

Uncovering reionization with gravitationally lensed galaxies at $z=5-10$ in Hubble Frontier Fields

石垣 真史 (東京大学大学院 理学系研究科)

Abstract

暗い銀河はその大きな数密度ゆえに宇宙の再電離を引き起こした主要な電離光子源であると考えられているが、再電離期のような高赤方偏移の暗い銀河を観測するのは容易ではない。そこで本研究では Hubble Frontier Fields の銀河団 Abell 2744 を用いてそのような $z = 5-10$ の銀河を探索する。Hubble Frontier Fields(HFF) とは 2013 年秋からハッブル宇宙望遠鏡 (HST) によって撮像される 6 つの銀河団の領域であり、Abell 2744 はそのうち 1 年目に観測される銀河団である。銀河団による重力レンズ効果によって背後の天体の像は増光されるため、見かけの AB 等級が 28.7-29 の非常に暗い天体でも検出することが可能となり、光度関数の暗い天体での値に制限を与えることができる。HFF のデータが出てくるまでに、すでに HST によって撮像されている Hubble Legacy Archive のデータを用いて、Abell 2744 の質量分布を求める予定である。

1 Introduction

宇宙が誕生してから 38 万年後、それまで電離していた陽子と電子は温度の低下とともに再結合期を迎え、宇宙は中性となった。しかし現在の宇宙はほぼ電離しており、再結合期から現在までの間にいつ、どのようなプロセスで再電離が起きたのかが大きな問題となっている。

Gunn & Peterson (1965) によるクエーサーのスペクトルの観測の結果、銀河間物質は赤方偏移 $z \sim 5$ ではほぼ電離していることがわかった。再電離を引き起こすものとしては、 $z > 6$ の星形成銀河が大きな役割を果たしていると考えられており、その性質を調べることは非常に重要である (Robertson et al 2013 [1])。しかし現在観測されている銀河だけでは再電離を引き起こすのに十分でなく、観測できていない暗くて数の多い銀河からの寄与が大きいことが示唆されている (Ellis 2007 [2])。

本研究ではそのような暗い銀河を検出するために強い重力レンズ効果を用いる。重力レンズ効果とは高密度の重い天体 (主に銀河団とそれに付随する銀河団ハロー) が存在するとき、その重力によって測地線が曲げられ、背後にある天体の像が歪められる効果のことである。この効果により光源の光度が増光されることが知られており、通常の観測での限

界等級より光度の小さい銀河も検出することができるようになる。

Hubble Frontier Fields(HFF) は 6 つの銀河団 (Abell 2744, MACSJ0416.1-2403, MACSJ0717.5+3745, MACSJ1149.5+2223, RXCJ2248.7-4431, Abell 370) を各 140 orbits かけて銀河団およびその付近の空白領域を観測する計画である (図 1)。そのうち始めのサイクル 21 で観

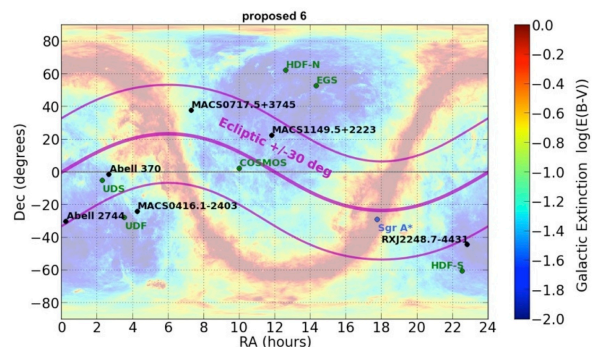


図 1: 6 つの銀河団の天球面上での位置 (http://www.stsci.edu/hst/campaigns/frontier-fields/)

測するのが Abell 2744 と MACSJ0416.1-2403 であり、本研究では Abell 2744 を扱う。

観測は可視光 (ACS) および近赤外 (WFC3) で行

われる。フィルターは ACS では F435W, F606W, F814W、WFC3 では F105W, F125W, F140W, F160W を用いる。

2 Lensing Model

図 2 に示すように、重力レンズ効果をもたらす銀河団 (レンズ天体、L) によってその背後にある銀河 (光源、S) から発せられた光の経路は曲げられ、観測者 (O) から見える銀河の像 (I) は本来とは異なる位置に移る。

光源の本来の天球面上での位置を表す光源平面から、像として見えている位置を表す像平面への写像は、次のような行列で表される。

$$d\vec{\theta}_I = \mathcal{A}d\vec{\theta}_S \quad (1)$$

$$\mathcal{A}^{-1} = \begin{pmatrix} 1 - \kappa - \gamma_1 & -\gamma_2 \\ -\gamma_2 & 1 - \kappa + \gamma_1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

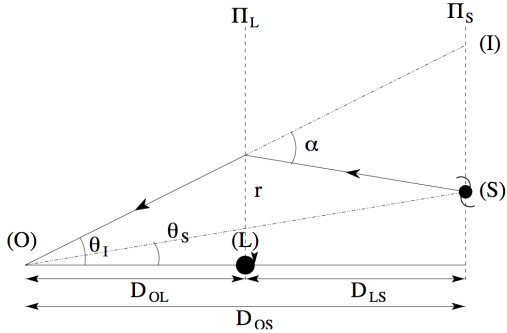


図 2: 光源 S と見かけの位置 I の関係 (Kneib & Natarajan 2012 [3])

ここで κ は収束率 (convergence)、 γ は歪み (shear) を表し、どちらもレンズ天体の質量分布から求められる。増光率 μ は κ と γ の関数として書くことができる。

$$\mu^{-1} = \det(\mathcal{A}^{-1}) = (1 - \kappa)^2 - \gamma^2 \quad (3)$$

$\gamma/(1 - \kappa) = \pm 1$ のとき増光率は発散する。この関係をみたく像平面上での曲線を critical line、光源平面上での曲線を caustic line と呼ぶ。critical line の近くで光源は重力レンズ効果を強く受ける。これによ

り増光率が大きくなり、また位置によっては光源が 2 つ以上に分離して見える多重像が現れる (図 3)。

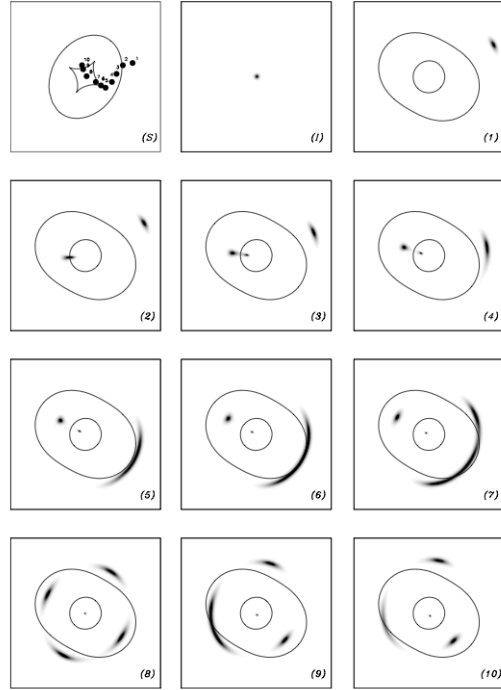


図 3: 光源の位置による像の見え方の例 (Kneib & Natarajan 2012 [3]) : 図 (S) は光源平面上での光源の位置と caustic line、図 (1) ~ (10) はそれぞれに対応する像平面上での critical line と像を示している。

3 Methods

解析は以下のような手順で行う。1) ~ 3) は Hubble Legacy Archive のデータを用いて、4) は HFF のデータを用いて進める。

1) ACS の画像から Abell 2744 に含まれている銀河を選び出す。SExtractor を用いて画像中にある銀河の色を見ることで銀河の年齢を見積もることができ、どの銀河が Abell 2744 の銀河団に属しているかを求めることができる。

2) 銀河およびダークハローの質量分布を仮定し、表 1 の重力レンズ効果を再現するものを求める。Abell 2744 の質量分布を求めるにはいくつかのパラメータを置く必要がある。1) で求めた銀河団中の銀河の質

量光度比をパラメータ化することで銀河団の質量分布が求まり、ダークハローについてはその形状を回転楕円体と仮定し、楕円率と軸の方向をパラメータに置く。表 1 の多重像の位置を最も良く再現できるようなパラメータの組み合わせを求めることで、Abell 2744 の質量分布を決定することができる。パラメータの種類・数については実際に計算し結果を見ながら調整することになる。

3) 求めた質量分布から critical line を導く。ここで critical line は光源の赤方偏移に依存し、各赤方偏移で異なる critical line が得られることに注意する。

4) $z = 5-10$ での critical line 上またはその近傍にある天体を探し出す。dropout 法によってその天体の赤方偏移を求め、critical line の赤方偏移と一致すれば、その天体は強い重力レンズ効果を受けていると言える。その増光率と、critical line 上の観測している範囲の共動体積を求めることで、 $z = 5-10$ での光度関数を描くことができる。

れている。これらの銀河の多重像の位置から、Abell 2744 の質量分布を求めることができる (表 1)。

表 1: Abell 2744 によって重力レンズ効果を受けた天体 (J. Merten et al. 2011 [4])

Image-ID	多重像の数	z
1	6	2.0 ± 0.3
2	8	2.0 ± 0.3
3	3	4.0 ± 0.3
4	3	3.5 ± 0.3
5	3	4.0 ± 0.5
6	3	3.0 ± 0.5
7	3	3.7 ± 0.5
8	3	4.0 ± 0.2
9	3	3.0 ± 0.5
10	3	3.0 ± 0.5
11	3	3.0 ± 0.5

4 Target Cluster

Abell 2744 は $z = 0.308$, RA=00:14:21.2, Dec=-30:23:50.1 にある銀河団であり、活発に融合しているために複雑な構造をなしている。

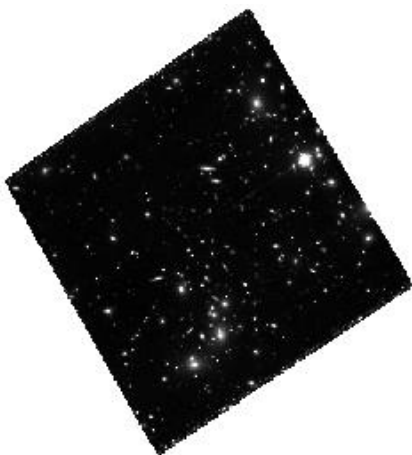


図 4: HST/ACS による Abell 2744 の画像 (<http://hla.stsci.edu/hlaview.html>)

Abell 2744 によって強い重力レンズ効果を受けた天体として、多重像となった 11 個の銀河が観測さ

Reference

- [1] Brant E. Robertson et al. 2012. ApJ, 768:71
- [2] Richard S Ellis. 2007. arXiv, 0701024
- [3] Jean-Paul Kneib and Priyamvada Natarajan. 2012. arXiv, 1202.0185
- [4] J.Merten et al. 2011. arXiv, 1103.2772