적색이동 3 이상 별 생성 은하의 라이만 연속선 직접 검출

● 심현진

경북대학교

1. 과학 목적 및 요약

우주의 재이온화를 이해하는 주요 변수 중 하나는 은하에서 라이만 연속복사의 탈출 가능성이다. 고적색이동 퀘이사의 스펙트럼에서 관측되는 건-피터슨 효과, 우주배경복사에서 추정되는 전자 산란의 광학적 깊이 변화 등은 적어도 적색이동 6 이전($z < 6$)에는 재이온화가 완료되었음을 시사하며, 이에 결정적인 기여를 한 것이 별 생성이 활발한 은하라 추정된다. 별 생성이 활발한 어린 은하에서는 무거운 별들이 만들어지면서 수소를 이온화시킬 수 있는 고에너지 광자를 방출하는데, 은하 간 물질을 이온화시키기 위해서는 이런 이온화 광자들이 은하 바깥으로 빠져나갈 수 있어야 한다. 하지만 생성된 광자 중 얼마가 은하에서 탈출하는지에 대한 확률에 대해서는 명확히 밝혀진 바 없으며, 은하에서 이온화 광자의 탈출률은 고적색이동 라이만 브레이크 은하들의 자외선 광도함수와 함께 재

이온화 모델에 필수적으로 포함되는 변수가 되었다.

기존 연구에서 제시한 적색이동 1 이하 은하들에 대한 자외선 분광관측, 적색이동 3 근처 은하들에 대한 광학 분광관측 결과에 따르면 일반적으로 별 생성 은하에서 이온화 광자의 탈출률은 10% 미만으로 나타난다. 가까이 있는 은하에 비해서는 적색이동 3인 라이만 브레이크 은하가 더 높은 탈출률을 가질 것으로 예상되나, 라이만 연속복사의 세기가 약하고 탈출률이 낮기 때문에 개별 은하의 스펙트럼에서는 탈출률의 상한선을 추정하는 이상의 결론을 이끌어내기 어려웠다. 따라서 GMT를 이용한 본 관측 프로그램 제안에서는 GMT의 높은 집광력을 무기 삼아 적색이동 3 이상 개별 은하들의 라이만 한계 이하-이상 파장대 스펙트럼을 얻고, 각 은하에서 이온화 광자의 탈출률을 직접 검출한 연속복사의 세기로부터 추정하고자 한다.

이온화 광자의 탈출률은 은하의 질량, 별 생성률 등 물리적 인자와도 관계가 있을 수 있으므로, 상관관계의 존재 여부와 그 특징을 탐구함으로써 적색이동 3 근처 은하들에서 얻은 결론을 실제 재이온화 시기인 적색이동 7 이상($z > 7$) 은하들에 적용할 수 있으리라 기대한다.

2. 연구 필요성, 배경 및 동향

1) 연구의 배경 및 필요성

슬로언 탐사(SDSS)에서 관측한 고적색이동 퀘이사의 스펙트럼은 우주를 구성하는 물질의 상태가 적색이동 6 부근에서 완전히 이온화되었음(재이온화)을 시사한다(Becker et al. 2001). 최초의 천체가 등장하여 이온화가 가능한 광자(ionizing photon), 즉 수소의 경우 912Å보다 짧은 파장을 가진 라이만 연속복사가 생성됨으로써 재이온화가 일어났다고 할 수 있으며, 따라서 재이온화의 진행 속도와 시작, 완료 시기 등을 이해하기 위해서는 초기 천체에 대한 이해가 선행되어야 한다.

우주의 재이온화를 기술하는 시나리오에서 필수적으로 포함되어야 할 요소들은 첫째, 이온화 광자를 방출할 수 있는 천체 후보와 그 개수 밀도, 둘째, 각 후보 천체에서 이온화 광자의 생성률, 셋째, 생성된 이온화 광자가 은하 바깥으로

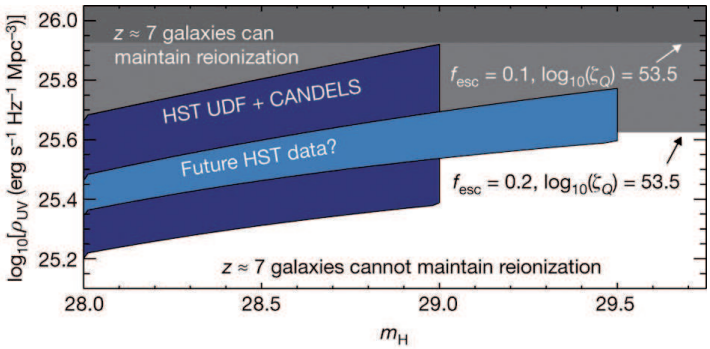

그림 1. 알려진 재이온화 시기와 정도를 설명하기 위해 필요한 자외선 광자의 밀도 표시(짙은/옅은 회색)와 UDF에서 관측된 적색이동 7 은하들의 자외선 광도함수를 적분해 얻은 자외선 광자 밀도의 비교(Robertson et al. 2010의 Fig.3에서 인용).

탈출하는 비율 등이다. 재이온화에 기여할 수 있는 주요 천체 후보군으로는 퀘이사와 별 생성이 활발한 은하가 있는데, 고적색이동 퀘이사의 광도함수에 대한 연구는 대부분 퀘이사의 개수 밀도가 재이온화를 설명하기에 다소 부족하다는 결론을 제시하고 있어(Willott et al. 2010) 고적색이동 라이만 브레이크 은하의 역할이 더 크다고 할 수 있다. 물론 은하의 광도함수 또한 특히 낮은 광도에서 불확실하며, 따라서 적색이동 6 이상을 가지는 초기은하들의 개수 밀도, 별 생성률, 고에너지 광자 생성률, 해당 광자의 탈출률 등을 파악하는 것이 필요하다.

[그림 1]은 우주배경복사를 이용해 추정한 재이온화 시기와 정도(9-Year WMAP; Hinshaw et al. 2013)를 적색이동 7 라이만 브레이크 은하로 설명할 수 있는지 여부를 이온화 광자의 생성률을 비교함으로써 보여주고 있다. 짙은 회색과 옅은 회색은 각각 적색이동 7 은하에서 이온화 광자의 탈출 가능성이 0.1, 0.2일 때 WMAP 관측 결과 알려진 톰슨 산란 광학적 깊이를 유지하기 위해 필요한 자외선 광자 밀도이다. UDF 관측에서 추정하는 적색이동 7 은하의 광도함수를 적분하면 광도함수 기울기의 불확정성, 어두운 등급(29등급 이상)에서의 데이터 부족 때문에 자외선 광자 밀도가 짙은 파란색의 범위에 들어오는데, 어떤 경우에라도 이온화 광자의 탈출 가능성이 0.1 이상이어야 광도함수를 극단적으로 변화시키는 일 없이 재이온화를 설명할 수 있다.

그러나 적색이동 7 은하의 이온화 광자 탈출률은 이들의 라이만 연속복사가 관측자에게 도달하는 것이 거의 불가능하므로 대략적으로라도 그 값을 추정하기

위해서는 그보다 낮은 적색이동 3-5 사이 은하들의 이온화 광자 탈출률에 대한 정보가 필요하다. 특히 이온화 광자 탈출 가능성이 은하의 물리적 인자(별/헤일로 질량, 별 생성률, 형태 등)에 의존한다면 최초의 은하들이 재이온화에 기여한 바를 보다 정확하게 추산할 수 있을 것이다. [그림 2]는 은하에서의 이온화 광자 탈출 가능성에 대한 SPH 시뮬레이션 내역으로, 헤일로 질량과 별 생성률에 따라 광자의 탈출 가능성이 다르며, 평균적으로는 적색이동에 따라 광자의 탈출률이 진화하고 있음을 제안하고 있다(Razoumov & Sommer-Larsen 2010).

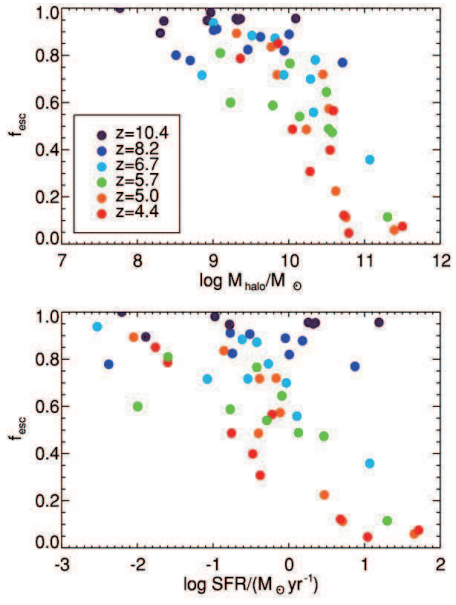

그림 2. 은하의 별 질량, 별 생성률, 적색이동에 따른 이온화 광자 탈출률의 변화(Razoumov & Sommer-Larsen 2010의 Fig. 5에서 인용).

광자의 탈출 확률은 내부 성간물질의 밀도와 공간적 분포의 영향을 크게 받는 것으로 보인다(Fernandez & Shull 2011). 밀도가 높은 성간물질 덩어리가 소수 존재할 경우 밀도가 낮은 덩어리가 다수 존재할 경우보다 광자가 탈출할 확률이 높으므로, 무거운 별을 많이 생성해낼 수 있는 고밀도, 고온의 환경이 유지된다면 이온화 광자의 탈출률이 높을 것이다. 본 연구에서는 재이온화를 일으킨 주요한 원인 천체인 별 생성 은하에서 이온화 광자의 탈출률을 직접 라이만 연속복사를 검출하여 계산하고자 한다.

2) GMT의 필요성

라이만 연속복사의 탈출 가능성을 추정하기 위해 분광관측으로 직접 연속복사를 검출하는 관측은 거의 시도되지 않았다. 이는 라이만 연속복사가 매우 약하기 때문으로, 여러 천체의 스펙트럼을 겹쳐 신호대잡음비를 증가시키는 방법으로 평균 연속복사를 추정하여 광자의 탈출률을 구하거나 탈출률의 상한선을 구하는 연구들이 있었다. 분광관측 대신 협대역 필터를 사용한 측광관측이 주로 사용되었는데, 이 역시 파장에 따른 에너지 분포를 모델로 추정해야 하고 연속복사

에 방출선, 흡수선의 영향이 더해지는 등 구조적인 오차를 포함할 수밖에 없었다. 또한 협대역 필터 플럭스가 고적색이동 라이만 브레이크 은하로부터 나온 것이 아니라 앞쪽 은하로부터 나왔을 가능성도 상당히 높았다(Vanzella et al. 2012).

GMT의 높은 집광력을 활용하면 기존 관측에서 검출하기 어려웠던 연속복사를 직접 검출할 수 있을 것이며, 협대역 필터 관측에서 발생할 수 있는 오차를 제거할 수 있다. 라이만 연속복사 외에도 라이만 알파 방출선, 이온화된 헬륨 방출선, 적색이동에 따라서는 성간물질에 의한 다양한 이온 흡수선을 관측할 수 있고 자외선 연속선의 경사도 측정 가능하므로 다양한 물리 인자와 탈출 가능성의 상관관계를 심층적으로 탐구할 수 있다는 장점이 있다.

3) 국내외 연구 동향

이미 은하에서 라이만 연속복사의 탈출 가능성, 혹은 이온화 광자의 탈출 가능성에 대한 연구가 연구 대상을 다르게 접근하거나 검출 방법을 다르게 접근하는 방법으로 진행된 바 있다. 연구 대상으로 가까이 있는 은하를 선정하여 직접 자외선 스펙트럼 혹은 자외선 측광관측을 수행하거나, 혹은 적색이동 3 이상인 라이만 브레이크 은하, 라이만 알파 방출 은하의 분광관측 혹은 협대역 필터를 이용한 측광관측으로 라이만 연속복사를 추정하는 전략이 시행되었다.

적색이동 1 이하에서는 이온화 광자 탈출률의 상한값이 5% 이하로 추정되었지만(Cowie et al. 2009; Siana et al. 2010; Bridge et al. 2010), 적색이동 3 근처에서는 관측된 은하 중 약 10%는 이온화 광자의 탈출률이 거의 1에 가깝다는 연구 결과가 보고된 바 있다(Shapley et al. 2006; Iwata et al. 2009). 그러나 최근 Nestor et al.(2013), Vanzella et al.(2012) 등이 수행한 적색이동 3 근처의 라이만 브레이크 은하들의 협대역 필터 관측은 적색이동 3 근처 은하의 탈출률이 높지 않다는 반박을 제기한다. 라이만 연속복사가 검출되었다고 생각되는 협대역 필터의 플럭스가 실은 낮은 적색이동을 가진 앞쪽 은하에 의해 비롯되었을 가능성이 높다는 것이다.

앞쪽 은하의 영향에서 자유로운, 실제 적색이동 3 은하의 라이만 연속복사 누출이라고 짐작되는 사례는 자외선 색이 푸르고 성간흡수선이 약하며 라이만 알파선이 약한 천체로, 이온화광자의 탈출률은 25-100%로 추정된다. Cooke et al.(2014)는 일반적인 라이만 브레이크 은하를 선정하는 기준이 고적색이동 은하

에서 라이만 연속복사 누출 사례를 제대로 골라내지 못한다고 주장하고 있는데, 이 주장은 은하의 물리적 인자와 이온화 광자 탈출률의 연관 관계가 존재할 수 있음을 암시하기도 한다. 가까운 은하에서 라이만 연속복사 누출을 관측한 사례들(Leitet et al. 2013)을 보면, [OIII]/[OII] 비 등이 클수록 이온화 광자 탈출률 또한 큰 특징들이 있으며(Nakajima & Ouchi 2014) 이러한 연구 결과는 적색이동에 따른 이온화 광자 탈출률이 변하며, 특히 적색이동이 클수록 탈출률 또한 평균적으로 증가할 것이라는 예측을 이끌어내고 있다.

3. 연구의 내용 및 방법

1) 연구 대상

관측 대상은 적색이동 3-5 사이의 별 생성이 활발한 은하로, 다파장 자료를 기반으로 이미 후속분광관측이 수행된 지역에서 해당 은하들을 선정하는 것이 용이하다. GMT의 위치 조건을 고려할 때 COSMOS, GOODS-S 탐사 영역이 1차적인 후보군이다.

2) 사용 GMT 기기 및 관측 전략

기존 연구에 따르면 적색이동 3 근처의 별 생성이 활발한 은하들의 경우, 라이만 연속선 탈출 가능성의 상한선이 약 10% 정도로 추정되고 있다. 은하 간 물질에 의한 라이만 연속선의 손실을 고려하지 않을 경우, 적색이동 4에 위치한 금속함량 $0.0004Z_{\odot}$, 별 질량 $10^{10}M_{\odot}$ 은하의 정지좌표계에서 자외선 스펙트럼은 [그림 3]과 같다. 라이만 한계 이하 복사의 탈출률이 20%라면 4000-5000Å 파장 대역에서 연속복사의 검출 깊이가 6×10^{-20}erg/s/cm^2/Å 이하, 탈출률이 10%라면 3×10^{-20}erg/s/cm^2/Å 이하여야 한다.

라이만 연속복사의 검출에는 높은 분광분해능이 필요하지 않으므로 본 관측 프로그램에서는 GMACS의 저분해능 모드(R~1500)를 사용하고, 4000-5000Å 파장을 포함하는 블루 채널로 관측하고자 한다. 반사경 4개를 사용하는 초기 GMT 운영 기간 동안 GMACS 블루 채널에서 저분해능 관측을 할 때 위 검출 깊이(3×10^{-20}erg/s/cm^2/Å)에서 신호대잡음비 ~5를 얻기 위해서는 8시간 정도의 노출이

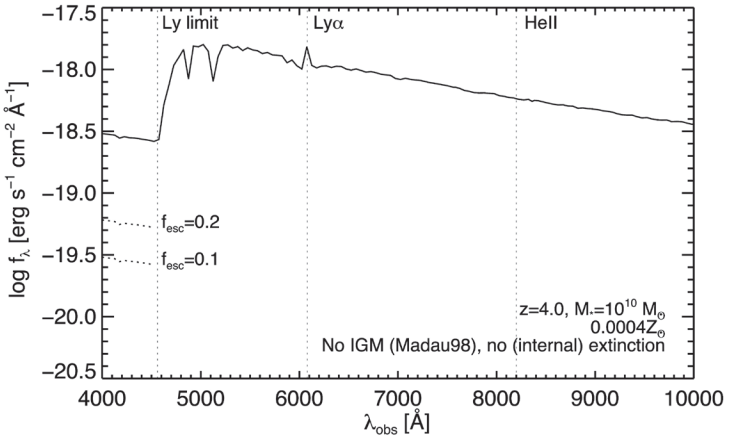

그림 3. z=4.0, $M^*=10^{10}M_\odot$인 별 생성 은하의 정지좌표계 자외선 스펙트럼. 이온화 광자의 탈출률이 20%라면(f_{esc}=0.2) 직접 라이만 연속복사를 검출하기 위한 플럭스 깊이는 6×10^{-20}erg/s/cm^2/Å이다.

필요하다. 이는 은하 간 물질에 의한 소광 효과, 은하 내 성간물질에 의한 영향을 모두 고려하지 않은 것으로 보다 보수적인 가정하에서는 10~15시간의 노출시간을 투자할 경우 적색이동 3~5 사이 은하에서 수소 이온화가 가능한 광자의 탈출 가능성을 직접 측정할 수 있을 것으로 전망한다.

관측 대상의 개수 밀도는 적색이동 3 은하의 경우 R_{AB} < 25등급에서 약 0.6arcmin^{-2}(Steidel et al. 1999; Shim et al. 2007), 적색이동 5 은하의 경우 같은 등급제한에서 약 0.1arcmin^{-2}(Iwata et al. 2007)이다. 따라서 GMACS의 시야가 4각분×8각분 내에 들어오는 관측 대상은 3-40개로 마스크당 슬릿 개수가 100여 개임을 고려할 때 하나의 마스크로 시야 내의 관측 대상을 전부 관측할 수 있을 것으로 보인다.

3) 선행 연구

(1) 관측 대상 확보

COSMOS, GOODS-S 영역에서 분광관측이 된 적색이동 3 은하의 목록을 확보한다. 관측 전략을 좀 더 구체화하기 위해, 스펙트럼 원본을 이용해 근적외선에서 OH 방출선을 제거하고 라이만 광자 탈출률을 가정해 필요한 플럭스 한계를 살펴보는 작업이 필요할 것이다. 또한 Lyα 방출선의 모양을 살펴보고 이를 물

리량과 비교해보는 작업이 선행되어야 한다.

(2) GMT 이전 망원경을 사용한 선행 관측

적색이동 3 이상 은하들에 대해서는 GMT 이전 망원경들을 사용해서 원하는 깊이까지 내려가는 분광관측을 수행하기란 거의 불가능하다고 할 수 있으므로, 다른 망원경들을 사용한 선행 관측에서는 보다 낮은 적색이동을 가지는 은하들을 대상으로 꼭 분광관측이 아니더라도 라이만 광자의 탈출률에 대한 힌트를 얻고 탈출률 추정치를 수소 방출선 플럭스 등 다른 관측치와 비교해볼 수 있는 연구를 진행하고자 한다.

가능한 접근 방법 중 하나는 깊이가 충분히 깊은 원자외선 영상 관측을 활용하는 것이다. GALEX FUV 필터의 파장 범위는 적색이동이 1 이상인 은하의 라이만 한계 이하에 해당하므로, 적색이동 1 이상인 은하의 FUV 필터 플럭스를 측정함으로써 직접 연속선을 관측하는 것은 아니지만 연속선의 세기를 추정해 낼 수 있다. 한편 이 은하들은 1.3μm 이상에서 Hα 방출선을 보이므로, 근적외선 스펙트럼을 얻거나 협대역 관측을 통해 라이만 연속선과 원자외선 복사의 비가 Hα 방출선의 세기와 어떤 관계가 있는지 비교해 볼 수 있다. 특히 이후 JWST 관측이 시작되면 고적색이동 은하의 Hα 방출선 관측이 가능해지므로 Hα 방출선 세기-라이만 광자 탈출률의 관계는 고적색이동 은하에서의 라이만 광자 탈출률을 추정하는 데에 또 다른 측면에서 좋은 근거를 제공할 것이다.

4. 연구 결과의 기대 성과

본 관측 프로그램은 기존 망원경의 집광력 한계로 시도되기 어려웠던 라이만 연속복사의 직접적인 스펙트럼 관측 결과를 얻는다는 데에 그 의의가 있다. 협대역 필터 측광관측이 가지는 여러 문제점—전경 은하에 의한 오염 문제, 파장에 따른 에너지 분포 모델링의 불확실성 등—을 해소할 수 있고, 다양한 물리 인자를 가진 적색이동 3 이상 별 생성 은하들의 이온화 광자 탈출률을 계산함으로써 실제 재이온화에 기여한 초기은하들의 이온화 광자 탈출률을 추정할 수 있을 것이다. 이는 현재까지 알려진 재이온화 시나리오에 경계 조건을 제공할 것이며,

이온화 광자 탈출률 결과가 초기은하의 광도함수와 결합될 때 우주를 구성하는 물질의 이온화 상태 변화에 대한 전체 그림을 완전하게 그릴 수 있을 것이다.

또한 라이만 연속복사의 검출과 함께 신호대잡음비가 높은 정지좌표계 자외선 스펙트럼을 얻을 수 있어, 라이만 알파 방출선의 선윤곽이나 성간물질에 의한 흡수선 등을 검출해 성간물질의 물리적/동역학적 특징, 별 생성률, 금속함량, 별 질량 등의 물리 인자가 이온화 광자의 탈출률에 어떤 영향을 끼치는지 파악할 수 있을 것이다.

5. 인용문헌

Becker, R. H. et al. 2001, AJ, 122, 2850
Bridge, C. R. et al. 2010, ApJ, 720, 465
Cooke, J. et al., 2014, MNRAS, 441, 837
Cowie, L. L., Barger, A. J., & Trouille, L. 2009, ApJ, 692, 1476
Fernandez, E. & Shull, J. M., 2011, ApJ, 731, 20
Hinshaw, G. et al. 2013, ApJS, 208, 19
Iwata, I. et al., 2007, MNRAS, 376, 1557
Iwata, I. et al. 2009, ApJ, 692, 1287
Leitet, E. et al., 2013, A&A, 553, 106
Nakajima, H. & Ouchi, M., 2014, MNRAS, 442, 900
Nestor, D. B. et al., 2013, ApJ, 765, 47
Robertson, B. E. et al., 2010, Nature, 468, 49
Razoumov, A. & Sommer-Larsen, J., 2010, ApJ, 710, 1239
Shapley, A. E. et al., 2006, ApJ, 651, 688
Shim, H. et al., 2007, ApJ, 669, 749
Siana, B. et al., 2010, ApJ, 723, 241
Steidel, C. et al., 1999, ApJ, 519, 1
Vanzella, E. et al., 2012, ApJ, 751, 70
Willott, C. J. et al., 2010, AJ, 139, 906
Zackrisson, E., Inoue, A. K., & Jensen, H. 2013, ApJ, 777, 39