가까운 은하의 분광학적 연구를 통한 은하의 형성과 진화에 대한 연구

● 김민진[1], Luis C. Ho[2,3], 박병곤[1], 이준협[1,4], 정현진[1], 선광일[1], 김상철[1], 이창희[1]

한국천문연구원[1], Kavli Inst. for Astronomy and Astrophysics[2], Carnegie Observatories[3], 과학기술연합대학원대학교[4]

1. 과학 목적 및 요약

본 관측 제안팀은 가까운 은하의 외곽부 영역에 대해 가시광 분광관측을 수행하고자 한다. 표준 우주론에 따르면 현재의 은하들은 무수히 많은 은하 간 병합을 통하여 형성되어 있다고 알려져 있다. 타원은하의 경우 적색이동 1-2 이후부터 현재까지 작은 은하와의 병합을 통해 은하의 크기를 매우 커지는 방향으로 진화했다고 알려져 있다. 그러므로 타원은하의 중심에서 멀리 떨어진 별들의 밀도 분포와 물리적 특성은 이러한 병합에 의한 진화 양상을 연구하는 데 매우 중요하다.

반면에 나선은하의 경우 병합에 의한 진화보다는 매우 작은 은하나 차가운 가스가 유입되면서 생기는 별 생성에 의해 주로 성장해왔다고 알려져 있다. 이 경우에 원반의 바깥 부분에서 별 밀도, 나이, 중원소함량의 분포는 나선은하의 진

화를 이해하는 데 매우 중요한 요소이다. 또한 은하 주변의 환경도 은하의 진화에 매우 밀접한 연관 관계가 있으며, 특히 모은하와 주변부 왜소은하의 특성 간에 어떠한 상관관계를 가지는지를 이해하는 것은 은하의 진화 과정을 연구하는 데 중요하다.

본 연구팀은 KMTNet 망원경을 이용해 가까운 은하의 매우 깊은 이미지를 얻기 위한 프로젝트(Deep Wide-Field Imaging of Nearby Galaxies)를 2014년 가을부터 약 3-4년간 수행할 예정이다. 하지만 이미지 자료만으로는 나이와 중금속함량 등 물리적인 특성을 정확히 알아내기 어렵다. GMT 망원경을 이용하여 이미지 자료가 있는 가까운 은하의 분광자료를 얻고자 한다. 이미지 자료와 분광자료를 이용하여 은하의 외곽부와 위성은하의 물리적 특성을 알아내고자 한다. 이를 통해 은하가 최근 수억 년 동안 어떤 과정을 통해서 진화했는지에 대한 연구를 수행하고자 한다.

2. 연구 필요성, 배경 및 동향

1) 연구의 배경 및 필요성

현대 우주론에 따르면, 은하의 진화 과정은 질량에 따라 매우 다르다고 알려져 있다. 예를 들어 무거운 은하는 무수히 많은 은하 간의 병합을 통해서 진화를 해왔고, 현재의 가벼운 은하는 차가운 가스의 유입으로 인한 별 생성이나 매우 작은 위성은하들에 의한 별의 유입으로 진화해왔다고 생각되어진다. 이러한 진화 과정은 은하의 모양(morphology)을 결정짓는 데도 중요한 역할을 했을 것이다.

이러한 진화 과정을 이해하는 데 있어, 타원은하와 나선은하에서 넓게 퍼진 어두운 대상들을 연구하는 것은 매우 중요하다. 왜냐하면 은하의 바깥에 위치한 별들은 최근에 은하가 어떻게 진화했는지에 대한 정보를 정확하게 기억하고 있기 때문이다. 그러므로 이러한 대상의 형태와 물리적 특성을 이해하는 것은 은하 전체의 진화 과정을 이해하는 데 매우 중요한 요소이다.

최근의 연구 결과에 따르면 타원은하의 경우 두 단계 모델(Two-phase Scenario)을 통해서 진화해왔을 가능성이 높다고 알려져 있다(van Dokkum et al. 2010). 즉 우주 초기(z~2 이전)에 아주 활발한 별 생성을 통해서 현재보다 크기가 작고 밀

도가 아주 높은 중심부가 만들어진 후, 최근의 10억 년 동안 질량이 작은 은하와의 무수한 병합을 통해 질량은 크게 변하지 않고 은하의 크기만 커지는 쪽으로 진화해왔다고 알려져 있다(Daddi et al. 2005; Damjanov et al. 2009; Bezanson et al. 2011, 2012). 만약 이러한 예측이 맞는다면 타원은하의 바깥 부분에 위치한 별들은 최근의 병합에 의해서 바깥으로부터 유입되었을 가능성이 많으며(Belli et al. 2014), 물리적 특성이 은하 중심부와 매우 다를 것으로 예측이 되어진다(Greene et al. 2012).

나선은하의 원반의 경우, 별의 분포가 중심에서의 거리에 따라 지수함수(exponential function)의 형태를 띤다고 많이 알려져 있었다. 하지만 최근 연구 결과에 따르면 은하의 바깥 부분으로 갈수록 별의 밀도가 급격히 올라가거나(upbending) 떨어지는(break, truncation) 것을 볼 수가 있다(van der Kruit 1979; Erwin et al. 2005). 이는 나선은하의 원반이 어떤 기작에 의해서 서로 다르게 진화해나가는 것을 보여주므로 매우 흥미로운 결과다. 하지만 정확하게 어떤 원인으로 이러한 현상이 나타나는지에 대한 연구는 부족한 실정이다. 왜냐하면 이러한 현상(truncation)이 은하의 바깥 부분의 어두운 부분에 위치하기 때문에 넓은 시야를 가진 깊은 이미지/분광 데이터가 필요하기 때문이다.

최근 긴 노출시간을 통해 얻은 이미지나 분광자료(예, Stripe 82, S4G, SLUGG Survey)를 이용해서 은하의 바깥 부분의 물리적 특성(나이와 중원소함량 등)을 연구하는 주제가 진행 중이나, 대상 자체가 매우 어둡고 넓은 광시야를 필요로 하는 일이라 제한된 대상에 대한 연구만이 진행 중이다(Bakos & Trujillo 2012; Greene et al. 2012; Pastorello et al. 2014). 본 연구팀에서는 GMT 망원경을 이용해서 가까운 은하의 바깥에 위치한 별들의 특성을 연구하는 것을 제안하고자 한다.

본 연구팀은 KMTNet 망원경의 광시야 망원경(시야: 2도×2도)을 이용하여 약 200개의 가까운 은하(< 100Mpc)의 측광학적 특성을 연구하는 프로젝트를 수행할 예정이다. 이 연구를 통해 은하 바깥에 위치한 별들의 밀도 분포와 색깔을 측정하고, 모은하의 특성에 따라 이러한 특성이 어떻게 변하는지 알아볼 예정이다. 하지만 밀도 분포와 색깔만으로는 나이와 중금속함량 등 은하의 진화 과정을 이해하는 데 중요한 요소를 측정하기 어렵다. 그러므로 GMT의 가시광 분광자료를 이용해 얻을 수 있는 물리적 특성은 가까운 은하의 우주론적인 진화 과정을 이해하는 데 매우 중요한 역할을 할 것으로 예상된다.

2) GMT의 필요성

은하의 바깥 부분에 대한 연구는 측광학적으로는 꾸준히 수행되고 있지만, 분광학적 연구는 매우 부족한 실정이다. 그 이유는 표면밝기가 매우 낮기 때문이다. 타원은하에 대해서 현재까지 대략 은하의 유효 크기(effective radius)의 대략 3배 지점까지 연구가 가능하다(Pastorello et al. 2014). 이러한 제약의 가장 큰 이유는 대형망원경(8-10m)의 경우 IFU(Integral field unit)의 시야가 매우 제한되기 때문에 현재까지의 연구는 넓은 시야를 가진 중간 크기 망원경을 중심으로 이루어지고 있다(Greene et al. 2012; Raskutti et al. 2014). 우리가 제안한 연구에서는 타원은하의 유효 크기의 5배 이상 되는 지점에서 별들의 물리적 특성을 구하고자 한다. 또한 나선은하의 원반의 변곡점 부근과 병합은하의 특성을 알기 위해서는 매우 어두운 표면밝기를 가진 대상에 대한 관측이 가능해야 한다. 이러한 이유로 비교적 넓은 시야를 가진 GMACS와 MANIFEST가 없이는 여기서 제안된 연구는 불가능하다.

다만 GMT 운용 초기에 MANIFEST가 만들어지기 전이라도 GMACS의 멀티슬릿 마스크를 이용해서도 KMTNet 망원경으로 얻은 이미지에서 발견되는 흥미로운 대상들(병합은하, 껍질 모양 등 최근 병합의 결과물, 은하 주변의 왜소은하)을 충분히 관측할 수 있을 것으로 기대된다.

3) 국내외 연구 동향

가까운 은하에서 중심에서 멀리 떨어져 퍼져 있는 별의 분포에 대한 측광학적 연구는 매우 활발하다. 특히 최근 5-10년 동안 광시야 망원경의 발달로 인해 타원은하와 나선은하의 헤일로의 별 분포 곡선에 대한 연구와 물리적 특성에 대한 연구가 이루어지고 있다. 이에 반해 현재 만들어진 기기의 한계로 인해 분광학적 연구는 매우 제한적이다. 예를 들어 2.5m McDonald 망원경과 Keck/DEIMOS를 이용한 타원은하 관측을 통해 유효 크기의 2-3배에서의 별들의 나이, 중원소 함량, 운동학적 특성들에 대한 연구에 수행되어왔다. 여기서 나온 결과들이 소위 타원은하의 두 단계 모델(two-phase scenario)이 예측하는 모델과 부합하는지는 아직 명확하지 않다(Arnold et al. 2013; Raskutti et al. 2014). 향후 MaNGA와 CALIFA 등 다양한 프로젝트를 통해서 은하 유효 크기의 2-2.5배까지에서 별의 특성에 대한 연구가 활발해질 예정이다.

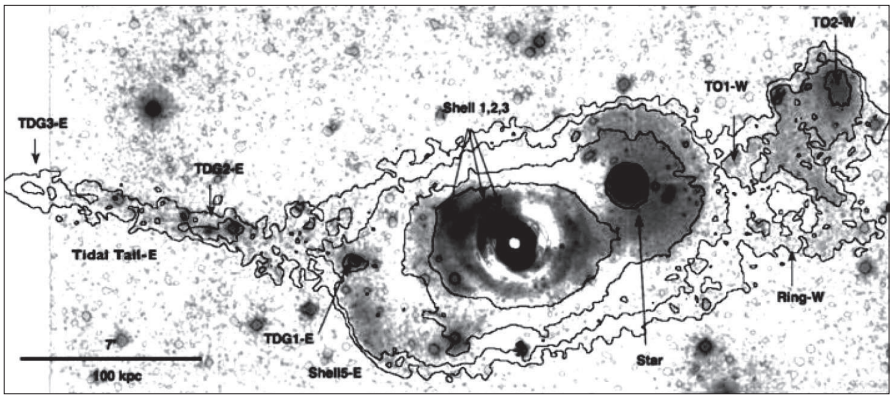

그림 1. CFHT로 얻은 NGC 5557의 매우 깊은 이미지. 껍질 모양, 왜소은하 등 여러 가지 병합 흔적을 보여준다 (Duc et al. 2011).

하지만 앞에서 밝힌 바와 같이 최근의 10억 년간 은하 진화를 이해하기 위해서는 중심에서 멀리 떨어진 어두운 영역에서의 분광학적 특성을 알아내는 것이 매우 중요하다. 그러므로 현재 실행되고 있는 프로젝트들의 한계는 명확하고, GMT를 이용한 가까운 은하에 대한 분광학적 탐사는 은하 진화를 연구하는 데 매우 중요한 역할을 할 것으로 기대된다.

3. 연구의 내용 및 방법

1) 연구 대상

MANIFEST의 사용 여부에 따라 연구 대상은 크게 두 단계로 나뉠 예정이다.

첫 번째, 2017년까지 KMTNet 망원경을 이용하여, 약 200개의 남반구 은하의 깊은 이미지를 얻을 예정이다. 은하까지의 거리는 100Mpc보다 작으며, 평균적인 거리는 25Mpc이다. 여기서 얻은 이미지를 이용해 발견될 흥미로운 대상에 대한 후속 관측을 수행할 예정이다. 예를 들어 최근에 병합의 흔적을 보이거나, 유입되는 별의 흐름이 보이거나, 모은하 가까이 어두운 병합은하가 관측될 경우 GMACS의 multislit 마스크를 이용해서 관측을 수행할 예정이다.

두 번째, MANIFEST가 사용이 가능해지면, 은하의 질량, 형태, 중심에서 거리에 따른 별의 분포별로 대표하는 은하를 골라 통계적인 연구를 수행할 계획이다.

약 20개의 은하를 선택해서, 은하의 중심과 중심으로부터 멀리 떨어진 영역에서의 별의 물리적 특성과 운동학적 특성에 대한 정보를 얻을 예정이다.

2) 사용 GMT 기기 및 관측 전략

관측 전략도 MANIFEST의 사용 여부에 따라 크게 두 단계로 나뉠 예정이다.

첫 번째, MANIFEST가 사용 가능하기 전에는 KMTNet으로 얻은 이미지에서 흥미로운 특징으로 보이는 대상을 GMACS의 multislit 마스크를 이용해서 관측할 예정이다. 예를 들어, 그림 1에서 보이는 것처럼 최근에 병합을 하고 있는 은하의 특성을 살펴볼 예정이다. 현재까지 결과에 따르면 이러한 은하들의 최대 표면밝기는 대략 25-27mag/arcsec^{2}정도가 된다고 알려져 있다. 분광분해능은 중요하지 않으므로 최대한 넓은 슬릿(2초)을 이용하고 슬릿 안에 들어오는 모든 빛을 합해서 분광자료를 얻는 경우, 슬릿 안에 들어오는 은하의 밝기는 23-25mag 정도 될 것으로 예상된다. 물리적 특성(나이, 금속 원소함량)을 구하기 위해 S/N는 10 정도가 요구된다. 이를 바탕으로 하나의 은하당 2-4시간 정도의 노출시간이 필요할 것으로 예측된다.

두 번째, MANIFEST를 사용해서 은하의 유효 크기의 5배 이상의 거리에서 S/N~20의 분광자료를 얻고자 한다. 중심으로부터의 거리에 따라서 유효 파이버의 개수가 늘어나므로 정확한 관측 시간을 예측하기는 매우 어렵다. 현존하는 넓은 시야를 가진 IFU 중에 하나인 맥도날드 망원경의 VIRUS-P를 이용한 연구의 경우, 약 2시간의 노출로 대략 유효 크기의 2.5배 정도에서의 물리적 특성을 알아낼 수 있었다. 망원경의 크기를 제외한 다른 조건이 모두 같다면, GMT를 이용해서 대략 2시간의 노출로 유효 크기의 5배인 곳의 나이와 금속함량을 구할 수 있는 분광자료를 얻을 수 있을 것이라 예측이 된다. 이를 20개의 가까운 은하에 대해 관측을 수행한다면 대략 40시간을 이용해서 본 프로젝트를 수행할 수 있을 것으로 예상이 된다.

4. 연구 결과의 기대 성과

GMACS와 MANIFEST를 이용해서 수행될 가까운 은하의 분광관측 연구를 통해, 은하의 진화 과정을 이해하기 위해 크게 여섯 가지의 중요한 관측적 결과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

첫 번째로, 타원은하의 바깥 부분에서 나이와 중원소함량을 구하고자 한다. 이를 통해 타원은하의 진화가 어떠한 형태로 이루어졌는지 관측적 증거를 얻을 수 있을 것으로 기대된다. 만약 비교적 질량이 작은 은하와의 합병을 통해서 진화가 이루어졌다면, 타원은하 바깥 부분의 별들은 나이가 젊고 금속함량이 비교적 적을 것으로 예측이 된다(Greene et al. 2013). 또한 중심부와 바깥 부분 사이에 물리적 특성이 명확한 차이가 있을 것으로 기대가 된다. 관측적인 결과를 바탕으로 이러한 예측이 얼마나 정확한지 검증할 수 있을 것이다.

두 번째로, 타원은하의 중심에서 거리에 따른 운동학적 특성의 분포를 살펴볼 것이다. 작은 은하와의 병합이 타원은하 바깥 부분의 형성에 중요한 역할을 했다면, 은하의 안쪽과 바깥쪽에 운동학적인 증거를 발견할 수 있을 것이라 기대가 된다(Raskutti et al. 2014).

세 번째로, 나선은하의 원반부에서 나이와 중원소함량 분포를 살펴볼 예정이다. 특히 원반부의 별의 밀도가 변곡점을 그리는 지점에서 물리적 특성을 알아봄으로써, 변곡점의 형성 원인을 알아볼 것이다. 최근 연구 결과에 따르면 변곡점 주위에서 색깔이 푸르게 보인다고 알려져 있지만, 정확한 원인은 알려져 있지 않다(Bakos et al. 2008). 분광자료를 이용해 물리적 원인을 밝히고자 한다.

네 번째로, 나선은하 중 몇몇의 은하에서 UV에서 밝은 바깥쪽 원반(Outer disk)의 존재가 알려져왔다(Thilker et al. 2005). 하지만 이 원반이 얼마나 많은 은하에서 발견되는지에 대한 통계적인 연구와 바깥쪽 원반의 기원에 대한 연구는 많이 수행되지 못했다. KMTNet과 GMT를 이용한 후속 관측을 통해서 바깥쪽 원반을 새롭게 발견하고, 그 원반의 존재 여부가 모은하의 특성과 어떤 관계를 가지는지 밝히고자 한다.

다섯 번째로, 병합은하들과 병합 잔해(껍질, 조석에 의한 별의 줄기)의 물리적 특성 연구를 연구하고자 한다(Duc et al. 2011). 그리고 병합 잔해의 특성과 모은하가 어떤 상관관계를 가지는지 알아낼 것이다.

여섯 번째로, 은하의 헤일로는 대체로 매우 어두우므로(~28-29mag/arcsec^2) 개개의 은하에서 헤일로 분포를 보는 것은 매우 어렵다(Mihos et al. 2013). 하지만 여러 은하에서 얻은 분광자료를 합하여(stacking) 헤일로에 위치한 별들의 특성을 연구하고 관측 결과가 우주론적 모델에서 예측하는 결과와 일치하는지 연구할 것이다.

5. 인용문헌

Arnold, J. A., Romanowsky, A. J., Brodie, J. P., et al. 2013, arXiv:1310.2607

Bakos, J., & Trujillo, I. 2012, arXiv:1204.3082

Bakos, J., Trujillo, I., & Pohlen, M. 2008, ApJL, 683, L103

Belli, S., Newman, A. B., Ellis, R. S., & Konidari, N. P. 2014, ApJL, 788, L29

Bezanson, R., van Dokkum, P., & Franx, M. 2012, ApJ, 760, 62

Bezanson, R., van Dokkum, P. G., & Franx, M., et al. 2011, ApJL, 737, L31

Daddi, E., Renzini, A., & Pirzkal, N., et al. 2005, ApJ, 626, 680

Damjanov, I., McCarthy, P. J., & Abraham, R. G., et al. 2009, ApJ, 695, 101

Duc, P.-A., Cuillandre, J.-C., Serra, P., et al. 2011, MNRAS, 417, 863

Erwin, P., Beckman, J. E., & Pohlen, M. 2005, ApJL, 626, L81

Greene, J. E., Murphy, J. D., Comerford, J. M., Gebhardt, K., & Adams, J. J. 2012, ApJ, 750, 32

Greene, J. E., Murphy, J. D., Graves, G. J., et al. 2013, ApJ, 776, 64

Mihos, J. C., Harding, P., Rudick, C. S., & Feldmeier, J. J. 2013, ApJ, 764, L20

Pastorello, V., Forbes, D.A., Foster, C., et al. 2014, arXiv:1405.2338

Raskutti, S., Greene, J. E., & Murphy, J. D. 2014, ApJ, 786, 23

Thilker, D. A., Bianchi, L., & Boissier, S., et al. 2005, ApJL, 619, L79

van der Kruit, P. C. 1979, A&AS, 38, 15

van Dokkum, P. G., Whitaker, K. E., & Brammer, G., et al. 2010, ApJ, 709, 1018