우주 공동 영역(void)에 위치한 타원은하의 구상성단계 연구

● 손주비[1], 이명균[1], 고유경[1], 임성순[1], 박홍수[2]

서울대학교[1], 한국천문연구원[2]

초 록

본 관측 제안팀은 우주 공동 영역(Cosmic void, 이하 void)에 위치한 타원은하의 구상성단계(Globular cluster system)에 대한 분광관측을 통해 금속 함유량(metallicity)과 나이를 측정하고자 한다. 이를 바탕으로 void의 타원은하에 위치한 구상성단들이 언제 어디서 형성되었는지를 조사할 것이다. 만약 구상성단들의 금속 함유량이 적고 나이가 많다면, void 타원은하들의 구상성단들은 초기우주에서 주로 형성되었음을 추정할 수 있다. 반대로 구상성단들의 금속 함유량이 높고 젊다면, 비교적 최근까지도 void 영역에서 은하들의 병합과 성단 형성이 일어났다고 생각할 수 있다. 우리는 이 결과와 은하단에 위치한 비슷한 밝기 또는 질량의 타원은하에 속한 구상성단계들의 분광 연구 결과를 비교하여, void 영역에서 타원은하의 형성 과정에 대해 이해하고자 한다.

1. 과학 목적 및 요약

우주거대구조 사이의 빈 영역인 void는 다른 환경에 비해 은하 밀도가 현저히 낮은 지역이다. 만약 void가 초기우주에서부터 밀도가 낮은 영역이었다면, void에는 무거운 은하, 특히 무거운 타원은하가 잘 형성되지 않을 것이다. 무거운 타원은하를 형성할 가벼운 은하들이 고밀도 환경에 비해 적게 만들어질 것이기 때문이다. 하지만 예측과는 달리 void에서는 무거운 타원은하들이 발견되고 있다. 이러한 void의 무거운 타원은하들의 기원은 자세히 알려져 있지 않다.

본 관측 제안팀은 void의 무거운 타원은하들이 거느린 구상성단에 대한 분광관측을 통해 이 문제를 연구하고자 한다. 관측 대상은 I < 25등급의 구상성단들이고, 동시 관측 파장대는 3500-10000Å이다. 구상성단들의 스펙트럼으로부터 각 구상성단의 금속 함유량과 나이를 측정할 것이다. 구상성단들의 평균적인 금속 함유량과 나이를 알게 되면, 구상성단들을 거느린 void 은하가 언제 어떤 특성을 갖는 구상성단들을 포획/형성했는지 추론해볼 수 있다. 이 과정을 통해 void에 놓인 무거운 타원은하들의 기원에 대해 이해할 수 있을 것으로 기대한다.

2. 연구 필요성, 배경 및 동향

1) 연구의 배경 및 필요성

Void는 비어 있지 않다. 은하 밀도가 매우 낮은 void에서도 은하는 존재한다. 그리고 다른 환경에서 발견되는 모든 종류의 은하가 void에서 발견된다(Hoyle et al. 2012; Kreckel et al. 2012). 따라서 void에 위치한 은하들의 특성을 고밀도 지역과 비교하면 은하의 형성에 주변 밀도가 어떤 영향을 끼치는지를 조사할 수 있다.

Void 은하들과 관련된 가장 흥미로운 문제 중 하나는, void에서 무거운 타원은하가 언제 어떻게 형성되었는가에 관한 것이다. 표준 차가운 암흑물질 모형(Standard cold dark matter model)에 따르면, 타원은하는 가벼운 은하들의 병합으로 만들어진다. Void처럼 밀도가 낮은 영역에서는 서로 병합할 가벼운 은하가 많지 않으므로 무거운 타원은하가 잘 형성되지 않을 것이다. 하지만 예측과는 달

리 void에서는 무거운 타원은하들이 발견되고 있다(Hoyle et al. 2005; Tinker & Conroy 2009). 이는 기존 우주모형에 비추어볼 때 이해하기 어려운 점이다.

Void 은하의 특성에 대해 조사한 기존 연구들의 공통적인 결과는 void에 위치한 은하들이 고밀도 환경에 놓인 은하들에 비해 평균적으로 색이 파랗고 나이가 젊다는 것이다. Sloan Digital Sky Survey(SDSS) 자료를 이용하여 void 은하를 통계적으로 분석한 결과 고밀도 환경의 은하보다 푸른 은하의 비율이 더 높고 평균 색도 푸른 것으로 나타났다(Hoyle et al. 2012). Void에서 발견되는 조기형 은하(E, S0 형)만 뽑아 분광관측한 결과, 은하를 구성하는 별 종족이 평균적으로 젊고 금속 함유량이 더 높은 것으로 알려졌다(Wegner & Grogin 2008). 또한, 별 형성률은 0.2-1.0$M_{\odot}$yr^{-1}로 측정되었다. 이 결과로부터 Wegner & Grogin(2008)은 void의 조기형 은하 중 최근에 별 형성을 겪는 은하의 비율이 고밀도 환경의 조기형 은하에 비해 더 높고, 별 종족의 나이도 더 넓게 분포하고 있다고 제안하였다. 즉, void 영역에서 무거운 타원은하가 형성될 수는 있지만, 다른 환경에 비해 최근에 형성되는 것으로 생각된다.

무거운 타원은하의 형성 과정을 이해하는 데 사용할 수 있는 도구 중 하나는 바로 구상성단이다. 구상성단은 10^3~10^6개의 별들로 구성된 구형의 천체로 낱별보다 훨씬 밝아 관측이 쉽다. 또, 무거운 타원은하에서는 수천 개 이상이 존재하기 때문에 많은 수의 표본을 확보하는 것도 용이하다는 장점이 있다. 구상성단을 이용한 연구의 중요한 장점 중 하나는, 구상성단을 구성하는 별들을 동시에 태어난 단순 항성종족(simple stellar population)으로 가정할 수 있다는 것이다. 이 가정을 받아들인다면, 구상성단의 관측 자료와 이론적 모형과 비교하여 구상성단의 나이와 금속 함유량 등을 추론할 수 있다. 이 정보로부터, 구상성단들이 언제 어떤 환경(구상성단을 형성한 가스의 금속 함유량)에서 형성되었는지를 알 수 있다. 이러한 구상성단의 특성을 이용하면 모은하(host galaxy)의 형성 과정에 대해서도 이해할 수 있을 것으로 기대한다.

은하의 구상성단계는 두 가지 종족으로 이루어져 있다고 생각된다. 금속 부족 구상성단(Metal poor globular cluster)과 금속 부유 구상성단(Metal rich globular cluster)이 그것이다. 두 종류의 구상성단의 기원을 설명하기 위해 다양한 가설들이 제시되었다. 대부분의 가설들은 두 종류의 구상성단이 서로 다른 기원을 가진다고 설명한다. 예를 들어, Lee et al.(2010)에서 제시한 비빔밥 모형에서는 각 구

상성단의 기원을 다음과 같이 설명한다.

(1) 금속 부족 구상성단 : 우주 초기에 질량이 작은 왜소은하(low-mass dwarf galaxy)에서 주로 만들어졌을 것이다. 이들은 우주에서 최초로 만들어진 구상성단들이다. 무거운 은하 주변에서도 만들어지지만, 그 수는 왜소은하에서 만들어진 것에 비하면 적다. 현재 무거운 타원은하에서 보이는 금속 부족 구상성단들은 대다수가 별 형성을 일으키지 않는 병합 과정(dissipationless merging)이나 유입(accretion)에 의해 은하에 속하게 된 것이다.

(2) 금속 부유 구상성단[1] : 은하의 별 형성과 함께 형성되거나, 별 형성을 일으키는 은하 병합(dissipational merging) 중에, 약간 금속 함유량이 증가한 기체에서 만들어졌을 것이다.

(3) 금속 부유 구상성단[2] : 은하들은 시간이 지남에 따라 병합하여 무거운 타원은하로 성장한다. 이때, 별 형성을 일으키는 은하 병합을 하는 과정에 일부 금속 부유 구상성단들이 만들어질 것이다. 그러나 이 비율은 높지 않을 것이다.

위의 모형에 따르면, void에 위치한 무거운 타원은하에서는 두 종류의 구상성단의 개수와 비율 등이 고밀도 환경의 무거운 타원은하와 다를 것이다. 만약 void 지역이 우주 초기부터 밀도가 낮은 지역이었다면, 근처에 왜소은하의 수가 많지 않아 포획할 만한 금속 부족 구상성단의 수도 많지 않았을 것이다. 또한, 별 형성을 일으키는 은하 병합 역시 void에서는 덜 자주 발생하여, 새롭게 태어나는 금속 부유 구상성단의 수도 적을 것이다. 한편, 앞서 언급한 것처럼 void의 타원은하들이 고밀도 지역의 타원은하들에 비해 비교적 최근에 병합을 겪고 성단을 형성했다면, 더 금속이 풍부하고 젊은 금속 부유 구상성단들은 많이 형성되었을 수 있다.

본 관측 제안팀은 모형에 근거한 이러한 예측을 void 타원은하에 속한 구상성단들에 대한 분광관측으로부터 확인하고자 한다. Void 타원은하에 속한 구상성단(이하 void 구상성단)의 금속 함유량 및 나이를 측정하는 것이 위의 모형을 검증하는 가장 직접적인 방법이다. 이 정보를 이용하여 구상성단의 형성 과정뿐 아니라 구상성단을 거느린 타원은하의 형성 과정을 연구할 수 있는 중요한 자료를 확보할 수 있다.

2) GMT의 필요성

본 관측 제안에서 목표하는 바를 달성하기 위해서는 두 가지 이유로 GMT/GMACS가 필요하다. 첫째, void 은하에 속한 구상성단들을 관측하기 위해서는 GMT의 막강한 집광력이 필요하다. 본 과제에서 대상으로 삼고 있는 void 타원은하들은 30Mpc~100Mpc의 거리에 분포한다. 이 은하들에 속한 I < 25등급의 구상성단들이 주 관측 대상이다. 최근 약 100Mpc의 거리에 위치한 머리털자리 은하단(Coma cluster)의 타원은하에 속한 R < 24등급의 밝은 구상성단(혹은 Ultra Compact Dwarf)에 대한 분광관측이 Keck을 이용해 수행되었다(Chiboucas et al. 2011). R~300의 저분해능으로 3시간 반의 노출을 주어 S/N(신호대잡음비)~3 정도의 스펙트럼을 얻었다. 따라서 비슷한 거리에서 발견되는 더 어두운 구상 단들에 대한 분광관측은 기존 관측에 사용된 Keck 망원경의 약 6배의 집광력을 가진 GMT를 이용할 때 효율적으로 수행할 수 있다.

본 관측팀이 GMT를 필요로 하는 두 번째 이유는 GMACS의 다천체 분광 기능이다. Void에서 구상성단 및 은하 형성 과정을 규명하기 위해서는 한 은하에 속한 많은 수의 구상성단의 금속 함유량 및 나이를 측정해야 한다. GMT/GMACS의 다천체 분광 기능이 있다면, void 타원은하 주변의 수십 개 이상의 구상성단을 동시에 분광관측할 수 있다. 따라서 void 구상성단계를 효율적으로 관측하기 위해서는 다천체 분광 기능이 필요하다.

3) 국내외 연구 동향

외부은하의 구상성단에 대한 연구는 주로 은하단 환경에서 이루어졌다. 은하단 환경에 무거운 타원은하가 많이 존재하고, 이 은하들이 구상성단을 많이 거느려 많은 수의 표본을 확보하기 용이하다. 은하단 환경의 구상성단계를 이용한 기존의 연구는 크게 두 가지 방향으로 진행되었다. 첫째, 두 종류의 구상성단의 기원에 대한 연구이다. 금속 함유량에 따른 두 가지 종류의 구상성단의 기원이 어떻게 다른지에 대해 측광학적, 분광학적 연구가 활발히 이루어졌다. 둘째, 구상성단계의 특성을 이용한 은하단 타원은하의 형성 과정 규명이다. 두 종류의 구상성단의 공간 분포, specific frequency, 역학적 특성 등을 이용하여 여러 가지 타원은하 형성 모형을 검증하는 작업들이 진행되어왔다.

은하단이 아닌 환경에서 타원은하의 구상성단에 대한 연구는 많이 진행되지

않았다. 많지 않은 연구 중 대표적인 것이 Cho et al.(2012)에서 수행한 저밀도 환경(field)에서 발견된 10개의 조기형 은하의 구상성단계에 대한 연구이다. 이 연구에서는 허블 우주망원경(Hubble Space Telescope, 이하 HST)을 이용한 광학 영상 자료를 이용하여 구상성단을 찾았다. 구상성단의 색 정보(color information)을 이용하여 두 종족으로 나누어 살펴본 결과, void의 구상성단계가 은하단 환경의 구상성단계에 비해 금속 함유량이 적거나 나이가 젊다는 것이었다. 그러나 이 차이는 모은하의 질량에 주로 영향을 받고 모은하가 위치한 주변 환경 효과는 작다는 것이 주요 결론이었다. 하지만 측광 정보만을 이용하여 구상성단계의 특성을 논하기에는 한계가 있다. 따라서 환경에 따른 구상성단계의 평균 금속 함유량과 나이 등을 분광학적으로 조사해볼 필요가 있다.

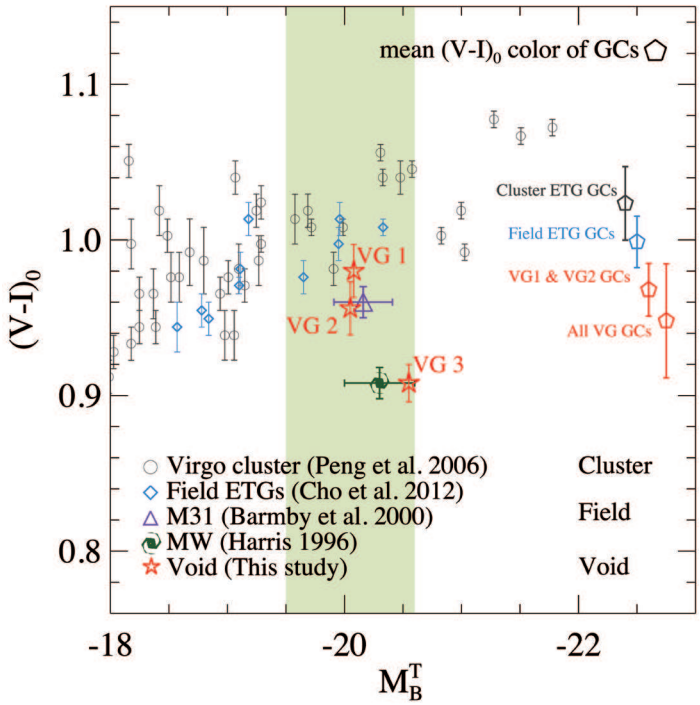

그림 1. 여러 은하의 구상성단계의 평균 V-I 색분포. 배경의 회색 원들은 처녀자리 은하단 조기형 은하(Peng et al. 2006), 하늘색 마름모는 저밀도 타원은하(Cho et al. 2012), 보라색 삼각형은 M31, 초록색 나선형 모양은 우리은하, 빨간 별은 void 은하의 구상성단계를 각각 나타낸 것이다. 저밀도 환경과 void의 구상성단계의 평균 색이 은하단 구상성단계에 비해 약간 파랗게 나타난다.

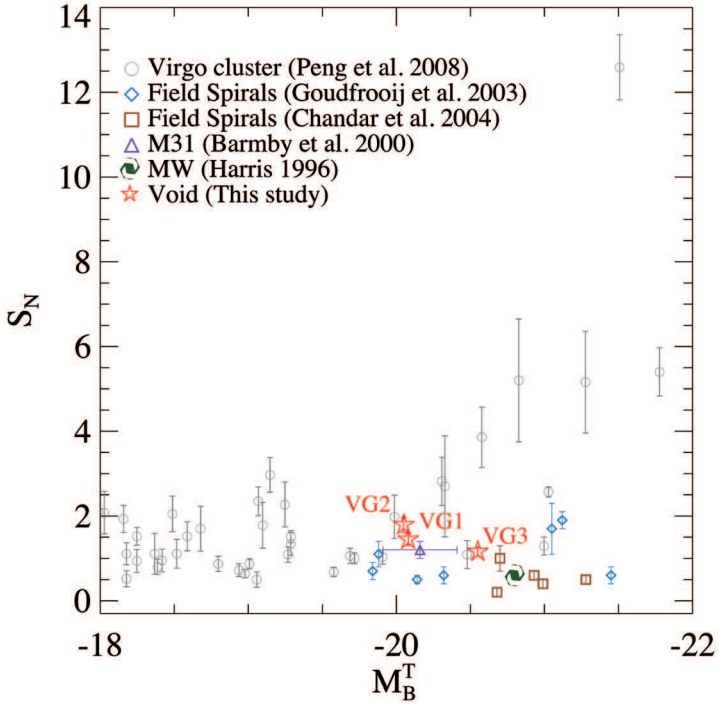

그림 2. 여러 은하의 구상성단계의 specific frequency 분포. 회색 원은 처녀자리 은하단 조기형 은하(Peng et al. 2008), 파란 마름모와 갈색 사각형은 저밀도 환경의 나선형 은하(Goudfrooij et al. 2003; Chandar et al. 2004), 보라색 삼각형은 M31, 초록색 나선형 모양은 우리은하, 빨간 별은 void 은하의 구상성단계의 specific frequency이다. 비슷한 밝기의 모은하를 갖는 경우 환경에 상관없이 specific frequency는 비슷하게 나타난다.

본 관측 제안팀은 void에 위치한 3개의 은하에 대한 HST 관측 자료를 이용하여 구상성단을 찾고 그 특성을 살펴보았다(Sohn et al. 2014, in preparation). 3개의 은하에서 색 정보를 이용하여 100여 개의 구상성단 후보를 찾을 수 있었다. Void 은하의 구상성단계의 평균 색을 보면 저밀도 환경이나 은하단 환경의 구상성단계에 비해 푸른 것으로 나타난다[그림 1]. 이는 void 환경에서 금속 부유 구상성단의 비율이 낮다는 것을 암시하는 결과다. 이 결과만 받아들인다면 void 환경에서 별 형성이 일어나는 병합에 의한 금속 부유 구상성단의 형성이 억제된 것처럼 보인다. 반면, 구상성단의 specific frequency의 분포를 보면 void 환경이 다른 환경과 크게 차이 나는 것 같지 않다[그림 2]. 상반되는 것처럼 보이는 두 결과를 제대로 해석하기 위해서는 구상성단들에 대한 분광관측을 수행하는 것

이 필요하다. 분광관측을 통해 구상성단들이 은하에 속하는지 확인하고(specific frequency도 계산 가능), 금속 함유량을 직접 측정해야 한다.

3. 연구의 내용 및 방법

1) 연구 대상

본 관측 과제는 void에 위치한 타원은하의 구상성단들을 대상으로 한다. 이를 위해서 측광관측을 통해 구상성단 후보가 미리 선택되어 있는 void 타원은하를 대상으로 삼는 것이 좋다. 현재까지 void 타원은하에 속한 구상성단 측광 자료는 거의 알려져 있지 않다. 앞서 언급한 Cho et al.(2012)은 저밀도 지역의 10개의 조기형 은하에 속한 I < 26등급의 구상성단계(각 은하당 50개 이상의 구상성단이 포함)에 대한 자료가 있다. 본 관측 제안팀에서 찾은 3개의 void 은하의 구상성단계는 각각 100여 개의 I < 27등급 밝기의 구상성단들로 이루어져 있다. 본 관측 과제에서는 위의 구상성단들을 대상으로 할 수 있다. 또는, 추후 고분해능 영상(high resolution imaging, 예를 들어 HST 관측 자료)을 통해 확보할 void 타원은하의 구상성단들을 관측하는 것이 좋다.

2) 사용 GMT 기기 및 관측 전략

GMT/GMACS를 이용하여 void 타원은하의 구상성단들에 대한 다천체 분광관측을 수행하고자 한다. Void의 타원은하에 속한 구상성단들 중 I~25등급의 성단들의 경우, GMACS를 이용하면 약 3시간의 노출로 관측하는 경우, 4000~10000Å에서 S/N (신호대잡음비) 5 정도의 스펙트럼을 얻을 수 있다. GMACS의 슬릿이 300개 정도라면 단 한 번의 관측으로 한 대상 은하의 구상성단들을 모두 관측할 수 있을 것이다. 이틀 정도의 관측(15시간)을 수행한다면 3-5개의 void 타원은하의 구상성단계에 대한 스펙트럼을 얻을 수 있을 것이다.

구상성단의 스펙트럼을 얻게 되면 각 성단들의 금속 함유량 및 나이를 추정할 것이다. 먼저 다양한 흡수선(G band, MgH, Mg2, Fe5270)의 세기와 금속 함유량과의 경험적 관계를 이용하여 각 구상성단들의 금속 함유량을 추정할 것이다. 또한 흡수선의 세기와 단순 별 종족 모형과의 비교를 통한 금속 함유량 및 나이 추

정법(Lick index grid method, Thomas et al. 2003, 2011)도 사용할 것이다. 기존의 관측기기를 이용한 경우 저분해능(R~500) 관측으로 위의 방법들을 적용하여 연구를 수행하였다. 즉, GMACS의 R~2000 분해능은 이 연구를 수행하기 충분한 것으로 생각한다.

3) 8m급 망원경을 사용한 사전 연구

본격적인 GMT 시대에 앞서 8m급 망원경을 이용하면 저밀도 환경의 조기형 은하에 속한 아주 밝은 구상성단에 대한 사전 조사를 수행할 수 있다. 현재까지 알려진 저밀도 환경의 구상성단들은 21 > I > 27등급으로 대체적으로 어둡다. 이들에 대한 분광 연구는 강력한 집광력을 가진 GMT를 이용했을 때 비로소 효과적으로 수행될 수 있다. 그러나 이들 중 I < 22등급의 아주 밝은 구상성단들에 대해서는 8m급 망원경으로 관측을 시도해볼 수 있다.

현재까지 구상성단이 검출된 저밀도 환경의 조기형 은하 중 NGC 3077, NGC 1172 등에서는 I < 22등급의 구상성단이 각각 40개 정도씩 발견된다. 이들 구상성단들이 좋은 사전 연구 대상이라고 할 수 있다. 8m급 망원경의 다천체 분광기를 이용하면, 3시간의 노출시간으로 이들 구상성단에 대해 신호대잡음비 3 이상의 분광 정보를 얻을 수 있다. 하룻밤의 관측으로 두 개의 은하에 속한 아주 밝은 구상성단들의 스펙트럼을 얻게 된다. 이 스펙트럼을 이용하여 앞서 언급한 방법과 마찬가지로 각 성단의 금속 함유량과 나이를 결정할 수 있다. 이들의 분포를 은하단에서 발견되는 구상성단과 비교함으로써 저밀도 환경의 구상성단의 기본적인 특성에 대해서 확인할 수 있을 것이다.

4. 연구 결과의 기대 성과

본 관측 과제는 void 환경에 위치한 타원은하의 구상성단에 대한 최초의 분광관측이다. 이 분광관측을 통해 void 구상성단들의 금속 함유량과 나이를 직접 측정할 수 있다. 구상성단의 두 종족 중 어떤 종족의 구상성단들이 void에서 더 많이 발견되는지를 확인할 수 있다. 구상성단의 두 종족의 기원은 오랫동안 광범위하게 연구되었음에도 아직 활발히 논의되고 있는 주제이다. 무엇보다도 void 구

상성단들의 금속 함유량이 두 종족으로 확연히 구분되는지부터 확인할 필요가 있다. 이를 바탕으로 구상성단의 형성 과정에 대한 연구를 수행할 것이다.

Void 구상성단이 두 종족으로 잘 나뉜다면, 각 종족의 개수와 비율로부터 void에 위치한 타원은하의 형성에 대해 이해할 수 있을 것이다. 관측 결과를 은하 형성 과정에 따른 구상성단계의 특성과 비교하여 void에서 타원은하의 형성 과정에 대해 연구할 것이다. 지금까지 void에 위치한 은하 형성에 대한 연구가 대부분 은하의 특성을 이용한 것과는 차별화되는 점이다. 또, 이 결과를 다른 환경의 은하 형성 과정과 비교함으로써, void 환경이 은하 형성에 어떠한 영향을 끼치는지 이해할 수 있다. 특히 지금까지 통계적인 연구를 바탕으로 void 환경의 은하들이 고밀도 환경에 비해 최근에 형성되었다고 알려져 있는데, 이를 구상성단 관측으로부터 확인해볼 수 있을 것이다.

5. 인용문헌

Barmby, P., Huchra, J. P., Brodie, J. P., et al. 2000, AJ, 119, 727
Chiboucas, K., Tully, R. B., Marzke, R. O., et al. 2011, ApJ, 737, 86
Chandar, R., Whitmore, B., & Lee, M. G. 2004, ApJ, 611, 220
Cho, J., Sharples, R. M., Blakeslee, J. P., et al. 2012, MNRAS, 422, 3591
Goudfrooij, P., Strader, J., Brenneman, L., et al. 2003, MNRAS, 343, 665
Harris, W. E. 1996, AJ, 112, 1487
Hoyle, F., Rojas, R. R., Vogeley, M. S., & Brinkmann, J. 2005, ApJ, 620, 618
Hoyle, F., Vogeley, M. S., & Pan, D. 2012, MNRAS, 426, 3041
Kreckel, K., Platen, E., Aragon-Calvo, M. A., et al. 2012, AJ, 144, 16
Lee, M. G., Park, H.~S., Hwang, H. S., et al. 2010, ApJ, 709, 1083
Peng, E.-W., Jordán, A., Côté, P., et al. 2006, ApJ, 639, 95
Peng, E.-W., Jordán, A., Côté, P., et al. 2008, ApJ, 681, 197
Sohn, J., Lee, M. G., Ko, Y., et al, 2014, in preparation
Thomas, D., Maraston, C., & Bender, R. 2003, MNRAS, 339, 897
Thomas, D., Maraston, C., & Johansson, J. 2011, MNRAS, 412, 2183
Tinker, J. L., & Conroy, C. 2009, ApJ, 691, 633
Wegner, G., & Grogin, N. A. 2008, AJ, 136, 1