河がもつ重元素量や電離パラメーターについて、近傍のSDSS銀河サンプルを用いて調べてみる。

2.2 電離状態と質量-星形成率-重元素量関係

図2のSDSS銀河サンプルに着目すると、近傍銀河は典型的に $[O III]/[O II]=0.2$, $R23-index=2.6$ をもつ。だが、ここで注目していただきたいのはその典型値からのばらつきである。近傍では、 $R23-index$ が大きい銀河ほど高い $[O III]/[O II]$ 比をもつ傾向があり、またある固定した $R23-index$ で見た場合でも、 $[O III]/[O II]$ 比には分散が見られる。これらのばらつきの起源として、銀河のグローバルな性質の違いが挙げられる。質量-重元素量関係や星形成率の違いも考慮に入れたFMRの存在を考えれば、重元素量と電離パラメーターの関係である $[O III]/[O II]$ - $R23-index$ 関係にも質量や星形成率依存性があると推測されるからである。

図3を見ていただきたい。SDSS銀河サンプルを星質量と単位星質量当りの星形成率（比星形成率）でサブサンプルに分け、これらの性質に応じて $[O III]/[O II]$ - $R23-index$ 関係がどう変わるのかを調べてみた図である。図3より、星質量が小さいほど、また比星形成率が高く星形成を活発に行っているほど、銀河は高い $[O III]/[O II]$ 比と $R23-index$ をもつことがわかる。この傾向は、小質量、活発な星形成活動、および/または低い重元素量をもつ銀河ほど高い電離パラメーターをもつ傾向があることを示唆している。この四つの物理量の関係性を2次元で便宜的に表現したものが図4である。異なる質量や星形成率をもつSDSS銀河サブサンプル同士に見られた分散が最も小さくなるように横軸をとっている。このようなタイトな関係性をSDSS銀河サンプル内に見つけたの

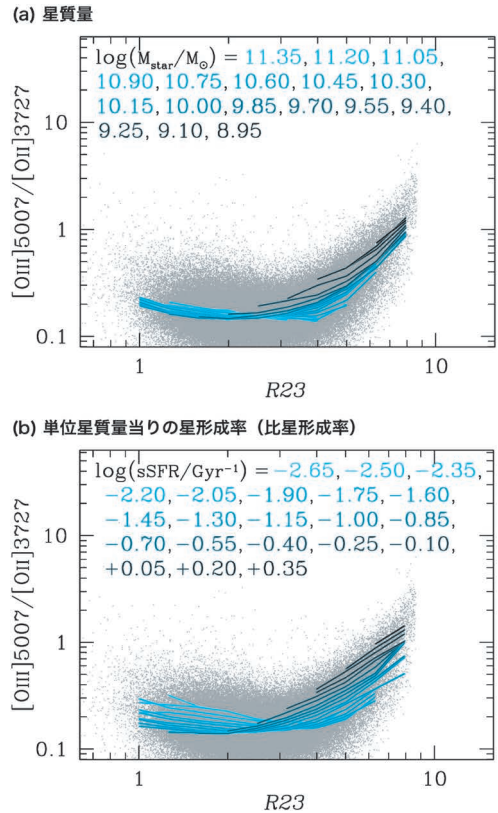


図3 SDSS銀河サンプルの $[O III]/[O II]$ - $R23-index$ 関係の (a) 星質量と (b) 比星形成率依存性。

だ。そして興味深いのは、このSDSS銀河のみで構築された関係上での他の銀河種族の振る舞いである。質量や星形成率の違いを考慮に入れたこの関係は、近傍の遠方対応天体や遠方銀河に対しても無矛盾であることが図4から示唆される。 $z\sim 3$ の遠方銀河まで無進化で成り立つ普遍的な関係である可能性から、この四つの物理量の関係性を本稿ではFundamental Ionization Relation (FIR)と呼ぶことにする。

2.3 遠方銀河の高い電離状態：再考

図2から、遠方銀河ほど典型的に高い電離パラメーターをもつ傾向が示唆された。同様の電離パラメーターの進化は近年の近赤外深分光観測を通じて他の研究からも確からしく認識され始めている^{13), 14)}。本章と次章で、この進化についてもう

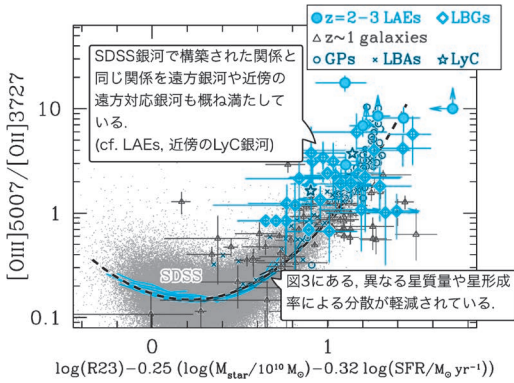


図4 SDSS銀河サンプルに見られた [O III]/[O II]-R23-index 関係の質量・星形成率依存性を補正した関係 (FIR; 破線).

少し掘り下げて考えてみたい。

図4から、FIR上では遠方銀河も近傍と同様の関係をもつことが示唆された。このことから、図2に見られた電離パラメータの進化の理由の一つとして、遠方ほど質量の割に高い星形成率をもつ銀河がよく見つかるため¹⁵⁾、典型的に高い電離パラメータをもつのだと捉えることができる。ここで簡単な比較をしてみたい。遠方銀河の中でも、LAEsは特に高い電離パラメータを平均的にもつことが示唆されている⁸⁾。近傍では、GPsが同程度の高い電離パラメータをもち¹⁶⁾、匹敵する質量や星形成率からも、LAEsの対応天体と思われる。そこで両者の個数密度を比較してみると、実にz~2 LAEsはGPsより100倍以上高い密度で存在することが判明した。同様の違いがz~3 LBGsとその近傍対応天体であるLBAsに対しても示唆されている¹⁰⁾。高い電離パラメータをもつ銀河は遠方ほど豊富に、かつ一般的に存在することがこれらの比較からもわかる。

2.4 z~3銀河のFMR: 再考

遠方銀河ほど典型的に高い電離パラメータをもつ傾向が示唆され、次に再考したいのがz~3銀河のFMRである。本稿の導入で触れたように、近傍で構築されたFMRは、z~3では成り立たないと示唆されている (図5の黒●)。このFMRの進

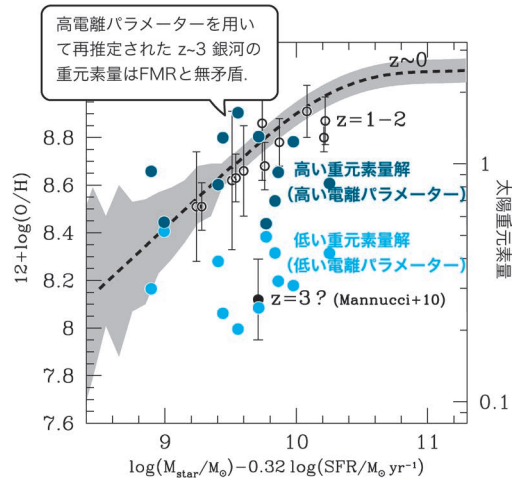


図5 FMR図。z=1-2銀河 (黒○) は近傍の関係 (黒曲線) に従うが、z~3 (黒●) では成り立たないと示唆されていた。濃薄の青●は、電離パラメータとともに再推定されたz~3銀河の重元素量。

化に関して、z~2と3の間で銀河進化を支配する物理が異なっている可能性とは別に、筆者らは、z~3銀河の重元素量が電離パラメータの進化を考慮に入れなかったために過小評価されている可能性について新たに考えてみる。

図5の黒●は、近傍で構築された輝線比-重元素量の経験的な関係を用いて求められたz~3銀河の平均的な重元素量を指し、近傍の電離パラメータを仮定していることになる。その仮定をなくすべく、筆者らは、光電離モデルを用いてz~3の個々の銀河の重元素量を電離パラメータとともに推定し直してみた。その結果が2種類の青●で表示されている。この方法では解が二つ求められてしまい、高い電離パラメータの解が濃い青で、近傍銀河並の低い電離パラメータの解が薄い青で、それぞれ描かれている。この図から、より高い電離パラメータを仮定することで、z~3の銀河まで無進化でFMRに従う解が存在することが明らかとなった。この傾向は、LBGsの近傍対応天体であるLBAsに対しても確認をすることができ、また理論予想ともよく合う¹⁷⁾。電離パ

ラメーターの進化が正しく、その進化を考慮に入れると、FMRは $z\sim 3$ まで文字どおり普遍的な関係であるのかもしれない。ではなぜ $z\sim 3$ で突然この事態が発生したかという点、電離パラメーターに特に敏感な $[\text{O III}]/[\text{O II}]$ 比を重元素量の主要な指標として用いていたからである。近傍の経験則を使うことで、高い $[\text{O III}]/[\text{O II}]$ 比を低重元素量と一意に解釈してしまっていたのだ。一方、 $z\leq 2.5$ の銀河に対しては、より重元素量に敏感な $[\text{N II}]/\text{H}\alpha$ 比も用いながら重元素量が推定されるため、電離パラメーター進化の重元素量測定に与える影響が比較的少なかったものと考えられる。

もし図5の濃い青●で表示された、FMRと無矛盾な [高重元素量, 高電離パラメーター] の解が正しい場合、遠方銀河ほど重元素量の割に高い電離パラメーターをもつことになる。つまり、FMRが普遍的であると仮定すると、その横軸である “ $\log(\text{星質量}) - 0.32 \log(\text{星形成率})$ ” が同じであれば、赤方偏移によらずに銀河は同程度の重元素量をもつ一方で、電離パラメーターは遠方銀河ほど高くなることになる。このことから、電離パラメーターは (質量で規格化されていない) 星形成率の絶対値にも依存するのだと推測される。遠方銀河は、すでに十分に星形成活動を行い星質量を獲得しつつも、ガスの流入によって活発に星形成を行い続け、相対的に多くの電離光子を H II 領域へ供給し、高い電離状態を維持しているのかもしれない。もしくは、近年言われているような密度の高い星形成領域によって高い電離状態が観測されている可能性もある¹⁸⁾。FIRに関するこれらの推測を観測・理論的により慎重に検証していくことが今後の課題となる。また忘れてはならないのが、従来報告されているような $z\sim 3$ 銀河の低い重元素量解も棄却できていない点である (図5の薄い青●)。 $z\sim 3$ 銀河に対して二つの解を信頼度高く見分けることは现阶段では難しい。 $\text{H}\alpha$ や $[\text{N II}]$ を観測できる近-中間赤外分光器を搭載する宇宙

望遠鏡 (例えば、James Webb Space Telescope) による将来の追観測が答えを出してくれるだろう。そして最後に、FMRやFIRの普遍性に関して、さらなる追試が必要であることは再度強調しておきたい。

こうした今後の課題は残るものの、本章から導かれる重要なことの一つは、用いる電離パラメーターによって銀河の化学進化の描像が全く異なって捉えられてしまう恐れがある点である。特に遠方銀河に対して、輝線スペクトルの解釈には慎重に臨まなければいけないことを自分自身改めて考えさせられた。

3. 銀河からの電離光子脱出

ここまで、電離パラメーターが銀河の性質とともにどう異なるのかを見てきた。最後に本章では、少し視点を変えて、電離パラメーターが銀河からの電離光子脱出とも密接にかかわっている可能性について議論したい。銀河からの電離光子脱出は、初期宇宙に起きたとされる宇宙再電離を考えるうえで欠かせない研究テーマである。観測的研究が難しい電離光子脱出を調べるための、輝線スペクトルを用いた新たな研究の切り口を紹介したい。

図4のFIRを再度見ていただきたい。この図で今注目してほしいのが、青の星印で示された電離光子放射が見られる近傍銀河 (LyC銀河) である。サンプルは二つと少ないものの、どちらも近傍銀河としては高い $[\text{O III}]/[\text{O II}]$ 比をもち、FIRの上側に位置しているように見える。この傾向は、電離光子が外部に漏れ出すような H II 領域をもつ銀河では、見かけ上 $[\text{O III}]/[\text{O II}]$ 比が (つまり、電離パラメーターが) 高く観測される可能性を示唆する。実際、筆者らは光電離モデルを用いてこの予想を裏づけることに成功している。その背景にあるのが、 $[\text{O II}]$ と $[\text{O III}]$ 輝線の放射領域の違いである。図6の H II 領域概略図をご覧ください。 $[\text{O III}]$ より低電離の $[\text{O II}]$ 輝線は、 H II 領域のより外側に卓越してその放射領

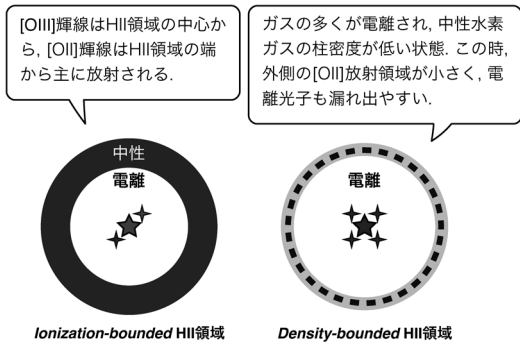


図6 通常のH II領域(左)では電離平衡が成り立つ。一方、ガスに対して多くの電離光子が供給され、中性水素ガス柱密度が低く電離光子が漏れ出るH II領域(右)をdensity-bounded H II領域と呼ぶ。

域を形成する。ガスの多くが電離され、中性水素ガス柱密度 ($N_{\text{H I}}$) が十分小さい場合 (density-bounded), 外側の [O II] 放射領域が小さくなるため、高い [O III]/[O II] 比が期待される。また、電離光子は density-bounded H II 領域からは脱出することができ、その脱出率 (f_{esc}) は $N_{\text{H I}}$ が小さいほど高くなる。この [O III]/[O II]- $N_{\text{H I}}$ 関係と f_{esc} - $N_{\text{H I}}$ 関係の組み合わせで、[O III]/[O II]- f_{esc} 間の正の相関が説明できるというわけである。

光電離モデルの計算から、高い電離光子脱出率に伴う [O III]/[O II] 比の増大率は2-4倍ほどであることが示唆されている。それほど顕著ではないものの、もし図4にある FIR が普遍的な関係であるとすると、近傍の二つの LyC 銀河同様、FIR の予想よりも高い [O III]/[O II] 比をもつ銀河は、高い電離光子脱出率をもつ銀河の候補になりうると考えられる。そういった観点では、遠方銀河の中でも特に高い [O III]/[O II] 比をもつ LAEs は、高い電離パラメーターをもつ可能性とは別に、高い電離光子脱出率をもつ銀河である可能性がある。この傾向自体は、 $z \sim 3$ の LAEs と LBGs の電離光子放射探査によってすでに示唆されていた^{19), 20)}。筆者らの示唆は、これらの過去の研究と整合性があることに加え、LAEs の高い電離光子脱出率の

物理的起源に迫ることができる点で新しいと言える。つまり、LAEs が中性水素ガス柱密度の低い銀河であるとする考えである。他の独立の観測量からも、LBGs に比べ LAEs の低い中性水素ガス柱密度が近年示唆されている^{21), 22)}。

もし LAEs が典型的に高い電離光子脱出率をもっているとすると、LAEs の宇宙再電離期における重要な役割が示唆されることになる。というのも、もし $z \sim 3$ の LBGs のもつような低い電離光子脱出率 ($f_{\text{esc}} \sim 5\%$ ²⁰⁾) を宇宙再電離完了時期とされている $z = 6-7$ の銀河がもつとすると、電離光子がその時代の銀河間空間を電離した状態に保てるほど十分供給されない可能性が指摘されていた²³⁾。遠方にいくほど LAEs の星形成銀河全体に占める割合が高くなる傾向が報告されており²⁴⁾、高い電離光子脱出率をもつ LAEs が豊富に存在することで、宇宙再電離完了時期の電離光子不足の懸念も自然に解決できると考えられる。

観測的にも理論的にも、銀河からの電離光子脱出の研究は容易でなく、まだ十分に研究が進んでいるとは言えないであろう。すばる望遠鏡で稼働を始めた超広視野主焦点カメラ Hyper Suprime-Cam を用いた将来のより大規模な遠方銀河の電離光子放射探査と、[O III]/[O II] 比を含む輝線スペクトルの精査、そして詳細な物理を取り込んだ理論予想とを組み合わせることで、銀河からの電離光子脱出の起源や銀河の性質に応じた電離光子脱出率の違いなどの未解決問題に迫ることができるであろう。また初期宇宙の銀河の性質を知るうえでも、LAEs をより大きなサンプルを用いて理解することは必須である。筆者らは世界最大規模の $z \sim 2$ LAEs サンプルを構築しており、その近赤外分光観測をすばる望遠鏡、Keck 望遠鏡、VLT を用いて率先して行っている。遠方銀河の性質や宇宙再電離期に果たす役割を明らかにすべく、これからも日々研究に励んでいきたいと思う。

謝 辞

本稿は筆者の学位論文の一部，ならびに2014年に筆者らが発表した投稿論文²⁵⁾に基づいている。より詳細な科学的議論はそちらを参照していただきたい。大学院時代の指導教官である嶋作一大氏，そして本研究の共同研究者である大内正己氏には，遠方銀河の観測的研究の初歩から指導をしていただいた。この場を借りて改めて感謝の意を表したい。本稿を書く機会を与えてくださった大栗真宗氏には，本稿を書き上げるにあたりたいへんお世話になった。

参考文献

- 1) 例えば, Tremonti C. A., et al., 2004, ApJ 613, 898
- 2) 例えば, Finlator K., Davé R., 2008, MNRAS 385, 2181
- 3) 例えば, 最新の結果として, Yabe K., et al., 2014, MNRAS 437, 3647
- 4) Mannucci F., et al., 2010, MNRAS 408, 2115
- 5) 例えば, Nagao T., et al., 2006, A&A 459, 85
- 6) 例えば, Lilly S. J., Carollo C. M., Stockton A. N., 2003, ApJ 597, 730
- 7) Kewley L. J., Dopita M. A., 2002, ApJS 142, 35
- 8) Nakajima K., et al., 2013, ApJ 769, 3
- 9) Cardamone C., et al., 2009, MNRAS 399, 1191
- 10) Heckman T. M., et al., 2005, ApJ 619, L35
- 11) Bergvall N., et al., 2006, A&A 448, 513
- 12) Leitert E., et al., 2013, A&A 553, A106
- 13) Cullen F., et al., 2014, MNRAS 440, 2300
- 14) Holden B. P., et al., 2014, ApJ, submitted (arXiv:1401.5490)
- 15) Daddi E., et al., 2007, ApJ 670, 156
- 16) Jaskot A. E., Oey M. S., 2013, ApJ 766, 91
- 17) Davé R., Finlator K., Oppenheimer B. D., 2011, MN-

- RAS 416, 1354
- 18) Shirazi M., Brinchmann J., Rahmati A., 2014, ApJ 787, 120
 - 19) Iwata I., et al., 2009, ApJ 692, 1287
 - 20) Nestor D. B., et al., 2013, ApJ 765, 47
 - 21) Hashimoto T., et al., 2013, ApJ 765, 70
 - 22) Shibuya T., et al., 2014, ApJ 788, 74
 - 23) 例えば, Ouchi M., et al., 2009, ApJ 706, 1136
 - 24) 例えば, Stark D. P., Ellis R. S., Ouchi M., 2011, ApJ 728, L2
 - 25) Nakajima K., Ouchi M., 2014, MNRAS 442, 900

Ionization State of Inter-Stellar Medium in Star-Forming Galaxies

Kimihiko NAKAJIMA

Geneva Observatory, University of Geneva, 51 Ch. des Maillettes, 1290 Versoix, Switzerland

Abstract: We present a systematic study for ionization state of inter-stellar medium in galaxies at $z=0-3$. We identify a tendency that a high ionization parameter is found in galaxies with a low stellar-mass, high specific star-formation rate, and/or low metallicity. The confirmed redshift evolution of ionization parameter could be due to the increased star-formation rate for its stellar-mass at higher redshift. We also discuss an effect of ionization parameter on metallicity estimates, as well as a correlation between ionization parameter and ionizing photon escape from galaxies.