적외선/서브밀리 은하들의 분광탐사

● 정웅섭[1], 심현진[2], 박성준[1], 표정현[1], 박원기[1]

한국천문연구원[1], 경북대학교[2]

1. 과학 목적 및 요약

적색이동에 따른 우주의 별 생성 밀도 변화와 우주의 별 질량 밀도 변화를 보면 특히 적색이동 구간 2에서 4 사이 시기가 단위 부피당 별 생성률이 가장 높은 은하 형성이 활발한 시기임을 알 수 있다(예: Bouwens et al. 2011). 해당 적색이동을 가진 은하들에 대한 연구는 지금까지 주로 정지좌표계에서 자외선 분광관측을 통해 진행되었다. 높은 자외선 플럭스를 이용해 선택된 라이만 브레이크 은하(LBG), 라이만 알파 방출 은하(LAE)들의 자외선 스펙트럼은 이들 은하의 항성 종족과 성간물질에 대한 화학적, 동역학적 정보를 제공해왔다.

또한, 적외선에서 밝은 은하(광도에 따라 LIRG, ULIRG, HyLIRG 혹은 DOG-Dusty Obscured Galaxies)나 서브밀리미터에서 밝은 은하(SMG)는 별 생성률이 높으면서도 먼지에 의한 소광량이 큰 은하로, 라이만 브레이크 은하(LBG)나 라이

만 알파 방출 은하(LAE)보다 개수 밀도는 작지만 별 생성률이 커 전체적으로 봤을 때 우주적 별 생성 밀도에 크게 기여하는 은하들이다. 큰 소광량 때문에 현재의 8-10m급 망원경으로도 이들의 정지좌표계에서의 자외선 스펙트럼을 얻기에는 어려우며, 따라서 적외선/서브밀리미터 은하들의 자외선 스펙트럼 연구는 여러 대상의 스펙트럼들의 겹침(stacking)을 통해 진행되는 것에 불과한 실정이다.

본 관측 제안은 중/원적외선 혹은 서브밀리에서 관측된 적색이동 ~1 이상을 가진 적외선/서브밀리 은하들과 높은 자외선 플럭스를 이용해 얻어진 라이만 은하들(LBG 혹은 LAE)이 밀집된 지역들에 대한 분광탐사를 수행하고자 한다. 통계적인 특성을 파악하기 위해 우주에서 관측된 적외선/서브밀리 측광 자료들이 있는 100여 개 정도의 별 생성 은하들을 관측할 계획이다. K-GMT의 큰 구경과 높은 감도를 이용, 소광이 심한 별 생성 은하들의 정지좌표계에서의 자외선 스펙트럼을 얻어 기존 별 생성 은하의 자외선 스펙트럼 관측 자료들과 비교하고자 한다. 해당 은하들의 초기질량함수, 별과 성간물질의 금속함량의 진화, 성간물질의 동역학적 특징 등이 소광 정도, 별 생성률, 환경 등 다양한 인자와 어떤 연관성이 있는지 살펴볼 예정이다.

2. 연구 필요성, 배경 및 동향

1) 연구의 배경 및 필요성

최근 Spitzer, AKARI, Herschel 등 우주망원경을 통해 발견된 은하들의 특성은 적외선 혹은 서브밀리 파장대에서 특히 밝으며 높은 적색이동($z > 1$)에서 강한 우주론적인 진화를 보이는 별 생성 활동이 활발한 은하들이다. 특히, 적색이동으로 $2 < z < 4$에 해당하는 시기는 현재 존재하는 대부분의 별 생성이 이루어진 은하 형성이 활발한 시기이며, 이러한 적외선에서 밝은 은하 혹은 서브밀리 은하들의 특성을 이해할 필요가 있다. 이러한 은하들은 정지 좌표계 자외선 밝기로 골라낸 라이만 은하(LBG)보다는 개수 밀도가 적지만, 질량이 크고 활발하게 별을 생성하고 있는 적외선 광도(L_{IR})가 10^{11}Lsun 이상인 은하로 여겨지고 있다. 광역탐사를 통해 적외선/서브밀리 은하들이 AGN과의 연관성, 다른 은하들과의 병합, 중력적으로 렌즈된 은하 등 다양한 특성들이 알려지고 있다. 궁극적으로 이

들 은하들이 어떻게 적외선 우주배경복사에 기여할 수 있는지 밝혀내는 것은 우주 별 탄생 역사를 이해하는 데 매우 중요한 테마이다.

가까이 있는 은하에 대해서는 관측적 제한 때문에 자외선 스펙트럼 연구가 활발히 진행되지 않았으나, 오히려 적색이동 3 이상인 은하에서는 정지좌표계에서의 자외선 스펙트럼이 각 은하의 항성종족 특징, 성간물질의 물리적 상태 등에 대한 정보를 제공하는 가장 유효한 수단이었다. Pettini et al.(2002)에서는 중력렌즈에 의해 플럭스가 증폭된 $z=2.723$ 라이만 브레이크 은하 cB58에 대한 자외선 스펙트럼을 얻어, 이로부터 해당 은하의 금속함량이 태양 금속함량의 약 0.25배임을 추정하고 무거운 별 과다 초기질량함수가 적용될 가능성이 낮음을 밝혔다. 또한 관측된 성간 흡수선의 청색이동은 cB58에서 기체의 유출을 시사했으며, 유출되는 비율은 약 $50M_{sun}/yr$의 별 생성률을 잘 설명함을 확인하였다.

이어진 연구들(예: Shapley et al. 2003; Frye et al. 2007; Quider et al. 2009; Talia et al. 2012)에서도 자외선 스펙트럼(수소 라이만 알파, CII, CIII, CIV, NV, OVI, SiII, SiIII, SiIV, FeII, AlII 등 중성수소와 금속이온의 흡수선, 방출선 포함) 관측으로 초기우주의 별 생성 은하를 연구하였다. 스펙트럼에서 대부분의 은하는 물질 유출(outflow)의 특징을 보이며, 이는 바리온의 유입과 유출이 별 생성과 밀접한 연관이 있음을 암시한다. 라이만 알파선의 선윤곽은 별 생성률뿐만 아니라 주변 환경에도 영향을 받는 것으로 보이며, 고에너지 광자의 은하 바깥으로의 탈출 가능성은 우주의 재이온화 모델의 주요 변수이다.

반면 자외선에서 밝지 않은, 적외선/서브밀리미터 은하들의 자외선 스펙트럼 연구는 많지 않다. 초기 서브밀리미터 은하의 자외선 분광관측 결과 이들의 성간 소광량을 비롯, 자외선 연속선의 기울기 등은 비슷한 별 생성률을 가진 라이만 브레이크 은하와 크게 다르지 않았으나(Chapman et al. 2007) 결과를 도출하기에는 관측된 은하의 개수가 적고, 개중에서도 자외선에서 밝은 은하로 대상이 편향되었을 가능성이 있다. 16개 정도의 $2<z<2.5$ 서브밀리 은하들의 근적외선 분광관측은 은하 병합으로 생성된 역사를 뒷받침해주기도 한다. 한편 최근 허셜 관측으로 골라낸 적외선에서 밝은 천체들의 자외선 스펙트럼은(Casey et al. 2012) CIV 선 등을 이용해 이 천체들의 적외선 광도에 활동성 은하핵의 기여 여부를 알 수 있음을 보여준다(그림 1).

자외선에서 선택된 샘플로부터 허셜로 관측된 $z\sim2$ 정도의 별 생성 은하들의

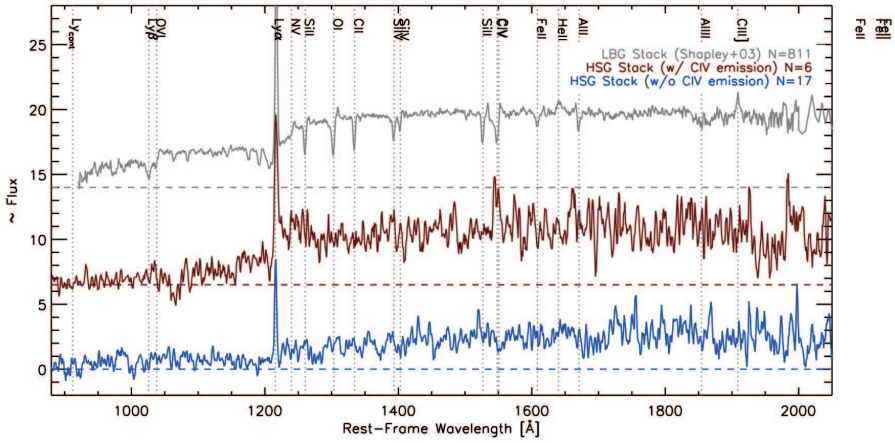

그림 1. (Casey et al. 2012의 Fig. 7) 위: 라이만 브레이크 은하(811)의 자외선 스펙트럼 겹침, 중간: 적외선에서 밝은 은하 중 CIV 방출선이 있는 은하(6)의 자외선 스펙트럼 겹침, 아래: 적외선에서 밝은 은하 중 CIV 방출선이 없는 은하(17)의 자외선 스펙트럼 겹침

경우, 성간소광의 효과는 가까운 별 생성 은하들로 캘리브레이션된 양과 큰 차이가 없음을 밝혔지만(Reddy et al. 2012), 다른 추가 분광관측들로부터 좀 더 정밀한 전체 별 생성량을 확인하는 것이 반드시 필요하다.

2) GMT의 필요성

기존에 적색이동이 큰 ULIRG, SMG의 자외선 스펙트럼을 얻기 위한 시도가 충분하지 않았던 이유는 지나치게 많은 노출시간을 필요로 함에 따라 관측이 경제적이지 않았기 때문이다. 개수 밀도가 적다는 것도 관측을 불리하게 하는 요소이다. 이들 은하의 I등급이 23-26등급 사이라고 할 때 8-10m급 망원경으로 25등급의 은하를 관측하기 위해서는 약 20시간에 달하는 노출시간이 필요하다. GMT를 사용할 경우 초기 운용 기간에는 6시간의 노출로 z=2-4, 25등급 은하의 자외선/가시광 스펙트럼을 얻을 수 있다.

한편 GMT의 위치 또한 소광량이 큰 초기 별 생성 은하들의 연구에 유리한 점으로 작용하는데, 남반구에 위치하여 ALMA에서 관측할 수 있는 대상들을 관측하는 데에 북반구의 경쟁 망원경들보다 유리하다. 이러한 고적색이동 은하 주변 기체, 은하 내 기체의 유입, 유출은 ALMA의 파장대역에서 금속이온선과 중성수소선을 관측하여 연구할 수 있다. 따라서 이러한 기체의 동역학적 연구를 자외

선 대역에서 화학적 연구와 결부시킨다면 바리온의 순환 과정을 보다 완전히 이해할 수 있을 것이며, 고적색이동에서의 일반적인 은하들과 광도가 높은 별 생성 은하들 사이에 기본적인 차이를 이해하는 데 중요한 역할을 할 수 있을 것이다. 또한 소광량이 더욱 큰 적외선/서브밀리미터 은하, 서브밀리미터/전파에서 관측되지 않는 라이만 브레이크 은하 등 자외선과 서브밀리미터 영역 둘 중 하나만 관측 가능한 은하들에 대해서도 양자의 비교가 가능한 대상들을 기준 삼아 이해할 수 있다는 것 또한 GMT를 사용한 연구의 장점이다.

3) 국내외 연구 동향

적색이동 4 이상의 고적색이동 서브밀리미터 은하를 광학, 전파 관측으로 확인한 최근 연구는 다음과 같다. 서브밀리 영역대에서의 광역 탐사의 발전으로 고적색이동의 서브밀리 은하들의 샘플은 앞으로도 증가할 것으로 기대된다.

표 1. 최근 연구에서 광학 및 전파에서 확인된 적색이동 4 이상의 서브밀리미터 은하들

대상	z	출처	비고
GN10, GN20, GN20.2	4.04, 4.05, 4.05	Daddi et al. 2009	GOODS-N
Capak4.55	4.55	Capak et al. 2008	COSMOS
AzTEC-1, AzTEC-3	4.64, 5.3	Younger et al. 2007	COSMOS
LESS J033229.4-275619	4.75	Coppin et al. 2009	GOODS-S
J1148+5251	6.42	Wang et al. 2007	
HFLS3	6.34	Riechers et al. 2013	
SPT0243-49, SPT0346-52	5.69, 5.65	Viera et al. 2013	
HLS J0918+5142	5.24	Combes et al. 2013	
HDF850.1	5.18	Walter et al. 2012	HDF

3. 연구의 내용 및 방법

1) 연구 대상

Magnelli et al.(2012)에서 기존의 다파장 관측 자료를 이용해 찾아낸 서브밀리미터 은하의 개수를 추정하면 GMT에서 관측 가능한 $0.8 < z < 5.3$ 서브밀리미터 은하는 약 30여 개다. 광학에서 관측된 이들의 등급은 I=25등급 이하이다. 최근 허셜 관측 자료에서 얻은 샘플들의 분석을 통해 일정 간격의 적색이동 샘플을 골라 100여 개의 은하 샘플을 관측할 계획이다.

2) 사용 GMT 기기 및 관측 전략

본 탐사에서는 저분해능으로 다중분광관측이 가능한 GMACS를 사용하여 은하들을 관측하고자 한다. GMACS의 시야가 30제곱각분이라고 하면, 관측하고자 하는 은하의 개수 밀도는 많지 않을 것이라 예상이 되기 때문에(한 필드당 ~1.5개), 다른 관측에 선택적으로 관측하는 전략이 필요할 수도 있다. 기본적으로 한 필드당 6시간 노출과 필드당 1.5개 정도의 개수 밀도를 가정하면 100여 개의 샘플을 관측하는 데 총 6x100/1.5~400일 정도의 관측 시간이 요구된다. 이중 개수 밀도가 적어 개별 관측이 요구되는 것들은 다른 관측과 같이 이루어진다고 가정하면(약 50% 샘플), 200여 일의 관측 시간이 필요하다.

또한 기본적으로 적색이동된 자외선 라인도 중요하지만, AGN의 특성을 추가적으로 파악하기 위해서는 가시광이 적색이동된 근적외선 영역대(예, [OII] 3727A)도 확정되는 것이 바람직하다. 약 2,000~3,000 정도의 분해능이면 위의 라인들을 구분하고, 정확한 적색이동 정보를 얻을 수 있을 것으로 예상된다.

4. 연구 결과의 기대 성과

본 분광탐사는 특정 적외선/서브밀리 은하들에 대한 분광 정보를 얻고자 한다. 상당한 수의 고적색이동($z > 2$) 적외선/서브밀리 은하들의 자외선 스펙트럼 연구로부터 먼지에 가려진 초기의 우주 별 생성률에 대한 기여를 파악할 수 있을 것으로 기대되며, 더 멀게는 재이온화 시기 이후에 먼지 생성/소광 메커니즘에

대한 정보를 얻을 수 있을 것이다.

또한, 적색이동 ~1 이상의 해당 은하들의 초기질량함수, 별과 성간물질의 금속함량, 성간물질의 역학적인 소모시간 등과 소광 정도, 별 생성률, 환경 등의 다양한 인자와의 연관성을 살펴봄으로써 우주 재이온화 이후에 별 생성 은하들에서 큰 광도를 내게 하는 물리적인 요인들(예: 은하 병합이 지배적인 역사)을 밝혀낼 수 있을 것으로 기대된다.

5. 인용문헌

Bouwens, R. et al. 2011, Nature, 469, 504
Capak, P. et al. 2008, ApJL, 681, 53
Casey, C. M. et al. 2012, ApJ, 761, 139
Chapman, S. C. et al. 2007, ASP Conference Series Vol. 375, 130
Combes, F. et al. 2012, A&A, 538, L4
Coppin, K. E. K. et al. 2009, MNRAS, 395, 1905
Daddi, E. et al. 2009, ApJ, 694, 1517
Frye et al. 2007, ApJ, 665, 921
Magnelli, B. et al. 2012, A&A, 539, 155
Pettini, M. et al. 2002, ApJ, 569, 742
Quider, A. M. et al. 2009, MNRAS, 398, 1263
Riechers, D. A. et al. 2013, Nature, 496, 329
Shapley, A. et al. 2003, ApJ, 588, 65
Talia, M. et al. 2012, A&A, 539, 61
Vieira, J. D. et al. 2013, Nature, 495, 344
Wang, R. et al. 2007, AJ, 134, 617
Walter, F. et al. 2012, Nature, 486, 233
Younger, J. D. et al. 2007, ApJ, 671, 1531