매우 어두운 라이만 알파 방출선을 탐색하기 위한 100시간 분광탐사

● 양유진

Universität Bonn

1. 과학 목적 및 요약

우리는 HST 또는 JWST 측광관측이 이루어진 하늘 영역에 대해 GMT/GMACS의 긴 슬릿을 이용하여 관측 대상을 특정하지 않고 100시간 노출을 얻음으로써, (1) 매우 작은 은하들의 별 생성에서 나오는 Lyα 방출선, (2) UV 배경복사 또는 퀘이사 UV 복사에 의한 은하 간 물질의 Lyα 발광, 그리고 (3) 은하로 흘러들어가는 가스가 방출하는 Lyα 냉각복사[그림 1]를 검출하는 분광탐사를 제안한다. 이처럼 매우 작은 은하나 매우 밀도가 낮은 가스에서 발생하는 어두운 Lyα 방출선은 GMT의 큰 집광력과 매우 긴 노출시간(100시간)을 결합하여 마침내 검출할 수 있을 것으로 기대된다. 우리는 이 분광탐사 관측에서 얻어진 Lyα 방출 천체들의 공간 분포, 선윤곽, 광도함수 등을 이용하여, 초기은하들이 만들어지는 과정에서 UV+QSO 배경복사, 가스의 흐름 등이 은하의 형성에 어떤 영향을 미

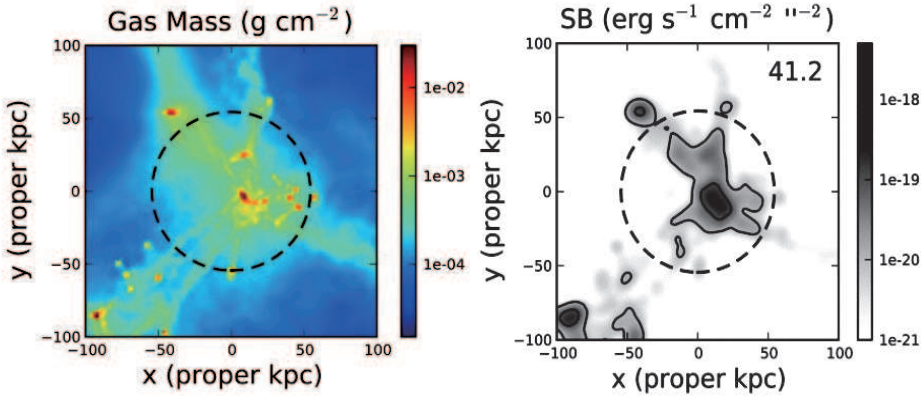

그림 1. 은하가 가스 유입을 통해 만들어질 때 나오는 Lyα 냉각복사(cooling radiation)의 수치 모의실험(Faucher-Giguère et al. 2010). (왼쪽) z=3에서 암흑물질 헤일로 질량이 $2.5\times10^{11}M_{\odot}$인 은하의 투영된 질량 밀도. (오른쪽) 은하주변물질에서 발생하는 Lyα 냉각복사의 표면밝기. 두 등고선은 10^{-20}, 10^{-19} erg s^{-1} cm^{-2} arcsec^{-2}을 나타내며, 현재의 가장 큰 망원경으로도 관측이 매우 힘들다는 것을 보여준다. 이미지의 크기는 z=3에서 ~25″(200kpc)이며, 점선으로 표시된 원들은 은하의 비리얼(virial) 반경을 나타낸다. 은하의 별들에서 나오는 UV나 가시광은 약 10kpc(~1″)에 집중되어 있는 반면, 밀도가 낮은 은하 간 물질 또는 은하주변물질은 약 50-100kpc에 걸쳐 넓게 퍼져 있음을 알 수 있다.

치는지를 연구할 계획이다.

2. 연구 필요성, 배경 및 동향

1) 연구의 배경 및 필요성

은하의 형성과 우주의 구조생성(structure formation)은 매우 큰 범위를 갖는 밀도, 크기, 질량에 걸쳐 계층적으로 이루어진다. 하지만 고적색이동 우주에서 이에 대한 관측 연구는 양극단의 스케일에 치우쳐왔다. 예를 들어, 매우 희박한 은하 간 물질의 연구는 주로 배경 퀘이사를 이용한 흡수선 관측을 통해 이루어져왔으며, 다른 한편에서는 무거운 은하들(Lyman break galaxies; LBGs)의 별빛이나, 상대적으로 작고 젊은 은하들(Lyα emitters)의 방출선 등을 이용하여 그 특성들을 연구해왔다. 반면 이러한 양극단의 중간 부분에—즉 전혀 빛을 내지 않은 어두운 가스 구름과 별 생성을 통해 밝은 빛을 내는 은하들 사이에—위치한 매우 어둡고 작은 왜소은하들과 은하 간 물질에 대한 연구는 많이 이루어져 있지 않다. 이는 이러한 천체들이 방출하는 빛이 너무 어두워서 일반적인 분광관측이나 좁

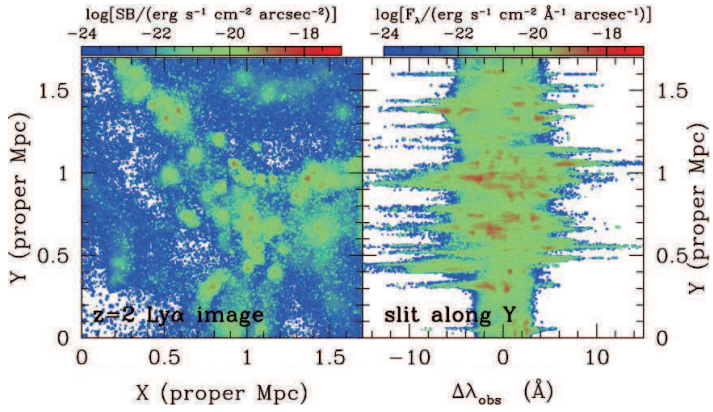

그림 2. UV 배경복사에 의한 Lyα 발광의 수치 모의실험 (Kollmeier et al. 2010). (왼쪽) z=2에 있는 거대구조의 Lyα 표면밝기. (오른쪽) 왼쪽의 구조를 모두 포함하는 가상의 슬릿을 세로 방향으로 놓았을 때 얻어질 Lyα 스펙트럼.

은 폭(narrowband) 필터 관측으로는 검출이 거의 불가능했었기 때문이다. 우리는 광도함수의 끝자락에 위치한 매우 작고 어두운 은하들과 주변 은하 간 물질이 내는 Lyα 방출선을 GMT/GMACS를 이용하여 검출하고 그 물리적 성질을 연구하는 과제를 제안하고자 한다.

매우 작은 왜소은하들과 은하 간 물질이 Lyα를 방출하는 기작은 크게 세 가지인데, (1) 별 생성 영역 주변의 H II 지역, (2) 우주 UV 배경복사에 의한 발광, 그리고 (3) 은하로 흘러들어가는 물질이 방출하는 Lyα 냉각복사(cooling radiation)이다. 여기서 우리가 고려하고 있는 매우 작은 은하들의 별 생성률은 대략 ~0.1 $M_\odot$/yr 정도로 매우 작으며, 이 은하들은 점점 자라고 진화하여 더 큰 은하들을 구성하는 구성 성분이 될 것으로 예상된다. 광학적 깊이가 큰 가스구름에 수소를 이온화할 수 있는 UV 배경복사가 입사하고, 구름 표면에서 이온화된 수소원자들이 재결합하면서, 주로 Lyα 방출선을 내게 되는데 이를 UV 배경복사에 의한 Lyα 발광(fluorescence)이라고 하며, 그 표면밝기는 매우 어둡다고 예측되어 있다 ($< 10^{-19}$ erg s^{-1} cm^{-2} $arcsec^{-2}$; Gould & Weinberg 1996; Kollmeier et al. 2010; 그림 2). 이렇게 빛을 내는 구름들을 방출선으로 검출하면 우주 공간을 채우고 있는 가스들의 분포를 눈으로 직접 볼 수 있기 때문에, 이 같은 현상을 검출하기 위한 많은 노력들이 있어왔으나 아직까지 배경복사에 의한 Lyα 발광은 검출되지 않고 있다.

또 다른 복사 기작은 소위 차가운 가스 흐름(cold-mode gas accretion)에서 발생하는 Lyα 냉각복사다[그림 1]. 은하 간 물질이 은하로 흘러들어 성간물질/분자운을 생성하고 별을 만들기 위해서는 이 가스가 복사를 통해 식어야 하는데, 이때 가장 효율적인 냉각 방식은 Lyα 방출선을 통하는 것이다. 따라서 대부분의 은하 생성 모의실험들은 은하로 흘러드는 가스들이 매우 어두운 Lyα 방출선을 낼 것이라고 예측하고 있지만(예를 들어, Fardal et al. 2000; Faucher-Giguère et al. 2010), 많은 노력에도 불구하고 아직까지 Lyα 냉각선은 명확하게 검출되지 않고 있다.

GMT의 큰 집광력을 이용하면 마침내 이렇게 어두운 Lyα선들을 검출할 수 있을 것으로 기대된다. 우리는 GMACS의 긴 슬릿을 이용한 '분광탐사(spectroscopic search)'를 통해 그동안 관측이 힘들었던 이러한 왜소은하들과 은하 간 물질이 내는 Lyα 방출선을 검출하고 그 천체 및 현상들의 특성을 연구할 계획이다.

2) GMT의 필요성

앞에서 설명한 다양한 경로로 생성되는 Lyα 방출선들을 기존에 연구하기 어려웠던 이유는 매우 낮은 표면밝기($< 10^{-19}$ erg s^{-1} cm^{-2} arcsec^{-2}) 때문에, 몇몇 시도를 제외하고는 현재의 가장 큰 망원경으로도 제한된 시간(약 10-20시간) 내에 검출하는 것이 불가능했기 때문이다. 우리가 아래에 제안한 GMT를 이용한 100시간 노출은 8미터급 망원경에서는 약 400시간(40일)의 노출시간을 필요로 하므로 8미터급 망원경으로 이 프로그램을 수행하는 것은 불가능하다.

3) 국내외 연구 동향

매우 어두운 Lyα 방출천체들(왜소은하, Lyα 발광, 냉각복사)을 검출하기 위한 노력은 크게 두 가지 방법을 이용하여 수행되어왔다. 첫 번째 방법은 좁은 폭 필터를 사용하여, 밝은 퀘이사가 포함된 영역을 매우 긴 노출(약 20여 시간)로 탐사하는 방법이다. 이렇게 깊은 노출에도 불구하고 도달할 수 있는 표면밝기는 약 5×10^{-19} erg s^{-1} cm^{-2} arcsec^{-2}(1 arcsec^2 면적당 1σ) 정도에 불과하므로(예를 들어, Arrigoni-Battaia et al. 2014), 이보다 5-10배 정도 어두운 UV 배경복사에 의한 Lyα 발광이나 냉각복사 등을 직접 검출하기에는 아직도 턱없이 부족하다. 따라서 밝은 퀘이사가 있어서, 퀘이사의 이온화 복사(ionizing radiation)가 UV 배경

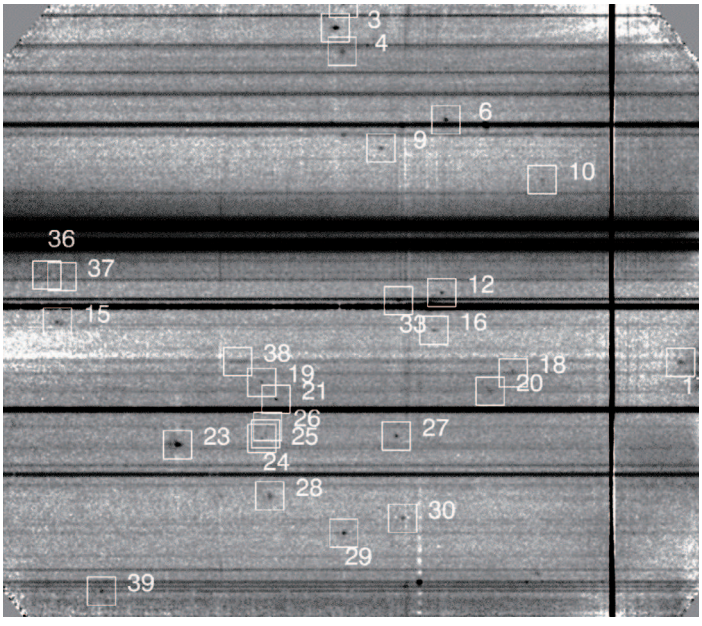

그림 3. 우리가 제안한 긴 슬릿 분광탐사관측의 예. Rauch et al.(2008)이 VLT/FORS2를 이용하여 3년에 걸쳐 얻은 92시간 노출. 현재까지 행해진 가장 깊은 분광자료다. 가로 방향이 분산/파장 방향, 세로 방향이 슬릿(2″×7.5″)에 평행한 공간 방향이다. 흰색 상자들은 검출된 Lyα 방출선 후보들이며, 세로 방향에서 거의 중앙에 에 위치한 강한 연속 스펙트럼(33번 상자 근처)은 QSO이다.

복사의 강도를 국지적으로 상승시킨—따라서 Lyα 발광이 더 강할 것이라고 예상되는—지역을 주로 탐사하는 방법이 채택되고 있다. 예를 들어, Cantalupo et al.(2012)은 z=2.4에 위치한 퀘이사 주위 영역을 탐사하여, 별 생성은 거의 없으나 Lyα를 방출하는 '암흑은하' 또는 Lyα 발광을 검출하는 데 성공하기도 했다.

두 번째 방법은 앞서 언급된 것 같은 이미지 탐사가 아니라 하늘의 임의 영역에 대해 스펙트럼을 얻는 '분광탐사'이다. 일반적인 좁은 폭 필터의 파장 분해능이 R=50-100인 반면, 일반적인 분광관측의 경우 R=1000 정도의 분해능을 얻을 수 있으므로, 정해진 측정 구경 안에 들어오는 배경하늘의 복사량(가장 큰 잡음원)이 약 10배 줄어들게 되고, 따라서 같은 관측 시간으로 약 3배($\sqrt{10}$) 이상 어두운 방출선을 검출할 수 있는 장점이 있다. 따라서 이러한 분광탐사 관측은 매우 어두운 Lyα 방출 은하들을 찾는 데 주로 이용되어왔다(예를 들어, Martin & Sawicki 2004; Tran et al. 2004; Cantalupo et al. 2007; Dressler et al. 2011).[1]

현재까지 수행된 가장 깊은 긴 슬릿 분광관측은 VLT의 FORS2 기기를 이용하여 3년간 약 92시간에 걸쳐 얻어진 것으로, 약 8×10^{-20} erg s^{-1} cm^{-2} $arcsec^{-2}$ (1σ)의 표면밝기 한계에 도달하는 데 성공한 Rauch et al.(2008)의 연구다[그림 3]. 이 연구에서는 그림에서 보인 것처럼 총 27개에 달하는 매우 어두운 Lyα 방출선들을 검출하는 데 성공하였으며, 이 중 대부분의 검출이 매우 낮은 별 생성률을 가진 은하들이라는 결론을 얻었다. 우리는 GMT/GMACS을 이용하여 이 관측보다 최소 2배 이상(GMT가 완성될 경우 3배 이상) 깊은 관측을 제안하고자 한다.

3. 연구의 내용 및 방법

1) 연구 대상

검출된 Lyα 방출선이 어떤 은하에서 나오는지를 결정하고 후속 연구를 수월하게 하기 위해서는 다양한 파장 영역의 측광관측 자료가 존재하고, 특히 허블망원경(HST)이나 제임스 웹 우주망원경(JWST) 이미지가 있는 하늘 영역을 대상으로 깊은 탐사 관측을 수행하는 것이 바람직하다. 추가로 고려해야 할 점은 대상 영역에 밝은($i\lesssim20$mag) QSO의 존재 여부이다. QSO가 탐사 영역에 포함되면 주변의 배경복사를 증가시키므로, 이에 따라 그 주변의 Lyα 발광이 더 증가할 것이기 때문이다. 그러나 일반적으로 밝은 QSO들은 당시 우주에서 상당히 주변 밀도가 높은 지역에 위치하고 암흑물질 헤일로의 질량도 상당히 클 것이기 때문에 이러한 영역으로 탐사관측이 편중되는 문제점이 있다. 따라서 이를 고려해서 우리는 2020년에 가장 이상적인 탐사 영역을 선택할 예정이다.

2) 사용 GMT 기기 및 관측 전략

우리는 장시간의 HST/JWST 측광관측이 이루어진 하늘 영역에 대해, GMT/GMACS의 긴 슬릿을 이용하여 관측 대상을 특정하지 않은 100시간 노출(blind survey)을 얻음으로써, 매우 작은 은하들의 별 생성에서 나오는 Lyα 방출

1 여기서 언급된 연구들은 탐사 부피를 늘리고, 특정한 적색이동 범위 안에서 은하들을 찾기 위해 좁은 폭 필터와 슬릿 마스크 분광기를 결합한 '다중슬릿 좁은 폭 분광법(multi-slit narrow-band spectroscopy)'이라는 특별한 탐사방법을 이용하였다.

선, UV 배경복사에 의한 은하 간 물질의 Lyα 발광, 또는 Lyα 냉각복사를 찾는 관측을 제안한다.

현재까지 수행된 가장 깊은 긴 슬릿 분광관측은 VLT/FORS2 기기를 이용하여 3년간 약 92시간에 걸쳐 얻어진 것으로서, 약 8×10^{-20} erg s^{-1} cm^{-2} $arcsec^{-2}$(1σ)의 표면밝기 한계에 도달하였고, 총 27개에 달하는 매우 어두운 Lyα 방출선들을 검출하는 데 성공한 관측이다(Rauch et al. 2008). 우리는 GMT/GMACS를 이용하여 같은 100시간 노출을 얻음으로써, 현존하는 가장 깊은 분광관측보다 최소 2배-2.5배 깊은 Lyα 분광탐사를 수행할 계획이다. GMACS의 1.5″×9′의 긴 슬릿과 중분산 그리즘(grism)을 이용할 경우, 4000Å부터 9000Å에 걸쳐 R=650-1250(460-240km/s)의 분해능을 얻을 수 있으며 약 $(3\text{-}4)\times10^{-20}$erg s^{-1} cm^{-2} $arcsec^{-2}$의 표면밝기 한계에 도달할 것으로 예상된다. GMACS의 엄청난 분광파장대역 덕분에 1.5″×9′의 슬릿으로도 약 2600Mpc^3의 탐사 부피를 얻을 수 있으며, Rauch et al.(2008)의 평평한 Lyα 광도함수를 가정할 경우 약 60-100여 개의 Lyα 방출선을 검출할 수 있을 것으로 예상된다. 이 관측 자료를 이용하여 어두운 은하들의 광도함수, 방출선을 내는 가스들의 공간 분포, 또 자연스럽게 얻어지는 선 스펙트럼의 모양으로부터 이 가스의 운동 등을 연구할 계획이다.

우리 천문학계에 할당될 시간(연간 ~300시간)을 고려할 때, 100시간에 달하는 어두운(그믐에서 3일 이내) 관측 시간을 얻는 것은 사실상 어려울 것으로 예상되므로 우리는 나쁜 시상 조건 아래에서 이 관측을 수행할 계획이다. 대부분의 분광관측은 비교적 좋은 시상 조건(FWHM < 1.5″)을 필요로 하는 반면, 전체 관측 시간의 10-20% 정도는 나쁜 시상을 가질 것으로 예상된다. 따라서 GMT 관측 시간의 어마어마한 가치를 고려할 때, 이러한 나쁜 시상 시간을 효율적으로 이용할 수 있는 방안을 우리 천문학계 차원에서 토의해야 할 것이다. 현재 GMT의 운영 방식이 아직 결정되지 않았지만 GMT가 서비스(service 또는 remote) 관측이나 공동(pool) 관측으로 운영된다고 가정할 경우, 우리가 제안한 프로그램은 좋은 시상을 요구하지 않고 단지 아주 긴 노출시간을 필요로 하므로 나쁜 시상 프로그램에 최적일 것으로 예상된다. 연간 10-20시간 정도의 어두우며 동시에 시상이 나쁜 시간이 발생한다고 가정할 때, 수년에 걸쳐 100시간 노출을 달성할 수 있겠지만, 다른 GMT 파트너들과 공동연구를 추진하면 이보다 훨씬 빨리 목표를 달성할 수 있을 것으로 보인다.[2]

제안된 장시간 노출 관측은 기존의 8-10미터급 망원경으로는 불가능했던 어두운 영역을 개척하기 위해 고안되었다. 하지만 관측 프로그램의 시의성을 고려한다면, 기존의 8미터급 망원경에서 3년에 걸쳐 ~100시간 노출을 하던 프로그램을 GMT로 단 2일 정도를 투자하여 빨리 끝내고, 이 같은 관측을 여러 하늘 영역에 대하여 시도함으로써 깊이는 얕지만 통계적인 연구를 수행하는 전략을 택할 수도 있다. 우리가 여기서 제안한 탐사 관측은 GMACS가 가시광까지만 포함할 것으로 가정하고 있다. 만약 GMT의 초기 분광파장대가 현재 논의되고 있는 대로 근적외선의 1.3μm까지 확장될 경우, 이론상으로는 탐사 가능한 적색이동이 약 z=10까지 늘어날 것이다. 그러나 하늘의 밝기가 빠르게 변하는 근적외선에서의 장시간 노출은 아직까지 많이 시도되지 않았으므로 관측 전략에 대한 연구가 더 필요하다. 한편, 제안된 분광탐사는 광섬유를 이용한 분광관측(즉 MANIFEST가 완성된 이후)보다는 긴슬릿을 이용한 분광관측에 적합하므로, 초기 GMT 관측 프로그램에 적합하다.

3) 선행 연구

여기서 제안한 연구를 성공적으로 수행하기 위해서는 매우 어두운 Lyα 방출선을 검출해내는 것뿐만 아니라 어렵게 검출될 Lyα 방출선을 제대로 해석하고 그로부터 천체들의 물리적 성질을 이끌어낼 수 있는 연구 역량을 갖추어야 한다. 따라서 2020년 이전까지 8-m급 망원경을 이용하여 밝은 Lyα 방출천체들을 분광관측함으로써 선윤곽함수 또는 편광으로부터 천체들의 물리적 특징을 밝히는 연구를 지속적으로 수행해야 할 것이다. 특히 Lyα 방출선의 복사전달(radiative transfer)을 이론적으로 이해하고 관측 결과에 적용 가능한 이론 수치 모형을 만드는 것이 필요하다.

2 전체 GMT 시간에서 발생하는 나쁜 시상 시간을 활용하면, 1-2년 이내에 100시간 노출을 쉽게 달성할 수 있다.

4. 연구 결과의 기대 성과

여기서 제안된 매우 깊은 Lyα 탐사는 일반적인 분광관측을 통해서는 절대 도달할 수 없는 어두운 플럭스와 표면밝기를 가진 천체/현상들을 새로 발견할 뿐만 아니라, 과거 우주에서 어떻게 가스들이 은하들과 상호작용하며 우주의 UV 배경복사가 은하 형성에 어떠한 영향을 미치는지를 연구하는 데 중요한 역할을 할 것이다.

5. 인용문헌

Arrigoni-Battaia, F., Yang, Y., et al. 2014, submitted to ApJ, arXiv:1407.2944

Cantalupo, S., Lilly, S. J., & Haehnelt, M. G. 2012, MNRAS, 425, 1992

Cantalupo, S., Lilly, S. J., & Porciani, C. 2007, ApJ, 657, 135

Dressler, A., Martin, C. L., Henry, A., Sawicki, M., & McCarthy, P. 2011, ApJ, 740, 71

Faucher-Giguère, C.-A., Keres, D., Dijkstra, M., Hernquist, L., & Zaldarriaga, M. 2010, ApJ, 725, 633

Gould, A., & Weinberg, D. H. 1996, ApJ, 468, 462

Kollmeier, J. A., Zheng, Z., Davè, R., et al. 2010, ApJ, 708, 1048

Martin, C. L., & Sawicki, M. 2004, ApJ, 603, 414

Rauch, M., Haehnelt, M., Bunker, A., et al. 2008, ApJ, 681, 856

Tran, K.-V. H., Lilly, S. J., Crampton, D., & Brodwin, M. 2004, ApJL, 612, L89