

Exploration of Ionizing Radiation Escaping from Star-Forming Galaxies

星形成銀河から漏れ出す電離放射の探究

岩田 生^{*}, 井上 昭雄⁺

^{*}:国立天文台 岡山天体物理観測所 iwata@oao.nao.ac.jp

⁺:Laboratoire d'Astrophysique de Marseille, France

ビッグバンの後, 赤方偏移1000付近で一旦中性化した宇宙空間の水素原子は, 天体形成に伴う紫外線放射によって再び電離状態になったとされる. この「宇宙再電離」と呼ばれる現象が, いつ, どのようにして起こったのかを知ることは, 宇宙初期における天体構造形成を理解する上での鍵である. このポスターでは, 宇宙再電離についての星形成銀河の寄与を探る上で極めて重要なファクターである, 電離光子の銀河からの漏れ出しを探索する研究について, 現在我々が進めている取り組みと, 次世代望遠鏡での観測の見通しについて紹介する.

何が宇宙再電離を起こしたのか？

活動銀河核 (AGN)

現在の宇宙においてはAGNが銀河間空間の電離放射の主要な成分であると考えられているが、赤方偏移3より遠方では明るいQSOの数密度が減少していることが分かっている。宇宙初期にこれまでに知られているものとは大きく異なるAGNが存在しない限り、AGNが宇宙再電離を起こした電離光子の主要な放射源であったとは考えにくい。

星形成銀河 / Population-III Stars

すばる望遠鏡をはじめとする大型望遠鏡やHSTを用いたライマンブレイク法や狭帯域フィルターによる Lyman α Emitter探査で赤方偏移6を超える "Dark Age" (の末期)にも銀河が見つかってきている。その数密度、光度関数にはまだ信頼性の向上の余地があるが、銀河間ガスを電離状態に保つだけの電離光子を放射できる位の数密度はある可能性がある。すなわち、Population-III stars もしくはその後の星形成銀河が宇宙再電離の過程で最も重要な役割を果たした可能性が高いと思われる。

星形成銀河から電離光子が実際に銀河間空間に放出されているのか、されているとすればどれくらいの割合で中性水素ガスによって吸収されてしまうのか、という基本的な事柄が、観測的には全くと言ってよいほど分かっていない。このため、高赤方偏移銀河からの電離背景放射への寄与の見積もりは、電離光子の漏れ出しの割合を仮定して推定せざるを得ないのが現状である。宇宙再電離への銀河からの寄与を定量的に理解する為には、**電離光子の銀河から銀河間空間への漏れ出しの割合(Escape Fraction)を知ることは必須の条件**である。

Escape Fractionは銀河ごとに大きく異なる可能性が指摘されている。紫外線光度、ガス質量、形態などの諸要素がEscape Fraction にどのように関わるのかを統計的に調べるため、多数の銀河の深い観測を行うことが急務と言える。

Escape Fractionの定義

$$f_{\text{esc}} \equiv \frac{L_{\text{LC}}^{\text{out}}}{L_{\text{LC}}^{\text{int}}}$$

$L_{\text{LC}}^{\text{out}}$: 銀河から銀河間空間へ漏れ出した電離光子の光度

$L_{\text{LC}}^{\text{int}}$: 銀河内の星から放射された電離光子の光度の総和

観測的には $\frac{F^{\text{UV}}}{F^{\text{LC}}}$

F^{UV} : 観測された非電離UV光 flux密度 (例えば1500 Å)

F^{LC} : 観測された電離光 flux密度 (例えば900 Å)

が得られる. Escape Fractionへの変換にはintrinsicな電離光fluxやISMによる吸収について, 仮定やモデルが介在する.

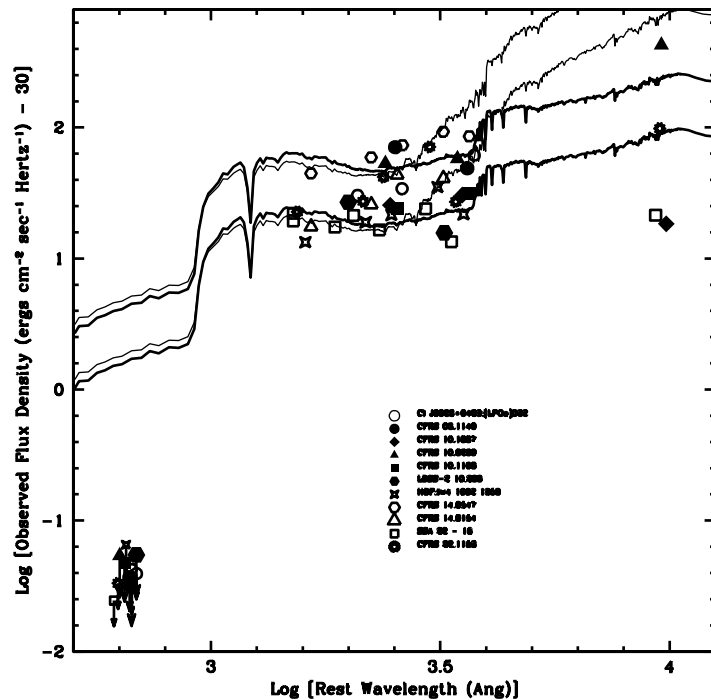
銀河からの電離放射のこれまでの観測

* 近傍銀河: スペースからのFUV観測

e.g., Leitherer et al. 1995 ApJ 454, 19; Deharveng et al. 2001 A&A 805, 813

* $z \sim 1$: HST/STIS Imaging (Malkan et al. 2003 ApJ 598, 878)

1.1 < z < 1.4 の 11 個の星形成銀河について Escape Fraction が 6% 以下という強い制限を与えた。



Malkan et al. 2003

* $z \sim 3$:

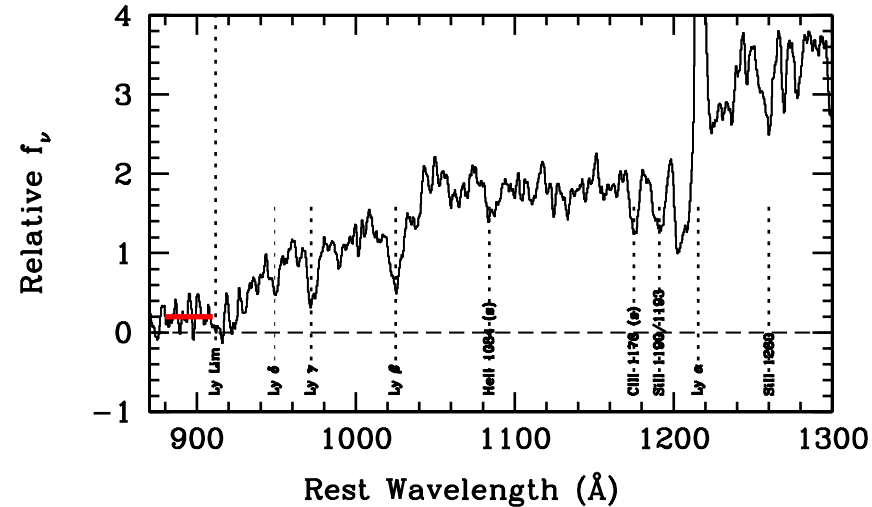
Steidel et al. 2001 ApJ 546, 665

29個の Lyman Break 銀河 $\langle z \rangle = 3.40 \pm 0.09$ の合成スペクトルで Lyman continuum を検出. $F_{UV}/F_{LC} = 4.6 \pm 1.0$. $f_{esc} > 0.5$ (=高い Escape Fraction?)

Giallongo et al. 2002, ApJ 568, L9

2個の明るい Lyman Break 銀河について深い分光観測を行い、Lyman continuum を検出しなかった. $F_{UV}/F_{LC} > 69$ (=低い Escape Fraction?)

矛盾する結果? より多くの観測が必要!



Steidel et al. 2001

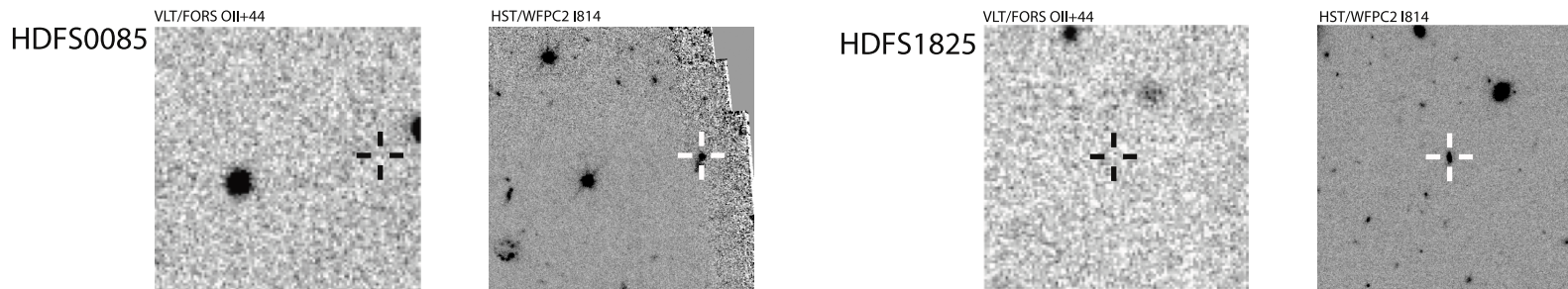
我々が現在推進している研究 (1)

Narrow-band Imaging of Star-forming Galaxies at $z \sim 3.2$ in the Hubble Deep Field - South

Inoue et al., submitted to A&A

Iwata et al., in prep.

HDF-S内の photometric redshift 3.2 付近の銀河に対し、分光観測で赤方偏移を決定するとともに、Narrowband Filterを用いた深い撮像で電離光子の漏れ出しに制限を与えることを目的とした観測を、ESO VLT/FORSを用いて行った。この観測によって赤方偏移3.2付近の二つの銀河について、 $F_{UV}/F_{LC} > 15.6$, $F_{UV}/F_{LC} > 10.2$ という下限値を得た。平均的なIGMやISMによる吸収を考慮して、これらの銀河での電離光子のEscape Fractionはそれぞれ17%, 38%以下であることが分かった。この観測によって、狭帯域フィルターを用いた観測が、Escape Fractionの探査に有効であることが実証された。



VLT/FORSによる狭帯域イメージとHST/WFPC2によるI-bandイメージ

我々が現在推進している研究 (2)

Subaru Spectroscopic Search for Ionizing Radiation from Lyman A Emitters and Lyman A Blobs in the SSA22 Region

SSA22領域には、Steidelらによって発見されたLyman α で輝く巨大ガス天体(Lyman A Blobs; LABs)をはじめ、すばるによる狭帯域撮像で発見されたLABs, Lyman α Emitters(LAEs)が多数存在しており、 $z=3.1$ における原始銀河団の有力な候補である。これらの天体はそのLyman α 輝線の状態から、電離光子が漏れ出しやすい状態にある可能性がある。すばる/FOCASによる深い分光観測で、電離光子の検出を目指す観測をすばるS05A期に提案している。

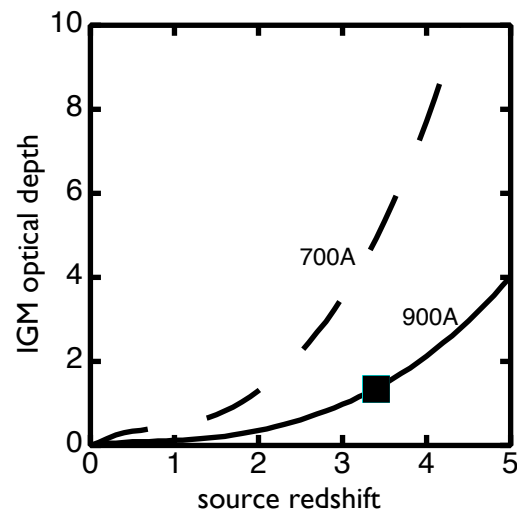
(松田有一氏(東北大/NAOJ), 山田亨氏(NAOJ)らとの共同研究)

Subaru/Suprime-Cam Imaging Search for Ionizing Radiation from High-z Star-forming Galaxies

狭帯域撮像による観測は、分光観測に比べ (1)スリットから外れた光のロスがない、(2)多天体分光よりも効率よく多数の天体について観測できる、というメリットがあり、最適化されたフィルターを用いれば非常に強力な手段となる。すばる/Suprime-Camの広視野を活かし、専用のフィルターを製作してこれまでになく深く、多数の天体について観測し、電離光子の検出やescape fractionへの強い制限を与える研究を計画している(2005年度科研費申請中)。天域としてはSSA22やSubaru-XMM Deep Survey領域を候補としている。

何故赤方偏移3-4か？

明るいQSOの分光観測から、IGMにおける中性水素の再電離は赤方偏移6以遠で起こったと考えられている。再電離の過程に関与した天体を直接調べるためには、赤方偏移6より遠方の銀河についてEscape Fractionを調べるのが望ましい。だが、IGMのoptical depthは赤方偏移が大きくなるほど急激に上昇する (see Inoue et al. 2005)。このため、現在の観測装置では赤方偏移4よりも遠方の銀河を観測しても、Escape Fractionに有意義な制限を与えることは不可能である。一方、赤方偏移3よりも近傍では、Lyman continuumの波長域が地上から観測できないFUV領域に入ってしまう、スペースからの観測が必要となる。したがって、赤方偏移3付近は、地上望遠鏡の集光力を活かした遠方銀河のEscape Fractionを調べることのできる「観測の窓」になっている。



Lyman α forest / Lyman Limit Systemsの観測に基づいて求められた、700A, 900Aでの平均的なIGMのoptical depthの、赤方偏移ごとの変化 (Inoue et al. 2005).

Extremely Large Telescopeでの観測へ

Extremely Large Telescopeによる圧倒的な集光力は、星形成銀河から漏れ出しIGMを通過してくる微小な電離光子を捉える上で力強い助けとなることが期待される。ここでは口径30mのELTを用いた場合、どれくらいの感度で探査を行うことができるかを検討する。

電離光子の放射についての仮定

- * Escape Fraction: 5%
- * ISMによる紫外光の吸収: $A_V \sim 0.65$: $\tau = 1.90$ (Calzetti Law)
(典型的なLyman Break銀河のdust吸収)
- * IntrinsicなUV光とLyman continuumのflux比: $LLC / LUV = 0.2$
(Constant SFR, sub-solar Metallicity, age=100Myrに相当)
- * 非電離UV光のluminosity: L^* of LBG at $z \sim 3$ ($M^* = -20.98$)
- * IGM attenuation: 平均的なIGM吸収 (Inoue et al. 2005)
- * みかけの天体サイズは0.6arcsec

観測装置の設定

撮像: 中間帯域フィルター(半値全幅100~200 Å)
特定の赤方偏移の天体の880~910 Åをトレース
するよう最適化

分光: 低分散分光($R=100\sim 200$)

CCD感度: MIT CCD

大気輝度, 大気吸収: Mauna Keaの観測値

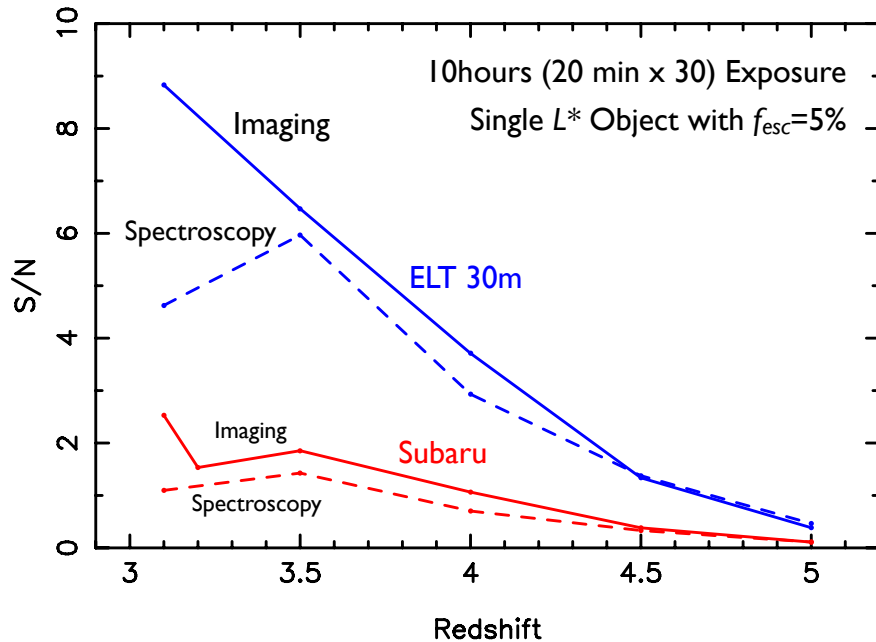
ELTのread-out noiseや波長感度特性はSuprime-Camの
それに準ずるものとし, 25%のケラレを考慮した。

20分x30回(=計10時間)の積分で得られるS/Nを計算した。

以上のような条件のもと, $z=3\sim 5$ の天体を観測した場合のS/Nを推定する。Escape Fractionがより大きければ, 電離光子の検出はより容易になる。

Extremely Large Telescopeでの観測へ

計算結果



Subaru Imaging $z=3.2$ はFOCASの既存のNB373フィルターを使用した場合の計算.

- * 最適化されたフィルターを用いた撮像の方が若干分光よりも良いS/Nを得られる.
- * 大局的に見て遠方の方がS/Nが下がるのは、天体が暗くなることと、IGMのoptical depthが大きくなることによる.
- * 分光の場合 $z=3.1$ の方が $z=3.5$ よりもS/Nが悪いのはグリズムの効率が落ちているため.
- * 30mのELTでは1個の天体についてでも、現実的な観測時間で $z=4.5$ 位までescape fractionについて有意義な制限を与えることが可能である. さらに、広視野カメラの搭載が可能であれば、多数の天体のイメージをcompositeすることで \sqrt{N} 倍のS/Nを達成できる. それによって $z=5$ 付近でも電離光子の検出が可能になるかもしれない.