

銀河から脱出する電離光子を探して

井上 昭雄

〈大阪産業大学教養部物理学教室 〒574-8530 大東市中垣内 3-1-1〉
e-mail: akinoue@las.osaka-sandai.ac.jp

岩田 生

〈国立天文台岡山天体物理観測所 〒719-0232 岡山県浅口市鴨方町本庄 3037-5〉
e-mail: iwata@oao.nao.ac.jp



井上



岩田

宇宙のルネッサンス「宇宙再電離」とは、宇宙の初期に存在した何らかの天体からの強力な電離紫外線により、銀河間空間の中性水素が電離されてしまう現象である。有力な電離紫外線源として原始銀河が考えられるが、その寄与は謎に包まれている。なぜなら、星からの電離光子は銀河内に存在する中性水素に吸収されやすく、銀河間空間に十分に供給されない可能性があるからだ。宇宙再電離に銀河が重要な役割を果たしたかどうかの鍵は、銀河から銀河間空間への電離光子の脱出率である。本稿では、銀河からの電離光子脱出率を測定する筆者らの試みを紹介する。

1. はじめに

宇宙は今から 137 億年前にビッグバンで始まったと考えられている。その際、時空とともに物質も創生された。宇宙の膨張とともに物質の温度は下がり、当初、電離（イオン化）状態にあった水素原子（陽子）は電子と結合して中性水素となる。この時期を宇宙の晴れ上がりという。その後も宇宙膨張とともに温度が下がり続ける。当時は天体など誕生しておらず、この時代を「宇宙の暗黒時代」と呼ぶ場合がある。しばらくすると宇宙で最初の天体が誕生し、それらから強力な紫外線が放射されるようになる。紫外線に照射された中性水素は電子を放出し、電離する。このような電離領域が徐々に広がり、また、重なり合い、最終的に宇宙空間のほとんどが電離されてしまう。これが「宇宙再電離」と呼ばれる現象である（図 1）。暗黒時代に終焉をもたらす、銀河、恒星、惑星などの

多様な天体からなる現在の宇宙を形作る端緒となった、まさに「宇宙のルネッサンス」といえるよう。

宇宙再電離期以降、宇宙空間、正確には銀河間空間は、ずっと電離状態にある。このような電離宇宙が発見されたのは、赤方偏移 2 程度の QSO が観測され始めた 1965 年のことである¹⁾。以来およそ 40 年、宇宙再電離問題は多くの研究者の関心を集めてきた。21 世紀に入り、赤方偏移 6 程度の QSO の観測や WMAP 衛星による宇宙マイクロ波背景放射の観測により、宇宙再電離期は赤方偏移 10 程度から始まり 6 程度で完了したことが明らかになってきた²⁾。つまり、宇宙再電離とは宇宙の年齢が約 5 億年から 10 億年ごろにかけてのできごとである。

宇宙再電離の始まりと終わりのおよその時期は特定されたのであるが、どんな天体がどのように宇宙を電離したのかはいまだによくわかっていな

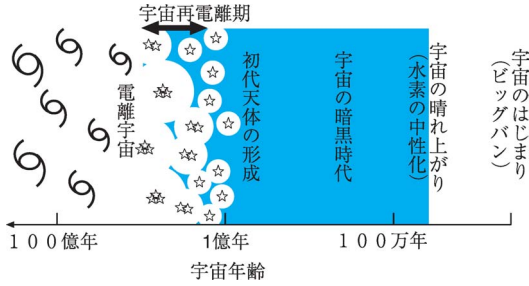


図1 宇宙再電離過程. 宇宙の晴れ上がり（再結合期）以降，宇宙はいったん中性化する．天体形成に伴う紫外線により宇宙は再び電離される．図中の青色部分は中性化している時期を表す．

い．最近，赤方偏移6を超えるような，まさに宇宙再電離期に存在した銀河が徐々に見つかってきており，そのような銀河が宇宙を電離した可能性がある*1．特に，ライマンα輝線銀河 (Lyman α emitter) はたいへん興味深く，それらを使って宇宙再電離の詳しい様子を調べる研究もなされている³⁾．現在でも，宇宙再電離期は観測情報が非常に限られているので，その様子を理論的に予想する研究も行われている．例えば，冷たい暗黒物質と暗黒エネルギーを主要な構成要素とする標準宇宙論モデルに基づいた天体形成・銀河形成の数値シミュレーションを使えば，宇宙再電離の様子を詳しく予想することができる⁴⁾．ここで問題となるのが，シミュレーション内でできた銀河がどのくらい電離光子を放射するかがよくわからないことである．この仮定しだいで，宇宙再電離の様子が大きく変わってしまう．そこで筆者らは，銀河の電離光子放射率，特に，銀河から銀河間空間への「電離光子の脱出率」を決定したいと考えている．本稿では，筆者らの最近数年間の成果をまとめて報告する．

2. 銀河からの電離光子

ここでは，銀河内の星から放射された電離光子が宇宙空間を伝搬する様子(図2)と，銀河からの電離光子脱出率を推定する方法について説明する．

電離光子とは，波長が912 Åより短い光子である．このような光子が中性水素原子に吸収されると，原子内の電子が光子のエネルギーを得て原子から飛び出し，電離する．中性水素原子は電離光子を効率良く吸収する（吸収断面積が大きい）ので，媒質に中性水素原子が少しでもあれば，電離光子は大きく吸収される．銀河内の星間空間には一般に大量の中性水素原子が存在するので，銀河から脱出し，銀河間空間に到達する電離光子の割合はかなり小さいと予想される．また，星間空間に存在するダスト（宇宙塵）も電離光子を吸収する．銀河内で星が生産した電離光子の光度を $L_{\text{生産}}$ ，銀河から脱出した電離光子の光度を $L_{\text{脱出}}$ と表すと，電離光子の脱出率 $f_{\text{脱出}}$ は，

$$f_{\text{脱出}} = \frac{L_{\text{脱出}}}{L_{\text{生産}}} \tag{1}$$

と書ける．

宇宙再電離期以降の電離宇宙にも，ごく少量の中性水素原子が残っている．これらは銀河間空間にフィラメント状に分布していると考えられており，遠方 QSO スペクトルにライマンα吸収線を刻み込む．このような銀河間空間の中性水素原子の塊をライマンα雲と呼ぶ．ライマンα雲は電離光子も吸収するので，銀河から脱出した電離光子の量は，われわれのもとに到達する前にさらに減少する．また，銀河間空間にダストが存在すればそれによる吸収もある．

QSO スペクトルに刻まれるライマンα吸収線の分布から，ライマンα雲の分布の統計的性質が

*1 4節で見るとように，高赤方偏移では QSO からの電離光子の寄与は小さいと考えられている．

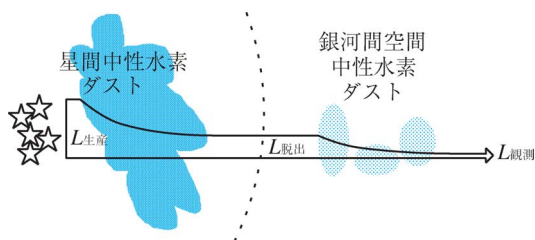


図2 銀河から脱出する電離光子の観測. 星から放射された電離光子 ($L_{生産}$) は、まず、銀河内の星間空間に存在する中性水素に吸収される. 吸収されずに脱出した電離光子 ($L_{脱出}$) も、銀河間空間に残っている中性水素により吸収される. わずかに残った電離光子を検出する ($L_{観測}$). L は光度 (luminosity) を意味する.

明らかになっている⁵⁾ので、それを使えば銀河間空間での電離光子吸収量の平均値を計算することができる. それに基づく銀河間吸収量の平均的補正因子 $C_{銀河間}$ を電離光子の観測光度 $L_{観測}$ に掛ければ、脱出光度 $L_{脱出}$ を求めることができる. つまり、

$$L_{脱出} = C_{銀河間} L_{観測} \quad (2)$$

である. ただし、銀河間吸収は視線方向によるばらつきが大きいので、平均的補正因子による見積りでは個々の視線方向での誤差はやや大きい.

電離光子脱出率 $f_{脱出}$ を求めるには、脱出光度 $L_{脱出}$ に加えて、生産された電離光子光度 $L_{生産}$ も必要である [式(1)]. 遠方銀河の場合、波長 1,500 Å 前後の (非電離) 紫外線しかデータがない場合が多いため、それを使って $L_{生産}$ を推定する. 紫外線から電離光子への換算因子を $C_{UV電離}$ とすると、

$$L_{生産} = C_{UV電離} C_{ダスト} L_{UV観測} \quad (3)$$

となる. ここで、 $L_{UV観測}$ は紫外線の観測光度、 $C_{ダスト}$ は銀河内のダストによる吸収の補正因子である. 紫外線は銀河内のダストによる吸収を受けやすいので、観測した紫外線光度は必ずダスト吸収補正をしなければならない. 例えば赤方偏移 3

程度にあるライマンブレイク銀河では、紫外線に対するダスト吸収量は約 1 等級程度である. しかし、ダスト吸収補正は天文学でもっとも難しい課題の一つであり、その不定性はかなり大きい⁶⁾. さらに、紫外線から電離光子に換算する係数にもある程度の不定性が含まれる.

結局、電離光子の脱出率は、電離光子と (非電離) 紫外線の観測光度に三つの補正因子を組み合わせれば推定できる. 次節では、電離光子の直接観測からその脱出率を推定する試みを紹介しよう.

3. 直接検出の試み

銀河から脱出する電離光子を直接検出する最初の試みは、1995 年に Claus Leitherer らにより行われた⁷⁾. 彼らは、スペースシャトル・エンデバー号に搭載されたホプキンス紫外線望遠鏡を使い、紫外線で明るい四つの近傍スターバースト銀河の電離光子を観測した. しかし、電離光子は検出されず、脱出率の上限として約 10% という結果を得た. その後、Jean-Michel Deharveng らが別の近傍スターバースト銀河を遠紫外線スペクトル探査機 (FUSE) を使って観測したが、やはり電離光子は検出されず、脱出率の上限として約 1% という結果を得た⁸⁾. 最近、Nils Bergvall らが FUSE を使って近傍の金属量が少ない矮小スターバースト銀河 Haro 11 から電離光子を検出したと報告した⁹⁾. この銀河は中性水素ガスが非常に少ないことが電波観測から知られており、電離光子が脱出しやすい状態にあるようだ. それでも、脱出率は約 10% と推定されている.

遠方銀河については、Charles Steidel らがケック望遠鏡を使って初めて観測した¹⁰⁾. 彼らは赤方偏移 3 程度のライマンブレイク銀河から紫外線が青いものを 29 個選び、それらのスペクトルを重ね合わせてノイズを低減することで、電離光子の検出に成功した. 驚くべきことに、彼らが検出した電離光子フラックスは数十%という大きな脱出

率を示唆していた。その後、Emanuele Giallongoらが同じような赤方偏移にある別の二つの明るいライマンブレイク銀河をVLTで観測したところ、今度は電離光子が検出されず、脱出率は約10%以下であった¹¹⁾。さらに、Matthew Malkanらが赤方偏移1程度の星形成銀河11個をハッブル宇宙望遠鏡で観測したが電離光子は検出されず、脱出率は約1%以下と報告した¹²⁾。このように、遠方銀河については混沌とした情勢になっていた。

ここからは筆者らの試みを説明しよう。Giallongoらの報告があった2002年、筆者らは博士課程の大学院生であった。井上は主に理論研究をしているのだが、すばる望遠鏡に関心を持ち、観測機会を狙っていた。そこに上記のような混乱した情勢である。すばる望遠鏡での観測経験がある同期の岩田に話をもちかけた。従来の観測結果や銀河間吸収を検討した結果、筆者らは一つのアイデアに至った。狭帯域測光観測である。

従来の観測は、Malkanらを除き、すべて分光観測である。波長方向に光を分けず、スリットのロスもない測光観測のほうが、検出感度は高い。一方、銀河間吸収は短波長ほど激しいことが知られており、912 Å (ライマン端) から離れた波長を観測してもノイズが増えるだけで意味がない。ライマン端直近の、波長900 Åあたりだけを観測すべきである。この二つの要求を満たすのが、狭帯域測光観測である。幸い、多くのカメラには波長3,727 Åにある1回電離した酸素原子の禁制線を観測する狭帯域フィルターが用意されている。このフィルターを使えば、赤方偏移3程度からのまさに900 Åの電離光子を観測することができる^{*2)}。

すばる望遠鏡に提出した観測提案の結果を待つ

ているとき、筆者らの研究室にフランスからの訪問者があった。マルセイユ天体物理研究所のVeronique Buatである。すばるに提出した観測提案を見せると彼女はたいへん興味をもち、ぜひVLTにも提案しようということになった。というのも、彼女はJean-Michel DeharvengとともにFUSEで電離光子を観測しており、いわばその道のプロであった。結果的には、すばるは落選し、VLTは採択された。

筆者らのVLTでの観測は2003年の6月から8月にかけてサービスモードで行われた¹³⁾。VLTはチリ・アンデス山中にあるのだが、事前に観測の詳細を設定しておけば、現地で観測所員が観測し、データを郵送してくれる。VLTはこのようなサービスモードで主に運用されているようだ。観測効率を高めるためということだが、やはりアンデスは遠いので、こちらとしても助かる。

ここで、どのようにターゲット銀河を選択したか説明しよう。筆者らは3,727 Å付近の狭帯域フィルターを通して電離光子を観測したいのだが、ライマン端以上の非電離光子の混入を避けなければならない。ゆえに、ある赤方偏移以上の銀河をターゲットとすることになる。この基準はかなりシビアで、分光的に決定された赤方偏移を使う必要がある。ところが、VLTで観測可能な南天には、分光赤方偏移が3程度に確定している銀河が当時は少なかった。そこでまず、非常に深い多色測光データから推定した赤方偏移カタログが整備されているハッブル・ディープ・フィールド・サウス (HDFS) からターゲット候補を選んだ。そして、それらに対する多天体分光観測を行い、分光赤方偏移を決定することにした。この分光観測は狭帯域測光観測と並行して、2003年の6月から7月にVLTで行われた¹⁴⁾。測光赤方偏移に基

*2) 宇宙再電離解明には赤方偏移6の銀河を観測すべきと考えられる読者も多いと推測するが、電離光子の観測に関しては、赤方偏移3が限界である。それは、銀河間吸収が赤方偏移に沿って激しく増大するからである。赤方偏移3銀河の電離光子脱出の「物理」を理解すれば、赤方偏移6銀河にもそれを適用して宇宙再電離を議論できると、筆者らは考えている。

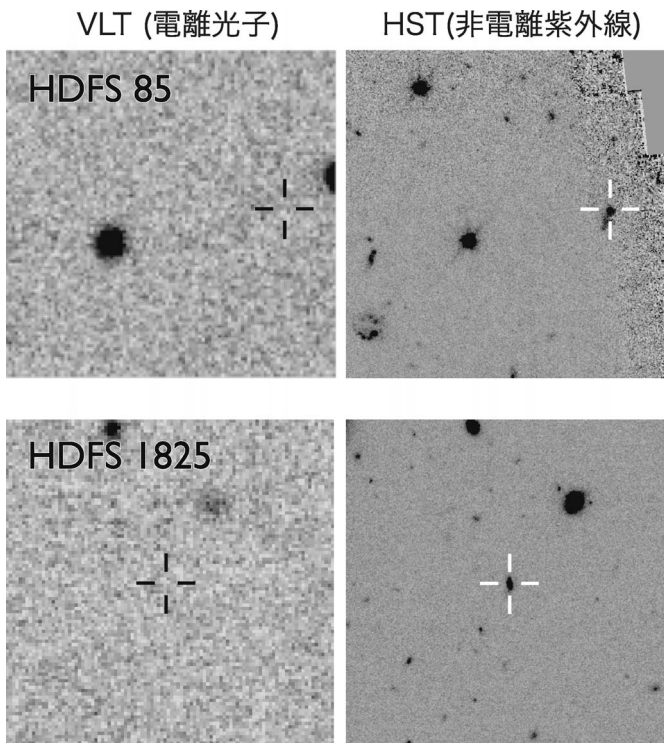


図3 ターゲット銀河の拡大図。上のパネルは HDFS 85, 下のパネルは HDFS 1825. 右側はハッブル宇宙望遠鏡 (HST) による非電離紫外線の画像, 左側は VLT による電離光子の画像. 画像中で黒いほど明るいことを意味する. 銀河の位置は十字線で示してある.

づくターゲット候補銀河 15 個を分光し, 13 個の銀河の分光赤方偏移を決定できた. しかし, 狭帯域測光の赤方偏移基準を満たすのは, たったの 2 個だけであった. 実際に分光してみたのだが, 参考にした測光赤方偏移がすべて過大評価であったのだ. 結局, 得られたのはわずか 2 個のターゲット銀河と, 他人の仕事を鵜呑みにしてはならないという教訓であった.

狭帯域測光で得た画像上で, 分光赤方偏移が基準を満たす 2 個のターゲット銀河 (HDFS 85 と HDFS 1825) の場所を詳しく調べたが, 電離光子は検出できなかった (図 3). 筆者らの狭帯域測光観測の限界等級 ($3-\sigma$) は, 11 時間以上の長時間露光の結果, 1.7 秒角四方 (赤方偏移 3 の銀河の典型的サイズ) あたり 27.4 等 (AB) に達している. これは, おそらくこの波長域での世界記録と考えら

れるが, Steidel らが報告した電離光子フラックスをぎりぎり検出できるかどうかというレベルである. Steidel らは 29 個の銀河を重ね合わせてノイズを低減していることに注意されたい. 筆者らの限界等級は個々の銀河に対してのものであり, もし多数の銀河を重ね合わせれば, もっと深い限界等級を達成し, 電離光子の検出に成功していたかもしれない. ターゲット銀河が 2 個しかないことがたいへん残念である.

筆者らの得た電離光子フラックスの上限値を, 式(1)-(3)を使って, 電離光子脱出率に換算することができる. これに必要な銀河間吸収補正, 紫外-電離換算, ダスト吸収補正のそれぞれに不定性が含まれ, 特に, ダスト吸収補正の不定性が大きい, 思い切って推定してみると, HDFS 85 と HDFS 1825 のそれぞれについて, 20% 以下,

40% 以下という結果を得た。Giallongoらが得た制限より弱いのは、彼らが観測した銀河のほうが非電離紫外線が4倍ほど明るいからである(式(1)の分母が大きくなる)。ちなみに、筆者らのターゲット銀河は、赤方偏移3程度のライマンブレイク銀河の典型的な明るさである。

その後も、VLTへの観測提案が採択されて、別の領域の狭帯域測光観測を行っている。しかし、サービスモードで行われる他のさまざまな観測プログラムとの優先順位の兼ね合いで、筆者らの観測は思うように進んでいない。そんななか、SteidelのグループのAlice Shapleyが新しい観測結果を報告してきた。なんと、赤方偏移3の銀河から個別に電離光子を検出したというのである¹⁵⁾。

Shapleyらは、赤方偏移3にある明るいライマンブレイク銀河14個をケック望遠鏡で非常に深く分光観測した結果、そのうち2個から電離光子を検出した。電離光子フラックスは26.2等(AB)と26.8等(AB)であり、筆者らの狭帯域測光観測でも楽に検出できるレベルである。この2個については、Steidelらが報告したような数十%という大きな脱出率が示唆される。一方で、残りの12個からは電離光子が検出されなかった。また、電離光子が検出された2個の銀河について、紫外線光度やダスト吸収量などに共通の性質は見られず、他の12個と比べて特異な性質も見つかっていない。

Shapleyらの結果は、電離光子の脱出が非常にランダムな現象であることを示唆しているのかもしれない。例えば、一部の方向にのみ電離光子が脱出し、他の方向には脱出しないという可能性が考えられる。激しい星形成活動で銀河の星間ガスに穴が開き、その方向にだけ電離光子が脱出できるような描像である。あるいは、一部の特別な銀河からだけ大量の電離光子が脱出し、残りの銀河からはほとんど脱出しないという描像も否定できない。電離光子の脱出が個別に確認された銀河はわずか3個(遠方2個、近傍1個)なので、それ

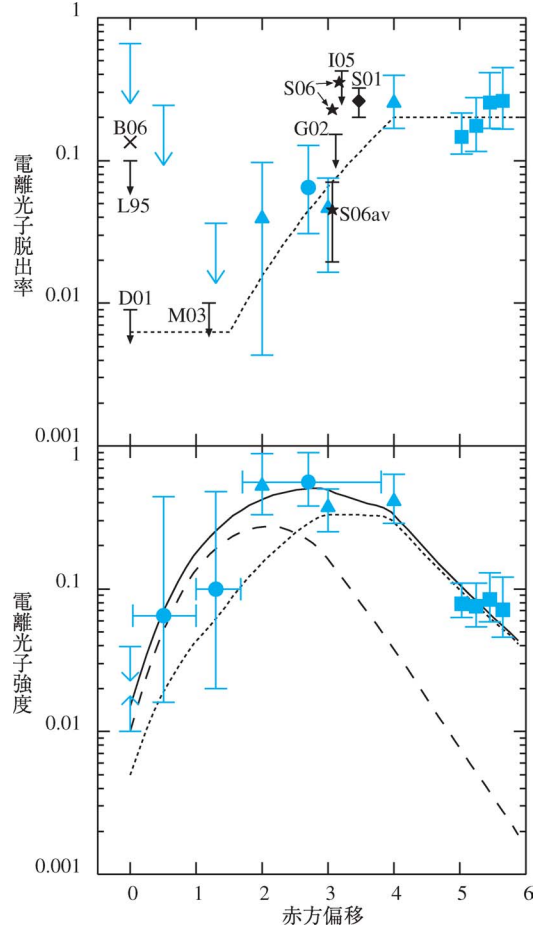


図4 電離光子脱出率と電離光子強度。(上) 青色データ点および上限値は井上ら¹⁸⁾による電離光子脱出率の推定: 丸印と上限値, 三角印, 四角印は, それぞれ, Scottら, Boltonら, Fanら¹⁶⁾による電離光子強度に基づく。黒色データ点および上限値は電離光子直接観測による推定: L95: Leithererら⁷⁾, D01: Deharvengら⁸⁾, B06: Bergvallら⁹⁾, S01: Steidelら¹⁰⁾, G02: Giallongoら¹¹⁾, M03: Malkanら¹²⁾, I05: 井上ら¹³⁾, S06, S06av: Shapleyら¹⁵⁾。点線は脱出率進化の例。(下) 青色データ点および上下限値はライマン α 雲の数から推定された電離光子強度: 丸印と上下限値, 三角印, 四角印は, それぞれ, Scottら, Boltonら, Fanら¹⁶⁾による推定。破線は可視光で見つかったQSOからの寄与¹⁷⁾, 点線は脱出率進化の例(上パネル)から予想される銀河からの寄与, 実線はQSOと銀河からの寄与の合計。縦軸の単位は, $10^{-21} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ Hz}^{-1} \text{ sr}^{-1}$ 。

らに共通の性質が見過ごされているだけかもしれない。

1995 年以来約 10 年間の直接検出の試みを通じて、一部の銀河からは確かに電離光子脱出があることがはっきりした。しかし、どのような銀河からどのようにして電離光子が脱出するのか、その「物理」はいまだ不明である。銀河の電離光子脱出の研究は、初期の「発見」段階から、脱出の「物理」を解明する段階に至ったといえよう。今後は、さまざまな性質の銀河を多数観測し、その性質ごとに電離光子脱出が見られる頻度を調べることが重要であろう。

4. 脱出率の進化？

前節では、個別の銀河の電離光子脱出率を直接観測で推定した。ここでは、宇宙全体の平均的な脱出率を推定してみよう。銀河から脱出した電離光子は、銀河間空間にあるライマン α 雲に吸収される(2 節)が、このことは、電離光子がライマン α 雲の状態に影響を与えることを意味する。つまり、ライマン α 雲を調べれば、その周囲の電離光子の量を知ることができる。図 4 下のパネルの青色で示された誤差棒つきデータ点および上下限界は、さまざまな赤方偏移にあるライマン α 雲の数から推定した電離光子強度である¹⁶⁾。同じパネルの破線は、可視光で見つかった QSO からの寄与を表している¹⁷⁾。赤方偏移 2 以上では、QSO からの寄与が観測された電離光子強度に全く足りない。筆者らは、この不足分が銀河からの寄与を表していると仮定して、銀河からの電離光子脱出率を推定した¹⁸⁾。

詳しい計算方法は筆者らの論文¹⁸⁾に譲るが、本質的には式(1)-(3)で理解できる。つまり、式(2)の電離光子の観測光度には、電離光子強度への銀河からの寄与に相当する値を使い、式(3)の(非電離)紫外線の観測光度には、最新の銀河紫外線探

査の結果¹⁹⁾を使う。銀河間吸収の補正因子には、ライマン α 雲分布の統計的性質⁵⁾に準拠したわれわれのモデル¹³⁾を使う。紫外線-電離光子換算因子とダスト吸収補正因子は不定性が大きく、良いモデルもないので、本稿では赤方偏移 3 のライマンブレイク銀河の典型的な値で定数と仮定する*3。

このようにして得られた結果を、図 4 上のパネルに青色の誤差棒つきデータ点および上限値として示す。赤方偏移 0 から 1 程度までで上限値(青色)しか得られていないのは、銀河からの寄与が全くなくても、QSO だけで電離光子強度を説明できるからである。

図 4 上のパネルには、3 節で述べた直接観測の結果も併せて示してある(黒色データ点および上限値)。ただし、紫外線-電離光子換算因子とダスト吸収補正因子は、比較のため、筆者らの推定値(青色)と同じ値を仮定してある(ゆえに、3 節で述べた値と若干異なる)。赤方偏移 3 あたりを見ると、Steidel らの値(図中の S01)は、筆者らの推定(青色)と比べてやや大きい。また、Shapley らが電離光子を検出した 2 個の銀河(図中の S06)も、やはり、筆者らの推定値に比べて大きな脱出率となっている。一方、Shapley らが観測した 14 個の平均値(図中の S06av)は、筆者らの推定値と非常に良い一致を見せている。ちなみに、この平均値はほとんど電離光子検出の 2 個だけで決まっている。

赤方偏移 1 程度より近傍では、データ点のばらつきが大きい。その中でも Malkan らの上限値(図中の M03)は 11 個の銀河に基づいているため、もっとも信頼性が高いと考えられる。そこで、Malkan らの上限値をシビアにとらえてすべてのデータを見直すと、脱出率の進化が浮かび上がってくる。つまり、赤方偏移に沿って、脱出率が 1% 以下から 10-20% 程度まで上昇しているように見

*3 紫外線-電離光子換算因子は約 1/3、ダスト吸収補正因子は約 3 (紫外線吸収 1 等) であり、両者の積はおよそ 1 である。

える(図中の点線)。この脱出率進化のシナリオに基づいた銀河からの電離光子強度は、図4下のパネルに点線で示してある。同パネルの実線は銀河とQSOからの寄与の合計である。

電離光子脱出率の推定には、紫外線-電離光子換算因子やダスト吸収補正因子の大きな不定性があるため、ここで提案した脱出率進化に疑いの目をもたれる読者も多いと推測する。確かに、筆者らは両因子を定数とみなして脱出率の推定を行った。そこで、赤方偏移依存する両因子を考慮することで脱出率進化を避けることができるかどうか考えてみる。

まず、紫外線-電離光子換算因子が赤方偏移に沿って減少していれば、脱出率進化を打ち消すことができる。この場合、遠方銀河の電離光子と(非電離)紫外線の生産効率比が、近傍銀河に比べて約10倍高いことが要求される。この数字は、例えば大質量の種族III星だけで構成される銀河なら実現できるが、赤方偏移4-6でそのような銀河があるとは考えられない。次に、ダスト吸収補正因子が赤方偏移に沿って増加していれば、脱出率進化を打ち消すことができる。この場合、遠方銀河のダスト吸収が近傍銀河に比べて約10倍大きいことが要求される。しかし、遠方銀河の金属量(ダストの原料)は近傍銀河に比べて明らかに小さく、このシナリオも現実的ではない。したがって、紫外線-電離光子換算因子やダスト吸収補正因子で脱出率進化を避けることは困難と思われる。

ところで、筆者らは電離光子の放射源として銀河とQSOだけを考えたが、高赤方偏移に他の放射源があれば、脱出率進化を避けることができる。例えば、可視光で見えない、いわゆる、2型のQSOや、低光度のためこれまで見つからない活動銀河核が、遠方に大量に存在する場合である。ちなみに、電離した銀河間媒質からの放射はそれほど重要ではない。

この節では、遠方銀河ほど電離光子脱出率が

大きい、「脱出率進化」がある可能性を指摘した。特に、高赤方偏移での脱出率10%というのは、宇宙再電離のシミュレーションで想定される値⁴⁾であり、標準的な宇宙再電離シナリオに合致する。筆者らの主張する「脱出率進化」とは、低赤方偏移まで脱出率10%が続くと、電離光子の直接観測やライマン α 雲から推定された電離光子強度に合わないということである。また、最近の宇宙論的銀河形成・進化のシミュレーションでは、ここで提案した「脱出率進化」が再現されているようである²⁰⁾。しかし、図4上のパネルを見てわかるように、直接観測のデータ点がまだまだ少ない。脱出率進化が正しいかどうか判断するためには、さらに多くの信頼できる観測データが必要である。遠方銀河については8m級望遠鏡、赤方偏移1程度の銀河には紫外線観測衛星GALEXの活躍が期待される。また、遠方の2型QSOや低光度活動銀河核の調査も重要であろう。

5. ライマン α 輝線銀河の電離光子

最後に、現在筆者らが進めている、ライマン α 輝線銀河からの電離光子を直接検出する計画を紹介しよう。3節で述べた、従来の赤方偏移3の銀河からの電離光子の直接観測は、ライマンブレイク銀河と呼ばれる星形成銀河の中でも、比較的明

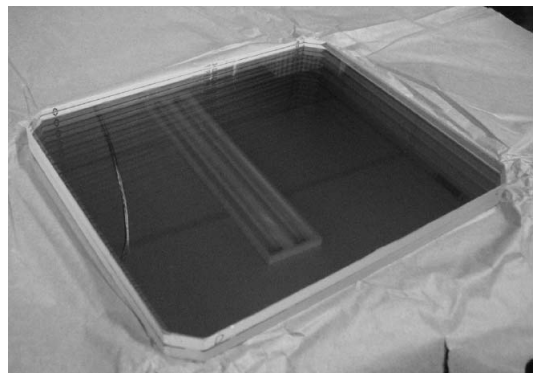


図5 製作したすばる望遠鏡主焦点カメラ用特製狭帯域フィルター。大きさ 20.5 cm×17.0 cm, 厚さ 15 mm。天井の蛍光灯が映っている。

る銀河を対象としたものであった。一方、ライマン α 輝線銀河には紫外線で暗めの銀河が多いことが示唆されている²¹⁾。また、赤方偏移6以上の宇宙再電離期にも、ライマン α 輝線銀河が発見されている³⁾。このような、比較的暗めの銀河は数のうえでは多数派であるから、宇宙再電離にも大きく貢献した可能性がある。また、光度という銀河の基本的な性質に沿って、電離光子脱出率が変化するのかどうか調べることも重要である。そこで筆者らは、ライマン α 輝線銀河の電離光子脱出率を推定したいと考えている。

赤方偏移6のライマン α 輝線銀河を観測できれば良いのだが、残念ながら、それは不可能である。なぜなら銀河間吸収は赤方偏移とともに急激に増加するからである。たとえ赤方偏移6の天体から電離光子が大量に脱出している、激しい銀河間吸収のため、われわれは検出できない。一方、赤方偏移3からの電離光子に対する銀河間吸収は比較的小さい(光学的厚みで1程度)。そこで、赤方偏移3のライマン α 輝線銀河を観測対象とする。

SSA22と呼ばれる天域では、ケック望遠鏡やすばる望遠鏡による観測で、赤方偏移3.1にあるライマン α 輝線銀河が大量に発見されている²²⁾。多いところでは、すばる望遠鏡主焦点カメラの1視野内に約800個のライマン α 輝線銀河が存在する。主焦点カメラでこれらの銀河からの電離光子を観測すれば、統計的信頼性の非常に高い脱出率の推定が一気に可能となるが、主焦点カメラには適切な狭帯域フィルターが無い。そこで、SSA22領域のライマン α 輝線銀河の赤方偏移にピタリと合う、900Å付近の電離光子だけをとらえるようにチューンアップした狭帯域フィルターを製作した(図5)。順調なら2007年の8月ごろに観測できるだろう。

約800個のライマン α 輝線銀河に加えて、観測視野内には分光赤方偏移が確定したライマンブレイク銀河も数十個ある。それゆえ、筆者らの観測

が成功すれば、従来の数倍のライマンブレイク銀河のサンプルと、初めてかつ大量のライマン α 輝線銀河のサンプルが同時に手に入る。これを使えば、平均的脱出率はもちろん、銀河の諸性質ごとの脱出率の違いも議論できるはずである。どのような結果が得られるか、今から楽しみでならない。

謝辞

本稿で紹介した筆者らの研究は、マルセイユ天体物理研究所のJean-Michel Deharveng, Veronique Buat, Denis Burgarella, 東北大学の林野友紀, 山内良亮, 中村有希, 国立天文台の山田 亨, 秋山正幸, 古澤久徳, 京都大学の松田有一の各氏との共同研究です。また、京都大学の釜谷秀幸氏は、筆者らの研究を常々応援して下さりました。この場を借りてお礼申し上げます。3節で紹介した研究の大半は、筆者の一人、井上がマルセイユ・プロヴァンス天文台の招きでマルセイユ天体物理研究所に滞在し、その後さらに日本学術振興会海外特別研究員として同研究所に赴任した時期に行われました。また、5節で紹介した計画は、日本学術振興会および大阪産業大学産業研究所の援助を受けています。最後に、本稿の執筆を勧めてくださった、国立天文台の今西昌俊氏に感謝いたします。

参考文献

- 1) Gunn J., Peterson B. A., 1965, ApJ 142, 1633
- 2) Fan X., et al., 2001, AJ 122, 2833; Page L., et al., 2006, ApJ, submitted (astro-ph/0603450); 詳しいレビューは、Fan X., Carilli C. L., Keating B., ARA&A 44, 415
- 3) 柏川伸成, 2006, 天文月報 99, 562
- 4) 吉田直紀, 2006, 天文月報 99, 452
- 5) Weymann R. J., et al., 1998, ApJ 506, 1; Kim T.-S., et al., 2002, MNRAS 335, 555
- 6) 例えば, Burgarella D., Buat V., Iglesias-Páramo J., 2006, MNRAS 360, 1413
- 7) Leitherer C., Ferguson H. C., Heckman T.M., Lowenthal J. D., 1995, ApJ 454, L19

8) Deharveng J.-M., Buat V., et al., 2001, A&A 375, 805
 9) Bergvall N., et al., 2006, A&A 448, 513
 10) Steidel C. C., Pettini M., Adelberger K. L., 2001, ApJ 546, 665
 11) Giallongo E., Cristiani S., D'Odorico S., Fontana, A., 2002, ApJ 568, L9
 12) Malkan M., Webb W., Konopacky Q., 2001, ApJ 598, 878
 13) Inoue A. K., Iwata I., Deharveng J.-M., Buat V., Burgarella D., 2005, A&A 435, 471
 14) Iwata I., Inoue A. K., Burgarella D., 2005, A&A 440, 881
 15) Shapley A., Steidel C. C., Pettini M., Adelberger K. L., Erb D. K., 2006, ApJ 651, 688
 16) Scott J., Bechtold J., Morita M., Dobrzycki A., Kulkarni V. P., 2002, ApJ 571, 665; Bolton J. S., Haehnelt M. G., Viel M., Springel V., 2005, MNRAS 357, 1178; Fan X., et al., 2006, AJ 132, 117
 17) Bianchi S., Cristiani S., Kim T.-S., 2001, A&A 448, 51
 18) Inoue A. K., Iwata I., Deharveng J.-M., 2006, MNRAS 371, L1
 19) Schiminovich D., et al., 2005, ApJ 619, L47; Sawicki M., Thompson D., 2006, ApJ 642, 653; Iwata I., et al., 2007, MNRAS, submitted
 20) Razoumo A. O., Sommer-Larsen J., 2006, ApJ 651, L89
 21) Ando M., Ohta K., Iwata I., et al., 2006, ApJ 645, L9
 22) 松田有一ほか, 2004, 天文月報 97, 628

Looking for Ionizing Photons Escaping from Galaxies

Akio K. INOUE

College of General Education, Osaka Sangyo University, 3-1-1 Nakagaito, Daito 574-8530, Japan

Ikuru IWATA

Okayama Astrophysical Observatory, National Astronomical Observatory of Japan, Honjo, Kamogata, Okayama 719-0232, Japan

Abstract: The cosmic renaissance, reionization is a phenomenon that neutral hydrogen atoms in the intergalactic space are ionized by strong ionizing radiation from some objects in the early Universe. Forming galaxies are thought to be a good candidate for the ionizing sources. However, their contribution is very uncertain because ionizing photons from stars are easily absorbed by neutral hydrogen in the galaxies and these photons may not reach the intergalactic space. A key to solving if galaxies played a significant role in the cosmic reionization is the escape fraction of ionizing photons from galaxies into the intergalactic space. This article presents our attempts to measure the escape fraction of galaxies.