고적색이동 은하의 은하주변물질 연구

● 심현진

경북대학교

1. 과학 목적 및 요약

은하에서 기체의 유입과 유출은 별 생성의 원인 혹은 결과로 일어나는 바리온 과정이다. 은하 간 물질(IGM), 은하주변물질(CGM)과 은하의 상호작용은 은하의 생성과 진화에 중요한 역할을 한다. 최근의 수치계산 결과들은, 고적색이동 은하에서는 은하끼리의 극적인 병합 과정 없이도 차가운 기체가 필라멘트의 형태로 지속적으로 헤일로 중심부로 유입될 가능성이 있으며, 이때 기체의 유입량은 관측된 별 생성률을 충분히 설명할 수 있음을 보여주고 있다. 관측된 기체의 유출량까지 고려하면 실제 별 생성률의 몇 배에 해당하는 기체가 은하로 유입되어야 할 것이며, 이러한 지속적인 피드백과 재활용 과정을 거쳐 은하주변물질은 점점 농축된다. 은하주변물질의 금속함량, 온도, 운동학적 특성 파악은 은하의 성장과 연관된 주요 질문들에 대해 해답을 제공할 것이다.

현재 은하주변물질 연구는 밝은 배경천체와 그보다 적색이동이 작은 전경천체의 짝을 대상으로 스펙트럼을 얻는 방법으로 진행되고 있다. 8-10m급 망원경을 사용한 연구들은 집광력과 분광분해능의 한계에도 불구하고 적색이동, 시선방향에 대한 충돌계수(Impact Parameter) 등에 따라 은하주변물질의 성질이 어떻게 달라지는지에 대한 약간의 힌트를 제공하였다. 은하 성장과 은하주변물질의 변화에 대한 보다 완전한 이해를 위해서는 은하의 물리인자와 은하주변물질의 특성 사이 상관관계가 존재하는지, 또 적색이동별로 은하주변물질의 특성이 진화하는지 등을 보다 넓은 범위의 은하들을 대상으로 살펴볼 필요가 있다.

GMT 이전 망원경들로는 관측 깊이의 문제로 연구 대상을 질량이 작거나 광도가 낮은 은하로 확대하는 것이 불가능했고 연구 가능한 전경은하의 적색이동 범위에도 상당한 제한이 있었다. 본 관측 프로그램에서는 GMT의 뛰어난 집광력에 기대어, 고적색이동 은하주변물질의 특성을 보다 넓은 은하 질량 범위에서, 다양한 적색이동 범위에서 연구하고자 한다.

2. 연구 필요성, 배경 및 동향

1) 연구의 배경 및 필요성

은하의 생성과 진화 과정은 바리온을 추적함으로써 설명할 수 있다. 일차적으로 은하 간 물질에 위치하던 바리온이 은하 헤일로에 포획되어 은하 중심으로부터 수백 kpc 이내에 분포하는 은하주변물질을 형성하면, 은하주변물질과 은하를 오가는 바리온이 은하 내에서의 별 생성을 지배한다. 고적색이동 은하에서 관측되는 높은 별 생성률은 차가운 기체가 지속적으로 은하 중심부로 투입되기 때문에 가능한 현상이다(Keres et al. 2005; Dekel et al. 2009). 또한 고적색이동 은하 중 별 생성률이 높은 은하들에서는 강한 기체 유출이 관측되는데, 별 생성의 피드백으로 발생하는 이러한 기체 유출은 은하주변물질의 금속함량을 증가시킨다. 유출된 물질은 다시 은하로 투입되며 은하의 화학적 진화를 유도한다. [그림 1]은 적색이동 3 근처에서 은하주변물질의 온도, 밀도, 금속함량 분포와 운동학적 특성(유입과 유출)을 시뮬레이션을 통해 얻은 결과이다.

차가운 기체 유입("cold accretion") 시나리오에서 필라멘트 형태의 흐름을 구

성하는 기체는 온도가 낮고(~10^5K), 밀도($N_{HI}=10^{17\sim20}cm^{-2}$)가 높으며 금속함량이 낮은(logZ~-2.5) 기체로, 200km/s 내외의 시선속도를 가질 것으로 추정된다(Fumagalli et al. 2011; Stewart et al. 2011). 그러나 흡수선의 청색이동으로 비교적 명확하게 확인할 수 있는 기체 유출(outflow)과 달리 기체 유입(inflow)은 상대적으로 검출이 어렵다. 기체 유출 운동 성분에 의해 가려지기도 하고, 성분 면에서도 유출된 기체가 재유입되는 상황에서는 기체 유출과 구별하기 어렵기 때문이다(Ford et al. 2013). 현재까지 기체 유입의 직접적인 증거는 관측되지 않았으나 최근 여러 시도들은 기체 유입설을 지지하는 간접적 근거를 찾아내고 있다. 일례로 Crighton et al.(2013)에서는 적색이동 2.4 은하의 은하주변물질을 관측, 관측된 금속함량과 중성수소 밀도가 차가운 기체 유입 시나리오에서의 예측치와 유사함을 보였다. 또한 Lehner et al.(2013)에서는 중성수소 흡수체들의 금속함량 분포가 두 개의 고점을 가진다는 점을 근거로, 금속함량이 낮은 흡수체들은 최근에 유입된 차가운 원시 기체, 금속함량이 높은 흡수체는 은하로부터 유출된 농축된 기체라고 설명하였다.

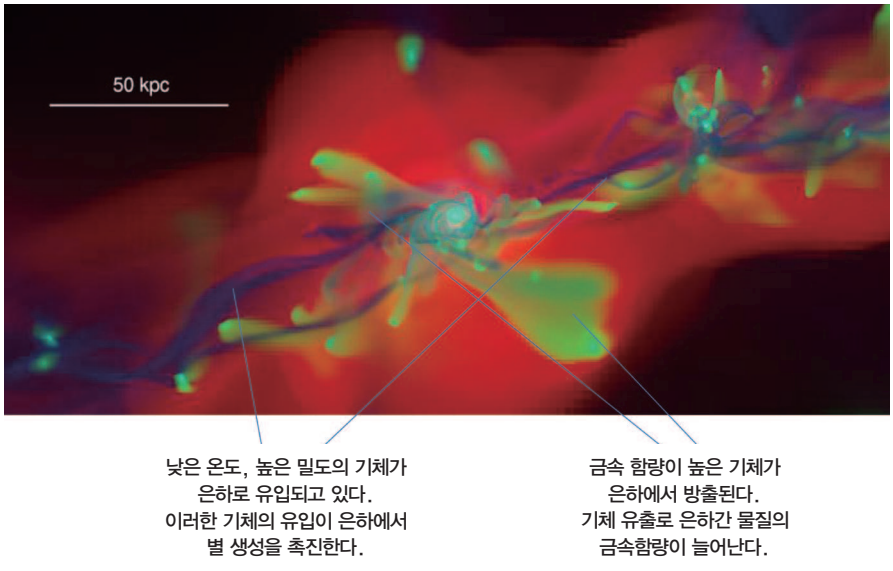

그림 1. 적색이동 3 근처에서 시뮬레이션한 은하 주변 기체의 분포를 온도(적색), 밀도(청색), 금속함량(녹색)의 변수를 기준으로 나타내었다(Agertz et al. 2009). 발달 중인 은하 원반에 필라멘트 형태의 고밀도 기체가 유입되고 있고, 충격파에 의해 가열된 뜨거운 기체들이 은하를 둘러싸고 있다. 은하에서 유출된 금속함량이 높은 기체는 주변 은하 간 물질의 화학적 농축을 유도한다.

은하주변물질을 관측하기 위한 기본 아이디어는 배경 퀘이사의 연속선을 이용, 시선방향에 놓인 흡수체의 흡수선을 얻어내는 것이다. 퀘이사는 충분히 밝은 천체이므로 연속 스펙트럼의 신호대잡음비가 높고, 중성수소 원주밀도가 큰 흡수체가 퀘이사의 전경에 놓여 있을 경우 이들에 의한 라이만 알파 흡수선, 금속(예: CIV, MgII) 흡수선 등이 퀘이사의 연속 스펙트럼에 드러나게 된다(예: Adelberger et al. 2005). 배경천체와 전경천체의 쌍을 이용, 전경천체 주변의 은하주변물질에 대한 정보를 얻는 방법의 원리를 [그림 2]에 개략적으로 설명하였다.

[그림 2]의 왼쪽 예시처럼 밝은 퀘이사를 배경으로 전경은하들의 은하주변물질을 연구할 수도 있고, 오른쪽 예시처럼 은하-은하 쌍을 대상으로 충돌계수를 더 다양하게 확보할 수도 있다. 배경천체-전경천체는 적색이동 범위에 따라 다른 방법으로 선정하게 된다. 충돌계수가 다른 배경천체-전경천체 쌍을 이용할 경우

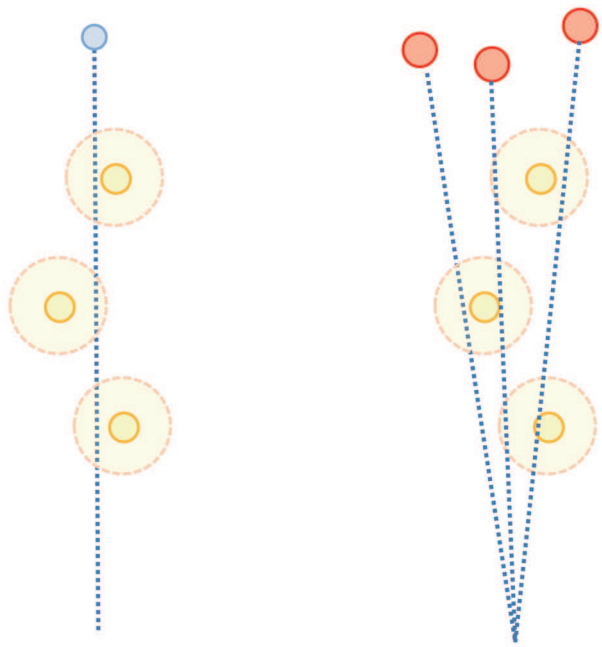

그림 2. 시선방향을 공유하는 배경천체와 전경천체의 쌍을 이용하여 전경천체 주변의 은하주변물질에 대한 정보를 얻을 수 있다. 왼쪽 예시에서는 배경천체로 밝은 퀘이사를 활용, 충돌계수가 다른 전경은하들의 은하주변물질 흡수선을 얻음으로써 은하로부터 멀어짐에 따라 은하주변물질의 특성이 어떻게 변화하는지 알 수 있다. 오른쪽 예시는 배경천체로 은하나 상대적으로 어두운 활동성 은하핵을 활용할 경우, 더 많은 개수의 시선을 이용해 은하주변물질의 특성을 연구할 수 있음을 보여준다.

은하에서 바깥쪽으로 갈수록 은하주변물질의 특성이 어떻게 달라지는지 확인 가능하다. 다양한 적색이동을 가진 전경천체들을 찾아냄으로써 적색이동에 따라 은하-은하주변물질의 상호작용을 살펴보는 것도 필요하다. 이미 수치계산 결과와 이론 모형들은 은하 간 물질의 금속함량이 적색이동에 대해 차이를 보일 가능성이 있고(Ryan-Weber et al. 2009) 은하 규모의 바람 모형과도 연관이 있을 것이라(Ford et al. 2013) 예측하고 있다.

이러한 일차적인 물음에 대한 답으로, [그림 3]은 최근 관측된 고적색이동 은하와 가까운 은하의 은하주변물질 스펙트럼을 충돌계수별로 보여준다. 배경은하/퀘이사의 스펙트럼을 전경은하로 이동시켰을 때 라이만 알파와 같은 중성수소 흡수선을 비롯, 이온화된 금속 흡수선이 관측되었다. 전경은하가 어두우므로 비슷한 충돌계수를 가지는 스펙트럼들끼리 합성하여 신호대잡음비의 향상을 꾀할 수 있다. 고적색이동 은하($2 < z < 3$)의 합성 스펙트럼은 배경천체와 전경천체가 모두 은하일 때, 충돌계수가 같은 은하들을 골라 각 은하들의 정지좌표계 자외선 스펙트럼을 평균한 것이다(Steidel et al. 2010). 가까운 은하($\langle z \rangle = 0.02$)의 합성 스펙트럼은 배경천체가 퀘이사일 때, 은하-퀘이사의 짝에서 역시 은하들의 자외선 스펙트럼을 평균하여 얻었다(Liang & Chen 2014).

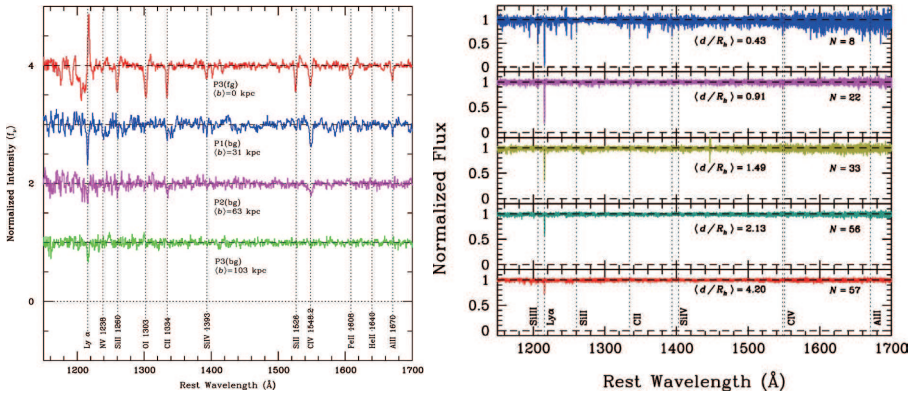

그림 3. (왼쪽) 적색이동 $2 < z < 3$ 은하들의 합성 스펙트럼. 위에서 두 번째 스펙트럼부터는 은하-은하 쌍을 관측했을 때 배경은하의 스펙트럼을 전경은하의 적색이동으로 이동시킨 뒤 전경은하를 기준으로 충돌계수가 같은(30, 60, 100kpc) 은하들끼리 스펙트럼을 평균하여 얻었다(Steidel et al. 2010). (오른쪽) 가까운 은하($\langle z \rangle = 0.02$)의 합성 스펙트럼. 왼쪽과 같은 방법으로 배경 퀘이사의 스펙트럼을 전경은하의 적색이동으로 이동시켜 평균을 구했다. 왼쪽과 오른쪽 모두 합성 스펙트럼에서 은하주변물질에 의한 라이만 알파, 금속 등의 흡수선을 관측할 수 있다(Liang & Chen 2014).

전자는 저분산 스펙트럼, 후자는 고분산 스펙트럼이라는 차이 외에도 두 결과를 직접적으로 비교하기에는 무리가 따르는데, 그 이유는 전경은하들의 광도가 상당히 다르기 때문이다. 고적색이동 은하의 경우 분광관측을 하기에는 매우 어둡고 따라서 Keck/LRIS로 상당한 노출시간을 주었음에도 불구하고 L* 이상의 은하들에 대해서만 스펙트럼을 얻을 수 있었다. 반면 가까운 은하에 대한 Liang & Chen(2014) 연구에서는 아카이브를 이용, 기존에 자외선 고분산 스펙트럼 자료가 확보된 퀘이사를 선정하고 이와 짝을 이루는 은하들을 찾았기 때문에 대부분의 은하가 ~0.2L* 정도의 광도를 가지는 왜소은하들이다. 충돌 계수에 따른 흡수선의 세기 변화를 보면 은하의 적색이동, 혹은 은하의 광도와는 무관하게 라이만 알파 흡수선은 은하로부터 상당히 멀리까지(100~400kpc) 관측되며 CIV 흡수선은 60kpc 이상에서는 관측되지 않는다는 사실을 알 수 있다. 하지만 이 사실의 원인을 바르게 해석하고 적색이동, 광도 등에 따른 은하주변물질 진화가 존재하는지 여부를 확인하려면 적색이동 2 이상에서도 L* 이하의 어두운 은하를 전경은하로 하여 은하주변물질의 특성을 연구할 필요가 있다.

2) GMT의 필요성

은하주변물질과 은하의 상호작용을 알아보기 위해서는 두 가지 요소가 필요하다. 첫 번째는 주변 기체의 화학조성, 동역학적 특징을 파악하는 것이고, 두 번째는 은하 내에서의 별 생성 등 바리온 과정을 이해하는 것이다. 전경천체(은하)와 배경천체(은하/퀘이사)의 짝을 사용할 때 첫 번째 목적을 만족하기 위해서는 배경천체의 스펙트럼 위에 나타난 전경천체의 흡수선을 이용해야 하므로 배경천체의 밝기가 중요해진다. 또한 은하 중심에서 바깥으로 가면서 은하주변물질의 위치에 따른 특성 변화를 파악할 수 있으려면 충돌계수가 다양한 전경천체의 적색이동 확보가 필요하다. 두 번째 목적을 위해서는 전경천체에 대한 광범위한 분광관측 혹은 다파장 관측이 있어야 한다.

이러한 점을 고려할 때 기존 연구에 비해 GMT가 가지는 가장 큰 장점은 우선 큰 구경으로 인한 높은 집광력이다. 은하-퀘이사의 짝을 이용한 연구에서 배경 퀘이사의 고분산 스펙트럼을 얻으려면 Keck, Magellan 등 기존 8-10m급 망원경을 사용할 경우에도 관측 대상을 매우 밝은 퀘이사(R밴드에서 15-17등급)로밖에 선정할 수 없어 연구 가능한 시선방향의 개수가 지극히 한정되어 있었다. GMT

는 R밴드에서 21등급 정도의 밝기를 가지는 퀘이사에 대해서도 G-CLEF를 사용해 R~25,000 정도의 고분산 스펙트럼을 얻을 수 있어, 은하주변물질의 운동학적 연구를 위해 보다 다양한 대상을 확보할 수 있다.

GMT의 장점을 하나 더 추가하자면 GMACS의 다천체 동시 분광 능력이다. 전경천체의 스펙트럼을 얻어 적색이동, 금속함량이나 별 생성률, 나이 등의 다양한 물리량을 확보해야 은하주변물질과 은하의 물리량 사이 상관관계를 연구할 수 있다. GMACS 마스크 디자인 시 한 번에 100여 개의 슬릿을 포함할 수 있으므로 많은 전경천체의 스펙트럼을 한 번에 얻을 수 있다. 물론 앞 문단에서 언급했듯이 기존 8-10m급 망원경에 비해 집광력이 우수하므로 같은 노출시간을 주었을 때 기존에 확보한 전경은하 분광자료보다 1등급가량 더 어두운 은하들의 자료를 확보할 수 있다는 것도 GMT의 강점이다.

3) 국내외 연구 동향

은하와 은하 간 물질의 교환, 상호작용에 대해 현재 진행 중인 연구 프로그램들은 크게 배경천체를 퀘이사를 대상으로 하는 프로그램과 은하를 대상으로 하는 프로그램으로 나눌 수 있다. 각각은 또한 고분산 스펙트럼을 사용하는지 여부에 따라, 대상으로 하는 은하들의 적색이동에 따라 구별 가능하다. 여기에서는 비교적 규모가 큰 프로그램 세 가지를 소개하도록 하겠다.

(1) Quasars Probing Quasars(예: Prochaska et al. 2013; Hennawi et al. 2013)

적색이동이 다르면서 시선방향에 가까이 있는 퀘이사-퀘이사 짝을 관측 대상으로 한다. 적색이동 $1.8 < z < 4.0$에 있는 밝은 퀘이사들의 중분산 스펙트럼에서 27개의 새로운 흡수선 천체를 발견하였으며, 이들의 군집적 특성, 라이만 알파선의 특징, 밝은 퀘이사 주변 물질의 동역학적 특성 등에 대한 논문이 차례로 발표되고 있다.

(2) Keck Baryonic Structure Survey(예: Steidel et al. 2014; Trainor & Steidel 2012; Rudie et al. 2012; Rakic et al. 2012)

밝은 퀘이사 15개를 중심으로 한 15개 영역에서 퀘이사를 배경천체로, 적색이동 $1.6 < z < 3.4$에 위치한 은하들을 전경천체로 하여 은하주변물질과 은하 간 물질의 흡수선을 연구하는 프로그램이다. 은하와 배경천체 간 충돌계수 범위가 0부터 100kpc

까지 다양한 은하-퀘이사 짝을 선정해 이에 따른 흡수선의 세기 변화를 살펴보았다. HI 흡수선의 세기가 가장 증가하는 위치는 300kpc 이내, 은하의 적색이동으로부터 ±300km/s 이내로 은하주변물질의 경계가 이 정도의 값을 가진다 할 수 있겠다. 큰 규모(~1Mpc)에서는 기체들의 움직임이 은하로 유입되는 형태라 할 수 있으나, 100kpc 이내에서는 은하에 대해 특이속도를 가지고 움직이는 것으로 보이며 은하 형성 모델에서 제시하는 별 생성의 원인인 직접적인 기체 유입이 관측되었다고 말하긴 어렵다.

(3) COS-Halos(예: Tumlinson et al. 2013)

위의 두 프로그램과는 다르게 HST/COS를 사용해 가까운 배경천체의 자외선 스펙트럼을 얻음으로써 가까운 은하의 은하주변물질, 헤일로 기체 특성을 연구한다. 적색이동 $\langle z \rangle = 0.5$인 퀘이사를 배경천체로 하여 적색이동 범위가 $0.15 < z < 0.35$ 은하의 주변 물질에 대한 정보를 얻었다. 가깝다는 장점을 살려 넓은 질량 범위(~1,000배)의 은하들을 대상으로 은하주변물질과 은하의 물리인자 사이의 상관관계를 확인하고 계산모델과 비교하는 것을 목표로 한다.

3. 연구의 내용 및 방법

1) 연구 대상

본 연구에서는 배경천체-전경천체 조합이 필요하며 연구 대상 선정을 두 가지 방법으로 접근할 수 있다. 첫 번째로는 멀리 있는 밝은 퀘이사를 배경천체로 활용하여 고적색이동 은하의 주변 물질을 연구하는 것이다. 이를 위해서는 밝은 퀘이사 주변에 적절한 적색이동을 가진, 충분히 가까이 있는 은하가 존재하는 사례를 관측 대상 후보로 확보하는 것이 선행되어야 한다. 관측 대상 후보를 선정하기 위한 선행 연구 전략에 대해서는 “(3) 선행 연구”에 기술하였다.

적색이동이 6 이상인 퀘이사를 활용하면 적색이동 4~5인 은하의 은하주변물질을 연구할 수 있으며, 적색이동이 3 이상인 퀘이사의 경우 밝기가 $R_{AB} < 21$등급 수준이라면 고분산 스펙트럼을 얻어 적색이동 2 근처 별 생성 은하의 은하주변물질이 보여주는 흡수선을 더 상세히 살펴볼 수 있을 것이다.

두 번째로는 은하-은하의 짝을 활용하는 방법으로, 이 경우 기존 연구 결과 비슷한 적색이동을 가진 은하들이 시선방향에서 가까이 분포하는 영역이 유리할 것으로 생각된다.

2) 사용 GMT 기기 및 관측 전략

현재 진행 중인 Quasars Probing Quasars, Keck Baryonic Structure Survey 프로그램은 R 밴드 등급이 15-17등급인 매우 밝은 퀘이사를 배경천체로 사용하고 있으며, Keck/HIRES, Keck/ESI, Magellan/MagE, Magellan/MIKE 등으로 고분산 스펙트럼을 얻었다. 분해능은 R~20000-45000로 속도를 10km/s 단위로 분해할 수 있었으며 3100-6000Å에서 픽셀당 신호대잡음비 50-200을 활용하였다.

GMT 관측 프로그램에서는 밝기가 $R_{AB} < 21$등급인 퀘이사를 배경천체로 활용할 경우 GCLEF를, 그 외 은하-은하 짝이나 적색이동 6 이상의 퀘이사-적색이동 4~5의 은하 짝 조합별로 스펙트럼을 얻을 경우 GMACS를 사용할 것이다.

GCLEF 관측 시, HT 모드를 사용해 R~25000 고분산 스펙트럼을 얻고자 하며, 4장의 거울로 운용될 초기에는 4시간의 노출로 $R_{AB} < 21$등급인 퀘이사의 자외선 연속복사 신호대잡음비 20을 얻을 수 있어 정교한 흡수선 분석이 가능할 것으로 기대된다.

GMACS 관측에서는 적색이동이 $2 < z < 5$인 은하를 이용할 것이며, 높은 분해능 모드로 12시간 노출을 주어 관측할 경우 $R_{AB} < 24$등급 은하에 대해 신호대잡음비 20을 얻을 수 있다. 기존 연구 결과에 따르면 $R_{AB} < 25$등급에서 적색이동이 4~5인 은하의 평균적인 개수 밀도는 0.2~1.5arcmin^{-2}(Iwata et al. 2007), 적색이동이 2~3인 은하의 개수 밀도는 0.6~4.5arcmin^{-2}(Reddy & Steidel 2009)이다. 적색이동이 유사한 은하들이 집중되어 있는 영역을 관측해 은하-은하 짝을 확보한다면 해당 적색이동에서 수 Mpc 내외의 영역을 GMACS 시야 한 번에 담을 수 있으므로, 각 은하들에 대해 신호대잡음비 30을 목표로 삼았을 때 한 적색이동 구간당 약 4일의 시간으로 최소한의 은하주변물질과 은하의 물리량 간 상관관계를 파악할 수 있을 것이다.

3) 선행 연구

(1) 관측 대상 확보

기존 탐사 데이터를 바탕으로 고적색이동 퀘이사($3 < z < 6$)의 목록을 확보한 뒤, 그 주변에서 $z > 2$ 이상 전경은하의 후보를 고르는 작업을 통해 GMT로 관측할 만한 배경 퀘이사-전경은하의 짝을 수집하고자 한다. 이를 위해서는 분광관측으로 적색이동이 결정된 고적색이동 퀘이사(예: SDSS 퀘이사)와 그 주변 영역에 대한 다파장 영상자료가 필요하다. SDSS 영상자료를 활용할 경우, 퀘이사의 주변에서 분광관측이 된 z~2 전경은하를 찾거나 측광적색이동이 2 이상인 은하를 찾기가 기대하기 어려우므로 퀘이사 주변에 대한 보다 깊은 영상자료를 아카이브에서 찾아내거나 3-4m급 망원경으로 획득하는 노력이 필요하다. 영상자료로 찾아낸 $z > 2$ 전경은하가 충분히 밝다면 8-10m급 망원경으로 분광관측을 수행해 적색이동을 확인하는 시도가 선행되는 것도 좋을 것이다.

[표 1]에 전경은하의 적색이동이 $0.2 < z < 4$ 사이일 때 해당 적색이동에서의 충돌계수에 해당하는 각거리와, L* 은하(별 생성 역사를 단일 별 폭발 모델로 가정, 수동적으로 진화시켰을 때)의 대략적인 K_s-밴드 등급, 적색이동된 Lyα, CIV, MgII 흡수선이 위치할 파장을 기술하였다.

위의 표를 고려하면 퀘이사 혹은 활동성은하핵 목록과 탐사은하 목록을 교차 확인해 퀘이사로부터 각거리가 12-60″ 이내, 관측기기의 파장 범위 내에 주요 흡수선이 들어가는지, 배경 퀘이사가 충분히 밝은지를 고려해 관측 대상을 선정해야 한다는 결론을 얻을 수 있다.

표 1. 적색이동에 따른 충돌계수-각거리와 L* 은하의 K_s 등급

적색이동	0.2	0.5	1	2	3	4
b=100kpc	30″	16″	12″	12″	12″	12″
b=500kpc	150″	80″	60″	60″	60″	60″
K_s	16.5	18.0	19.5	21.0	22.0	22.5
Lyα (Å)	1459	1824	2432	3648	4864	6080
CIV (Å)	1858	2323	3098	4647	6196	7745
MgII (Å)	3356	4196	5594	8391	11188	13985

퀘이사와 그 주변 영상자료가 존재하는, 활용 가능한 데이터셋의 한 예로는 스피처 3.6, 4.5μm 데이터가 확보된 활동성은하핵 목록이 있다(Wylezalek et al. 2013). 근적외선 자료는 적색이동 2 근처 은하들의 측광 적색이동 값을 추정하는 데에 있어 매우 중요하므로, 이 목록에서 적색이동 3 이상인 활동성은하핵 23개 천체에 대해 광학 탐사 영상과 근적외선 측광값을 결합하여 배경활동성은하핵-전경은하의 짝을 찾아볼 수 있을 것이다. 이 외에도 같은 방식을 적용하여 최대한 많은 관측 대상을 확보하는 것이 필요할 것이다.

(2) GMT 이전 망원경을 사용한 선행 관측

(1)에서 제시한 방법대로 관측 대상을 확보한 뒤, 이 중 충분히 밝은 대상이 존재한다면 8-10m급 망원경을 사용해 분광관측을 수행할 수 있을 것이다. 전경은하의 분광적색이동이 알려지지 않은 경우 이를 관측을 통해 확인하는 작업을 진행할 수도 있고, 이후 배경 퀘이사가 충분히 밝다면(18등급 이하) 중분산 스펙트럼을 얻어 전경은하(=흡수체)의 은하주변물질에 대한 연구를 진행할 수 있다.

4. 연구 결과의 기대 성과

이 연구를 통해 다수의 퀘이사-은하 짝, 은하-은하 짝 등 배경천체와 전경천체를 관측함으로써 질량과 광도 등 은하의 물리량에 따라 은하주변물질의 특성이 어떻게 변하는지 연구 가능할 것이다. 기존 연구에서 보고된 충돌계수와 은하주변물질의 특성 변화 역시 보다 어두운 은하나, 보다 먼 적색이동에 대해서 적용할 수 있는지 확인할 수 있을 것이다. 은하주변물질의 특성을 적색이동의 함수로 연구함으로써 은하의 생성과 진화가 은하주변물질, 은하 간 물질과 어떻게 상호작용하는지 우주의 역사에 대한 전체 그림을 이해할 수 있을 것이다.

5. 인용문헌

Adelberger, K. L. et al., 2005, ApJ, 629, 636
Agertz, O., Teyssier, R., & Moore, B., 2009, MNRAS, 397, 64
Crighton, N. H. M., Hennawi, J. F., & Prochaska, J. X., 2013, ApJL, 776, 18
Dekel, A. et al., 2009, Nature, 457, 451
Ford, A. B. et al., 2013 (arXiv: 1309.5951)
Fumagalli, M. et al., 2011, MNRAS, 418, 1796
Hennawi, J. F. et al., 2013, ApJ, 766, 58
Iwata, I. et al., 2007, MNRAS, 376, 1557
Keres, D. et al., 2005, MNRAS, 363, 2
Lehner, N. et al., 2013, ApJ, 770, 138
Liang, C. J., & Chen, H-W., 2014 (arXiv: 1402.3602)
Prochaska, J. X. et al., 2013, ApJ, 776, 136
Rakic, O. et al., 2012, ApJ, 751, 94
Reddy, N. A., & Steidel, C. C., 2009, ApJ, 692, 778
Rudie, G. C. et al., 2012, ApJ, 750, 67
Ryan-Weber, E. V. et al., 2009, MNRAS, 395, 1476
Steidel, C. C. et al., 2010, ApJ, 717, 289
Steidel, C. C. et al., 2014 (arXiv: 1405.5473)
Stewart, K. R. et al., 2011, ApJL, 735, 1
Trainor, R. F., & Steidel, C. C., ApJ, 2012, 752, 39