거대마젤란망원경을 이용한 라이만 알파 성운의 본질 연구

● 양유진[1], Ann Zabludoff[2]

Universität Bonn[1], University of Arizona[2]

1. 과학 목적 및 요약

우리는 고적색이동(z=2-6)에 위치한 Lyα 성운[그림 1]의 본질과 성운을 구성하는 가스의 운동학적 성질을 연구할 것을 제안한다. 우리 연구팀은 (1) Lyα 성운-은하/퀘이사 겉보기 쌍을 관측하여 Lyα 가스의 물리적 성질(온도, 밀도, 이온화 정도)을 측정하고, (2) Lyα 성운 내에 있는 은하의 연속 스펙트럼을 통해 은하 주변물질(CGM)의 운동학적 성질을 밝히고, 또한 (3) Lyα를 방출하는 가스에서 직접 He II 1640Å과 C IV 1549Å 같은 방출선을 검출함으로써 성운의 에너지원을 밝히는 연구를 수행할 계획이다. 최근의 연구들은 Lyα 성운들이 무거운 암흑물질 헤일로에 위치한 원시은하군/은하단이라는 것을 보여주고 있으므로, 여기서 제안된 관측들은 오랫동안 수수께끼로 남아 있던 Lyα 성운의 본질뿐 아니라, 나아가 은하군/은하단의 형성을 연구하는 데 중요한 역할을 할 것이다.

2. 연구 필요성, 배경 및 동향

1) 연구의 배경 및 필요성

매우 큰 적색이동(z=2-6)에 위치한 라이만 알파 성운(Lyman alpha blob, 그림 1)은 그 크기가 약 100kpc에 달하며 강한 Lyα선(L[Lyα]=10^{43-44} erg s^{-1})을 방출하는 원시은하들이다. 최근의 연구 결과들은 이 성운들이 주로 밀도가 높은 곳(over-dense region)에 위치하며, 그 내부에 서로 상호작용하는 작은 은하들을 무수히 포함하고 있다는 것을 보여주고 있다(Yang et al. 2009, 2010; Prescott et al. 2012). 이는 Lyα 성운들이 우주 초기의 젊은 원시은하단이나 은하군들이 매우 격렬한 과정을 통해 생성되고 있는 상태를 나타낸다는 것을 의미한다. 따라서 이러한 Lyα 성운들을 연구함으로써, 은하들과 은하 간 물질(IGM)/은하주변물질(CGM)이 어떻게 상호작용하며, 아주 무거운 은하들이 어떻게 만들어지는지를 이해할 수 있을 것으로 기대된다. 그러나 이 Lyα 성운이 어떤 물리적 기작으로 빛을 내는지, 그리고 주변의 가스들이 은하에서 분출된 것인지 또는 은하로 흘러들어가는지는 아직 잘 알려져 있지 않다.

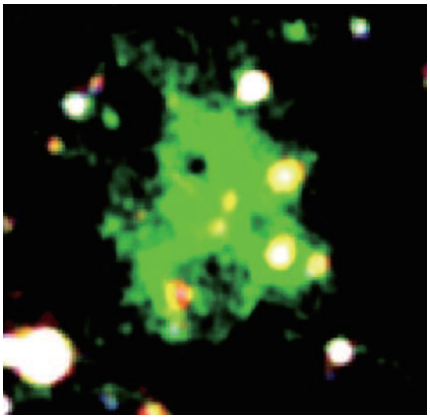

그림 1. 좁은 폭 필터를 사용하여 Steidel et al. (2000)에 의해 발견된 대표적인 Lyα 성운(SSA22-LAB1; Matsuda et al. 2004). 초록색으로 표시된 영역이 Lyα를 방출하고 있는 은하 간 물질을 나타낸다. 이미지의 크기는 25"(약 200kpc)이다.

이러한 Lyα 성운이 은하 내부의 별 생성 영역에서 만들어진 Lyα 광자들의 공진산란(resonant scattering)에 의해 만들어진다거나(Steidel et al. 2011; Hayes et al. 2011), 매우 강한 은하바람(galactic superwind)에 의한 쇼크(Taniguchi & Shioya 2001), 활동성 은하핵(AGN)에 의한 광이온화(Geach et al. 2009), 또는 소위 차가운 가스 유입(cold-mode gas accretion) 때문에(Goerdt et al. 2010) 만들어진다는 여러 이론들이 제시되었지만, 과거 약 10년 동안에 걸친 많은 노력에도 불구하고 이러한 Lyα 성운들의 본질은 여전히 밝혀지지 않고 있다.

2) GMT의 필요성

Lyα 성운의 본질을 밝히는 것이 어려웠던 이유는 성운의 매우 낮은 표면밝기

($\sim 10^{-18}$ erg s^{-1} cm^{-2} $arcsec^{-2}$) 때문에 주로 Lyα 방출선의 측광 또는 분광관측만이 가능했었고, 이보다 상대적으로 어두운 다른 방출선들의 관측이 어려워서, Lyα 가스의 온도, 밀도, 금속함량과 같은 물리적 성질을 알아내기가 기존에는 거의 불가능했기 때문이다. 또한 성운 안에 위치한 매우 작고 어두운 은하들의 물리적 성질들(예를 들어, 질량, 별 생성률, 은하바람의 속도)을 측정하는 것이 매우 힘들었다. 이렇게 기존의 8-10미터급의 망원경으로 해결하기 힘들었던 문제들은 차세대 거대망원경들이 완성되면 마침내 해결될 것으로 기대된다.

3) 국내외 연구 동향

2000년에 Lyα 성운이 처음으로 발견된 이후, Lyα 성운 관련 연구는 크게 두 가지 측면에서 이루어져왔다. 첫째는 새로운 Lyα 성운을 찾아내는 것이고, 다른 한 가지는 이렇게 발견된 Lyα 성운 가스의 운동학적 특성을 연구하는 것이다. 현재 GMT에는 광시야 이미지 관측 능력이 계획되어 있지 않으므로, GMT를 이용하여 수행할 수 있는 연구는 이미 알려진 Lyα 성운의 물리적 성질을 자세히 연구하여 그 본질을 밝히는 것에 집중해야 할 것이다. 아래는 기존에 이루어진 Lyα 성운 관련 국내외의 연구 동향이다.

새로운 Lyα 성운 탐사관측은 주로 Subaru 망원경의 Suprime-Cam과 좁은 폭(narrowband) 필터를 이용하여 일본의 연구자들에 의해 주도되어왔다(예를 들어, Matsuda et al. 2004, 2011). 반면 이러한 초기의 탐사관측들이 주로 이미 알려진 Lyα 성운이 위치한 영역을 중심으로 이루어졌기 때문에, 우리 연구팀은 하늘의 임의의 영역에 대하여 탐사관측을 실시하였다. 그 결과 우리는 Lyα 성운들이 서로 공간뭉침(clustering)이 매우 강하고, 주변 밀도가 높은 영역에 존재한다는 것을 발견하였다(Yang et al. 2009, 2010; Prescott et al. 2008 참고). 이는 z=2-3에 있는 Lyα 성운은 그 당시 암흑물질-헤일로-질량이 약 10^{12-13}Msun에 달하며, 따라서 앞으로 무거운 은하군이나 일반적인 은하단으로 진화할 것이라는 것을 의미한다.

앞으로의 Lyα 성운 탐사는 현재 진행 중인 Hobby-Eberly Telescope Dark Energy Experiment(HETDEX)나 Subaru의 Hyper Suprime-Cam(HSC) 탐사관측 프로그램들에 의해 주도될 것으로 예상된다. 시야가 매우 넓은 IFU를 이용하여 암흑에너지를 측정하는 것이 목표인 HETDEX는 많은 Lyα 방출은하뿐 아니라 약

100-1,000여 개의 Lyα 성운을 발견할 것으로 예상되며, 약 1.8제곱각도의 시야를 가진 Hyper Suprime-Cam은 좁은 폭 필터를 이용하여 가장 효율적으로 Lyα 성운을 찾아낼 것으로 기대된다.

라이만 알파 성운의 운동학적 연구는 현재 우리 연구팀(Yang et al. 2011, 2014ab)과 미국의 연구팀 (McLinden et al. 2011)이 주도하고 있다. 라이만 알파 성운의 가스가 은하들로부터 뿜어져 나오는지(outflow) 아니면 은하들로 유입되고 있는지(infall)를 연구하기 위해, 우리는 Magellan-6.5m 망원경의 MagE, FIRE 에셀분광기와 VLT-8.2m 망원경의 X-shooter, SINFONI 분광기들을 이용하여 필자와 공동 연구자들(Yang et al. 2010)이 새로 찾아낸 8개의 Lyα 성운을 관측하였다(Yang et al. 2011, 2014b). 기존의 Lyα 방출선만을 이용한 연구와는 달리, 광학적 깊이가 작은 Hα λ6563 또는 [O III] λ5007 방출선과 Lyα 방출선을 동시에 관측함으로써, 우리는 복사전달 효과에 구애받지 않고 성운 주변의 가스가 어떻게 운동하는지 연구할 수 있었다. Hα/[O III]와 Lyα 방출선의 속도 차이를 비교한 결과, 우리는 두 방출선의 속도가 거의 일치하거나 +250km/s보다 작다는 것을 발견했다(그림 2 참조). 따라서 이는 Lyα를 내는 가스는 은하로부터 방출되고 있으며 은하로의 유입에 대한 관측적 증거는 없다는 것을 의미한다. 한편, 이 속도 차이는 비슷한 적색이동을 갖는 Lyman break 은하들(LBGs)보다 상당히 작은 것으로서, 이는 Lyα 성운의 가스가 그다지 빠른 속도로 은하로부터 방출되는 것이 아니라는 것을 의미하며, 기존에 제시되었던 빠른 은하바람이론(superwinds)이 맞지 않는다는 것을 보여준다.

3. 연구의 내용 및 방법

1) 연구 대상

아래에 제안된 관측 프로그램들은 측광관측이 다양한 파장 영역에서 수행되어 있고, 특히 허블망원경 이미지가 있는 샘플을 대상으로 수행하는 것이 바람직하다. Extended Chandra Deep Field South(ECDFS)나 SSA22 원시은하단(proto-cluster)에 위치한 Lyα 성운들이 현재까지 알려진 가장 큰 Lyα 성운 샘플이고 많은 측광 자료가 존재하므로 가장 유력한 관측 대상이지만, 우리는 2020년

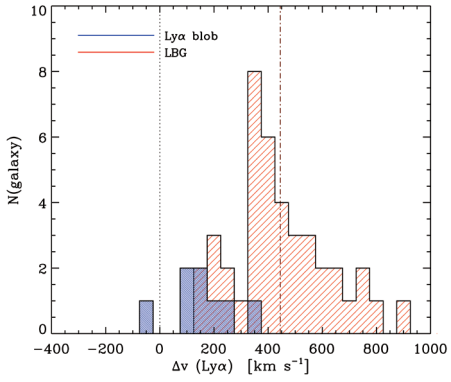

그림 2. Lyα와 Hα/[OIII] 방출선 사이의 속도 차이의 분포. 단순한 Lyα 복사전달 모형에 따르면 광학적 깊이가 두꺼운 Lyα와 얕은 Hα 방출선의 속도 차이는 은하바람의 속도를 나타낸다. 파랑과 빨간색은 각각 Lyα 성운과 LBG 은하들의 분포를 보여준다. Lyα 성운의 은하바람 속도가 비슷한 적색이동에 위치한 LBG 은하들보다 훨씬 작은 것을 알 수 있다(Yang et al. 2014b). 우리는 GMT를 이용하여 Lyα 성운 안의 은하들의 연속 스펙트럼을 측정함으로써 은하바람의 특성을 보다 직접적으로 연구할 계획이다.

경에 가장 적절한 Lyα 성운을 관측 대상으로 최종 선택할 예정이다.

2) 사용 GMT 기기 및 관측 전략

우리는 거대마젤란망원경(GMT)의 큰 집광력을 이용하여 Lyα 성운의 본질을 밝히고 원시은하군/은하단의 형성을 이해하기 위해서 GMACS나 G-CLEF를 이용한 다음 세 가지 관측 연구를 제안한다.

(1) Lyα 성운-은하/퀘이사 쌍 관측을 통한 Lyα 가스의 물리적 성질 연구

그동안 많은 Lyα 성운 가스에 대해서 분광관측이 이루어져왔지만, 복사 기작을 직접적으로 밝혀줄 Lyα 가스의 물리적 성질(이온화 정도, 밀도, 온도 등)은 전혀 알려져 있지 않다. 우리는 Lyα 방출 가스의 뒤에 위치한 퀘이사나 은하의 연속 스펙트럼(continuum)을 고분산으로 분광관측함으로써, Lyα 성운 가스에 의해 생기는 흡수선을 이용하여 그 물리적 성질을 측정할 계획이다. 현재까지 발견된 약 20여 개의 Lyα 성운 중에 이러한 배경은하/퀘이사와 Lyα 성운 쌍은 한 개 정도만 알려져 있지만, GMT가 운영을 시작할 때까지는 앞에서 언급한 여러 탐사관측으로부터 여러 개의 Lyα 성운-은하/퀘이사 쌍들이 발견될 것으로 기대된다. 언급된 배경은하들은 매우 어둡고(약 R~26등급) 상당한 고분산 관측(R > 2000)을 필요로 하므로 현재의 8미터급 망원경으로 충분한 S/N를 얻기 위해선 약 100여 시간의 노출시간이 필요하다. 따라서 여기서 제안된 관측은 오로지 GMT만이 해낼 수 있다.

잘 알려진 LBG 은하들의 광도함수를(예를 들어, Bouwens et al. 2007) 이용하면 GMT로 관측 가능한 Lyα 성운-배경은하 쌍의 수를 예상할 수 있다. 우리가 관측하려고 하는 배경은하가 약 z=4에 있다고 가정할 경우, i_{AB}=25.5등급보다 밝은 배경은하가 어떤 Lyα 성운의 중심으로부터 5초 이내에 있을 확률은 약 3%이며, 배경은하의 밝기를 i_{AB} < 26.5등급으로 낮출 경우 이 확률은 약 13%로 증가한다. 따라서 배경은하

의 밝기에 따라서, 즉 투자하고자 하는 관측 시간에 따라서 30여 개 또는 8개의 Lyα 성운 중 적어도 하나에 대해 제안된 관측을 수행할 수 있을 것으로 예상된다. [그림 3]은 $i_{AB}=25.5$등급 은하를 GMT로 10시간 관측했을 경우 얻어질 관측 자료를 모의실험한 것이다. 이 경우 분광픽셀당 약 S/N=5를 얻을 수 있으며, 이는 Lyα 성운 때문에 생기는 흡수선을 검출하고 이로부터 여러 물리량들을 도출하기에 충분하다는 것을 보여주고 있다.

(2) Lyα 성운 내에 있는 은하와 그 주변 물질 연구

Lyα 성운 내의 가스가 어떻게 운동하는지, 그리고 그 운동 속도를 결정할 수 있는 가장 확실한 방법은 성운 내부의 은하들에서 나오는 은하바람 속도를 자외선 금속 흡수선들을 이용해 측정하는 것이다. 그러나 성운 내의 은하들이 매우 어둡기(R > 25mag) 때문에 현재의 8미터급 망원경으로도 관측이 매우 어려웠었다. 우리는 GMT를 이용하여 성운 안에 있는 여러 은하들의 연속 스펙트럼(continuum)관측을 수행할 계획이다. 이 스펙트럼에서 Si II λ1260, C II λ1335, Si II λ1527 같은 흡수선들을 이용하여 은하주변의 바람의 세기 등을 측정하고 다른 물리량과의 상관관계를 연구할 예정이다. 한편 기존 연구에서 우리는 Lyα 성운 주변의 여러 개의 은하들로부터 각각 Hα선들을 검출하여 이 은하들이 정말 서로 상호작용을 하고 있거나 같은 암흑물질 헤일로에 속한다는 것을 밝힐 수 있었는데, 이는 Lyα 성운 알파 성운이 앞으로 은하단이나 무거운 은하군(group)으로 진화할 것이라는 것을 제시한 것이다(Yang et al. 2011). 따라서 제안된 관측 자료에서 자연스럽게 얻어지는 적색이동 정보는 성운 주변의 은하들이 실제로 원시은하군/은하단을 만들고 있는 Lyα 성운의 구성원인지를 결정함으로써 은하군/은하단이 만들어지는 과정을 규명하는 데 도움을 줄 것으로 기대된다.

(3) Lyα 성운에서 He II 1640Å과 C IV 1549Å 방출선 검출을 통한 성운의 에너지원 연구

Lyα 성운의 본질을 밝히는 것이 힘들었던 가장 큰 이유는, 매우 낮은 표면밝기 때문에 상대적으로 밝은 Lyα선만이 관측 가능했었고 다른 어두운 방출선들은 분광관측이나 측광관측으로 검출하는 것이 거의 불가능했기 때문이다. 따라서 이러한 방출선들 사이의 밝기비를 이용하여 에너지원(별 생성, AGN, 은하바람에 의한 shock, 차가운 가스흐름)을 결정하는 방법을 적용할 수 없었다. 예를 들어, 우리 연구팀은 그동안 VLT FORS를 이용하여 매우 긴 시간(필터당 20시간!) 노출의 좁은 폭 측광관측을 통해

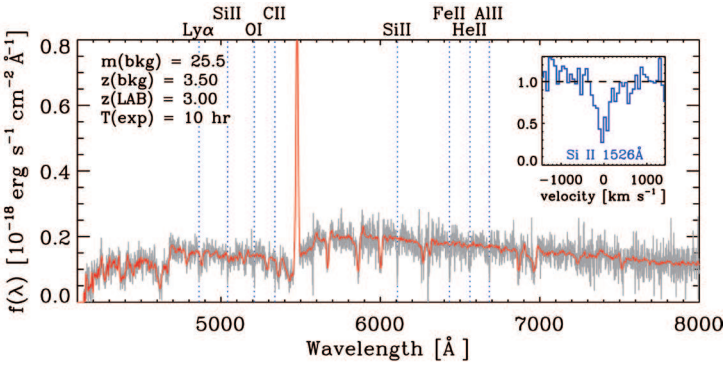

그림 3. 적색이동 z=3에 위치한 Lyα 성운가스가 z=3.5에 있는 배경은하의 연속 스펙트럼에 남긴 흡수선들. GMT의 거울 4개만을 이용할 경우를 가정하고 GMACS 노출시간계산기 1.6 버전을 이용하여 모의실험하였다. 붉은색 선은 배경은하의 모델 스펙트럼이고, 회색 선은 GMACS로 10시간 노출하여 얻은 스펙트럼이다(완벽한 배경하늘 제거를 가정할 경우). 파란 점선들은 Lyα 성운가스가 남긴 여러 흡수선들을 나타낸다. 오른쪽의 작은 그림은 Si II 흡수선 부분을 확대한 것이다.

Lyα 성운에서 He II와 C IV선을 관측하려고 시도했으나 검출에는 실패한 경험이 있다(Arrigoni Battaia et al. 2014, 그림 4). 이들 방출선의 밝기는 Lyα 보다 약 10배 정도 어두울 것이므로, 약 10시간 정도의 GMT/GMACS 분광관측을 통해 성운의 넓은 영역에 걸쳐 두 방출선과 Lyα 방출선의 밝기비를 측정하여 Lyα 성운의 에너지원을 규명할 계획이다.

우리가 위에서 제안한 세 가지 관측은 GMACS나 G-CELF 기기들이 가시광까지만 포함할 것으로 가정하고 고안한 것이다. 만약 GMT의 초기 분광파장대가 현재 활발히 논의되고 있는 대로 근적외선의 1.3μm까지 확장될 경우, Lyα 성운의 적색이동에 따라 근적외선대로 이동된 [O II] 3727Å, Hβ 4863Å, [O III] 5007Å 같은 비공진(non-resonant) 방출선들도 쉽게 측정할 수 있을 것이다. 이 경우엔 우리 연구팀이 이미 수행한 것처럼 Lyα와 여러 방출선 사이의 속도 차이를 이용한 은하바람 연구를 보다 많은 은하들에 대해 확장할 수 있다. 더 나아가 [O II] 3726, 3729Å나 [O III] 4959, 5007Å 같은 이중선들의 밝기비를 이용하면 성운의 온도나 밀도를 직접 측정할 수 있을 것이다.

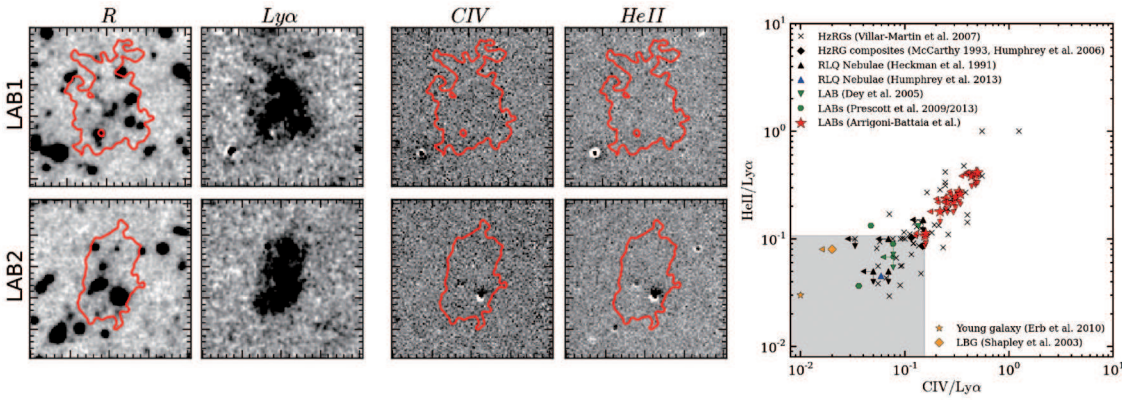

그림 4. (왼쪽) SSA22-LAB1과 LAB2의 여러 파장대에서의 이미지. 왼쪽부터 오른쪽 방향으로 R, Lyα(Subaru; Matsuada et al. 2004)와 C IV, He II(VLT/FORS2; Arrigoni-Battaia et al. 2014) 이미지이다. 8미터급 망원경에서 각 20여 시간에 걸친 깊은 노출에도 불구하고 C IV과 He II 방출선은 검출되지 않았다. (오른쪽) Lyα 성운과 고적색이동의 여러 천체들의 C IV/Lyα, He II/Lyα 밝기비. 붉은 별로 표시된 점들이 Lyα 성운의 밝기비 상한을 나타낸다. 그림에서 회색으로 표시된 곳이 앞으로 GMT를 이용하여 탐색할 영역이다.

3) 선행 연구

앞에서 제안한 연구들을 선도적으로 수행하기 위해서는 2020년까지 최적의 Lyα 성운 샘플을 최대한 많이 확보하고 관련된 연구를 주도적으로 수행해야 한다. 이를 위하여 4-m나 8-m급 망원경을 이용하여 하늘의 매우 넓은 영역(수십 각도)에 대해 좁은 필터를 이용한 탐사관측을 수행하는 것을 고려해볼 수 있다. 한편, 앞에서 언급한 HETDEX나 Subaru HSC을 이용한 탐사관측으로부터 매우 크고 밝은 Lyα 성운이나, 밝은($i_{AB} < 22$등급) 배경은하, QSO가 발견될 경우 8-m급 망원경을 이용하여 여기서 제안된 관측들을 미리 시도해볼 수도 있을 것이다. 다른 파장대역에서는 현재 계획 중인 NISS 위성(Near-infrared Imaging Spectrometer for Star Formation History) 같은 근적외선기기를 이용하여 Lyα 성운과 비슷한 [OII] 또는 [OIII] 성운들을 찾는 연구를 시도할 수 있다. 더 나아가 ALMA를 이용하여 먼지소광에 방해받지 않는 (서브)밀리미터 대역의 여러 분자선이나 원자선(atomic fine structure lines)을 이용하여 Lyα 성운의 본질을 밝히는 연구도 동시에 추진해야 할 것이다.

4. 연구 결과의 기대 성과

여기서 제안된 연구를 통해 그동안 밝혀지지 않았던 Lyα 성운의 본질이 밝혀지고 원시은하군/은하단 생성에 관한 연구가 활발하게 이루어질 것이다. 한편 제안된 관측들, 대표적으로 Lyα 성운-은하 쌍을 이용한 연구들은 앞으로 거대망원경들로 일상적 수행할 수 있는 실험들의 시범 사례가 될 것이다(GMT Science Book 5.4장 "Feedback and the galaxy-IGM connection" 참조). 따라서 우리는 Lyα 성운 관련 연구뿐만 아니라, 제안한 연구들을 통해서 초기 GMT의 성능을 검증하고 관련 고적색이동 연구 분야에서 선도적인 역할을 하도록 노력할 계획이다.

5. 참고문헌

Arrigoni-Battaia, F., Yang, Y., et al. 2014, submitted to ApJ

Geach, J. E. et al. 2009, ApJ, 700, 1

Goerdt, T., Dekel, A., Sternberg, A., Ceverino, D., Teyssier, R., et al. 2010, MNRAS, 407, 613

Hayes, M., Scarlata, C., & Siana, B. 2011, Nature, 476, 304

Matsuda, Y. et al. 2004, AJ, 128, 569

Matsuda, Y. et al. 2011, MNRAS, 410, L13

Prescott, M. K. M., Dey, A., & Jannuzi, B. T. 2009, ApJ, 702, 554

Prescott, M. K. M., Dey, A., & Jannuzi, B. T. 2012, ApJ, 748, 125

Steidel, C. C., Adelberger, K. L., Shapley, A. E., Pettini, M.,Dickinson, M., et al. 2000, ApJ, 532, 170

Steidel, C. C. et al. 2010, ApJ, 717, 289

Steidel, C. C., Bogosavljevic, M., Shapley, A. E., et al. 2011, ApJ, 736, 160

Taniguchi, Y. & Shioya, Y. 2000, ApJ, 532, L13

Yang, Y., Zabludoff, A. I., Jahnke, K., Eisenstein, D. J., & Davè, R., 2014b arXiv:1407.6801

Yang, Y., Walter, F., Decarli, R., Bertoldi, F., Weiss, A., et al. 2014a, ApJ, 784, 171

Yang, Y., Zabludoff, A. I., Jahnke, K., Eisenstein, D. J., Davè, R., et al. 2011, ApJ, 735, 87

Yang, Y., Zabludoff, A. I., Eisenstein, D., & Davè, R. 2010, ApJ, 719, 1654

Yang, Y., Zabludoff, A. I., Tremonti, C., Eisenstein, D. J., & Davè, R. 2009, ApJ 693, 1579