고적색이동 퀘이사에 대한 분광관측 연구

● 임명신, 전이슬, 김용정, 김도형, 전현성

서울대학교

1. 과학 목적 및 요약

최근 활발한 탐사관측의 결과로 적색이동이 z~7의 초기우주에 이르기까지 퀘이사가 발견되고 있다. 초기우주 퀘이사의 중심에는 질량이 $10^9 M_\odot$씩이나 되는 거대질량 블랙홀이 이미 자리 잡고 있는 것으로 보이는데, 우주에서 별이 최초로 탄생하고 수억 년밖에 되지 않는 짧은 시간 동안 어떻게 이렇게 거대한 블랙홀의 성장이 가능하였는지 아직까지 수수께끼로 남아 있다. 특히 적색이동 범위 $4 < z < 7$과 그 이상의 고적색이동 퀘이사의 경우 관측적인 한계로 말미암아 most luminous하면서 accretion rate가 큰 퀘이사들에 대해서만 연구의 범위가 국한되어 있는 실정이다. 본 연구에서는 광시야 imaging survey 관측을 통해 발견될 $z > 4$ 이상의 초기우주 퀘이사 후보들, 특히 z-등급 24-25등급의 어두운 퀘이사들에 대한 분광관측을 실시하여 (1) 이들이 고적색이동 퀘이사인

지 확인하고, (2) 고적색이동에서의 블랙홀 질량함수를 지금보다 2-3 orders of magnitude 가벼운 영역까지 확장하며, (3) 초기우주에서의 거대질량 블랙홀의 활동성에 대한 연구를 실시하고, (4) 여러 시선방향에 대한 IGM의 재이온화 정도를 연구하고자 한다. 미래의 광시야 imaging survey를 통하여 발견하게 될 300개 이상의 이러한 high red shift 퀘이사 후보들을 분광으로 확인 및 연구하면 초기우주에서의 거대질량 블랙홀의 통계적 속성과 성장 과정을 이해하는 것이 가능할 것이다. 특히 GMT를 이용한다면 아직까지 발견이 되지 않는 $z > 7$ 이상의 퀘이사에 대한 분광관측도 손쉽게 가능할 것으로 보인다.

2. 연구 필요성, 배경 및 동향

1) 연구의 배경 및 필요성

거대질량 블랙홀(Supermassive Black Hole, 약자: SMBH)이란 $10^6 \sim 10^{10} M_\odot$에 이르는 매우 무거운 블랙홀이며 많은 은하들의 중심부에 이러한 블랙홀이 자리 잡고 있다. SMBH 주변으로 물질이 떨어질 때 중력에너지가 빛에너지로 변환되면서 매우 밝게 빛나는 천체가 퀘이사이다. 활동성이 큰 퀘이사는 모은하(host galaxy)보다 더 밝게 빛나기 때문에 매우 먼 거리에 있는, 즉 적색이동 값이 큰 곳에 있어도 관측이 비교적 용이한 천체이다. 따라서 퀘이사를 이용하여 SMBH의 성장 과정이나 초기우주의 intergalactic medium(IGM)의 상태를 이해하는 연구가 활발히 진행되고 있다.

퀘이사는 그렇게 흔한 천체가 아니기 때문에 광시야 탐사관측이 절대적으로 필요하다. 최근에 이루어진 Sloan Digital Sky Survey(SDSS), 2dF, UKIDSS 등의 광시야 탐사관측에 힘입어 이제 10만 개가 넘는 퀘이사가 발견되었으며, 지금까지 발견된 가장 멀리 있는 퀘이사의 적생이동 값은 $z=7$에 이른다(Mortlock et al. 2011). 흥미롭게도 고적색이동 우주, 즉 우주의 나이가 10억 년도 채 되지 않는 초기우주에서 발견된 퀘이사의 중심부에는 그 질량이 $10^9 M_\odot$에 이르는 매우 무거운 SMBH가 자리 잡고 있는 것으로 밝혀졌으며, $10^{10} M_\odot$에 이르는 가장 무거운 블랙홀도 $z < 5$에서 발견되고 있다[그림 1]. 우주의 나이가 5-8억 년에 불과한 우주 초기에 그렇게 무거운 블랙홀을 만드는 것은 쉬운 일이 아니기 때문에 고적색

이동 퀘이사에서 발견된 SMBH는 아직 활발히 형성 중에 있는 블랙홀로 추정할 수 있다. 최근 관측 결과들도 이러한 추정을 뒷받침해주고 있는데 고적색이동 퀘이사들의 accretion rate은 L/L_{Eddx}~1로 매우 커서 accretion activity가 활발하고(de Rosa et al. 2014; Tracktenbrot 2014; Willott et al. 2010a), hot dust emission이 적어서 dust torus가 아직 완전히 형성되지 않는다는 이유로 고적색이동 퀘이사들은 아직 성장 중인 블랙홀로 보는 연구 결과들이 있다(Jun & Im 2013; Jiang et al. 2010). 그 외에도 z > 6에 있는 퀘이사 스펙트럼을 연구한 결과, IGM의 재이온화의 지표인 Gunn-Peterson trough가 z=6을 기점으로 매우 현저하게 나타난다는 점으로부터 우주의 재이온화 시점을 알 수 있다(e.g., Fan et al. 2006).

그런데 SMBH 중 가장 무거운 블랙홀, 이름 지어 Extremely Massive Black Hole(EMBH)은 질량이 M~$10^{10}M_{\odot}$으로 적색이동이 1 < z < 5인 구간에서 수백 개가 발견이 되어 있는 반면, z > 5인 초기우주에서는 아직 발견되어 있지 않다. 이로부터 EMBH는 z=6 우주에서는 아직 성장 중이었음을 추측할 수 있다. 가까운 우주에서 EMBH는 가장 무거운 은하의 중심부에서 발견이 되고 있다(McConnell

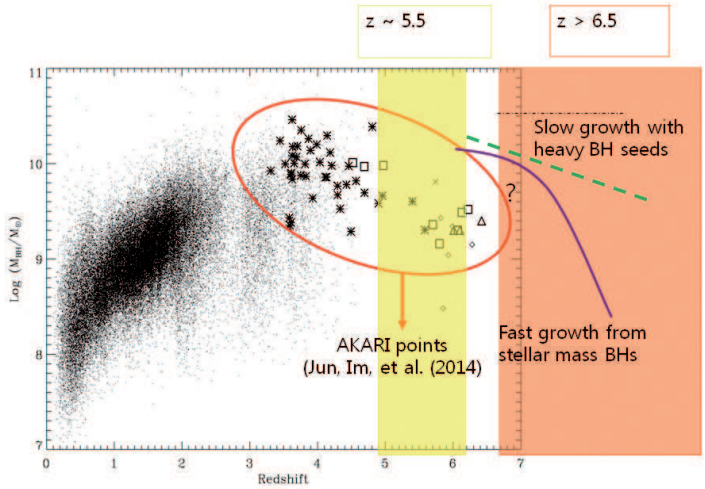

그림 1. 적색이동에 따른 퀘이사 블랙홀 질량의 변화. 작은 점은 SDSS 퀘이사 결과이며(Shen et al. 2008), 별표와 네모, 마름모는 AKARI 망원경을 이용하여 검출한 Hα 선을 이용하여 측정한 블랙홀 질량이다(Jun et al. 2014). 적색이동 5 < z < 6인 영역과 z > 6.5인 영역에서는 아직까지 발견된 퀘이사의 수가 매우 적음을 알 수 있다. 반면 z=5 정도까지는 M~$10^{10}M_{\odot}$에 이르는 SMBH가, 그리고 z=6에서도 질량이 $10^{9}M_{\odot}$에 이르는 SMBH가 있어 이들이 짧은 시간 안에 어떻게 그만큼 성장하였는지 수수께끼로 남아 있다(2014년 IAU Asia-Pacific Rim Regional Meeting M. Im 발표자료에서 발췌).

et al. 2011; van den Bosch et al. 2012). ΛCDM 우주의 계급적 은하 형성 이론에서 비교적 최근에야 나타나기 시작하는 것으로 예측하는 가장 무거운 은하의 seed인 EMBH의 성장 과정을 이해한다는 것은 은하 형성 이론을 검증한다는 의미에서도 뜻있는 일이라 할 수 있다. 그런데 [그림 1]에서 보는 바와 같이 지금까지 있어왔던 광시야 탐사관측의 한계로 말미암아 EMBH의 등장 시기라고 할 수 있는 z~5.5에서는 퀘이사들이 잘 발견이 되지 않았다. EMBH의 성장 과정을 이해하기 위해서는 지금까지의 관측적인 한계를 넘어서서 더 많은 EMBH를 $5 < z < 6$에서 발견하고 연구할 필요가 있다.

적색이동이 $6 < z < 7$인 우주에서도 [그림 2]에 보이는 바와 같이 아직까지 low luminosity 퀘이사들의 광도함수(luminosity function)가 잘 결정되어 있지 않아 이에 대한 연구가 필요하다. Accretion rate가 작으면서 블랙홀 질량이 매우

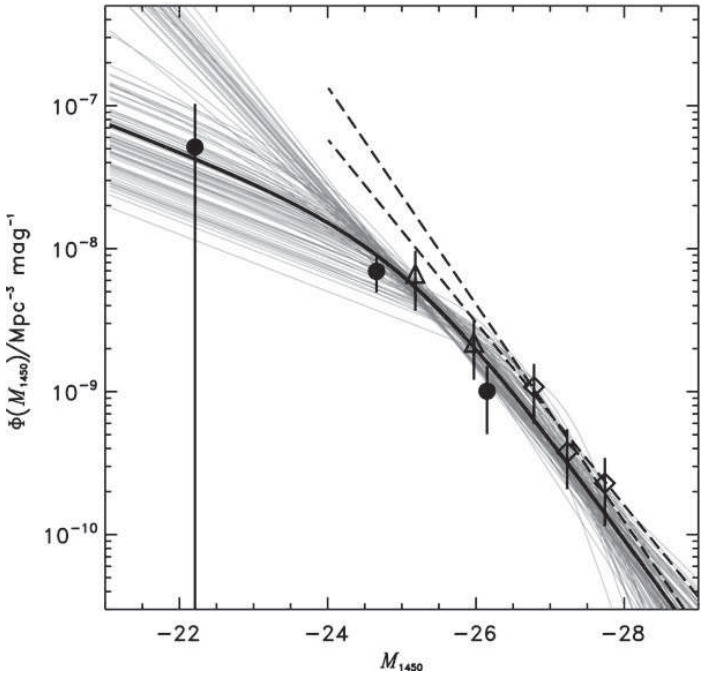

그림 2. 적색이동 z=6에 있는 퀘이사의 광도함수. X-축은 145nm에서의 UV 광도를 AB등급으로 나타낸 것이다. 25 AB등급은 z=6에서 절대등급으로 대략 -22 AB등급에 해당하며, 아직까지 퀘이사의 광도함수가 이렇게 희미한 등급에서는 잘 결정되어 있지 않다 (Willott et al. 2010b).

큰 퀘이사의 경우 광도가 밝지 않을 수 있기 때문에 low luminosity 퀘이사들에 대한 통계적인 연구가 제대로 이루어져야 z=6인 초기우주의 무거운 퀘이사들이 실제로 accretion rate가 큰, 성장 과정에 있는 상태로만 존재하는지 결정할 수 있을 것이다. 그리고 IGM의 재이온화 과정이 어떤 식으로 이루어지고 있었는지 제대로 이해하기 위해서는 많은 수의 퀘이사 스펙트럼을 관측하여 다양한 시선방향에서 Gunn-Peterson trough를 연구해야 할 것이다. 마지막으로 SMBH가 z=7과 그 이전 우주에서 stellar mass 블랙홀로부터 급속하게 성장을 하였는지, 질량이 10^4~$10^7 M_\odot$ 정도의 무거운 seed 블랙홀로부터 성장한 것인지(e.g., Natarajan 2014), 그리고 그들의 성장 과정과 z>7에서의 IGM 재이온화 과정을 이해하기 위해서는 z>7 퀘이사들을 발견, 연구할 필요가 있다.

2) GMT의 필요성

고적색이동으로 갈수록, 그리고 절대광도가 낮은 퀘이사일수록 J=22-25 AB 등급으로 밝기가 매우 어둡고 근적외선에서만 스펙트럼 관측이 가능한데, 현존하는 8-m급 망원경으로는 근적외선 파장에서 그렇게 희미한 천체를 관측하기가 매우 어렵다. 예컨대 8-m급 망원경으로 J=23 AB등급의 퀘이사를 관측하여 그것의 적색이동을 결정하려면 8시간 이상의 노출시간이 필요하다. 따라서 GMT와 같은 거대망원경이 절대적으로 필요하다. 그리고 근적외선 스펙트럼을 얻을 수 있는 기기를 사용해야 z>7 이상의 퀘이사에 대한 적색이동 결정이 가능하다.

3) 국내외 연구 동향

지금까지 Sloan Digital Sky Survey, 2dF, UKIDSS, Pan-Starrs 등의 광시야 탐사관측에 힘입어 이제 10만 개가 넘는 퀘이사가 발견되었으며, 지금까지 발견된 가장 멀리 있는 퀘이사의 적생이동 값은 z=7에 이른다. UKIDSS에서 z=7 퀘이사를 하나 발견하였으며(Mortlock et al. 2011), VISTA를 이용한 탐사관측을 통하여 z=6.8 부근의 퀘이사 3개가 발견되었다(Venemans et al. 2013). 앞으로도 LSST를 비롯한 여러 광시야 imaging survey를 통해 많은 수의 희미한 고적색이동 퀘이사 후보 천체들이 발견될 것이다. 따라서 고적색이동 퀘이사 연구는 앞으로도 많은 주목을 받을 연구 분야일 것으로 전망할 수 있다. 국내에서는 본 연구팀이 Infrared Medium-deep Survey(Im et al. 2014)를 실시하면서 고적색이

동 퀘이사 탐사를 하고 있다. z~5.5 퀘이사 발견을 위해 특별히 고안된 Is 및 Iz fitler를 장착한 CQUEAN 카메라(Park et al. 2012)를 사용하여 6개의 z~5.5 퀘이사와 2개의 z=6 퀘이사를 발견하였고, 현재 IMS 자료를 이용하여 z=6, 7 퀘이사를 탐사 중이다. 또한 본 연구팀은 AKARI 우주망원경을 사용하여 세계 최초로 고적색이동 퀘이사들의 Hα선을 검출하였으며 이를 사용하여 블랙홀 질량을 높은 신뢰성을 가지고 측정하는 연구를 수행하고 있다(Jun & Im 2013; Jun et al. 2014).

3. 연구의 내용 및 방법

1) 연구 대상

연구 대상은 z=4-7 또는 그 이상의 고적색이동 우주에 있을 것으로 추정되는 퀘이사 후보들이며, UV luminosity가 M_AB > -22인 비교적 어두운 퀘이사를 포함한 모든 고적색이동 퀘이사를 연구하고자 한다. SDSS, UKIDSS, VISTA Survey, 본 연구진이 수행하고 있는 Infrared Medium-deep Survey, 그리고 미래의 LSST survey 등을 통해 이러한 후보 천체들을 발굴하여 follow-up 관측하고자 한다.

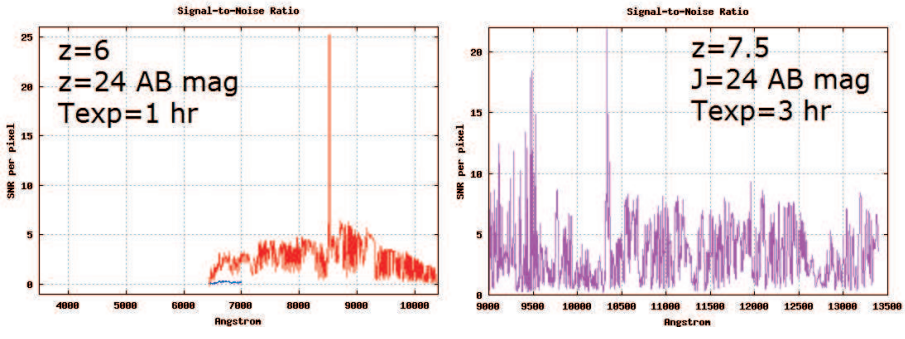

그림 3. 고적색이동 퀘이사와 유사한 스펙트럼 모양을 가지는 Lyman break galaxy를 GMT/GMACS로 관측하였을 때 기대되는 S/N per pixel(1/3 of Δλ/λ로 가정). 적색이동 z=6에 있는 z=24 AB등급으로 어두운 퀘이사도 GMT 1시간 노출시간으로 적색이동 결정이 가능하며(S/N>5 per pixel), z=7.5에 있는 J=24 AB등급 퀘이사에 대해서도 3시간 정도의 노출시간이면 S/N~5 per pixel의 S/N을 얻을 수 있다. 이 모의 스펙트럼은 GMACS Exposure Time Calculator를 사용하여 만들었다(http://instrumentation.tamu.edu/cgi-bin/gmacs_J.cgi).

2) 사용 GMT 기기 및 관측 전략

본 연구를 위해서는 moderate resolution(R~2000)과 근적외선 파장을 포함하는 관측이 가능한 GMACS를 사용하고자 한다. GMACS를 사용할 경우, 다천체관측이 가능하기 때문에 퀘이사의 주변 환경을 연구할 수 있다는 부차적인 효과까지 거둘 수 있다. Multi-object 또는 single-slit 관측을 하여 1-3시간 정도의 노출시간으로 24등급 정도의 어두운 퀘이사의 스펙트럼을 S/N=5 per pixel(pixel size=1/3 of $\Delta\lambda/\lambda$로 가정)로 비교적 손쉽게 얻을 수 있다[그림 3]. 특히 NIR-arm이 있을 경우, z>7인 고적색이동 퀘이사 관측도 가능해진다.

3) 선행 연구

본 연구 과제의 성공적인 수행을 위해서는 (1) 고적색이동 퀘이사 후보 선별 방법의 확립 및 (2) 고적색이동 퀘이사 후보의 선별이 이루어지는 것이 바람직하다. 먼저 고적색이동 퀘이사 후보 선별의 경우, 적색이동이 된 Lyman break 때문에 생기는 색지수의 갑작스러운 변화를 이용하여 선별하는 방법이 가장 경제적이다. Color-color diagram으로부터 또는 SED template를 사용한 photometric red shift를 이용하여 후보를 선별하면 된다. IMS와 같은 독자적인 광시야 imaging survey를 수행하거나 Subaru HSC, Pan-Starrs, VISTA survey와 같은 대규모 프로젝트에 대한 참여를 통한 근적외선 다파장 영상자료 획득을 하면 퀘이사 후보 선별이 가능할 것이다. KMT-Net과 같은 광시야 망원경을 사용하는 것도 한 방법이다. 이렇게 선별된 퀘이사 후보들은 밝은 퀘이사의 경우(20등급 이상) 4-m급 망원경으로, z~6 퀘이사와 같이 20등급보다 어두운 퀘이사의 경우 Magellan, Gemini와 같은 6-8m급 망원경과 근적외선 분광기기를 사용하여 follow-up 분광관측을 하는 것이 가능하다. 23 AB등급 이상의 어두운 고적색이동 퀘이사의 경우 2020년대에도 성질 규명이 제대로 이루어져 있지 않을 것으로 예상할 수 있기 때문에, 이러한 어두운 퀘이사 선별을 위한 imaging survey 수행이 필요하다. LSST를 이용한 탐사관측, Subrau HSC와 같은 기기를 이용한 탐사관측, 그리고 우주망원경을 이용한 1000 deg^2 이상의 광시야 근적외선 탐사관측을 수행한다면 많은 수의 퀘이사 후보 천체를 발굴할 수 있을 것이다.

4. 연구 결과의 기대 성과

SMBH의 성장 과정과 초기우주의 재이온화 진행 과정은 아직까지 수수께끼로 남아 있는 흥미로운 연구 분야이다. 여기서 제안하는 연구가 이루어질 수 있다면 고적색이동 범위 $5 < z < 6$ 및 $z > 6.5$에 있는 퀘이사를 100개 이상 발견하여 초기우주 SMBH들의 성장 과정을 밝혀내고, 광도함수의 어두운 부분을 제대로 결정하는 것은 물론, 우주의 재이온화 과정에서 퀘이사가 차지하는 역할까지 알아낼 수 있을 것이다. 또한 이 연구에서 발견한 퀘이사들을 JWST와 같은 미래 우주망원경으로 후속 관측할 경우 $z > 6.5$ 이상의 우주에서 SMBH들이 어떻게 성장해왔는지, 그리고 그것으로부터 은하 형성이론에 대한 검증과 seed 블랙홀의 성질 규명을 할 수 있을 것으로 기대한다. ALMA를 이용하여 초기우주 퀘이사 모은하의 성질규명도 가능할 것이다. 그 외에도 퀘이사 스펙트럼에 나타나는 Gunn-Peterson trough를 여러 시선방향에서 연구하여 우주의 재이온화 과정이 어떻게 이루어졌는지 알아내는 것도 가능할 것이다.

5. 인용문헌

Banados, E., Venemans, B. P., Morganson, E., et al. 2014, AJ, 148, 14
de Rosa, G., Venemans, B. P., Decarli, R., et al. 2014, ApJ, 790, 145
Fan, X., Strauss, M. A., Becker, R. H., et al. 2006, AJ, 132, 117
Im, M. et al. 2014, in preparation
Jiang, L., Fan, X., Brandt, W. N., et al. 2010, Nature, 464, 380
Jun, H. D., Im, M., Lee, H. M., et al. 2014, ApJ, submitted
Jun, H. D., & Im, M. 2013, ApJ, 104
McConnell, N. J.; Ma, C.-P.; Gebhardt, K., et al. 2011, Nature, 480, 215
Mortlock, D. J., Warren, S. J., Venemans, B. P., et al. 2011, Nature, 474, 616
Natarajan, P. 2014, General Relativity and Gravitation, 46, 1702
Park, W.-K., Pak, S., Im, M., et al. 2012, PASP, 124, 839
Shen, Y., Greene, J. E., Strauss, M. A., et al. 2008, 680, 169
Trakhtenbrot, B. 2014, ApJL, 789, L9
van den Bosch, R. C. E.; Gebhardt, K.; Gültekin, K. 2012, Nature, 491, 729
Venemans, B. P., Findlay, J. R., Sutherland, W. J., et al. 2013, ApJ, 779, 24

Willott, C. J., Albert, C., Arzoumanian, D., et al. 2010a, AJ, 140, 546
Willott, C. J., Delorme, P., Reyle, C., et al. 2010b, AJ, 139, 906