적색이동 사막 구간의 고밀도 적색이동 탐사

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

고등과학원[1], 경희대학교[2], Univ. of Texas, Austin[3]

초 록

본 연구팀은 1제곱각의 면적에서 $i<24.5$인 모든 은하에 대해 중분산($R=3000$)분광관측을 수행하여, 적색이동 구간 0.8에서 2.5 사이에 있는 어두운 은하들에 대한 분광자료를 얻고자 한다. 겉보기등급 한계 $i=24.5$는 적색이동 $z=1.5$에서 절대등급 $M_B<-20$인 모든 은하들의 분광자료를 줄 것이고, 크기 1도는 $z=1.5$에서 $50h^{-1}$Mpc 규모의 공간에서 은하들의 분포를 보여줄 것이다. 이 자료를 통해 은하들의 성장과 별 생성이 가장 활발하게 일어나는 시기에 대한 연구를 수행할 수 있게 될 것이다.

1. 과학 목적 및 요약

본 관측 제안팀은 약 i=24.5등급까지의 은하들에 대해 등급제한 분광탐사를 수행하여, 적색이동 구간 0.8에서 2.5 사이에 있는 어두운 은하들에 대한 분광자료를 얻고자 한다. 이 자료를 통해 은하들의 성장과 별 생성이 가장 활발하게 일어나는 시기에 대한 연구를 목적으로 한다. 또한 등급제한 탐사를 통해 자연스럽게 주어지는 적색이동 2.1 이상에 위치한 Ly-alpha 방출은하들의 분포자료와 적색이동 2.2 이상에 있는 중성수소 은하 간 물질의 분포자료를 동시에 얻어서 고적색이동 시기의 은하분포와 성질, 은하 간 물질 간의 관계를 연구하고자 한다.

적색이동 구간 약 1.4에서 2.1 사이는 광학대 파장구간(약 3800A~9500A) 안에 적색이동과 분광 정보를 얻을 강한 분광선이 없기 때문에 적색이동 사막(red shift desert)이라고 부른다. 또한 적색이동 0.8 이상의 시대에는 현재 미리 선별하지 않고 관측된 완전한 등급제한 은하 탐사 자료는 규모가 극히 작고, 주로 일부 색제한이 된 밝은 은하들만 분광관측이 되어 있는 실정이다.

본 관측 제안팀은 1제곱각의 면적에서 등급이 $i < 24.5$인 모든 은하에 대한 중분산(R=3000)분광관측을 제안하고자 한다. 동시관측 파장대는 3800A에서 1.3μm까지이다. GMT/GMACS를 사용한 이 은하 적색이동 탐사는 지금까지 은하 생성과 진화 연구에 큰 걸림돌이 되어왔던 적색이동 사막 구간의 자료 부족 문제를 처음으로 완전히 없애게 될 것이다. 겉보기등급 한계 i=24.5는 적색이동 z=1.5에서 절대등급 $M_B < -20$인 모든 은하들의 분광자료를 줄 것이고, 크기 1도는 z=1.5에서 $50h^{-1}$Mpc 규모의 공간에서 은하들의 분포를 보여줄 것이다.

본 탐사의 또 다른 특징은 매우 어두운 등급까지 분광자료가 얻어지기 때문에 적색이동 z=0.8-2.5 구간에서 밀도 높은 그리고 절대등급의 폭이 넓은 은하 자료를 얻게 된다는 점이다. 이로 인해 은하종족의 다양성과 은하에 대한 우주거대구조 환경의 효과도 시간의 함수로 연구할 수 있게 될 것이다.

2. 연구 필요성, 배경 및 동향

1) 연구의 배경 및 필요성

은하 적색이동 탐사는 지난 수십 년간 관측우주론을 발전시키는 결정적인 역할을 해왔다. 그중에 특히 고밀도 겉보기등급제한 분광탐사로는 대표적인 예가 1980년대의 CfA2 탐사와 2000년대의 SDSS 탐사가 있었다. 플럭스제한 분광탐사 자료는 여러 과학적 활용도가 있는데 다양한 은하종족 연구, 은하광도함수와 별 질량함수 측정, 별 생성률 측정, 은하성질에 대한 환경효과 연구, 이점상관함수와 다점상관함수 측정, 우주거대구조 발견, 우주밀도장의 정규분포 성질 검증 등 매우 다양하다.

본 제안팀은 겉보기등급제한 은하 분광관측을 통해서 적색이동 구간 $z=0.8-2.5$ 사이의 시기를 특히 탐사 연구 대상으로 삼고 있다. 우주의 역사에서 왜 이 구간이 중요한가? 이 구간은 바로 은하의 생성 시기다. 오늘날 밝은 은하들의 총질량은 $10^{11}h^{-1}M_{\odot}$에서 $10^{13}h^{-1}M_{\odot}$ 사이의 값을 갖는다. 예를 들면 우리은하의 질량은 약 $10^{12}h^{-1}M_{\odot}$이다. 헤일로가 현재 질량의 반에 도달하게 되는 시기를 보통 헤일로의 생성 시기라고 하고, 이는 은하의 생성 시기라고도 할 수 있다. N-체 모의실험 결과에 따르면 헤일로의 반질량-헤일로 생성 시기는 평균적으로 $z_f=2.89(M/10^{10}h^{-1}M_{\odot})^{-0.0563}-1$로 주어진다(Boylan-Kolchin 등 2009). 따라서 헤일로들의 생성 시기는 다음 표 1과 같이 주어진다. 헤일로 질량은 별 질량과 통계적으로 일대일 대응을 시킬 수 있는데 이에 따라 각 헤일로 질량에 해당되는 천

표 1. 헤일로 생성 시기와 해당 천체

헤일로 현재 질량	반질량-헤일로 생성 시기	해당 천체 예
$10^{14}h^{-1}M_{\odot}$	0.72	은하단
$10^{13}h^{-1}M_{\odot}$	0.96	은하군
$10^{12}h^{-1}M_{\odot}$	1.23	M31, 우리은하
$10^{11}h^{-1}M_{\odot}$	1.54	M33, LMC, M32
$10^{10}h^{-1}M_{\odot}$	1.89	왜소은하
$10^{9}h^{-1}M_{\odot}$	2.29	왜소은하

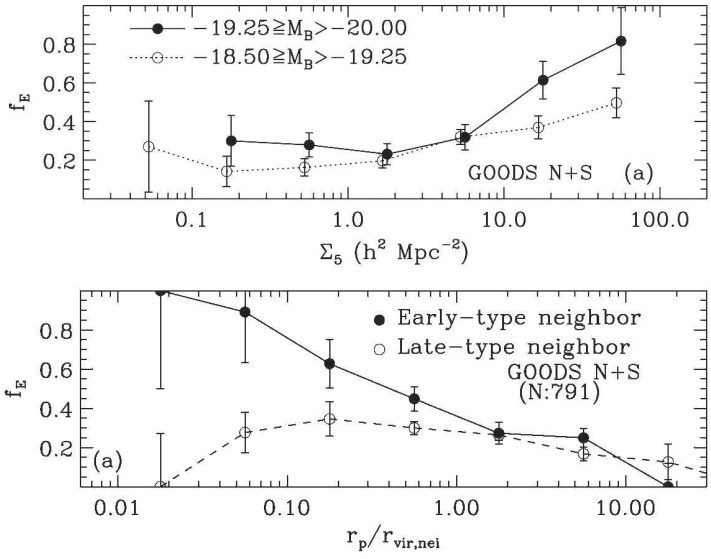

그림 1. (위) GOODS North와 South 자료에서 확인된 은하들의 형태-광도(M_B)-주변 밀도(Σ_5) 관계. 세로축 f_E는 조기형 은하의 비율이다. (아래) 가장 가까운 은하까지의 거리(rp)에 따른 은하 형태의 변화. 짝은하가 조기형인 경우(실선)와 만기형인 경우(점선)인 경우로 나누었다. 거리는 짝은하의 비리얼 반경으로 규격화했다(Hwang & Park 2009).

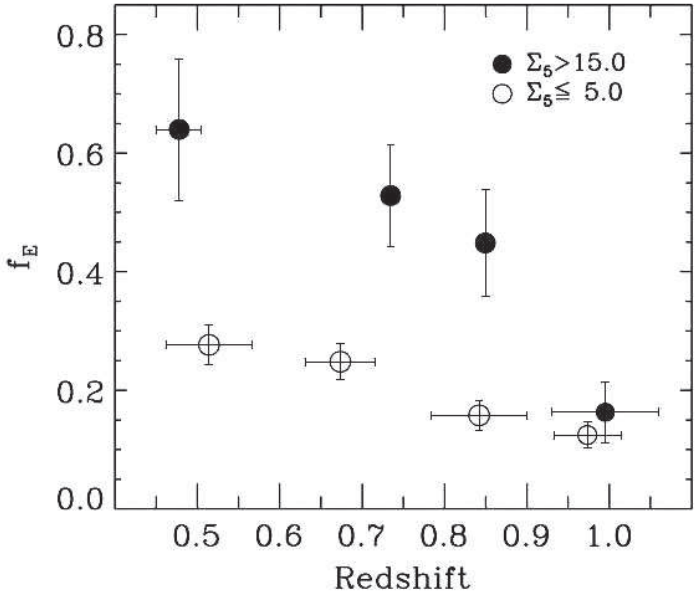

그림 2. 적색이동에 따른 조기형 은하의 비율. 주변 밀도가 높은 지역($\Sigma_5 > 15$; 검은 원)과 낮은 지역($\Sigma_5 < 5$; 속이 빈 원)으로 나누었다(Hwang & Park 2009).

체의 예를 참고로 제시하였다(Guo 등 2010). 이 표는 적색이동 1에서 2 사이의 시기가 바로 은하 생성 시기라는 점을 분명히 보여주고 있으며, 은하의 생성을 이해하기 위해서는 이 시기에 대한 연구가 가장 중요함을 알 수 있다.

실제로 이 시기는 은하의 병합과 별 생성이 최고조에 이르는 시기임이 관측적으로 확인되고 있다. 그러나 이 시기에 대한 은하의 환경과 병합에 대한 통계적인 연구를 할 수 있는 양질의 자료는 현재 없으며 $z < 1$의 시기에 작은 자료들이 있을 뿐이다. 이 자료에 따르면 $z \sim 1$인 때에 은하들은 현재 가지고 있는 대부분의 물리적 성질을 이미 갖추고 있다. 예를 들면 현재 우리 주변의 은하들은 형태와 광도 간에 상관관계가 있으며, 형태와 거대규모 환경과도 상관관계도 있다. 또 같은 형태의 은하들끼리 모여 있는 형태 동거성을 가지고 있다.

이러한 성질들은 적색이동 $z \sim 1$까지도 그대로 보이고 있다. 그림 1의 위 그림은 GOODS 자료에서 확인된 은하들의 형태-광도(M_B)-주변 밀도(Σ_5) 관계이다. 주변 밀도가 증가함에 따라, 또 광도가 큼에 따라 조기형 은하의 비율(f_E)이 높아짐을 볼 수 있다. 그림 1의 아래 그림은 은하 형태 동거성 역시 이 시기에 성립되어 있음을 보여준다. 가장 가까운 은하까지의 거리(rp)에 따른 은하 형태의 변화를 보면 짝은하가 조기형인 경우(실선)는 은하가 조기형일 가능성이 높아지고, 만기형이면(점선) 만기형일 가능성이 높아진다(Hwang & Park 2009). 따라서 은하들이 이러한 성질을 갖추게 된 과정을 살펴보기 위해서는 $z = 1$ 이전의 은하 탐사 자료가 필요한 것이다.

$z = 0.8$ 이전의 고밀도 자료가 필요한 이유를 명백히 알 수 있는 또 하나 자료는 은하 형태의 변화에 대한 연구 결과이다. 그림 2는 적색이동에 따른 조기형 은하의 비율을 보인 것이다. 조기형 은하의 비율을 주변 밀도가 높은 지역($\Sigma_5 > 15$)과 낮은 지역($\Sigma_5 < 5$)으로 나누어 따로 보면 이 비율이 고밀도 지역에서는 적색이동 1에서 0.8 사이에 급격하게 증가했으나, 저밀도 지역에서는 거의 일정한 증가를 보이고 있다. 특히 $z = 1$ 근처에서는 지역에 따른 조기형 비율의 차이가 거의 없어져서 형태와 환경의 상관관계가 사라짐을 볼 수 있다. 본 탐사의 결과는 고밀도 지역에서의 급격한 형태 변화의 이유와 $z = 1$ 이전 시기에서의 은하들의 형태를 등급에 따라 조사하는 데에 결정적인 자료를 제공하게 될 것이다.

2) GMT의 필요성

본 제안서의 탐사가 기존의 장비로 수행할 수 없었지만 GMT로는 가능한 데에는 두 가지 이유가 있다. 하나는 망원경 구경의 증가로 인해 같은 노출시간에서 더 어두운 은하를 관측할 수 있기 때문이다. 최근 VIMOS VLT Deep Survey(VVDS) Ultra-Deep Survey는 $i < 24.75$등급의 은하를 $R = 230$의 저분해능으로 관측하기 위해서 VLT로 18시간을 노출했어야 했다. 이는 UV 파장대의 약한 금속 흡수선을 사용해서 적색이동을 측정했기 때문이기도 하지만 기본적으로 8m급 망원경의 한계 때문이다. 거울 4장을 장착한 초기 GMT는 구경 8m 망원경에 비해 4배의 집광력이 있고, 따라서 같은 노출시간에 1.5등급 더 어두운 천체를 관측할 수 있다.

본 탐사가 GMT에서 가능해지는 두 번째 이유는 근적외선 분광탐사 기능 때문이다. 현재 GMT의 첫 검출기로서 GMACS가 선정되어 있는데 GMACS는 1.3μm까지의 근적외선 지역을 포함할 것을 고려하고 있다.[1] 적색이동이 1 이상인 시기에 은하들의 적색이동을 정확히 재려면 최소한 [OII] 3727A, Ca H&K 3968A lines, 4000A break 등이 검출돼야 하는데 파장대가 1.3μm까지 확장되면 적색이동 탐사가 약 $z = 2.5$까지 가능해진다. 적색이동 사막을 없애고 은하 생성 시기를 연구하려는 본 제안 탐사가 가능해지기 위해서는 반드시 GMACS의 관측 파장대가 근적외선 지역을 포함하여야 한다.

3) 국내외 연구 동향

적색이동 0.5 이상의 시기에 있는 은하들을 분광관측한 기존의 탐사들을 살펴보면 큰 특징이 있다. 그것은 분광관측을 하기 전에 관측 대상을 천체의 색 등을 고려하여 미리 선별했다는 점이다. 또한 등급한계도 적색이동 0.8에서 2.5 사이의 시기를 관측하기에는 충분히 깊지 못한 실정이다(표 2 참조). 순수 겉보기등급제한기준을 선택하여 본 제안서의 탐사와 비교할 만한 탐사로는 VVDS-Ultra Deep Survey(Le Fèvre 등 2013)가 있는데 탐사 면적이 좁아서(0.14제곱각도) 관

1 2014. 3. 17-18일 미국 텍사스 A&M 대학에서 열린 GMACS 워크숍에서 은하와 우주거대구조, 초기 우주 분야의 모든 참가자가 근적외선 파장대를 각 과학 연구 주제의 핵심 요구 사항으로 선정하였다.

표 2. 기존의 고적색이동 시기(z > 0.5) 분광탐사 (Le Fèvre 등 2013)

탐사	면적	관측 대상	은하개수	평균 z	논문
zCosmos-Bright	1.5제곱각도	17.5 < i < 22.5	20 000	0.55	Lilly + (2007)
VVDS-Wide	8.7	17.5 < i < 22.5	26 178	0.55	Garilli + (2008)
PRIMUS	9.1	i < 23	96 599	0.6	Coil + (2011)
WiggleZ	1000	NUV < 22.8 + CS	100 000	0.6	Blake + (2011)
VVDS-Deep	0.74	17.5 < I < 24.0	11 601	0.92	Le Fèvre + (2013)
DEEP2	2.8	R < 24.1 + CS	38 000	1.0	Newman + (2013)
VIPERS	24	17.5 < i < 22.5 + CS	100 000	1.0	Guzzo + (2013)
VVDS-UDeep	0.14	23.0 < i < 24.75	941	1.38	Le Fèvre + (2013)
zCosmos-Deep	1	B < 25 + CS	2728	2.1	Lilly + (2007)

측된 은하가 941개에 불과하고, 분광분해능이 R = 230에 불과하여 측정된 적색이동의 정확도가 측광적색이동과 별반 차이가 없는 데이터라고 할 수 있다. VVDS-UDeep 탐사에서는 적색이동 측정이 근적외선대에서 이루어지지 않고 푸른색 파장대로 적색이동된 약한 UV 금속 흡수선들을 사용하였다.

3. 연구의 내용 및 방법

1) 연구 대상

본 탐사는 측광관측이 다양한 파장대에서 수행되어 있고, 특히 HST 이미지가 있는 지역을 대상으로 수행하는 것이 바람직하다. 대표적인 예가 COSMOS 필드이다. 이러한 지역에서 약 1제곱각도 정도의 면적을 분광탐사하는 것이 일차적인 목표이다. 1도는 적색이동 1.5에서 약 $50h^{-1}$Mpc 규모에 해당한다.

Taniguchi 등(2007)에 따르면 은하들의 누적표면개수 밀도는 I = 24.0, 24.5, 25.0에서 약 65 000, 99 000, 150 000이다(3초 구경). 따라서 I = 24.5 등급한계까지 약 10만 개의 은하를 분광관측하는 것이 탐사의 목적이 되겠다.

2) 사용 GMT 기기 및 관측 전략

본 탐사에서는 저분해능으로 다중분광관측이 가능한 GMACS를 사용하여 은하들을 관측하고자 한다. GMACS의 시야가 30제곱각분이라고 하면 등급한계 I=24.5까지 시야당 약 1,000개의 은하가 있고, 슬릿의 개수가 300개라면 각 시야당 평균 3번 정도의 노출을 필요로 할 것이다. 즉 총 탐사 영역 1제곱각도를 모두 분광탐사하려면 (1제곱각도/30제곱각분)*3=360번의 노출이 필요하다. 따라서 노출을 평균적으로 한 mask마다 1시간 주는 경우를 생각하면 탐사를 수행하는 데에 걸리는 총 노출시간은 360시간, 즉 36일이 될 것이다.

본 탐사가 가능하기 위해서는 GMACS의 분광파장대가 반드시 근적외선대인 1.3μm까지 확장되어야만 한다. 근적외선대로 이동된 [OII] 3727A, Ca H&K 3968A, 4000A break 등의 분광선들을 이용하여 적색이동을 측정하기 위해서는 약 2,000~3,000 정도의 분해능이 필요할 것으로 예상된다. 한편 GMT의 노출시간 계산기에 따르면 I=24.5등급인 은하에 대해서 1시간 노출의 저분해 분광관측을 하는 경우 S/N는 파장에 따라 그림 3과 같이 주어진다.

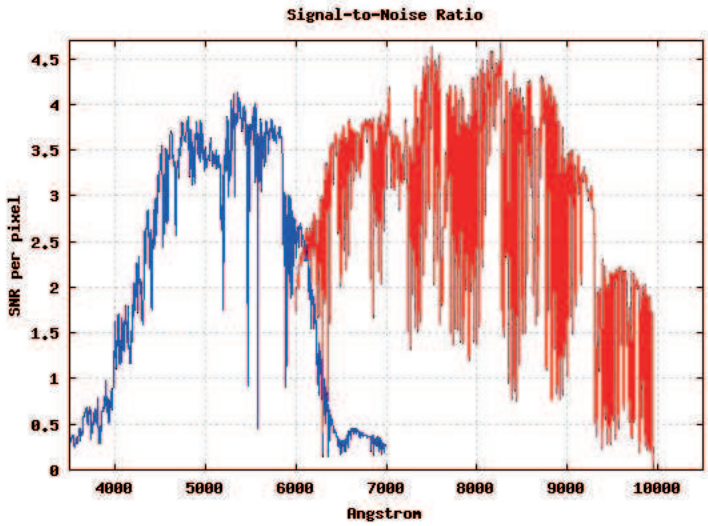

그림 3. GMT GMACS 파장별 S/N비. i=24.5 은하를 4개 거울로 1시간 저분해 노출했을 경우이다.

4. 연구 결과의 기대 성과

본 적색이동 탐사에는 기존에 수행됐던 등급제한 우주탐사 자료의 용도를 넘어서는 대단히 중요한 차이점이 두 가지 있다. 첫째는 적색이동 사막 시기의 은하들에 대한 통계적 연구를 가능하게 해준다는 점이다. 이로 인해 본 제안서의 탐사를 통해서 얻어질 은하분광관측 자료는 은하의 생성과 진화 연구에 결정적인 공헌을 하리라고 예상된다. 이는 앞서 2절에서 언급한 대로 본 탐사의 시기가 우주의 역사에서 은하들의 생성 시기이고 별 생성이 최고조에 이르는 시기이기 때문이다. 또한 이 시기에 물리적 규모 $50h^{-1}$Mpc 정도에서 은하들의 공간 분포를 관측하게 됨으로써 생성 시기에 있는 은하들의 내부 물리적 성질과 주변 환경과의 관계를 조사할 수 있을 것이다. 그리고 은하들의 공간 분포로부터 다양한 우주거대구조들을 발견할 수 있고, 긴 적색이동 구간에서 탐사가 이루어지기 때문에 은하에 주변 환경이 미치는 영향을 시간에 따라 높은 통계적 정확도로 조사할 수 있을 것이다.

두 번째 차이점은 매우 긴 시간 구간에서 은하와 우주거대구조를 보여준다는 점에서 우주거대구조의 생성과 진화를 처음으로 보여줄 것이라는 점이다. 우

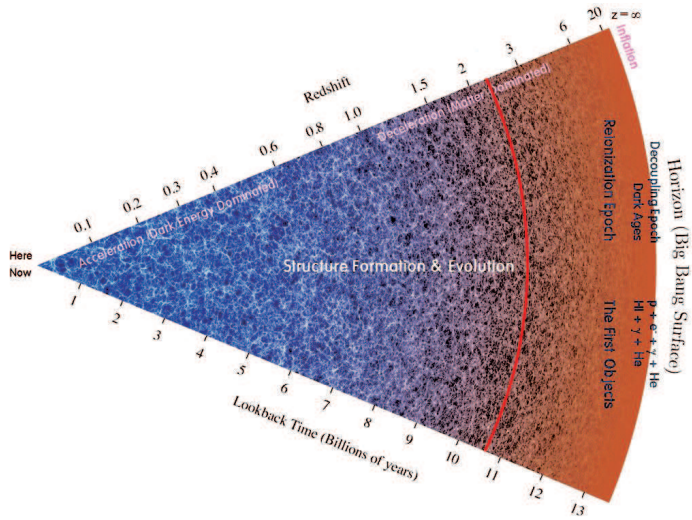

그림 4. 물질의 진화를 past light cone상에서 본 모습(Kim et al. 2009). 본 제안서의 탐사가 도달할 거리를 붉은 선으로 표시하였다.

주거대구조는 그 크기가 수십 Mpc 이상에 이르기 때문에 대개 기존 탐사 자료의 크기와 우주거대구조의 크기가 비슷하였고 따라서 지금까지 가장 큰 자료인 SDSS 탐사에서도 적색이동이 약 0.1 근처의 우주거대구조의 정지상(snapshot)만을 볼 수 있었다. 우주거대구조의 생성과 진화를 보기 위해서는 수천 Mpc에 걸쳐 자료가 주어져야 하는데 본 탐사가 바로 그 첫 시도가 될 것이다. 그림 4는 past light cone상에서 물질의 진화를 보인 것인데 본 제안서의 탐사가 도달할 탐사 영역 거리를 표시하였다. 우주의 역사에서 과거 100억 년 이상 시기의 우주거대구조 및 은하의 분포와 진화를 보게 될 것임을 알 수 있다.

5. 인용문헌

Blake, C., Kazin, E. A., Beutler, F., et al. 2011, MNRAS, 418, 1707

Boylan-Kolchin, M., Springel, V., White, S. D. M., Jenkins, A., & Lemson, G. 2009, MNRAS, 398, 1150

Coil, A., Blanton, M. R., Burles, S. M., et al. 2011, ApJ, 741, 8

Garilli, B., Kurtz, M. J., Geller, M. J., et al. 2008, A&A, 486, 683

Guo, Q., White, S., Li, C., & Boylan-Kolchin, M. 2010, MNRAS, 404, 1111

Guzzo, L., Scodeggio, M., Garilli, B., et al. 2013, A&A, submitted [arXiv: 1303.2623]

Hwang, H. S., & Park, C. 2009, ApJ, 700, 791

Kim, J., Park, C., Gott, J. R., & Dubinski, J. 2009, ApJ, 701, 1547

Le Fèvre, O., Cassata, P., Cucciati, O., et al. 2013, A&A, 559, A14

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

Newman, J. A., Cooper, M. C., Davis, M., et al. 2013, ApJS, 208, 5

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