論文の内容の要旨

論文題目　The Chemical Evolution and Ionization State of Star-Forming Galaxies

（星形成銀河の化学進化と電離状態）

氏名　中島王彦

銀河の星間物質の物理状態を理解することは銀河進化を探る上で欠かせない．特に，気相の重元素量と電離パラメーターは重要な性質である。重元素量とは水素とヘリウム以外の元素の量を指し，銀河の星形成活動の歴史やガスの流出・流入を強く反映する．そのため，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・星形成活動依存性を理解することは重要だと言える．一方の電離パラメーターとは，HII 領域における電離光子の水素原子に対する個数比を指し，銀河の電離状態を反映する．電離光子スペクトルに強く依存する電離パラメーターは，重元素量とともに HII 領域から放射される輝線に大きな影響を与える．言い換えると，輝線を元に推定された重元素量には電離パラメーターの不定性が残る．しかしながら，これまでの多くの遠方銀河研究では，近傍の電離パラメーターを仮定して重元素量が推定され，銀河の化学進化が議論されてきている．この仮定の妥当性を含め，電離パラメーターの研究は十分に進んでいない．

そこで本研究で我々は，赤方偏移 z~0 から 3 の銀河に対して，電離パラメーターと重元素量の系統的研究を行った．観測から得られた[OIII]5007/[OII]3727 比と([OIII]5007,4959+[OII]3727)/Hβ 比 (R23-index) を光電離モデルと比較して電離パラメーターと重元素量を求めた (図 1 と 2).

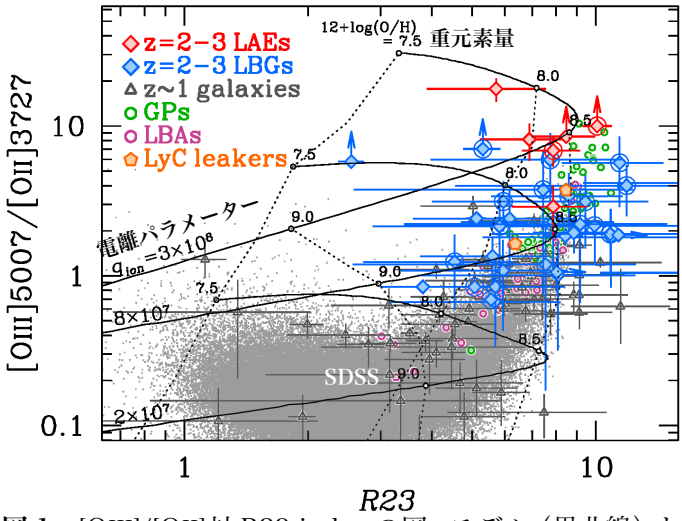

図 1　[OIII]/[OII]対 R23-index の図．モデル（黒曲線）との比較から，(i) SDSS 銀河（灰色）でも，R23-index の大きい銀河ほど高い[OIII]/[OII]比を示し，(ii) 近傍銀河に比べて遠方銀河 (LAE が赤印，LBGs が青印) の高電離パラメーター・低重元素量が示唆される．近傍の GPs や LBAs (緑と紫印) も遠方銀河と似た性質を示す．

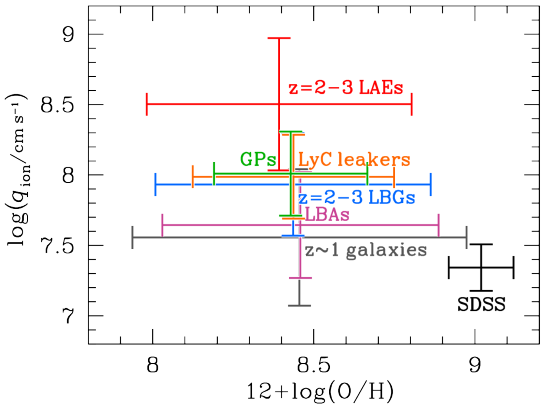

図 2　[OIII]/[OII]比と R23-index の関係から求められた各銀河サンプルの平均的な電離パラメーターと重元素量．重元素量はエラーが大きいが，電離パラメーターの違いは読み取れる．SDSS 銀河に比べ，遠方銀河や GPs などの高い電離パラメーターが示唆される．

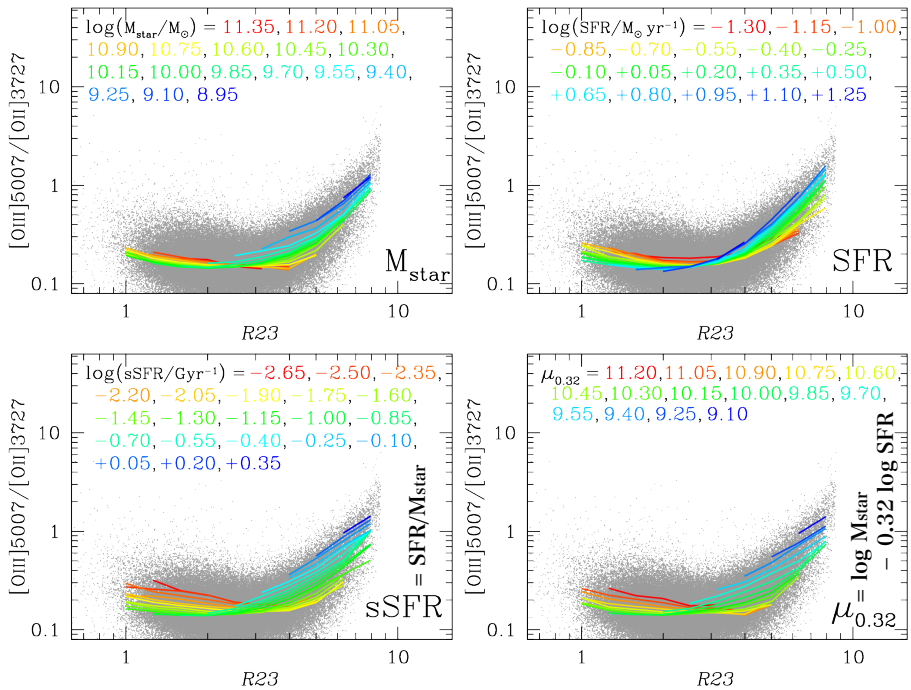

図3　SDSS銀河の[OIII]/[OII]比とR23-indexの関係(灰色)と，その星質量（左上），星形成率（右上），比星形成率（左下），$\mu_{0.32}$（右下）の依存性．色の違いが，各物理量の値(各パネル上部に記載）に応じた[OIII]/[OII]比と R23-index の関係の違いを表す．小質量，高星形成率の銀河ほど高い[OIII]/[OII] 比と R23-index (i.e. 高電離パラメーター・低重元素量）を持つ傾向が見て取れる．

まず第 2 章では，近傍銀河の電離パラメーターと重元素量の系統調査を紹介する．Sloan Digital Sky Survey (SDSS) で探査された~140,000 天体を用いた．[OIII]/[OII]比と R23-index の関係から，近傍銀河は典型的に 12+log(O/H)~9.0 の重元素量，log(q_{ion}/cm s^{-1})~7.3 の電離パラメーターを持つことがわかった(図 2).

次に我々は，その典型値からのばらつきに着目した．R23-index が大きい銀河ほど高い[OIII]/[OII]比を示す傾向があり（図 1 灰色点），重元素量が低い銀河ほど高い電離パラメーターを持つことが示唆される．重元素量は銀河の星質量や星形成率と強く相関することが知られており，その[OIII]/[OII]比 vs. R23-index 関係への依存性を探った結果，小星質量・高星形成率の銀河ほど高い[OIII]/[OII]比・高い R23-index を持つことがわかった（図3）．この傾向は，小星質量・高星形成率の銀河ほど高電離パラメーター・低重元素量を持つことを示唆している．この4次元空間の関係を2次元で表現したものが図 4 である．

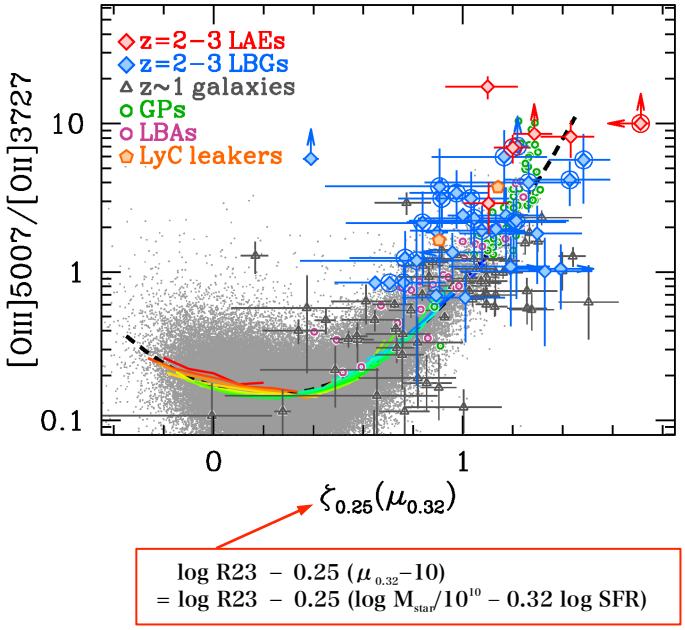

図4　SDSS銀河に見られた[OIII]/[OII]比と R23-index の関係の質量・星形成率依存性を補正した関係（異なる色の曲線が共通の黒破曲線で表現できている). SDSS 銀河で構築された関係だが，他の近傍銀河や遠方銀河も同一の関係を満たしていることが示唆される．よって，この黒破線で表される関係式を Fundamental Ionization Relation (FIR) と呼ぶ．ただし，近傍の LyC leakers やいくつかの遠方の LAEs は更に高い[OIII]/[OII]比を持っているかもしれない．これは，これら銀河の電離光子脱出と関わっていると考えられる．

近傍銀河サンプルとしては，SDSS 銀河に加えて，遠方銀河の対応天体と考えられている Green Pea 銀河 (GPs), Lyman-break Analogs (LBAs), そして電離光子放射が観測されている銀河 (LyC leakers) も考慮している．これら銀河は SDSS 銀河の典型値に比べ高電離パラメーター・低重元素量を持っているのだが (図 2), SDSS 銀河で構築された質量-星形成率-重元素量-電離パラメーター関係と同じ関係を持つことが示唆された (図 4). 近傍では幅広い星質量・星形成率の範囲において，この関係が成立していると考えられる．

重元素量や電離パラメーターの進化を調べるため，第 3 章と 4 章では，以上の研究を遠方銀河へ拡張する．まず第 3 章では，Lyα 輝線を基に選択される Lyα 輝線銀河 (LAEs) に着目し，その物理量を報告する．従来の遠方銀河研究は連続光を基に選択された明るい大質量銀河 (e.g., Lyman-break 銀河; LBGs) に偏っており，特に <~$10^{9.5}M_{\odot}$の低質量銀河の観測が欠けていた．我々は Subaru/Suprime-Cam に搭載された独自の狭帯域フィルターNB387 を用いて巨大な z=2.2 LAE サンプルを構築し (詳細は Appendix A を参照)，その詳細な性質を探っている．
Keck/NIRSPEC と Magellan/MMIRS を用いた近赤外分光観測によって，我々は 2 つの LAEs から[OII], [OIII], Hβ, Hα 等の複数輝線の検出に成功した．[OII]の分光観測に成功した LAEs の初報告である．観測された[OIII]/[OII]比と R23-index から，LAEs の非常に高い電離パラメーターと低い重元素量が示唆された (Appendix B も参照)．また，z=2.2 LAEs の[OII]と Hα(+[NII])輝線は既存の二つの近赤外狭帯域フィルターで捕えることができる．約 100 個の LAEs の近赤外狭帯域画像を重ね合わせることで，平均的な LAEs の[OII]と Hα(+[NII])輝線の検出に成功した．その輝線比から，平均的な LAEs の重元素量に対して下限値を得た (Appendix C も参照)．これらの物理量は，遠方小質量銀河の新たな知見をもたらし，LAEs という未だ謎の多い銀河種族の研究に大いに貢献する．

そして第 4 章では，我々の同定した z=2.2 LAEs を加えた計 39 個の遠方銀河 (z=2-3)，更には 69 個の中程度に遠方の銀河 (z=0.5-1.5) を用いて，より遠方の銀河の電離パラメーターや重元素量の結果を近傍銀河の結果と比較しつつ，報告する．
z=2-3 の遠方銀河は，SDSS 銀河に比べ有意に高い[OIII]/[OII]比・R23-index を持ち (図 1)，近傍銀河に比べ 4-10 倍以上も高い電離パラメーターを典型的に示すことが確認できた (図 2). z~1 の銀河はちょうど近傍と z=2-3 銀河の中間程度の高さの電離パラメーターを持っている．これらは，電離パラメーターの赤方偏移進化を示唆している．興味深いことに，近傍で構築された質量-星形成率-重元素量-電離パラメーター関係は遠方銀河に対しても成立しているように見える (図 4). z~3 という遠方銀河まで無進化で成り立つと示唆されるその普遍性から，この 4 次元空間での関係を Fundamental Ionization Relation (FIR) と呼ぶ．

最後に，第 5 章において我々は以上の幅広い赤方偏移，星質量，星形成率の銀河を用いた電離パラメーター・重元素量の系統的研究から得られた結果の考察をする．
まず，電離パラメーターの赤方偏移進化について考察する．FIR 上では遠方銀河も近傍と同様の関係を持つことから，この赤方偏移進化には銀河の星質量，星形成率の進化が深く関連していると考えられる．遠方ほど質量の割に高い星形成率を持つ銀河が増えるために，典型的により高い電離パラメーター・低い重元素量を示すのだと考えられる．GPs や LBAs のような，近傍でも遠方銀河並に高い電離パラメーターを持つ銀河は存在するが，近傍では稀である (SDSS の~0.06%).
次に，質量-星形成率-重元素量-電離パラメーター関係 (FIR) について考察する．この関係の赤方偏移に依らない普遍性が本研究で示唆された．これは，z~2 と 3 の間で重元素量が急激に進化したとする質量-星形成率-重元素量関係 (Fundamental Metallicity Relation; FMR; Mannucci et al. 2010) とは対照的である (図 5). 過去の多くの研究では，遠方銀河に対して近傍銀河に見られる典型的な電離パラメータ

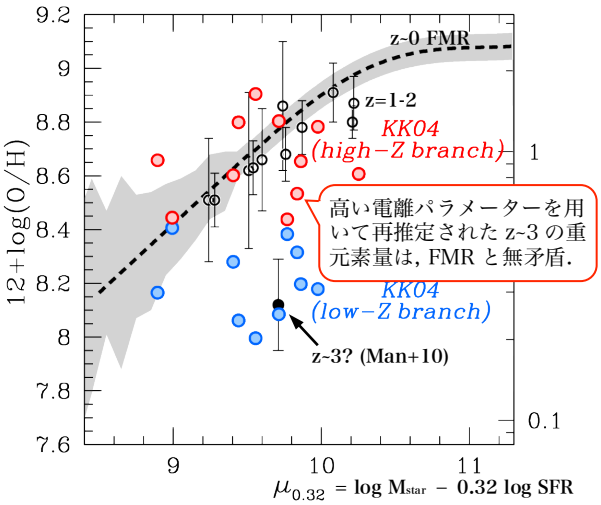

図 5 FMR 図．黒曲線が SDSS 銀河による近傍の FMR (Mannucci et a. 2010). z=1-2 銀河 (穴空き丸) は近傍の FMR に従うが，z~3 (黒丸) では成り立たないと示唆されていた．我々は z~3 銀河の重元素量を電離パラメーターと共に再推定した (赤点と青点). 2 つの重元素量の不定性があるが，より高い電離パラメーターで説明できる赤点に着目すると，z~3 銀河も共通の FMR に従う可能性がある．

ーを仮定して重元素量が求められてきた．我々は，z~3 の銀河に対してより高い電離パラメーターを用いることで，z~3 の銀河まで無進化で FMR に従う解を見つけた (図 5)．FMR や FIR の普遍性は更なる追試が必要であるが，用いる電離パラメーターによって異なる銀河進化の描像が得られてしまうことは確かであり，銀河の化学進化を正しく理解する上でも電離パラメーターが重要であることが強く示唆される．

我々は更に，近傍の LyC leakers が特に高い[OIII]/[OII]比を持つことに着目した (図 4)．これは，電離光子が外部に漏れ出すような HII 領域では，電離パラメーターが見かけ上大きくなる可能性を示唆する．[OII]より高階電離した[OIII]輝線は，HII 領域のより内側に卓越してその放射領域が形成される．中性水素ガスの大部分が電離され，中性水素の柱密度が小さく，HII 領域がむき出しの場合 *(density-bounded)*，[OII]放射領域が小さくなるため，高い[OIII]/[OII]比が期待される (図 6)．Density-bounded HII 領域からは電離光子も出やすいため，[OIII]/[OII]比と電離光子脱出率との間の正の相関が説明できる．我々は光電離モデルを用いてこの予想を定量的に裏付けることに成功している．

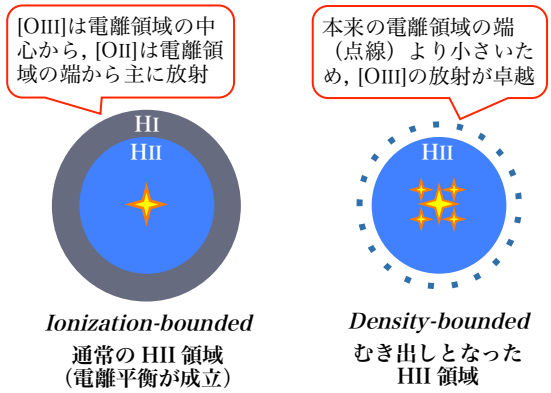

図 6　通常の HII 領域 (左) では星の周りが電離され，その周りを中性水素ガスが取り囲む．中心の星によってまわりの中性水素ガスが全て電離されると，HII 領域がむき出しとなる (右)．

遠方銀河の中でも特に高い電離パラメーターが観測されている LAEs のような銀河は，形成初期の若い銀河か，高い電離光子脱出率を持つ銀河の可能性がある．後者の場合，LAEs のような銀河が z~6 以遠で起こったとされる宇宙再電離の重要な電離源になり得ると考えられる．再結合線である Lyα 輝線は電離光子脱出に伴い弱くなるが，脱出率が ~80%以下であれば LAE として同定可能であることもモデルで実証している．

最後に，我々は独自の観測で突き止めた LAEs の基本的な性質を紹介・議論している．特に注目すべき特徴が，LAEs の質量-重元素量関係である．電離パラメーターやガス温度を基に丁寧に求められた LAEs の重元素量は，質量に強く依存せず，おおむね低い (~0.1$Z_{\odot}$) 傾向が明らかになってきた．これは近傍銀河や遠方の LBGs とは対照的である．低い重元素量と高い電離パラメーターは，LAEs が大質量星の卓越した形成初期の若い銀河である可能性を支持する．また星形成率の違いを考慮に入れた FMR 上では，LBGs との不一致が軽減されている．他の多くの銀河種族と同様に，LAEs の重元素量はガスの流出・流入によって大きく支配され，星質量と星形成率でうまく記述できることが示唆される．しかしながら，LAEs の中には FMR でも FIR でも依然としてうまく説明できない銀河もいる．これら特殊な銀河に対しては，先に議論したように，電離光子脱出率が重要な性質になると考えられる．