심우주의 고밀도 은하 탐사

● 김주한[1], 양유진[2], 박창범[1], 황호성[3], Benjamin L'Huillier[1], Cristiano Sabiu[1], 박현배[4]

고등과학원[1], Universität Bonn[2], Harvard Smithsonian Center for Astrophysics[3], Univ. of Texas, Austin[4]

초 록

우리는 GMT의 GMACS를 이용하여 Ks(AB) = 24까지 등급제한 은하 적색이동 관측을 수행하고자 한다. 겹치는 두 개의 영역(1.36제곱각과 0.45제곱각)에서 총 30일 동안 66,000개 은하의 적색이동을 측정하고, 가깝고 어두운 은하들(적색이동 2 이하)과 멀고 밝은 별 탄생 은하들(적색이동 3~5)의 시간과 공간 분포를 이용하여 별과 은하의 탄생 그리고 그들의 진화에 대해서 연구하고자 한다. 또한 원시은하의 개수 분포와 공간 분포에 대해서 우주론적 통계분석을 수행하여 우주모형을 검증하고자 한다.

1. 과학 목적 및 요약

우리는 Ks(AB)=24등급까지의 두 가지 관측 영역의 은하들에 대해서 등급제한 다목적 분광탐사를 수행하여, 고적색이동 구간 2와 5 사이에 있는 밝은 별 탄생 은하들과 중·저 적색이동 공간의 어두운 은하들에 대한 분광자료를 얻고자 한다. 이 자료를 통해 은하가 생성되는 초기우주에서의 별 탄생의 기작과 은하의 공간 분포를 파악하여 우주론 연구를 수행하고, 가까운 우주에 있는 작고 어두운 은하들을 관측하여 은하들의 공간 분포와 물리적 성질에 대한 연구를 질량 규모가 작은 곳까지 확장시키려고 한다.

우주배경복사 시기 이후로 우주는 빛을 내는 천체가 없는 암흑시기를 거치게 되고, 중력 수축으로 최초의 별들이 탄생하고 작은 구조물들이 서로 병합 발전하여 별들의 집합체인 은하의 탄생까지 이어지게 된다. 이러한 은하의 탄생은 대략 적색이동 3~5에서 마침내 본격적으로 시작하고, 이후의 은하 병합과 상호작용을 통해서 오늘날 볼 수 있는 다양한 은하들이 나타나게 된다.

초기우주에서 은하들은 현재 은하단의 중심이 될 지역에서 주로 생성된다. 따라서 좁은 지역에 많은 은하들이 생겨나고 서로 큰 영향을 주고받기 때문에 은하단 생성 초기의 환경 영향을 알아낼 수 있다. 또한 은하단은 전체 우주 공간에서 매우 드물게 나타나는 커다란 우주 구조물이기 때문에 이러한 초기은하단의 개수와 공간 분포로부터 우주의 파워스펙트럼을 추정할 수 있고 이를 통해서 우주 모형을 검증할 수 있을 것이다. 또한 가까운 우주에서의 작고 어두운 은하들의 관측은 암흑물질 헤일로의 진화 과정을 연구하는 데 큰 도움이 된다. 현존하는 거의 모든 우주론적 시뮬레이션이 가지고 있는 “작은 은하들의 과다 형성 문제”를 면밀히 조사하기 위해서는 매우 어두운 은하들의 공간 분포를 관측하는 것이 중요하다.

이러한 고적색이동 은하들의 분광관측에는 주로 Lyα 방출선을 이용하여 적색이동을 측정하게 된다. 이 방출선은 적색이동 3에서는 4864Å 그리고 적색이동 5에서는 7296Å에서 관측된다. 따라서 광학대 파장구간(3800Å~9500Å)에서 별 탄생이 활발한 은하들의 적색이동 관측이 가능하다. 이러한 적색이동 탐사는 특정 대상으로 수행되었던 기존의 단발적 분광관측이 할 수 없었던 초기우주의 별 탄생의 경향을 집합적으로 수행할 수 있을 것이다.

2. 연구 필요성, 배경 및 동향

1) 연구의 배경 및 필요성

초기우주에서의 별 탄생과 은하의 형성 기작은 천체물리학에서 아직 해결되지 않은 문제다. 현재 은하단에 주로 보이는 타원은하 또는 만기형 은하들은 정형적인 모습을 보여주고 있지만, 초기은하단 지역에서 나타나는 급격한 별 탄생과 은하 씨앗이 자라나는 과정들은 매우 역동적일 것이고, 이에 따라서 초기은하들도 현재 은하들과 매우 다른 모습을 지닐 것으로 기대하고 있다. 따라서 본 관측 프로젝트를 통해서 우리는 현재 장년이 된 은하들과 유년기일 때의 은하들을 서로 비교하여 은하들이 나이를 먹음에 따라서 어떻게 진화하는지에 대한 중요한 단서를 제공할 수 있을 것이다.

은하의 적색이동 관측을 통한 우주거대구조 탐사는 1980년대의 CfA 탐사를 기점으로 본격적으로 시작되었고, 지난 30년 동안 다양한 적색이동 관측 프로젝트들(예를 들면 2dFGRS와 SDSS)이 성공적으로 수행되었다. 최근에 SDSS-III가 수많은 연구 결과물들을 배출하며 성공적으로 막을 내렸고, 현재는 좀 더 깊고 먼 곳을 바라보기 위해서 eBOSS와 DESI 등의 대규모 국제 은하 탐사 프로젝트들을 본격적으로 준비하고 있다. SDSS의 성공적인 관측을 통해서 우리는 프로젝트 초기에 기대했던 것보다 훨씬 많은 새로운 연구 주제들을 발굴해내었고 생각지도 못했던 천체 현상들을 발견하기도 하였다. 따라서 초기우주 은하들에 대한 체계적인 분광탐사를 한다면 우리가 생각지 못한 새로운 자연 현상과 새로운 우주론적 구조물들을 발견할 가능성이 매우 높을 것이다.

2) GMT의 필요성

고적색이동 구간에서의 은하들에 대한 분광관측을 수행하여 초기우주에서의 은하 형성을 살펴보는 것은 매우 도전적인 연구 주제이다. 현재의 8m급의 망원경으로는 R=22등급의 분광자료를 얻기 위해서 대략 4시간의 분광노출이 필요하다(Lilly et al. 2007). 따라서 Ks=24등급(적색이동 3 이상인 밝은 은하들이 대상. 대략 R≃25.6에 해당)까지 많은 은하들의 분광자료를 얻는 것은 현재 세계적인 망원경으로도 거의 불가능에 가깝다. 하지만 현재의 가장 큰 망원경보다 5배 이상 더 큰 집광능력을 가질 GMT가 완성되면, 같은 관측 시간 내에 동일한 분광분해능

으로 R=22등급의 은하들을 5배 이상 더 많이 관측할 수 있어서 고적색이동 구간에서 은하의 형성과 분포 연구에 매우 큰 도움이 될 것이다. 또한 GMT는 가까운 우주에 있는 작고 어두운 은하들에 관한 연구에 절대적이다. 현재 SDSS의 Main Galaxy 샘플의 경우 r=17.7등급까지, 즉 적색이동 0.05의 M_r=-18등급의 은하까지 관측할 수 있다(Choi et al. 2010). 하지만 GMT GMACS를 이용하면 약 100배 어두운 은하를 불과 10여 분 만에 분광관측할 수 있을 것이다. 따라서 우리는 가까운 우주의 어두운 은하들을 매우 쉽게 관측할 수 있고, 높은 통계적인 정확도로 이들 은하의 분포와 성질들을 연구할 수 있을 것으로 기대한다.

3) 국내외 연구 동향

지금까지 이루어진 은하 적색이동 분광탐사는 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 즉 좁고 깊은 또는 넓지만 얕은 탐사들이다. SDSS, 2dFGRS, WiggleZ는 분광관측된 은하의 수가 10만 개가 넘는 대표적인 것들이지만 이들의 최대 적색이동 깊이는 1보다 작다. 그리고 최근에 이루어진 좁고 깊은 탐사들로는 대표적으로 zCOSMOS-Deep($\langle z \rangle$=2.1; Lilly et al. 2007), VVDS-Deep($\langle z \rangle$=0.92; Le Fèvre et al. 2013), VIPERS($\langle z \rangle$=1; Guzzo et al. 2013) 등이 있다. 이러한 좁고 깊은 탐사들의 평균 관측 깊이들은 z=1~3 정도이지만 분광분해능이 낮아서(zCOSMOS-Deep: R=200, VVDS-Deep: R=230, VIPERS: R=210), 시선방향의 길이 오차가 $15h^{-1}$Mpc 정도 된다. 이 값은 현재 은하들의 평균 상관길이의 3배에 육박하고 은하단의 평균 거리의 절반에 해당하기 때문에, 해당 은하의 위치에서 주변 환경과 은하 간의 상호 관계를 연구하기에는 분해능이 턱없이 부족하다. 이와 관련한 국내 연구로는 2007년도에 8.1m급 망원경으로 $r^* < 22$ 등급한계로 허블거리($d_H=3000h^{-1}$Mpc)까지의 은하관측(Hubble-Depth Survey) 계획을 세운 적이 있다(Park & Kim 2007). 이를 통해서 초기우주에서의 은하 형성, 분포, 퀘이사, 그리고 우주론 관련 연구를 수행하고자 하였으나 이에 필요한 망원경 건설이 진행되지 못하였다.

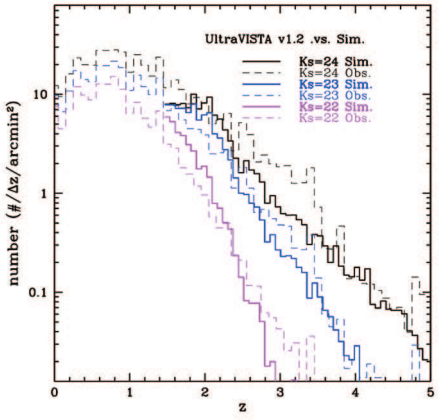

그림 1. UltraVISTA 관측에서 구한 측광학적 적색이동에 따른 은하의 분포(점선)와 우주론적 다체 시뮬레이션을 통해서 예측한 가상은하의 분포(실선). 관측 등급 상한이 Ks=24, 23, 그리고 22일 때의 분포를 보여주고 있다. 적색이동 3-3.5 사이에 관측이 시뮬레이션 예측보다 50% 정도 높게 나오는 이유는 유한한 관측 영역에 우연히 들어오는 우주거대구조의 영향 혹은 측광학적 적색이동 측정 방법의 오차에 기인한 것이다.

3. 연구의 내용 및 방법

1) 연구 대상

본 적색이동 탐사는 분광관측 대상을 선정할 때에 기존의 측광관측 자료로부터 시너지를 얻는 것이 중요하다. 현재는 COSMOS 필드 또는 Extended Chandra Deep Field South(ECDFS, ~0.3deg^2)가 관측 대상 후보군이다. 이 지역들은 이미 여러 파장대에서 광학, 전파, X-ray 관측이 수행되었기 때문에 별이나 다른 천체들로부터 대상은하를 선별하기 위해서 선행 측광관측이 따로 필요하지 않다.

우리는 기존 광학관측에서 얻어낸 측광 자료를 바탕으로 다음과 같은 두 개의 적색이동 탐사를 수행하는 것을 목표로 하고 있다. 이하 언급되는 예상 관측 가능 은하의 수는 그림 1에 나온 은하 개수 분포에 기반한 것이다.

(1) 얇고 넓은 관측 영역: 이 영역의 크기는 1.36제곱각도(49.5′×99′; GMACS 분광관측 타일 121개)로 하되 관측 등급을 Ks=22와 23으로 제한한다. 여기에 대략 30,000개의 대상은하가 있을 것이고, 적색이동 2와 5 사이의 매우 밝은 은하들과 중·저 적색이동 공간의 어두운 은하들이 주된 관측 대상이 될 것이다. 그림 1을 보면 Ks=23등급으로 했을 경우 적색이동 2-5에서의 은하들(주로 밝은 은하들에 해당)은 이 영역에 대략 7,500개 정도 있을 것으로 예상하고 있다. 그리고 나머지 22,500개의 은하들은 중·저 적색이동 공간에 있을 것으로 생각된다.

(2) 깊고 좁은 관측 영역: 이 영역은 관측 영역 (1)의 가운데에 있고, 크기는 0.45제곱각도(36′×45′; 분광관측 타일 40개)로 관측이 수행될 예정이다. 관측 등급은 Ks=23과 24로 하여 영역 (1)보다 상대적으로 어둡고 깊은 곳까지 36,000개 은하들을 분광관측할 예정이다. 여기에는 대략 2,000-4,000개의 밝은 고적색이동

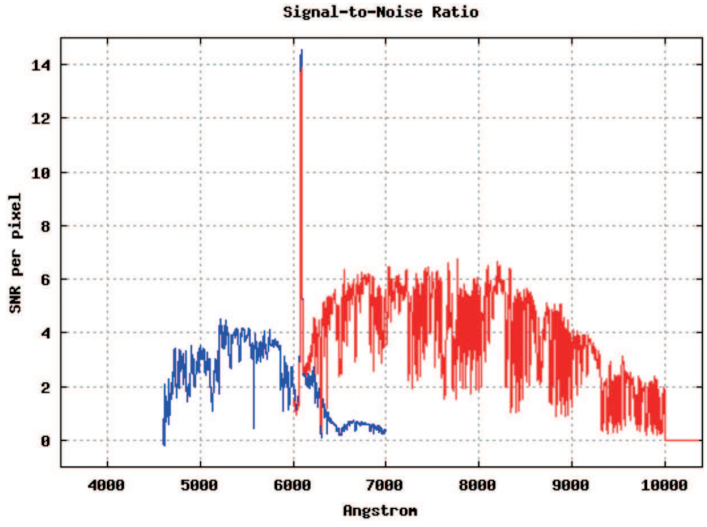

그림 2. 적색이동 4에 있는 관측 등급 R=25.5(대략 Ks=24에 해당) 별 탄생 은하(Lyman Break galaxy)를 GMACS로 2.5시간 노출을 주었을 때 얻는 분광자료의 S/N 값의 분포. 여기에서 우리는 4개의 거울과 저분해능 (Δλ=3.73Å; R=2,000 정도에 해당) 노출을 가정하였다. 따라서 속도분해능은 λ=6000Å에서 약 180km/second이다(픽셀 크기의 분해능을 가정).

은하들이 있고, 나머지는 어두운 중·저 적색이동 은하들로 채워질 것이다.

이와 같이 케이크처럼 겹겹이 쌓인 탐사관측 전략을 채택하여 총 66,000개 은하의 분광자료를 얻는 것이 목표다. 그림 2는 분광관측 시뮬레이션을 통해서 얻어낸 적색이동 4에 있는 별 탄생 은하를 2.5시간 노출했을 때 얻어지는 스펙트럼의 S/N 분포를 나타내고 있다.

2) 사용 GMT 기기 및 관측 전략

GMACS slit mask의 개수를 500개로 그리고 한 번 관측 타일의 크기를 4.5′×9′으로 가정하고 계산하겠다. 이처럼 많은 슬릿 마스크(slit mask)는 고밀도의 은하 탐사에 반드시 필요하다.

첫 번째 관측 영역은 등급을 Ks=22와 23 사이로 제한하여 1시간 분광관측 시 신호대잡음비가 약 10이 되도록 할 예정이다. 관측 영역은 1.36제곱각도로 하고 GMACS 관측 타일을 총 121개 설정하도록 할 예정이다. 이러한 관측 공간과 등급 구간 사이에 은하는 대략 60,000개(그림 1 & Lilly et al. 2007)로 추정되고 관측

대상은하는 HST 관측 자료나(Scoville et al. 2007; Rix et al. 2004) 또는 다파장대의 관측 자료들[예를 들면 COSMOS 필드를 관측한 UltraVISTA의 Y, J, Ks 밴드별 자료, CDFS 필드를 관측한 CDFS-MUSIC(Cardamone et al. 2010)의 B, V, R, I, z, J, H, K 밴드별 자료, 그리고 HUDF를 관측한 VLT/ISAAC(Retzlaff et al. 2010)의 Ks 밴드]로부터 골라낼 예정이다. 각각의 GMACS 타일에 대해서 1번의 분광관측(한번에 250개의 대상에 대해서 분광관측한다고 가정)을 수행하여 100%(추정치 90%) 분광 완성도에 도전할 생각이다. 이 관측에는 총 11일 정도 소요될 예정이다.

두 번째 관측 영역은 첫 번째 관측 영역 가운데에 위치하도록 하겠다. 이 영역은 0.45제곱각도(40개의 GMACS 관측 타일에 해당) 정도의 면적을 갖게 하고 등급 제한을 Ks=23과 24 사이로 정하고 Ks=23보다 밝은 은하들은 첫 번째 관측 영역에서 얻은 자료를 활용하겠다. 이 등급 구간에서 신호대잡음비가 약 4 이상이

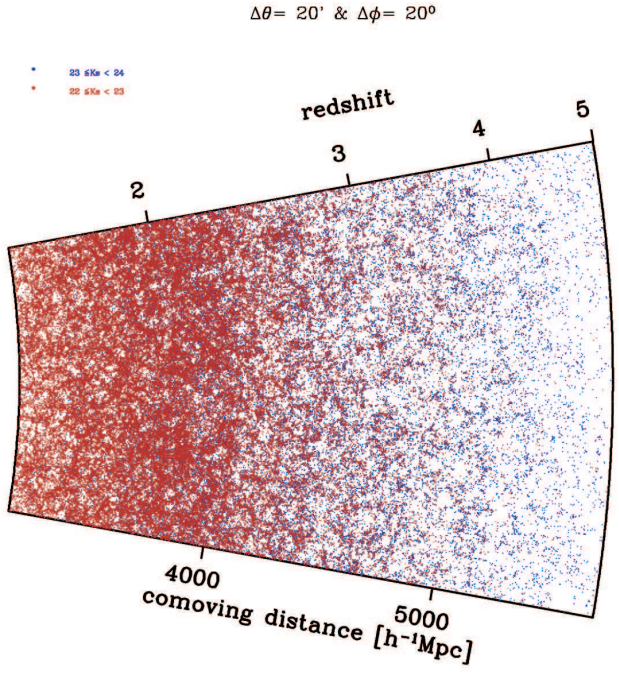

그림 3. 고적색이동에서 가상은하들의 2차원 공간 분포. 우주론적 다체 시뮬레이션 코드인 GOTPM(Dubinski et al. 2004)을 바탕으로 은하 형성 시뮬레이션(Kim et al. 2011)을 수행하고 이로부터 예상되는 고적색이동 은하들의 2차원 공간 분포를 보여주고 있다. 가상관측자는 왼쪽 멀리에 있고 관측 영역의 두께는 20각분이고 넓이는 20각도이다. 여기에 관측 등급별로 은하들의 분포를 색을 달리하여 공간 분포를 나타내었다.

되도록 2.5시간 동안 분광관측을 수행하여 은하의 분광신호를 얻을 생각이다. 이 두 번째 관측 영역에는 총 36,000개의 은하가 있을 것으로 예상되고(Taniguchi et al. 2007), 이 전체 은하를 100% 관측하기 위해서는 각 관측 타일(4.5′×9′)마다 2개의 슬릿 마스크가 필요하므로 총 18일 정도의 관측 시간이 필요하다.

따라서 총 30일 분광관측을 하여 총 66,000개 은하의 분광자료를 얻을 예정이다. 이 분광자료에서 여러 방출선(Lyα, He II, C IV 등)과 금속 흡수선들을 이용하여 적색이동을 측정할 계획이다. 특히 Lyman-α 방출선은 우리가 원하는 적색이동 공간($2 < z < 5$)에서 광학 파장대에 있기 때문에 별 탄생이 활발한 은하들의 적색이동 값을 쉽게 얻을 수 있을 것이다. 그런데 여러 방출선 또는 흡수선들을 병행 관측하여 적색이동 값의 정확도를 높이기 위해 근적외선($< 1.3\mu m$)까지 스펙트럼을 얻는 것이 매우 중요하다.

그림 3에는 시뮬레이션을 통해서 예상되는 관측 은하들의 2차원 공간 분포가 나와 있다. 은하들의 공간 분포를 좀 더 보여주기 위해서 본 탐사의 관측 영역보다 더 넓은 지역을 선택했다. 관측한계등급을 $Ks = 23$으로 했을 경우, 대부분의 은하들은 적색이동 3 이내에 분포하고 $Ks = 24$일 경우에는 적색이동 5의 은하들까지 볼 수 있는 것을 나타내고 있다. 1차원 pencil-beam 관측이나 2차원 은하 적색이동 관측의 경우 3차원 관측보다는 적은 시간과 투자로 깊게 또는 폭이 넓게 관측할 수 있어서 GMT처럼 큰 망원경 이용에 효율성을 가져다줄 수 있을 것이다(Park & Gott 1991).

3) 과학적 연구 방법

관측을 통해서 얻은 고적색이동의 은하들 분포로부터 우리는 여러 가지 연구를 할 수 있을 것이다. 그중에서 대표적인 것으로는 고적색이동 은하들의 공간 분포와 적색이동에 따른 개수 변화를 이용한 우주론과 은하진화 연구가 있다. 관측된 별 탄생 은하의 광도와 개수 진화를 이용하여 초기우주의 별 탄생 역사를 살펴보고, 이를 표준우주모형의 시뮬레이션에서 구현한 가상은하의 개수 진화와 비교하여, 우주 초기 고밀도 지역의 별 탄생과 은하 탄생을 지배하는 물리량들을 계산할 수 있을 것이다. 또한 고적색이동에서 별 탄생 은하들이 공간적으로 얼마나 크게 밀집해 있는지 정량화하고 이를 시뮬레이션과 비교하여 우주모형을 검증할 수 있을 것이다(Park et al. 2012).

4. 연구 결과의 기대 성과

본 등급제한 다목적 고적색이동 은하 탐사는 8m급 망원경에서 수행되었던 중·저 적색이동 탐사를 한 단계 뛰어넘는 중요한 이정표가 될 것이다. 특히 적색이동 2~5 사이에 별 탄생이 본격적으로 발생하는 밝은 초기은하들과 적색이동 2 이하의 어두운 은하들을 동시에 관측함으로써 깊은 우주에서의 별과 은하의 탄생과, 근 우주에서의 질량이 작고 어두운 은하들의 연구에 절대적인 영향을 미칠 것이다. 고적색이동의 밝은 은하들을 관측함으로써 우리는 우주 초기의 물질 분포와 초기은하들의 생성에 대해서 매우 중요한 연구를 수행할 수 있을 것이다. 뿐만 아니라 초기우주 별 탄생의 기작과 중금속함량의 역사를 근 우주 관측과 비교하여 기존의 우주 역사에 대한 지식을 한 단계 더 깊게 확장시킬 수 있을 것이다. 질량이 작고 어두운 은하들은 주로 중심의 밝은 은하들 주변에 분포하고 있으므로 이번 관측을 통해서 밝은 은하들 주변의 위성은하들의 공간/속도 분포를 알아낼 수 있고, 나아가 은하의 형성에 대해서 심도 있는 연구를 할 수 있을 것이다.

이번 탐사의 목표는 해당 영역에서 등급제한에 들어오는 은하들을 최대한 100%(예상치는 90%) 분광관측하는 것이기 때문에, 높은 신뢰도를 갖고 은하에 대한 통계연구를 수행할 수 있게 되고 더 나아가 별 탄생이 활발해지기 시작한 때에 은하 형성의 기작에 대해서 자세히 연구할 수 있을 것이다. 기존의 여러 다목적 은하 적색이동 탐사와 마찬가지로, 시작할 때에 기대했던 연구 결과보다 훨씬 다양하고 참신한 연구 결과들을 얻을 것이다. 이번 탐사를 성공적으로 수행하면 고적색이동에서 별 탄생과 은하 탄생에 관련된 현상과 더불어 잘 알려져 있지 않은 새로운 현상들, 예를 들면 은하 중심에서 거대블랙홀의 탄생 순간이나 초기은하단의 생성 순간 등을 발견할 수 있을 것이다.

본 탐사는 두 가지 목적을 동시에 추구하고 있다. 즉 시간(고적색이동)과 질량(어두운 은하)이라는 측면에서 기존 은하에 대한 연구 범위를 확장시킬 것이고, 이것이 바로 GMT가 추구하는 바와 일치하는 것이다. 따라서 다른 적색이동 탐사와 비교하면 작은 규모이지만 여기에서 나오는 천문학적 연구 결과들은 기존의 탐사와 비교가 불가능할 정도로 매우 중요할 것이다.

5. 인용문헌

Cardamone et al. 2010, ApJS, 189, 270

Choi, Y.-Y., Park, C., Kim, J., Gott, J.R. III, Weinberg, D.H., & Vogeley, M.S. 2010, ApJS, 190, 181

Dubinski, J., Kim, J., Park, C., & Humble, R. 2004, New Astronomy, 9, 111

Guzzo, L., Scodeggio, M., Garilli, B., et al. 2013, arXiv:1303.2623

Kim, J., Park, C., Rossi, G., Lee, S.-M., & Gott, J. R., III 2011, JKAS, 44, 217

Lilly, S. J., Le Fèvre, O., Renzini, A., et al. 2007, ApJS, 172, 70

Park, C., Choi, Y.-Y., Kim, J., Gott, J. R. III, Kim, S. S., Kim, K.-S. 2012, ApJ, 759, 7

Park, C. and Kim, J. 2007, RevMexAA, 28, 93

Park, C. and Gott, J. R., III 1991, MNRAS, 249, 288

Retzlaff, J. et al. 2010, A&A, 511, 24

Rix, H.-W. et al. 2004, ApJS, 152, 163

Scoville, N. et al. 2007, ApJS, 172, 150

Taniguchi, Y. et al. 2007, ApJS, 172, 9