무거운 조기형 은하의 형성과 진화

● 고종완[1], 황호성[2], 이준협[1,3], 김민진[1], 이종철[1]

한국천문연구원[1], Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics[2], 과학기술연합대학원대학교[3]

1. 과학 목적 및 요약

본 관측 제안팀은 적색이동 구간 1과 2 사이에 있는 무거운(태양 질량의 약 100-1,000억 배 이상) 조기형(별 생성이 거의 없고, 형태가 타원형이거나 렌즈형) 은하에 대한 체계적인 분광탐사를 수행하고자 한다. 무거운 조기형 은하의 형성과 진화 연구는 효율적으로 은하의 별 질량 증가 역사를 추적하는 방법이다. 무거운 은하는 현재 우주의 대부분의 별 질량을 포함하고 있고, 적색이동 1까지 대부분의 무거운 은하는 조기형 은하임이 알려져 있다. 하지만 이런 무거운 조기형 은하가 은하들의 병합과 별 생성이 가장 활발하게 일어나는 시기에($1 < z < 2$) 얼마나 존재하고, 고적색이동($z > 2$) 시기에도 여전히 무거운 은하의 형태가 조기형인지에 대한 체계적인 분광탐사 연구는 현대 관측우주론에서 풀어야 할 은하의 형성과 진화 규명에 대한 중요한 단서를 제공할 것이다.

현재까지 수행된 조기형 은하에 대한 연구 결과에 따르면, 빅뱅 이후 약 30억 년(z~2) 지난 우주에 벌써 그 존재가 관측적으로 확인되고 있다. 최근 10년의 관측 결과는 이 시기의 무거운 조기형 은하는 우주 초기에(z > 1.5-3) 짧은 기간의 폭발적인 별 생성 활동으로 만들어진 이후에 큰 별 생성 활동 없이 수동적으로(passively) 진화해왔다는 것이다. 하지만 최근 5년간의 연구 결과는 이전과는 다르게 이런 무거운 조기형 은하는 폭발적으로 생성되지 않았고 오랜 기간 동안의(수십억 년) 꾸준한(quasi-steady) 별 생성 활동으로 생성되었음을 제안했다. 이런 관측 결과의 차이는 분석에 사용한 조기형 은하의 개수가 작은 것과 함께, 분광 적색이동 자료의 부족에 기인한 것이다. 즉, 이 적색이동 구간에 있는 무거운 조기형 은하에 대한 체계적인 분광탐사가 아직 미비한 실정이다.

본 관측 제안팀은 허블 우주망원경의 깊은 이미지가 있는 영역(예, HST Legacy Fields; COSMOS, UDF, and CDFS)에 대해서 K = 21등급까지의(적색이동 2에 있는 무거운 조기형 은하의 기대 밝기) 은하들에 대한 분광탐사를 수행하여 은하들이 가장 활발하게 성장한 시기에(1 < z < 2) 무거운 조기형 은하가 얼마나 있는지를 확인하고, 물리적 특성에 대한 연구와 함께 주변 환경 효과를 연구하고자 한다. 그리고 이 시기의 무거운 조기형 은하의 통계적인 연구를 통해서, 그 기원이 되는 우주 초기의(z > 2) 물리적인 현상을 이해하는 데 더 다가갈 것이다. 또한 이 적색이동 구간의 무거운 조기형 은하의 통계적인 연구는 ALMA를 통한 우주 초기의(z > 2) 서브밀리미터(submillimeter) 은하 자료와의 융합 연구는 시너지 효과를 가져올 것이다. 이를 통해서 무거운 조기형 은하(1 < z < 2) 형성에 대한 시나리오로 대규모 합병에 (major merger) 의한 짧은 시기의 폭발적인 별 생성과 이후의 급격한 별 생성 억제 메커니즘인 활동성은하핵(AGN) 피드백 과정을 검증할 수 있을 것이다.

2. 연구 필요성, 배경 및 동향

1) 연구의 배경 및 필요성

현재 은하 형성 모델에 따르면 무거운 은하일수록 대부분의 별들을 더 이른 시기에(z > 2) 만들었고(Cowie 등 1996), 은하의 형태는 대규모 합병을 통해서 만

기형에서 조기형으로 변한다고 한다(Khochfar & Silk 2006). 따라서 무거운 은하의 개수 밀도는 적색이동 z=1에서 현재의 우주까지 약간의 증가가 있지만, 상대적으로 가벼운 은하에 비해서 큰 변화가 없다.

즉, 무거운 은하는 적색이동 z=1 시기에 벌써 존재하고 있고, 대부분의 형태는 조기형이다(Moustakas 등 2013; Buitrago 등 2013). 또한 적색이동 z=2 시기에도 별 생성 활동이 거의 없는 무거운 은하가 분광관측을 통해서 발견되고 있는데 과반수 정도가 조기형으로 분류되었다(Kriek 등 2006; Cassata 등 2008). 또한 모델에 따르면, 고적색이동(z=2-3) 조기형 은하의 크기는 현재 우주의 그것보다 몇 배 작게 됨을 예측하는데(Loeb & Peebles 2003), 최근의 관측 결과도 적색이동 구간 약 1과 2 사이에 있는 무거운 조기형 은하의 크기가 현재 우주의 무거운 조기형보다 약 5배(Cimatti 등 2008; van Dokkum 등 2008) 작음을 보여주고 있다.

하지만 최근의 연구 결과는 모델과는 다르게 무거운 조기형 은하는 우주 초기에 폭발적으로 생성되지 않았고 오랜 기간 동안의 꾸준한 (quasi-steady) 별 생성 활동으로 생성되었음을 제안했다(Rodighiero 등 2011). 또한, 적색이동 1과 2 사이에 무거운 조기형 은하의 생성이 급격하게 증가한다는 결과가 있는 반면(Arnouts 등 2007), 그렇지 않고 천천히 증가했다는 관측 결과도 있다(Brammer 등 2011). 이런 서로 다른 결과들은 이 적색이동 구간에 있는 무거운 조기형 은하에 대한 체계적인 연구가 필요함을 보여준다. 또한 은하의 활발한 상호작용과 병합이 일어나는 시기의 무거운 조기형 은하에 대한 이해는 은하 형성 모델에 대한 우리의 이해를 더욱 높일 수 있을 것이다.

지금까지의 적색이동 구간 약 1과 2 사이에 대한 무거운 조기형 은하 연구는 대부분 측광학적인 방법으로 얻은 것이기에 은하의 적색이동 불확실성이 매우 크다고 할 수 있다. 또한 분광자료를 이용한 고적색이동 조기형 은하의 연구에서 사용한 은하 개수가 매우 작아서 조기형 은하의 일반적인 특성을 연구하는 데 한계가 있다. 그리고 관측적으로 현재 우주의 무거운 조기형 은하들의 특징은 주변 환경과 상관관계가 있고 은하단과 같은 거대 규모 환경에 모여 있음이 알려져 있는데, 이는 적색이동 구간 1과 2 사이에서도 관측적으로 확인되고 있다. 따라서 통계적으로 유의미한 결과를 위해서는 적색이동 구간 1과 2 사이에서 다양한 지역에 있는 무거운 조기형 은하에 대한 체계적인 분광탐사가 필요하다.

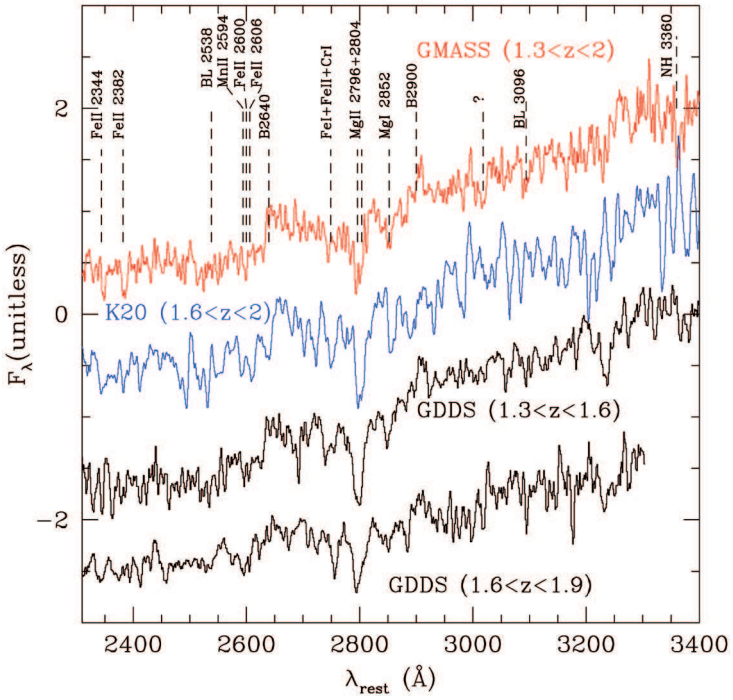

그림 1. 별 생성 활동이 거의 없는 조기형 은하의 자외선 파장대에서의 스펙트럼. 13개의 GMASS 조기형 은하의 평균 밝기는 I=25등급이다(Cimatti 등 2008).

2) GMT의 필요성

본 제안서는 적색이동 1과 2 사이에서 최소 3개의 지역에 대한 분광탐사로 최소 수백 개의 무거운 은하들에 대해서 분광자료를 얻는 것을 목표로 한다. 적색이동 2에서 무거운 은하의 평균적인 밝기가 K=21등급 정도이기에(약 I=25등급 정도로 어두운), 현재의 8-10m급 망원경으로는 본 연구 과제를 수행하기가 거의 불가능하다고 할 수 있다. 왜냐하면 이 적색이동 구간에서는 별 생성 활동이 거의 없고, 별 질량이 태양의 100억 배 이상인 조기형 은하에 대해서 8m급 이상의 망원경으로 약 480시간의 노출이 필요하기 때문이다(그림 1). 또한 GMACS를 이용한 분광관측이 근적외선까지(1.3μm) 가능하면, 강한 금속 흡수선들부터(예, MgI 2852, Mg II 2800), [OII] 3727 방출선, Ca H&K 3968 흡수선, 그리고 Balmer/4000Å break 등을 관측할 수 있어서 충분히 정밀하게 적색이동을 결정할 수 있다. 또한 넓은(broad) 방출선의 유무와(예, Mg II 2800) [NeV] 3426 등을

통해서 활동성은하핵(AGN) 영향을 볼 수 있을 것이다.

이 적색이동 시기의 무거운 조기형 은하들에서 방출선이 없지만 강력한 발머 흡수선(Hδ 4102)은 있을 거라 기대되기에, 적색이동 2까지의 무거운 조기형 은하에 대해서 최근 십억 년 내의 폭발적인 별 생성 활동의 유무를 추적할 수 있게 된다. 그리고 GMACS 한 번의 관측으로 적색이동 1.5에서 공변 각거리 ~3Mpc에 해당하는 (은하단의 비리얼 반경의 2~3배) 지역까지 관측함으로써, 무거운 조기형 은하의 환경 의존성을 한 번의 관측으로도 확인할 수 있을 것이다.

3) 국내외 연구 동향

적색이동 0.5 이상의 시기에 있는 은하들을 분광관측한 기존의 탐사 연구를 정리하면 표 1과 같다. 기존의 탐사 연구들은 분광관측의 대상을 천체의 색 등을 고려하여 미리 선별했거나, 등급 한계가 적색이동 1에서 2 사이의 구간에 있는 무거운 은하들 중에 조기형 은하를 관측하기에는 충분히 깊지 못하다. 즉, 대부분의 분광탐사가 별 생성 활동이 활발해서 강한 방출선이 있는 은하들 초점으로 한 것이다.

표 1. 기존의 고적색이동(z > 0.5) 분광탐사(Le Fèvre et al. 2013)

탐사	면적	관측 대상	은하 개수	평균 z	z 범위	참고문헌
zCosmos-Bright	1.5 제곱각도	17.5 < i < 22.5	20 000	0.55	0-1.5	Lilly + (2007)
VVDS-Wide	8.7	17.5 < i < 22.5	26 178	0.55	0-1.5	Garilli + (2008)
PRIMUS	9.1	i < 23	96 599	0.6	0-1.2	Coil + (2011)
WiggleZ	1000	NUV < 22.8 + CS	100 000	0.6	0.2-1.0	Blake + (2011)
VVDS-Deep	0.74	17.5 < I < 24.0	11 601	0.92	0-5	Le Fèvre + (2013)
DEEP2	2.8	R < 24.1 + CS	38 000	1.0	0.7-1.4	Newman + (2013)
VIPERS	24	17.5 < i < 22.5 + CS	100 000	1.0	0.5-1.5	Guzzo + (2013)
VVDS-UDeep	0.14	23.0 < i < 24.75	941	1.38	0-4.5	Le Fèvre + (2013)
zCosmos-Deep	1	B < 25 + CS	2728	2.1	1.5-2.5	Lilly + (2007)

* 관측 대상의 'CS' : Color Selection으로 각 탐사마다 다르다.

적색이동 구간 1과 2 사이에 있고, 8-10m급 망원경을 이용해서 분광학적으로 적색이동을 측정한 조기형 은하 연구로 Galaxy Mass Assembly ultra-deep Spectroscopic Survey(GMASS) 자료를 이용한 Cimatti 등 (2008)이 있다. 하지만 약 46제곱각분 지역에서 단지 13개의 은하만을 가지고 결과를 도출했다. 그리고 The Cosmic Assembly Near-infrared Deep Extragalactic Legacy Survey(CANDELS) 자료를 이용한 Chang 등(2013)은 약 260제곱각분 지역에서 880개의 조기형 은하에 대한 통계적 연구를 했지만, 측광학적 방법으로 얻은 적색이동 자료를 사용했다. 최근 The FourStar Galaxy Evolution Survey(ZFOURGE)는 허블 우주망원경의 깊은 이미지가 있는 지역에 대해서 약 30,000개 고적색이동($z > 1$) 은하들에 대한 측광학적 적색이동을 구하기 위한 깊은 근적외선 측광탐사를 진행 중인데, 파장폭이 좁은(midium-band) 필터 여러 개를 사용하기에 기존의 방법보다는 에러를 줄일 수 있겠지만, 은하의 모델과 비교해서 적색이동을 구하는 것이기에 한계는 분명 존재한다.

3. 연구의 내용 및 방법

1) 연구 대상

본 연구 제안서는 적색이동 구간 1과 2 사이에 위치한 무거운 은하들에 대한 체계적인 분광관측을 수행할 계획이다. 우선 허블 우주망원경의 깊은 이미지가 있는 영역(예, HST Legacy Fields; COSMOS, CDFS, and UDS)에 대해서 약 $K=21$ 등급까지의(적색이동 2에 있는 무거운 조기형 은하의 기대 밝기) 은하들에 대한 분광탐사를 수행할 것이다. 이 적색이동 구간에서 별 생성 활동이 거의 없고 별 질량이 태양의 100억 배 이상인 조기형 은하의 평균 등급은 $I=25$ 정도로 기대된다. 제곱각도당 $I=25$등급에 천체가 6만 개 정도 있을 것이고(Taniguchi 등 2007), 여기서 무거운 은하들의 후보는 허블망원경 H(F160W) 밴드처럼 은하의 별 질량에 민감한 근적외선 자료를 이용해서 선별할 것이다(그림 2). 별 생성 활동이 없는 조기형 은하는 잘 알려진 색깔-색깔 분포도(U-V vs. V-J, B-z vs z-K) 등을 활용할 수 있다.

그리고 이와 유사한 깊이의 허블 우주망원경 이미지가 있는 지역에 대해서도

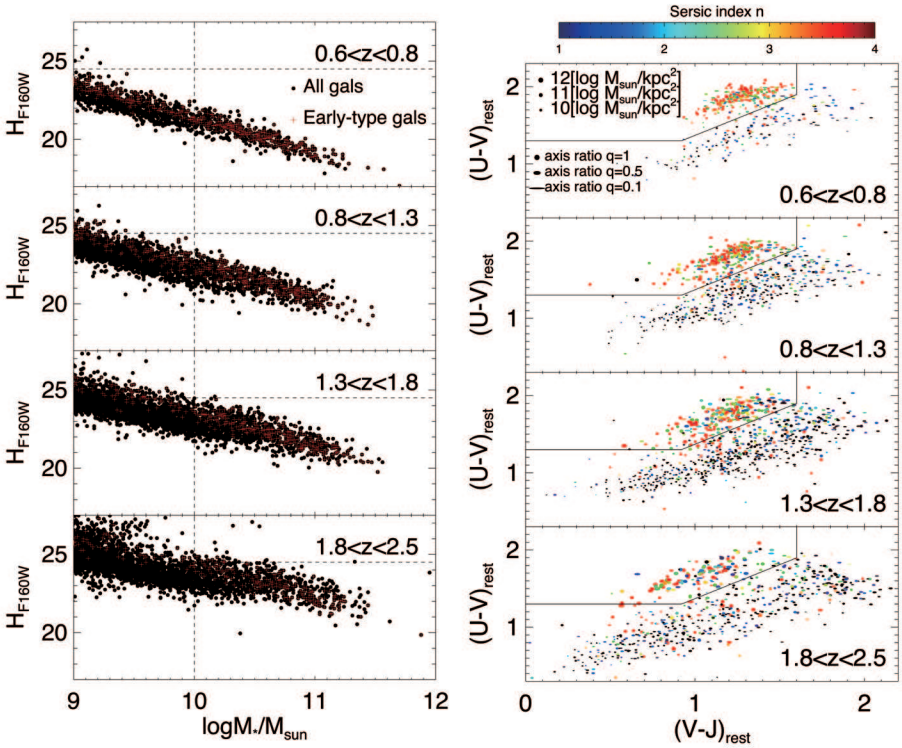

그림 2. (왼쪽) CANDELS 은하의 허블망원경 H(F160W) 밴드 등급과 은하의 별 질량 관계. 검은색은 모든 은하를, 빨간색은 조기형 은하를 나타냄. 다양한 적색이동 구간에서 H 밴드 등급제한으로 별 질량으로 제한한 은하를 선별할 수 있다. (오른쪽) (U-V)와 (V-J) 색깔-색깔 분포도. 점 색깔은 은하의 Sersic index에 해당함. 검은색 실선은 별 생성이 활발한 은하와 그렇지 않은 은하를 잘 구분하는데, 은하를 조기형과 만기형으로도 잘 구분하는 것을 볼 수 있다(Chang 등 2013).

탐사를 확장하여 이 적색이동 구간에 편향되지 않게 다양한 환경에 있는 무거운 (특히, 조기형) 은하들을 연구 대상으로 확보할 것이다.

2) 사용 GMT 기기 및 관측 전략

본 연구 과제에서는 저분해능으로 다중분광관측이 가능한 GMACS를 사용하여 무거운 조기형 은하들을 관측하고자 한다. GMACS의 시야가 약 30제곱각분이라고 하면 시야당 약 500개의 I=25등급의 은하가 있고, 슬릿의 개수가 100개라면 시야당 5번 정도의 노출을 필요로 할 것이다. 만약 별 생성 활동이 활발해서 비슷한 별 질량이지만 상대적으로 I 밴드에서 밝은 은하는 상대적으로 짧은 시간의 노출로 관측하고, 추가적으로 조기형 은하에 긴 노출을 준다고 하면 10번

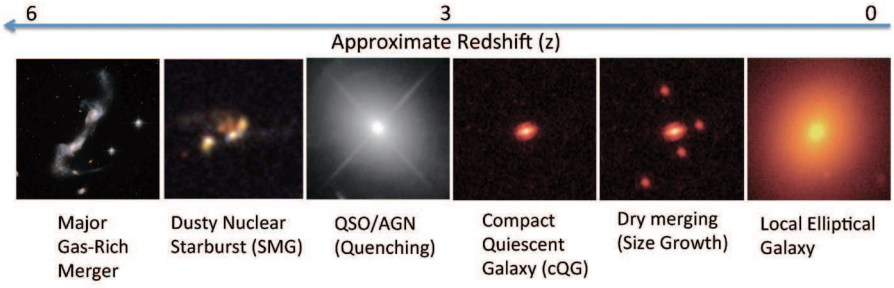

그림 3. 무거운 은하의 형성과 진화에 대한 하나의 개략도(Toft 등 2014).

의 마스크로 충분할 것이다.

GMACS를 이용한 분광관측이 근적외선까지(1.3μm) 가능하면, 강한 금속 흡수선들부터(예, MgI 2852, Mg II 2800), [OII] 3727 방출선, Ca H&K 3968 흡수선, 그리고 Balmer/4000Å break 등을 관측할 수 있어서 충분히 정밀하게 적색이동을 결정할 수 있다. 또한 Hδ 4102 흡수선을 측정할 수 있다면, 적색이동 구간 1과 2 사이에 있는 무거운 조기형 은하의 별 생성 역사에서 기대되는 최근 10억 년 사이의 폭발적인 별 생성 활동 유무를 확인할 수 있다.

은하들의 속도뿐만 아니라, 각 방출선과 흡수선의 등가폭을 측정하기 위해서는 픽셀당 신호대잡음비 10 정도의 스펙트럼이 필요하다. GMACS 노출시간 계산기를 이용하면 (4장 거울, 타원은하, 슬릿 폭=1각초) 저분해능으로 최소 2시간 정도는 필요해 보이며, 3시간 정도가 타당해 보인다.

4. 연구 결과의 기대 성과

적색이동 구간 1과 2는 우주의 역사에서 은하들의 별 질량이 가장 활발하게 증가한 시기이고, 별 생성이 최고조에 이르는 시기이기 때문에 본 연구 과제를 통한 무거운 은하 및 조기형 은하들에 대한 통계적인 연구는 은하의 생성과 진화 연구에 결정적인 공헌을 하리라 기대된다. 또한 이 시기에 물리적 규모로 은하단 정도에서 무거운 은하들의 공간 분포를 관측하게 됨으로써 은하들의 내부 물리적 성질과 주변 환경과의 관계를 조사할 수 있을 것이다. 그리고 무거운 은하들

의 공간 분포로부터 다양한 우주거대구조들을 발견할 수 있을 것이다.

그리고 이 시기의 무거운 조기형 은하의 통계적인 연구를 통해서, 그 기원이 되는 우주 초기의($z > 2$) 물리적인 현상을 이해할 수 있을 것이다. 예를 들면, 이 적색이동 구간의 무거운 조기형 은하의 통계적인 연구는 ALMA를 통한 우주 초기의 ($z > 2$) 서브밀리미터 (submillimeter) 은하 연구 결과와의 융합으로 시너지 효과를 가져올 것이다(그림 3). 이를 통해서 무겁고 밀도가 높은 조기형 은하 형성에 대한 시나리오로 대규모 합병에 의한 짧은 시기의 폭발적인 별 생성과 이후의 급격한 별 생성 억제 메커니즘인 활동성은하핵(AGN) 피드백 과정 등을 검증하는 중요한 자료를 제공할 것이다.

5. 인용문헌

Arnouts, S. et al. 2007, A&A, 476, 137
Blake, C., Kazin, E. A., Beutler, F., et al. 2011, MNRAS, 418, 1707
Brammer, G. B., Whitaker, K. E., van Dokkum, P. G., et al. 2011, ApJ, 739, 24
Buitrago, F., Trujillo, I., Conselice C. J., et al. 2013, MNRAS, 428, 1460
Cassata, P. et al. 2008, A&A, 483, L39
Chang, Y.-Y., van der Wel, A., Rix, H.-W., et al. 2013, ApJ, 773, 149
Cimatti, A. et al. 2008, A&A, 482, 21
Coil, A., Blanton, M. R., Burles, S. M., et al. 2011, ApJ, 741, 8
Cowie, L. L., Songaila, A., Hu, E. M., & Cohen, J. G. 1996, AJ, 112, 839
Garilli, B., Kurtz, M. J., Geller, M. J., et al. 2008, A&A, 486, 683
Guzzo, L., Scodeggio, M., Garilli, B., et al. 2013, A&A, 566, A108
Khochfar, S., & Silk, J. 2006, MNRAS, 370, 902
Kriek, M. et al. 2006, ApJ, 649, L71
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
Loeb, A., & Peebles, P. J. E. 2003, ApJ, 589, 29
Moustakas, J., Coil, A. L., Aird, J., et al. 2013, ApJ, 767, 50
Newman, J. A., Cooper, M. C., Davis, M., et al. 2013, ApJS, 208, 5
Rodighiero, G., Daddi, E., Baronchelli, I., et al. 2011, ApJ, 739, L40
Taniguchi, Y. et al. 2007, ApJS, 172, 9
Toft, S., Smolčić, V., Magnelli, B., et al. 2014, ApJ, 782, 68
van Dokkum, P. G. 2008, ApJ, 674, 29