분광 흡수선을 이용한 구상성단 중원소함량의 연구

● 김수영, 정철, 김학섭, 이상윤, 윤석진

연세대학교

초 록

구상성단계들의 색지수가 이중분포를 보이는 현상은 많은 외부은하들에서 흔하게 관측되며, 구상성단 및 모은하의 형성과 진화를 설명하려는 주요 여러 가지 이론들에 중요한 단서를 제공해왔다. 연세대학교 팀은 2006년 《사이언스》지 논문 게재를 통해 비선형 색-중원소함량 전환 과정(nonlinear color-to-metallicity conversion)이 구상성단 색 이중분포의 원인이라는 새로운 설명을 제시하였다. 이 이론은 허블 우주망원경 및 수바루 망원경의 구상성단계 측광관측 결과들을 성공적으로 재현해내었으며, 또한 M31 은하 구상성단들의 광학대 파장 영역의 분광자료들을 사용하여 검증할 수 있었다. 분광을 통해 직접적으로 측정할 수 있는 구상성단들의 중원소함량의 분포는 측광관측의 간접 측정 결과와 동반하여 구상성단의 이중 색분포의 기원에 대한 연구에 매우 중요한 정보들을 제공한다.

이를 위해 본 관측 제안팀은 GMT/GMACS를 사용하여 Fornax 은하단 중심의 거대 타원은하인 NGC 1399의 구상성단계에 대한 광학대 및 근적외선 파장구간의 양질의 분광자료를 얻고자 한다.

1. 과학 목적 및 요약

본 관측 제안팀은 광학대 파장구간 흡수선들인 릭 인덱스 값들(4000-6000Å) 근적외선 파장구간의 흡수선인 칼슘 분광 흡수선을 (CaT, 8498, 8542, and 8662Å) 이용하여 외부은하 구상성단들의 중원소함량 분포를 살펴보고자 한다.

구상성단 연구 분야에서 지난 이십여 년간 가장 중요하게 다루어져 왔던 주제들 중 하나는 구상성단계들의 색지수가 이중분포를 보이는 현상이다(예, Geisler, Lee, & Kim 1996; Kundu & Whitmore 2001; Larsen et al. 2001; Peng, Ford, & Freeman 2004; Harris et al. 2006; Peng et al. 2006; Lee et al. 2008; Jordán et al. 2009; Sinnott et al. 2010; Liu et al. 2011). 많은 외부은하들에서 흔하게 관측되는 이 현상은, 색과 중원소함량 간의 선형적 관계(linear relation)를 전제로 하며, 따라서 색의 이중분포는 즉 중원소함량의 이중분포라고 해석되어져 왔다. 이러한 해석을 바탕으로 구상성단 및 모은하의 형성과 진화를 설명하려는 주요 여러 가지 이론들이 제시되었다.

하지만 연세대학교 팀은 2006년 《사이언스》지 논문 게재를(Yoon et al. 2006) 시작으로 비선형 색-중원소함량 전환 과정(nonlinear color-to-metallicity conversion)이 구상성단 색 이중분포의 원인이라는 새로운 설명을 제시하였다. 이 이론을 사용하여 Yoon et al.(2011a), Yoon et al.(2011b), Yoon et al.(2013), Kim et al.(in prep)에서는 단일 중원소함량 분포에서도 이중 색분포를 만들어낼 수 있음을 이론적으로 보여주는 한편, 허블 우주망원경 및 수바루 망원경의 구상성단계 측광관측 결과들을 성공적으로 재현해내었다. 또한 M31 은하 구상성단들의 광학대 파장 영역의 분광자료들을(Caldwell 2009, 2011) 이용하여, 관측된 분광 흡수선들 세기의 이중분포가 비선형 중원소함량-분광흡수선 전환 과정을 (nonlinear metallicity-to-index conversion) 통해서 발생하는 것을 증명해 보였다(Kim et al. 2013).

기존의 이론과 대치되는 이러한 결과들은 구상성단과 은하 형성 이론에 새로운 시각을 제시하며, 더 많은 구상성단계들에 대해 통계적으로 유의미한 수와 높은 신호대잡음비를 가진 (signal-to-noise ratio, S/N) 분광자료를 얻어 성단들의 중원소함량을 측정하는 추가적인 검증을 필요로 한다.

중원소함량의 지표로 알려진 칼슘 흡수선은 주로 낱개 별들과(Battaglia et al. 2008) 은하(Foster et al. 2009), 그리고 우리은하 구상성단(Armandroff & Zinn 1988) 연구 분야에서 사용되어져 왔다. 최근 수년간은 외부은하 구상성단의 연구에도 점차 활용되면서, 기존의 광학대 파장 영역의 릭 인덱스(Lick index) 흡수선과 더불어 성단계 중원소함량에 중요한 정보를 제공할 것으로 기대되고 있다. 또한 본 연세대학교 연구팀은 현재 칼슘 흡수선과 성단 내 중원소함량 간의 관계를 설명하는 고유의 최신 모델을(Chung et al. in prep) 보유하고 있어 직접 관측한 분광자료를 사용해서 이론의 검증이 가능하다.

이를 위해 본 관측 제안팀은 GMT/GMACS를 사용하여 Fornax 은하단 중심의 거대 타원은하인 NGC 1399의 구상성단계에 대한 광학대 및 근적외선 파장구간의 분광자료를 얻고, 이로부터 구상성단 중원소함량 이중분포의 기원을 밝혀보고자 한다.

2. 연구 필요성, 배경 및 동향

1) 연구의 배경 및 필요성

우주에서 가장 오래된 천체들 중 하나인 구상성단들은 긴 시간 동안 주변의 환경과 상호작용하며 진화해왔다. 따라서 구상성단들을 통해 모은하의 진화 과정을 유추할 수 있음은 물론, 은하의 여러 가지 성질에 대한 이해를 돕는 데 귀중한 정보를 얻을 수 있다. 거의 동일한 나이와 화학조성비를 가진 단일 종족 항성들로 이루어진(Simple Stellar Population) 구상성단은 그 관측과 분석이 비교적 쉽다는 장점 또한 가지고 있다.

수많은 은하들의 구상성단계들에서 관측되는 색지수 분포의 양분 현상에 대한 해석은(예, Geisler, Lee, & Kim 1996; Kundu & Whitmore 2001; Larsen et al. 2001; Peng, Ford, & Freeman 2004; Harris et al. 2006; Peng et al. 2006; Lee et al.

2008; Jordán et al. 2009; Sinnott et al. 2010; Liu et al. 2011) 하나의 구상성단계가 두 개의 형성 기원이 다른 종족 그룹으로 이루어져 있다는 것이었다. 성단의 색지수와 중원소함량 값이 선형적인 관계를 가지고 있음을 전제로 하는 이 해석은 구상성단 및 모은하의 형성과 진화를 설명하려는 은하합병, 인 시추(in-situ), 그리고 유입(Ashman & Zepf 1992; Cote, Marzke, & West 1998; M. Lee 2003; Forbes, Brodie, & Grillmair 1997) 모델들의 중요한 바탕이 되었다.

하지만 연세대학교 팀은 2006년 구상성단 색 이중분포의 원인에 대한 새로운 해석을 제안하였다. 즉, 성단의 색과 중원소함량 분포는 비선형적인 관계를 가지고 있으며, 이로 인해 단일 분포를 가진 중원소함량 분포에서도 양분된 형태의 색분포를 얻을 수 있다는 것이었다. 이어지는 논문들에서는 이 새로운 이론을 이용하여 허블 우주망원경 및 수바루 망원경의 구상성단계 다중 색지수 측광관측 결과들을 성공적으로 재현하였다. 또한 M31 은하 구상성단들의 광학대 파장 영역의 MMT(Multi Mirror Telescope) 분광자료들을(Caldwell et al. 2009, 2011) 사용하여, 관측된 분광 흡수선 세기의 이중분포가 비선형 중원소함량-분광흡수선 전환 과정을(nonlinear metallicity-to-index conversion) 통해서 생성될 수 있다는 것을 보였다(Kim et al. 2013). Blakeslee et al.(2012)과 Chies-Santos et al.(2012)의 결과에 따르면, NGC 1399 및 처녀자리 은하단의 여러 구상성단계들이 광학대 파장 영역의 색지수들에서는(g-i, g-z) 양분된 분포를 가지더라도, 광학대와 근적외선 영역의 조합인 색지수들에서는(예, g-K, z-K, i-H) 다양한 형태의 색분포를 보인다.

이러한 결과들은 구상성단과 은하 형성 이론에 새로운 시각을 제시하며, 더 많은 구상성단계들에 대해 통계적으로 신뢰할 수 있는 양질의 분광자료를 얻어 성단들의 중원소함량을 측정하는 추가적인 검증을 필요로 한다. 분광자료의 분석을 통해 결정된 구상성단들의 나이와 중원소함량 값은 은하 형성의 기원과 진화를 유추하는 데 매우 중요한 단서들을 제공한다.

근적외선 파장 영역에서는 칼슘 흡수선이 중원소함량의 함수임이 알려져 있으며, 이 성질을 이용하여 낱개 별들과(Battaglia et al. 2008) 은하들(Foster et al. 2009), 그리고 우리은하 구상성단들의 연구에(Armandroff & Zinn 1988) 활용되어왔다. 최근에는 외부은하 구상성단의 중원소함량 분포 연구에도(Foster et al. 2010; Usher et al. 2012; Brodie et al. 2012) 점차 이용되고 있는 추세이고 기존의

광학대 파장 영역의 릭 인덱스 흡수선과 더불어 성단계 중원소함량에 중요한 정보를 제공할 것으로 기대되고 있다. GMT/GMACS는 광학대부터 근적외선 파장 영역까지 관측이 가능하며, 이 관측을 통해 얻어질 높은 신호대잡음비 분광자료를 사용하여 NGC 1399 구상성단들의 중원소함량을 정밀하게 측정하고, 또한 본 연세대학교 연구팀이 보유한 칼슘 흡수선과 성단 내 중원소함량 간의 관계를 정의하는 최신 모델과 함께 비교 분석을 통해 이론의 검증을 시도할 예정이다(Chung et al. in prep).

2) GMT의 필요성

구상성단의 분광관측은 결과의 유용함에 비해 시간과 비용 면에서 효율이 낮은 편이다. 현재 중원소함량에 대한 분석이 가능한 신호대잡음비를 가진 외부은하 구상성단계들의 분광자료는 그 수가 많지 않으며, 대부분의 경우 각 관측당 성단 개수는 50여 개 미만으로, 이는 은하 전체의 구상성단들을 대표하는 성질들을 유추하기에는 부족한 숫자이다.

이번 관측 제안서의 대상인 NGC 1399의 경우 포낙스 은하단의 중심부에 위치하고 있으며(~20Mpc) 이 거리에서 구상성단들은 매우 어둡기 때문에 기존의 8-10m급 망원경과 분광기를 사용하여도 충분한 개수의 성단에 대해 높은 신호대잡음비의 자료를 얻는 것에 제약이 있다.

GMT의 큰 구경과 뛰어난 집광력으로 훨씬 적은 시간으로도 턴오버 등급(turn-over magnitude) 아래의 어두운 성단들에 대해서도 신호대잡음비 50에 달하는 저분산 분광자료를 얻을 수 있다. GMACS는 근적외선까지 분광탐사가 가능한 기기로, 높은 신호대잡음비를 가진 릭 인덱스 흡수선들뿐만 아니라 중원소함량의 지표로 알려진 칼슘 흡수선까지 동시에 얻을 수 있어, 이를 바탕으로 신뢰할 수 있는 성단계의 중원소함량 값들을 구할 수 있다.

3) 국내외 연구 동향

외부은하 구상성단계들에 대해서는 현존하는 관측기기들의 한계로 인해, 가까운 거리의 대상들을(예, M31, NGC 5128) 제외하면 통계적으로 유의미한 개수의 분광자료들이 많지 않다. 최근 MMT/Hectospec으로 얻은 M31 구상성단들 280개에 대한 매우 우수한 분광자료를(Caldwell et al. 2009, 2011) 이용하여 중원

소함량 분포와 릭 인덱스 흡수선의 세기 값들의 관계가 비선형적이며, 따라서 이를 바탕으로 본 연구팀의 모델이 예측하는 대로 분광 흡수선들 세기의 이중분포가 재현될 수 있음을 보였다(그림 1, Kim et al. 2013).

Keck 망원경의 Deimos 분광기를 사용한 최근의 연구들에서는 뚜렷한 색지수 이중 분포를 가진 것으로 보고된 NGC 3115 은하 주변의 구상성단의 경우(Brodie et al. 2012) 칼슘 흡수선의 분포 역시 이중 분포를 보인다. NGC 1407 은하의 구상성단 분광 연구에서는(Foster et al. 2010) 흥미롭게도 관측된 색지수 분포와 칼슘 흡수선 분포가 전혀 다른 형태를 보인다[그림 2 가, 나]. 두 연구 결과 모두 이론적 혹은 실험적으로 얻어진 선형적인 칼슘 흡수선과 중원소함량 분포의 관계를 바탕으로 하고 있다.

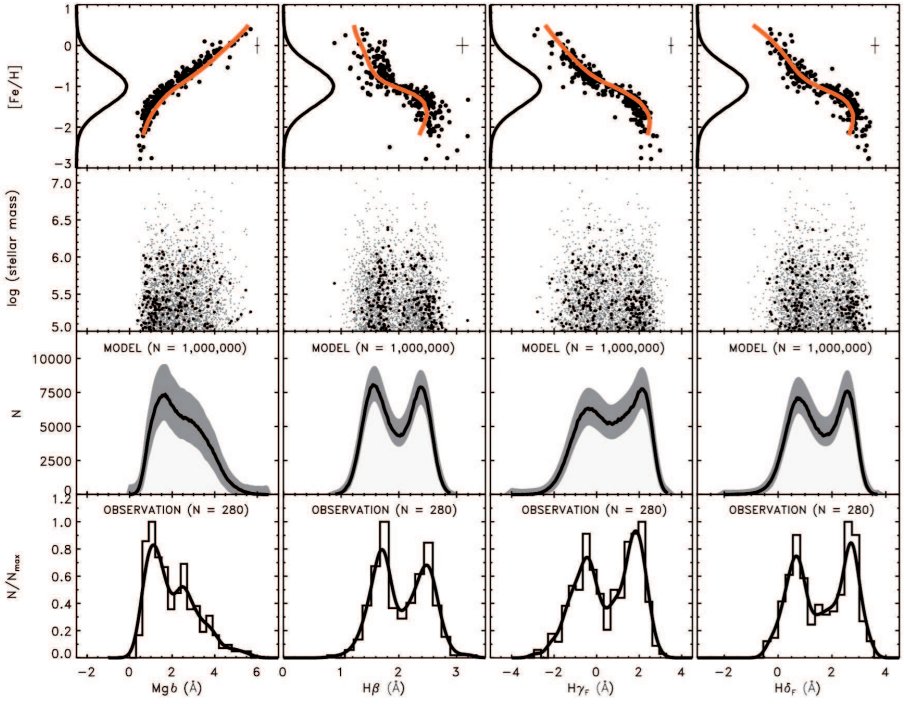

그림 1. 중원소함량의 지수[Fe/H]로는 임의의 단일분포 가우시안 분포를 사용하고, 모델 관계를 통해 분광 인덱스 분포로 전환하였다. (첫째 줄) 검은 점들은 280개의 M31 구상성단들의 분광관측점들이다. 오렌지 실선들은 연세 종족합성 모델들 중 나이가 12 Gyr인 구상성단들을 나타낸다. (둘째 줄) 각 흡수선들의 세기 분포를 stellar mass 값들에 대해 표시한 것으로 회색 점들은 5,000개의 임의로 골라진 모델 성단들이며, 검은 점들은 실제 관측점들이다. (셋째 줄) 모델을 통해 변환된 분광 흡수선들 세기의 분포. (넷째 줄) 관측 분광 흡수선들 세기의 분포.

본 연구팀이 보유한 최신의 단일종족 항성 모델에서 설명하는 칼슘 흡수선과 중원소함량 분포의 관계는 그림 3 (가)에서와 같이 중원소함량이 높아질수록 기울기가 급격해진다(Chung et al. in prep). 각각 나이가 10, 12, 그리고 14 Gyr인 모델(초록색, 빨간색, 그리고 파란색 실선)들이 예측하는 구상성단들은 함께 비교한 NGC 1407 구상성단 관측 자료의 경향을(Foster et al. 2010) 잘 재현하고 있다.

이와 같은 관계를 이용하여 단일 분포를 가진 중원소함량 분포에서 칼슘 흡수선으로 변환하게 되면 그림 3 (나)의 결과를 얻게 된다. 이 형태의 분포는 그림 2 (나)에서 본 NGC 1407의 관측 칼슘 흡수선 분포와 매우 흡사한 것을 알 수 있다.

3. 연구의 내용 및 방법

1) 연구 대상

많은 개수의 구상성단들을(~1,0000) 거느린 Fornax 은하단의 중심부에 위치한 거대 타원은하 NGC 1399를 주요 대상으로 선정하였다. 약 20Mpc의 거리에 위치한 NGC 1399의 구상성단들은 V-밴드에서 턴오버 등급이 약 23.8등급이며, 관측하고자 하는 GMT 필드에 대해 구상성단들의 광학대 및 근적외선 영역의 측광관측 자료들이 존재한다.

현존하는 기기들의 제약으로 인해 10~20여 개의 성단들에 대해 Keck 망원

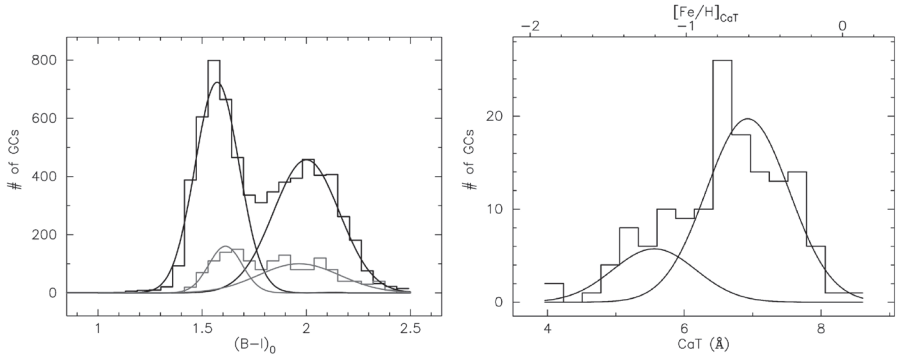

그림 2. (가) 허블 우주망원경과 수바루 망원경 측광 자료 분포(검은색)와 분광자료의 분포(회색)(Foster et al. 2010, 그림 3). 두 개의 봉우리(peaks)들은 각각 평균 $(B-I)_0=1.57$ and 2.00의 값을 가진다. (나) 관측 칼슘 흡수선의 분포(Foster et al. 2010, 그림 14).

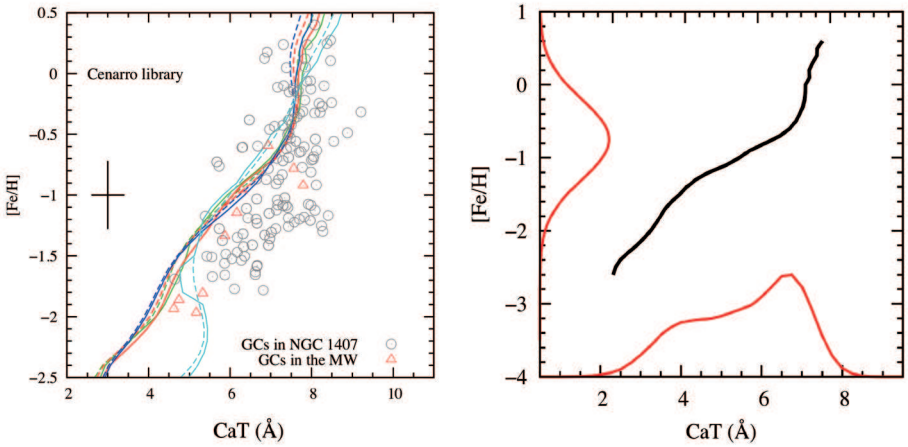

그림 3. (가) 연세 종족합성 모델이 예측하는 칼슘 흡수선과 중원소 함유량 분포의 관계들이 각 나이별로 표현되어 있다. 청록색, 초록색, 빨간색, 그리고 파란색 실선들은 각각 3, 10, 12, 14 Gyr의 나이를 나타내며, 실선의 경우 수평계열 별들이 모델에 포함된 경우이고 점선의 경우 포함되지 않은 예측들이다. (나) 단일분포의 중원소함량 분포에서 연세 모델을 이용해 칼슘 흡수선의 분포로 변환하였다. 정규분포를 가진다고 가정한 중원소함량 분포는 평균 중원소 값 −0.85와 0.55의 시그마 값을 가진다.

경의 LRIS 분광기를 사용한 분광관측 이후로는(Kissler-Patig et al. 1998, Forbes et al. 2001) 분광자료를 이용한 중원소함량 분석은 이루어지지 않았다.

2) 사용 GMT 기기 및 관측 전략

우리는 GMT/GMACS의 다중분광관측 모드를 사용하여 NGC 1399 주변의 약 300여 개의 구상성단들에 대해서 저분산 분광관측을 하고자 한다. GMT 노출시간 계산기에 따르면, 어두운 밤(dark night)을 가정하였을 때, V-밴드 23등급의 성단에 대하여 평균 1,800초의 노출로 신호대잡음비 50 정도의 분광자료를 얻는 것이 가능하다.

NGC 1399의 중심으로부터 20분 안쪽에 위치한 구상성단들 300개에 대하여 각각 30개씩의 슬릿을 가진 10개의 마스크를 사용하여 저분산 분광관측을 수행하게 되며, 따라서 총 노출시간은 약 5시간으로 예상된다.

4. 연구 결과의 기대 성과

GMT/GMACS 관측을 통해서 현재의 8-10m급 망원경과 분광 기기들로는 얻을 수 없는 NGC 1399 구상성단 300여 개에 대한 높은 신호대잡음비의 분광자료를 얻을 수 있다. 턴오버 등급 아래의 어두운 성단들까지 포함하게 될 이 관측 자료는 비교적 짧은 노출시간으로도 높은 신호대잡음비를 얻을 수 있고, 또한 광학대와 근적외선 파장범위의 동시 관측이 가능하여, 릭 인덱스 흡수선과 칼슘 흡수선들의 세기를 잴 수 있다. 이를 바탕으로 신뢰할 수 있는 나이와 중원소함량 분포 값들을 구할 수 있으며, 분광 흡수선과 중원소함량의 관계를 정밀하게 정의할 수 있다.

최근 유용한 중원소함량의 지표로 외부은하 구상성단계의 연구에 사용되고 있는 칼슘 분광 흡수선 세기 값들을 이용하여 중원소함량 분포와 칼슘 흡수선의 관계를 결정하고, 또한 본 연구팀이 보유한 최신의 모델과 비교 검증을 실시할 예정이다. 통계적으로 유의미한 양질의 분광자료들을 바탕으로 구한 성단계의 중원소함량 분포는 나아가 모은하 형성과 진화의 역사를 유추하는 데 중요한 단서를 제공할 것으로 기대된다.

5. 8m급 망원경을 이용한 사전 연구

최근 수년 동안 외부은하 구상성단들에 대한 근적외선 파장 영역의 측광관측이 점차 활발히 이루어지고 있다(e.g., Hempel, et al. 2007; Blakeslee et al. 2012; Chies-Santos et al. 2012). 적색거성렬 별들의 온도에 의해 결정되는 근적외선 영역의 색지수들은 중원소함량에 매우 민감하다는 특성을 가지고 있고, 이는 구상성단들의 중원소함량 연구의 또 하나의 중요한 수단으로 사용될 수 있다.

Blakeslee et al.(2012)은 NGC 1399의 구상성단들에 대해 HST/WFC3로 얻은 H-band(F160W) 자료를 이용, 광학대-근적외선 색지수들의 조합이 각각 다른 형태의 색분포들을 보이는 것을 보고하였다. 이는 현재까지 NGC 1399 구상성단들에 대해 얻어진 근적외선 관측 자료로는 최대이지만 비교적 좁은 영역에 대한 단일 밴드(H-band) 관측이라는 한계가 있다. 현존하는 남반구의 8-10m급 망

원경들에 탑재된 근적외선 측광 기기들을 사용한, 더 넓은 영역에 대하여 통계적으로 신뢰할 수 있는 구상성단의 적외선 영역 관측은 이미 본 연구팀이 보유하고 있는 NGC 1399 구상성단계의 양질의 광학대 관측데이터와(Kim et al. 2013) 함께 성단의 나이와 중원소함량 연구에 또 다른 중요한 역할을 할 것이다.

6. 인용문헌

Armandroff, T. E., & Zinn, R. 1988, AJ, 96, 92
Ashman, K. M., & Zepf, S. E. 1992, ApJ, 384, 50
Battaglia, G., Irwin, M., Tolstoy, E., et al. 2008, MNRAS, 383, 183
Blakeslee, J.-P., Cho, H., Peng, E.-W., et al. 2012, ApJ, 746, 88
Brodie J. P., Usher C., Conroy C., et al. 2012, ApJL, 759, L33
Caldwell, N., Harding, P., Morrison, H., et al. 2009, AJ, 137, 94
Caldwell, N., Schiavon, R., Morrison, H., et al. 2011, AJ, 141, 61
Chies-Santos, A. L., Larsen, S. S., Cantiello, M., et al. 2012, A&A, 539, 54
Chung et al. in prep
Côté, P., Marzke, R. O., & West, M. J. 1998, ApJ, 501, 554
Forbes, D. A., & Forte, J. C. 2001, MNRAS, 322, 257
Forbes, D. A., & Blakeslee, J.-P.2001, ApJL, 563, L143
Foster, C., Proctor, R. N., Forbes, D. A., et al. 2009, MNRAS, 400, 2135
Foster C., Forbes D. A., Proctor R. N., et al. 2010, AJ, 139, 1566
Geisler, D., Lee, M.-G., & Kim, E. 1996, AJ, 111, 1529
Harris, W. E., Whitmore, B. C., Karakla, D., et al. 2006, ApJ, 636, 90
Hempel, M., Zepf, S., Kundu, A., et al. 2007, ApJ, 661, 768
Jordán, A., Peng, E. W., Blakeslee, J. P., et al. 2009, ApJS, 180, 54
Kim, H.-S., Yoon, S.-J., Sohn, S. T., et al. 2013, ApJ, 763, 40
Kim, S., Yoon, S.-J., Chung, C., et al. 2013, ApJ, 768, 138
Kim et al. in prep
Kissler-Patig, M., Brodie, J., Schroder, L., et al. 1998, AJ, 115, 105
Kundu, A., & Whitmore, B. C. 2001, AJ, 121, 2950
Larsen, S. S., Brodie, J. P., Huchra, J. P., et al. 2001, AJ, 121, 2974
Lee, M.-G., Hwang, H.-S., Kim, S.-C., et al. 2008, ApJ, 674, 886
Liu, C., Peng, E. W., Jordán, A., et al. 2011, ApJ, 728, 116
Peng, E. W., Ford, H. C., & Freeman, K. C. 2004, ApJ, 602, 705
Peng, E. W., Jordán, A., Côté, P., et al. 2006, ApJ, 639, 95

Sinnott, B., Hou, A., Anderson, R., et al. 2010, AJ, 140, 2101
Usher, C., Forbes, D. A., Brodie, J. P., et al. 2012, MNRAS, 426, 1475
Yi, S. K., Peng, E., Ford, H., et al. 2004, MNRAS, 349, 1493
Yoon, S.-J., Sohn, S. T., Kim, H.-S., et al. 2013, ApJ, 768, 137
Yoon, S.-J., Lee, S.-Y., Blakeslee, J. P., et al. 2011a, ApJ, 743, 150
Yoon, S.-J., Sohn, S.-T., Lee, S.-Y., et al. 2011b, ApJ, 743, 149
Yoon, S.-J., Yi, S. K., & Lee, Y.-W. 2006, Sci, 311, 1129