가장 무거운 블랙홀의 주변 환경 연구

● 임명신, 전현성, 윤용민, 현민희, 김재우, 이성국

서울대학교

1. 과학 목적 및 요약

현재 우주의 모습을 가장 잘 설명하는 모델은 ΛCDM 우주모델이다. ΛCDM 우주모델에서는 작은 규모의 은하들이 만들어진 후 이들이 모여서 무거운 은하와 은하단이 만들어지기 때문에 무거운 은하와 은하단의 형성이 비교적 최근에 ($z < 1$–2) 이루어진다고 예측하고 있다. 하지만 ΛCDM 우주모델에 기초한 은하 형성이론에서 예측하는 바와 다르게, 적지 않은 수의 무거운 은하와 은하단들이 우주 초기에 만들어졌다는 최근 관측 연구 결과들이 있어 이론의 검증이 중요한 과제로 대두된 상태이다. 본 연구에서는 가장 무거운 블랙홀(Extremely Massive Black Hole, EMBH, 질량이 $M \sim 10^{10} M_{\odot}$이 되는 블랙홀)로 인해 빛을 내는 퀘이사의 주변 환경에 대한 연구를 함으로써 ΛCDM 은하 형성이론에 대한 검증을 하고자 한다. 이는 가까운 우주의 EMBH는 가장 무거운 은하의 중심부에, 그리고 가장

무거운 은하는 무거운 은하단에 주로 존재한다는 점에 착안한 것이다. 적색이동에 따른 EMBH 주변 환경의 변화를 관측으로 밝혀내고 그것이 ΛCDM 은하 형성이론 예측과 얼마나 잘 부합하는지 알아보고자 한다.

현재까지 많은 EMBH 퀘이사들이 적색이동 $1 < z < 5$에서 발견되었다. 본 연구에서는 이들 고적색이동 EMBH 퀘이사 주변에 있는 은하들에 대한 GMACS 다천체 분광관측을 실시하여 고적색이동에 있는 원시은하단을 다수 발견하여 EMBH 퀘이사들이 어느 정도 규모의 원시은하단에 소속하고 있는지, 그리고 그 사실이 ΛCDM 은하 형성이론에서 예측하는 바와 일치하는지 simulation data와의 비교를 할 것이다. 이 연구를 통해 아직까지 고적색이동 우주에서는 발견이 거의 되지 않는 질량규모가 $M \sim 10^{14-15} M_{\odot}$ 정도 되는 무거운 원시은하단을 다수 발견할 수 있을 것이다. 밝은 퀘이사가 주변 은하 형성에 미치는 negative feedback이 두드러지거나 블랙홀 질량 측정법 자체가 가장 무거운 질량에서는 성립하지 않을 경우와 같이 EMBH와 은하단 간의 상관관계를 약화시킬 수도 있는데 이 또한 흥미로운 연구 과제이다.

다천체분광관측은 $z = 1-5$ 사이에 있는 수십 개 EMBH 퀘이사의 주변 은하에 대하여 실시할 것이다. 다파장 영상자료를 이용하여 선별한 퀘이사와 비슷한 적색이동을 가지고 있다고 생각되는 은하들이 퀘이사당 수십 개 있을 것으로 예상하며, 밝기가 $z < 24-26$ AB mag인 30여 개의 은하단 소속 은하들 및 약 70개의 주변 은하들에 대하여 스펙트럼을 얻어 overdense한 지역에 대한 질량 측정과 고적색이동 은하단 은하들의 특성 연구에 사용할 것이다. GMACS의 field of view는 수 Mpc 정도 크기의 은하단에 퍼져 있는 은하들 관측에 매우 적합하며, spectral resolution 또한 $R = 2000$ 정도면 은하단의 속도분산을 계산하는 데 충분하다.

2. 연구 필요성, 배경 및 동향

1) 연구의 배경 및 필요성

20세기 후반에 이루어진 관측 연구들을 통해 우주를 이루고 있는 주요 구성 물질은 암흑에너지와 암흑물질이며, 이로 인하여 우주는 현재 가속팽창 중

이라는 것이 기정사실로 굳어졌다(Im et al. 1997; Chiba & Yoshii 1997; Riess et al. 1998; Perlmutter et al. 1999). 은하의 거대구조 분포 연구를 통해 Cold Dark Matter(CDM)가 암흑물질의 유력한 후보로 받아들여지고 있으며, CDM과 암흑에너지에 기초한 우주를 소위 ΛCDM 우주라고 한다. 이러한 우주모델에 기초한 은하 형성이론은 우주 초기 작은 밀도 요동에서 작은 은하들이 먼저 형성이 된 후 이들이 합병 과정을 거쳐 현재 우리은하 주변에서 볼 수 있는 무거운 은하들을 만들어냈다고 설명하고 있다. 비슷한 이유로 ΛCDM 은하 형성이론에서는 무거운 은하단들($M=10^{14-15}M_{\odot}$)의 형성이 비교적 최근에 이르러서야($z<1$) 이루어졌다고 보고 있다(e.g., Allen et al. 2011; Kravstov et al. 2012; Lukic et al. 2007).

그러나 최근 무거운 은하와 은하단들에 대한 관측 결과들은 무거운 은하와 은하단들이 형성된 시기가 ΛCDM 은하 형성이론에서 예측하는 것과 반드시 일치하지는 않는다는 점을 보여주고 있다. 적색이동 z=0에 있는 가장 무거운 은하들만큼 무거운 은하들이 z=1.5에서도 발견이 되었는데, 은하 형성이론에서는 좀 더 최근에 이르러야 그렇게 무거운 은하들이 만들어진다고 예측한다(Collins et al. 2009; Im et al. 2002). 은하단의 경우에도 사정은 비슷하다. ΛCDM 은하 형

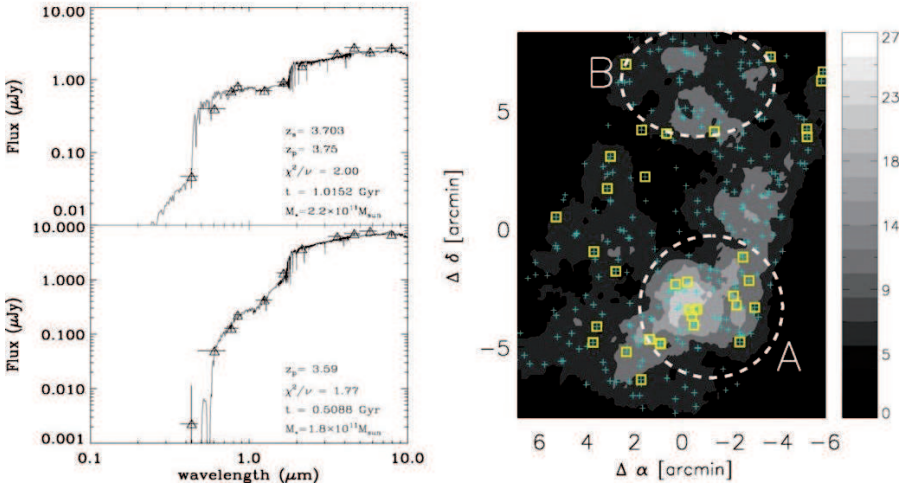

그림 1. 적색이동 z=3.7에 있는 원시은하단. 우측그림은 GOODS-S field에서 z=3.7 부근에 있는 은하들의 number density map이며 밝은 지점으로 표시된 A지역에 원시은하단이 존재한다. 좌측그림은 소속 은하단들의 spectral energy distribution(SED)이며, 나이가 많고 무거운 은하들이 원시은하단에 당시 이미 존재하였음을 보여준다(Kang & Im 2009).

성이론이 예측한 바로는 주로 $z < 1$에서 만들어진다는 무거운 은하단들을 $z > 1$에서 발견하였다는 보고들이 잇따르고 있다(그림 1; Kang & Im 2009, 2014; Jee et al. 2009, 2011; Papovich et al. 2010; Stanford et al. 2012; Fassbender et al. 2011; Nastaci et al. 2011; Foley et al. 2011; Holz et al. 2012; Brodwin et al. 2012; Gonzalez et al. 2012; Aghanim et al. 2011; Stalder et al. 2013; Tozzi et al. 2013; Muzzin et al. 2013; Bayliess et al. 2013; Cucciati et al. 2014; Lemaux et al. 2014). 그러나 적색이동이 $z\sim1$ 부근의 무거운 은하단 존재가 ΛCDM 은하 형성이론과 모순되지 않는다는 연구 결과들도 있어 고적색이동에서의 무거운 은하단의 존재는 현대천문학에서 난제로 남아 있다(Mortonson et al. 2011; Hotchkiss 2011; Waizmann et al. 2012, 2013; Hasselfield et al. 2013; Harrison & Hotchkiss 2013). 그런 면에서 볼 때 $z > 1.5$ 이상인 고적색이동 은하단 연구는 매우 중요하다. 무거운 은하단의 형성은 우주상수 등 우주론에서 가정하는 여러 parameter 값에 좌우되는데 고적색이동으로 갈수록 모델 간 차이가 두드러진 것이 특징이기 때문이다(e.g., Grossi et al. 2007). 하지만 아쉽게도 $z > 1.5$가 넘어서는 은하단에 대한 연구는 관측적인 한계 때문에 효율적으로 진행이 어려운 것이 현황이다.

고적색이동에 있는 은하단과 무거운 은하를 발견하기 위한 효율적인 방법으로 은하단이 있을 만한 천체 주변을 살펴보는 것을 들 수 있다. 그동안 전파은하(radio galaxy)나 퀘이사들이 고적색이동 은하단을 찾기 위한 도구로 사용되어왔지만 그러한 천체들 주변에 은하단들이 반드시 존재하는 것은 아니라는 것이 알려져 있다(Kang & Im 2014; Adams et al. 2014). 고적색이동 은하단을 찾기 위하여 본 연구단이 착안한 것이 가장 무거운 블랙홀, 즉 질량이 매우 무거운 블랙홀을 가지는 퀘이사들이다. 거대질량블랙홀(Supermassive Black Hole)이란 태양보다 100만에서 100억 배 더 무거운 블랙홀을 뜻한다. 그중 가장 무거운 블랙홀들, 이름 지어 Extremely Massive Black Hole(EMBH)은 질량이 $M\sim10^{10}M_{\odot}$으로 매우 크며 현재 가까운 비활동 은하 몇 개에서 그 존재가 확인된 바 있다(McConnell et al. 2011; van den Bosch et al. 2012). EMBH 퀘이사들은 적색이동이 $1 < z < 5$인 구간에서 수백 개 이상 발견이 되어 있다. EMBH 질량 범위에서 퀘이사 블랙홀 질량 측정법 검증이 덜 된 점, 그리고 EMBH 퀘이사들의 방출선이 특이한 모양을 갖는 점 등 EMBH 퀘이사의 질량 측정 자체에 다소 의문을 가질 수도 있지만, EMBH 퀘이사들과 가까운 우주에 있는 거대은하 수밀도가 비슷한 것으로 보

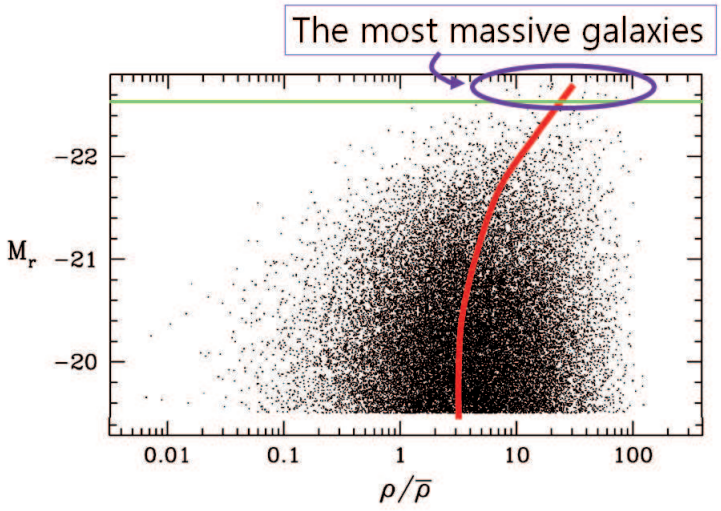

그림 2. SDSS 자료에 있는 조기형 은하들(Early-type galaxy)의 R-band 절대등급과 주변 밀도 사이의 관계. 빨간 실선은 밀도-절대등급 관계의 평균치를 대략적으로 그려놓은 것이다. EMBH들은 그림에 표시한 가장 밝고 무거운 조기형 은하들(R < -22.5mag)의 중심부에 위치하게 된다. 대부분 조기형 은하들은 다양한 환경에서 존재하지만 가장 무거운 조기형 은하들은 밀도가 높은 지역에서만($\rho/\bar{\rho}\simeq25$) 주로 존재하는 것을 알 수 있다. 위 그림은 Park et al.(2007)에 게재된 그림을 목적에 맞게 편집한 것이다.

아 이들은 서로 밀접한 관계에 있다고 봐도 무방하다(Lauer et al. 2007).

그런 점으로 볼 때 EMBH는 가장 무거운 은하와 은하단을 추적하기 위해 매우 유용한 천체라고 할 수 있다. 블랙홀-모은하 질량 간의 관계식에 따르면 EMBH는 모은하 질량이 $M > 10^{12} M_\odot$인 가장 무거운 은하, 특히 조기형 은하(Early-type galaxy)의 중심부에 있다고 추정이 가능한데, 가장 무거운 은하들은 대부분 은하단에 속해 있다는 것이 알려져 있다. [그림 2]는 Sloan Digital Sky Survey(SDSS) 자료에 있는 가까운 조기형 은하들의 R-band 절대등급(M_R)과 주변 밀도 사이의 상관관계이다(Park et al. 2007). 조기형 은하의 경우 밝기와 질량 사이에 좋은 상관관계가 있기 때문에 매우 밝은 조기형 은하는 매우 무거운 은하라고 할 수 있다. 밝기가 $M_R > -21$등급 정도의 보통 밝기 조기형 은하의 경우 주변 밀도 환경이 매우 다양함을 알 수 있으나, 밝은 조기형 은하의 경우($M_R < -21$등급), 밀도가 높은 곳에 존재하는 경향을 보여준다. 특히 가장 밝은 조기형 은하인 경우($M_R < -22.5$등급), 밀도가 $\rho/\bar{\rho}\sim25$이나 그 이상이 되는 고밀도 지역에 주로 있음을 알 수 있다. 그런데 이것은 이론적으로 다소 의외의 결과이다. 최근

Fanidakis et al.(2013)의 모델에 따르면 고적색이동($z > 5$)에 있는 밝은 퀘이사들은(대부분 $M \sim 10^9 M_\odot$ 정도의 질량을 가진다), 현재 가장 무거운 환경인 $M \sim 10^{15} M_\odot$ 정도의 halo가 아니라 그것보다 덜 무거운 $M \sim 10^{14} M_\odot$ 정도나 그 이하의 halo에 소속이 되어 있다고 예측한다. 그렇지만 [그림 2]로 볼 때 EMBH에 대해서는 이 예측이 옳지는 않다는 것을 알 수 있다. 따라서 다양한 적색이동에서 이론을 검증하는 것이 필요하다.

결론적으로 EMBH와 그 주변 환경을 연구하면 다음과 같은 난제들을 해결할 수 있을 것이다. 첫째, EMBH 퀘이사 주변을 살펴봄으로써 우주론과 은하 형성 이론 검증에 유용한 고적색이동 은하단을 다수 발견할 수 있다. 둘째, 고적색 은하단의 질량, 수밀도, 그리고 소속 은하들의 진화 상태가 이론 예측과 일치하는지 확인하여 ΛCDM 은하 형성이론에 대한 검증을 할 수 있을 것이다. 마지막으로 EMBH 퀘이사 주변 은하단의 유무 및 은하단 소속 은하들의 진화 상태를 통하여 퀘이사들이 주변 은하들의 형성에 어떤 영향을 미치는지에 대한 조사도 가능할 것이다.

2) GMT의 필요성

EMBH 주변에서 은하단을 발견하기 위해서는 주변 은하들의 적색이동 값이 EMBH의 적색이동 값과 동일한지 알아내어야 한다. 그러나 $1 < z < 5$에 있는 은하들은 먼 곳에 있어 어둡기 때문에 그들의 스펙트럼을 관측하여 적색이동 값을 구하는 일은 쉽지가 않다. 적색이동 값이 $z \sim 3$인 천체인 경우 높은 신뢰성을 갖고($> 5\sigma$ 이상) 은하단 유무를 결정짓고 은하단의 velocity dispersion을 결정하기 위해서는 20개 내외의 member galaxy들 및 은하단 주변에 있는 고적색이동 후보 천체들에 대한 적색이동 결정이 필요하다. 또한 은하단 소속 은하의 적색이동 값에 대한 정확한 결정 및 metallicity 측정 등 은하의 특성 파악에는 $R \sim 2000$ 정도의 파장해상도가 필수적이다. 적색이동 3인 경우 10-30개의 은하단 은하들을 검출하기 위해서는 $R \sim 25$ AB mag의 깊이가 필요한데 그러한 관측을 1-3시간의 경제적인 노출시간으로 이루어내는 것은 GMT와 같은 차세대 거대망원경을 사용해야만 가능하다. 은하단의 겉보기 각크기는 수 arcmin이 될 것이기 때문에, 이보다 더 큰 field of view를 갖는 기기가 필요하다. 따라서 넓은 시야에 대해서 $R \sim 25$ AB mag나 그보다 더 어두운 천체까지 관측이 가능한 GMT/GMACS는 이

연구에 매우 적합한 기기라고 할 수 있다. 또한 z=1.5-2.5에 있는 천체의 적색이동 값은 Lyα 등 UV line을 통해 결정하는 것이 불가능하기 때문에 J-band까지 포함하는 NIR arm이 있는 기기를 사용하는 것이 이상적이다. J=23-24 AB mag 정도까지의 한계등급일 경우 stellar mass가 $M > 10^9 M_\odot$ 은하에 대해서도 적색이동 값 결정이 가능하기 때문에 stellar mass에 따른 은하단 소속 은하의 특성 변화를 연구할 수 있다. 위와 같은 연구를 기존 8-m급 망원경으로 하기 위해서는 GMT 대비 약 10배 이상의 노출시간(타깃당 10시간 이상)이 필요하기 때문에 수십 개의 EMBH 퀘이사 주변 환경 연구는 GMT 없이는 실질적으로 힘들다고 할 수 있다.

3) 국내외 연구 동향

블랙홀과 은하의 진화 상관관계 연구와 우주론 검증이라는 측면에서 가장 무거운 은하들에 대한 관심이 최근 몇 년 사이에 부쩍 커진 상태이다. 특히 가까운 곳에 있는 가장 무거운 은하들인 brightest cluster galaxy(BCS)와 고적색이동에 있는 그들의 counterpart에 대한 연구가 현재 활발히 이루어지고 있다. 퀘이사 주변에 은하단이 있느냐는 연구는 1990년대 중반부터 꾸준히 있어왔으며, Hall et al.(1998) 등에 의한 초기 연구 결과에 따르면 $1 < z < 2$에 있는 radio-loud quasar 주변이 overdense하다고 하나, 모든 퀘이사 주변이 overdense하지는 않다는 것이 알려져 있다. 최근에는 이러한 연구가 z=5-6인 초기우주에까지 이루어지고 있는데, 퀘이사 주변에 은하단이 있다는 결과와 그렇지 않다는 결과가 혼재하고 있는 상태이다. 예컨대, Priddey et al.(2008), Kim et al.(2009), Husband et al.(2013), Utsumi et al.(2010) 등은 z=5-6에 있는 퀘이사들 주변이 overdense하다는 결과를 내놓은 반면 Banados et al.(2013), Simpson et al.(2014) 등은 그러한 징후를 찾지 못하였다. 이론적으로는 Fanidakis et al.(2013)이 z=5-6에 있는 퀘이사 주변이 특별히 두드러지게 overdense하지는 않을 것이라 예측하고 있다. 반면 국내에서는 본 연구팀이 IRTF, AKARI 우주망원경을 사용하여 고적색이동 퀘이사들의 Hα을 검출하였고 이를 사용하여 블랙홀질량을 높은 신뢰성을 가지고 측정한 연구를 수행하였으며(Jun & Im 2014; Jun et al. 2014), 이는 본 연구에 사용할 퀘이사 기본 자료로 사용이 가능하다. 그 외에도 본 연구팀은 가장 무거운 퀘이사 주변 환경 연구를 위하여 CQUEAN 및

UKIRT와 같은 관측시설을 사용하여 $z < 1.5$에 있는 EMBH 주변 image 자료를 확보를 하였으며, 이를 현재 분석 중에 있다. 고적색이동 은하단 탐사 또한 이루어졌으며, Kang & Im(2009, 2014)은 $z = 3.7$에 있는 무거운 은하단 후보를 비롯하여 $0.7 < z < 4$ 사이에 있는 은하단 후보를 다수 발견하였다.

3. 연구의 내용 및 방법

1) 연구 대상

연구 대상은 SDSS 및 타 탐사 프로젝트들이 발견한 $1 < z < 5$에 있는 EMBH 퀘이사들 주변 환경이다. EMBH 퀘이사 중 블랙홀 질량 측정이 Mg II, Hα, Hβ와 같은 방출선을 이용하여 이루어진 퀘이사 주변 field를 관측 field로 정할 것이다. 그동안 본 연구팀은 AKARI 우주망원경, IRTF 등을 사용하여 퀘이사들의 rest-frame optical spectra를 획득하고 분석하였는데, 이들 퀘이사가 주된 탐사 대상이 될 것이나 필요할 경우 추가로 근적외선 분광을 실시하여 타깃의 수를 늘리고자 한다. GMACS target은 이들 field에서 photometric red shift 또는 color-color diagram을 사용하여 선별한 고적색이동 은하들로 한다. 적색이동이 $z > \sim 2.5$인 경우에는 Lyman break galaxy들이 주된 target이 될 것이며, $R < 25$ AB mag인 천체 또는 $I < 25$ AB mag인 천체들을 고려한다면 적절한 수의 LBG들을 적색이동 3-5에 걸쳐서 GMACS field of view에서 관측할 수 있다. $z < 2.5$인 경우 photmetric red shift를 위주로 target을 선정할 것이며, 이를 위하여 multi-band imaging 관측 자료를 확보할 것이다.

2) 사용 GMT 기기 및 관측 전략

본 연구를 위해서는 다천체 분광기능과 moderate resolution(R~2000)의 관측이 가능한 GMACS를 사용하는 것이 바람직하다. 4-arm을 사용하는 full capability(FoV: 9′x18′)를 가정할 경우 최대 약 200개의 5″ slit의 사용이 가능하기 때문에 2-3 arcmin scale의 은하단 소속 천체들과 그 주변 은하들에 대한 관측이 가능하여 이상적이다. 5″ slit을 사용할 경우 24-36개의 은하단 소속 천체들을 관측하는 것이 가능하며, 나머지 slit은 field에 있는 해당 red shift

천체들에 할당하여 해당 red shift 지역의 평균 density 측정할 것이다. R < 25 AB mag인 천체들의 경우(field galaxy의 경우 수밀도가 대략 1 per arcmin^2; Bien & Fan 2014; Reddy & Steidel 2007; Shim et al. 2007) 1시간 노출을 주면 S/N~3이 가능하여 적색이동 측정이 가능하다[그림 3]. 좀 더 큰 적색이동 값을 가지는 I < 25 AB mag 천체인 경우 3시간 노출을 주어 S/N~3의 목표를 이루고자 한다[그림 3]. 적색이동이 1 < z < 2.5인 천체의 경우, NIR-arm이 있을 경우 [O II], Ca H+K absorption line, Hβ 등을 이용하여 적색이동 확인이 가능하다. 적색이동이 z=1.5인 경우 J=23 AB mag limit에서 $M > 10^9 M_\odot$의 은하까지 sampling이 가능하다. 적색이동이 z=2인 경우에는 해당 mass limit에 대응하는 등급한계는 J=24 AB mag가 된다. z=2.5이 red shift range에서는 방출선을 보이는 star-forming galaxy 말고도 흡수선을 통해 적색이동을 확인해야 하는 quiescent galaxy들이 적지 않게 있을 것으로 보이기 때문에 이들 은하단 후보 천체들에 대해서는 3시간 정도의 노출시간을 주고자 한다. EMBH 퀘이사 주변 환경에 대한 통계적인 분석을 위해서는 각 red shift range에서 적어도 10개 정도의 sample이 필요할 것이다. 따라서 2.5 < z < 5에 있는 EMBH 퀘이사 20개에 대해서 overhead 포함(x1.5), 1.5시간, 그리고 z > 4에 있는 EMBH 10개, 그리고 1 < z < 2.5에 있는 EMBH 10개에 대해서는 각 4.5시간을 사용할 경우 총 120시간, 또는 약 12일의 관측 시간이 소요된다.

One-arm만 사용이 가능한 경우에는 FoV가 4.5′x9′로, 사용 가능한 slit 개수는 25-50개 수준으로 줄어들지만, 은하단 후보 천체들과 주변 은하들을 관측하는 것이 여전히 가능하다.

3) 선행 연구

본 연구 과제의 성공적인 수행을 위해서는 다음과 같은 선행 연구가 필요하다. (1) 가까운 우주에서 EMBH와 주변 은하들 간의 상관관계 확립; (2) 신뢰성 높은 질량 측정이 이루어진 EMBH 퀘이사 sample 확보; (3) Imaging 관측을 통한 EMBH 퀘이사 주변 은하들의 특성 파악 및 은하단 후보 선별; (4) EMBH 퀘이사(또는 은하) 주변에 있는 은하들에 대한 분광관측 선행 연구를 통한 방법론의 확립. 본 연구진은 (1)에 대해서 SDSS 자료를 이용 이미 EMBH와 주변 밀도 간의 상관관계를 확립하였는데, 이 방법의 적용 가능성을 타진하기 위하여

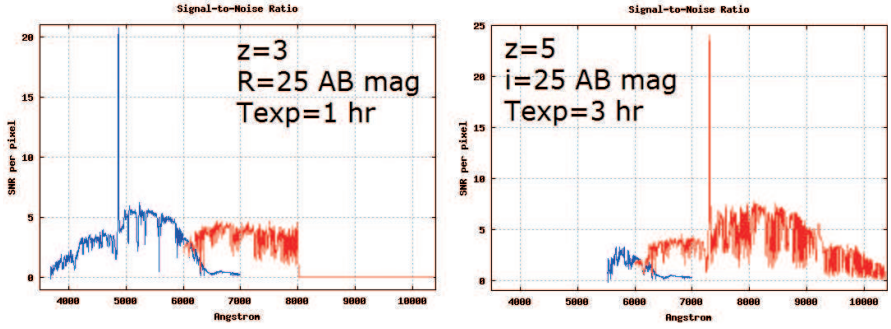

그림 3. 적색이동이 z=3 및 z=5에 있는 LBG 은하들에 대하여 Full-mirror configuration 관측에서 예상되는 파장별 S/N 값을 보여주는 그림. R 또는 I-band 25 AB mag의 희미한 천체들에 대해서도 노출시간 1-3시간 수준의 관측이면 pixel당 S/N 3-5로 적색이동 결정에 충분한 S/N 값을 얻을 수 있다.

z=0.3-0.4 EMBH 은하들 주변 은하에 대하여 4-6m급 망원경을 이용한 다천체 분광관측의 수행이 필요하다(field당 1시간 정도 소요, R < 20등급). 또한 (2)를 위해서는 3-8m급 망원경을 이용한 근적외선 분광관측이 필수적이다. Imaging 관측을 통한 은하단 후보를 선별하기 위해 z < 1.5에 있는 EMBH 주변 환경 imaging 관측을 수행 중이나, 4-8m급 망원경을 이용한 광시야 관측이 이루어질 수 있다면 좀 더 효율적이고 신뢰성 있는 후보 선별이 가능할 것이다. 마지막으로 EMBH 퀘이사 주변 환경을 이해하기 위한 분광관측은 5′ 이상의 시야를 가진 다천체분광기가 있는 8-m급 망원경을 이용하여(타깃당 3시간 내외) z~1 정도의 지역이나 overdensity가 두드러지는 지역에서 실시할 수 있을 것이다.

4. 연구 결과의 기대 성과

우주에서 가장 무거운 은하와 가장 무거운 구조물인 은하단이 언제 어떻게 생성되었는지는 아직까지 제대로 풀리지 않은 천문학 난제 중의 하나이다. 본 연구는 고적색이동 EMBH 퀘이사를 signpost로 이용하여 그 주변에서 은하단을 찾아 은하 진화/형성 연구를 한다는 방법론적인 측면에서 기존 연구와 차별성을 둔 연구를 할 것이다. 특히 그냥 퀘이사가 아닌 EMBH 퀘이사들 주변을 살펴볼 경우 z > 2가 넘는 우주에서 수십 개의 은하단을 발견하는 것이 가능할 것으로 보

이며, 그럴 경우 초기우주 은하단 형성 연구에 획기적인 진보를 가져다줄 수 있을 것으로 예상한다. 이렇게 발견한 은하단들과 EMBH 퀘이사 주변의 환경 변화를 연구함으로써 ΛCDM 은하 형성이론에 대한 검증이 가능할 것이다.

5. 인용문헌

Aghanim, N., Arnaud, M., Ashdown, M., et al. 2011, A&A 536, 26
Allen, S. W., Evrard, A. E., & Mantz, A. B. 2011, ARAA, 49, 409
Banados, E., Venemans, B., Walter, F., et al. 2013, ApJ, 773, 178
Bayliss, M. B., Ashby, M. L. N., Ruel, J., et al. 2013, ApJ submitted
Bian, F., Fan, X., Jiang, L., et al. 2014, ApJ, in press
Brodwin, M, Gonzalez, S. A., Stanford, A., et al. 2012 ApJ, 753, 162
Chiba, M., & Yoshii, Y. 1997, ApJ, 489, 485
Collins, Chris A., Stott, John P., Hilton, Matt, et al. 2009, Nature, 458, 603
Cucciati, O.; Zamorani, G.; Lemaux, B. C., et al. 2014, A&A submitted
Fanidakis, N, Maccio, V. M., Baugh, C. M., Lacey, C. G., & Frenk, C. S. 2013, MNRAS, 436, 315
Fassbender, R., Nastasi, A., Böhringer, H., et al., A&A, 527, L10
Foley, R., Andersson, K., Bazin, G., et al. 2011, ApJ, 731, 86
Gonzalez, A. H., Stanford, S. A., Browdin, M., et al. 2012 ApJ 753, 163
Grossi, M., Dolag, K., Branchini, E., Matarrese, S., & Moscardini, L. 2007, MNRAS, 382, 1261
Hall, P., Green, R. F. G., & Cohen, M. 1998, ApJS, 119, 1
Harrison, I., & Hotchkiss, S. 2013, JCAP, 7, 22
Hasselfield, M., Hilton, M., Marriage, T. A., et al. 2013, JCAP, 7, 8
Husband, K., Bremer, M. N., Stanway, E. R., et al. 2013, MNRAS, 432, 2869
Holz, D. E., & Perlmutter, S. 2012, ApJL, 755, 36
Hotchkiss, S. 2011, JCAP, 7, 4
Im, M., Griffiths, R. E., & Ratnatunga, K. U. 1997, ApJ, 475, 457
Im, M., Simard, L., Faber, S. M., et al. 2002, ApJ, 571, 136
Jee, M. J., Rosati, P., Ford, H. C., et al. 2009, ApJ, 704, 672
Jee, M. J., Dawson, K. S., Hoekstra, H., et al. 2011, ApJ, 737, 59
Kang, E., & Im, M. 2009, ApJL, 691, L33
Kang, E., & Im, M., 2014, JKAS, submitted
Kim, S. et al. 2009, ApJ, 695, 809

Kravtsov, A. V., & Borgani 2012, ARAA, 50, 353
Lauer, T. R., Faber, S. M., Richstone, D., et al. 2007, ApJ, 662, 808
Lemaux, B. C.; Cucciati, O.; Tasca, L. A. M., et al. 2014, A&A submitted
Lukic, Z., Heitmann, K., Habibi, S., et al. 2007, ApJ, 671, 1160
McConnell, N. J.; Ma, C.-P.; Gebhardt, K., et al. 2011, Nature, 480, 215
Mortonson, M. J., Hu, W., & Huterer, D. 2011, Physical Review D, 83, 02315
Muzzin, A., Wilson, G., Demarco, R., et al. 2013, ApJ, 767, 39
Nastaci, A., Fassbender, R., Böhringer, H., et al. 2011, A&A, 532, L6
Papovich, C., Momcheva, I., Willmer, C. N. A., et al. 2010, ApJ, 716, 1503
Park, C., Choi, Y.-Y., Vogeley, M. S., et al. 2007, ApJ, 658, 898
Perlmutter, S., Aldering, G., Goldhaber, G., et al. 1999, ApJ, 517, 565
Priddey, R. S., Ivision, R. J., & Isaak, K. G. 2008, MNRAS, 383, 289
Reddy, N. A., & Steidel, C. C. 2009, ApJ, 692, 778
Riess, A. G., Filippenko, A. V., Challis, P., et al. 1998, AJ, 116, 1009
Shim, H., Im, M., Choi, P., et al. 2007, ApJ, 669, 749
Simpson, C., Mortlock, D., Warren, S., et al. 2014, MNRAS, 442, 3454
Stalder, B., Ruel, J., Suhada, R., et al. 2013, ApJ, 763, 93
Stanford, A., Brodwin, M., Gonzalez, Anthony H., et al. 2012, ApJ, 753, 164
Tozzi, P., Santos, J. S., Nonino, M., et al. 2013, A&A, 551, 45
Utsumi, Y., Goto, T., Kashikawa, N., et al. 2010, ApJ, 721, 1680
van den Bosch, R. C. E.; Gebhardt, K.; Gültekin, K. 2012, Nature, 491, 729
Waizmann, J.-C., Ettori, S., & Moscardini, L. 2012, MNRAS, 420, 1754