# 청색낙오성에 대한 시계열 분광관측

● 류진혁, 이명균

서울대학교

## 초 록

우리는 GMT/GMACS를 이용하여 구상성단의 청색낙오성에 대해 시계열 분광관측을 수행하여 이들의 시선속도가 변하는지를 알아내려고 한다. 이로부터 청색낙오성의 쌍성계 비율 및 쌍성계의 성질을 파악하고, 청색낙오성의 기원과 진화에 대해 연구하려고 한다. 청색낙오성의 기원과 관련이 있는 직접적인 증거는 동반성의 유무인데, 현재의 망원경과 기기로는 이를 알기가 어렵기 때문이다. 대신 산소/탄소 고갈 또는 빠른 자전 등이 청색낙오성의 기원을 알 수 있는 간접적인 증거로 예측되었는데, 소수의 구상성단만 관측되어 있어서 아직 청색낙오성의 기원에 따른 구분은 이뤄지지 못하고 있다. GMT 관측을 통해 다른 기원을 가지는 청색낙오성들 사이의 분광학적인 차이점, 항성 진화의 양상, 또는 이들과 성단의 역학적 진화와의 관계 등 청색낙오성의 새로운 특성을 알게 될 것이다.

## 1. 과학 목적 및 요약

우리는 구상성단에 존재하고 있는 청색낙오성(Blue Straggler Stars, 이하 BSS)에 대해 시계열 분광관측을 수행하여 이 별들의 시선속도의 변화 여부를 알아내고자 한다. 이로부터 구상성단 내의 BSS의 쌍성계의 비율 및 쌍성계 자체의 성질(궤도 장반경, 공전주기, 질량비)을 파악하고, 더 나아가서는 BSS의 기원과 진화에 대해서 연구하려고 한다.

BSS는 쌍성계에서의 질량 전달(McCrea 1964)이나 별의 충돌 합병(Leonard 1989)으로부터 만들어진다고 생각되는데, 아직도 어떤 생성 기작이 어느 정도의 BSS를 만들어내는지, 그들의 진화 양상은 동일한지, 또는 BSS의 보편적인 특징이 존재하는지에 대해서는 잘 알려져 있지 않다. 가장 확실한 증거는 질량 전달에 의해 만들어진 BSS는 여전히 동반성을 가지고 있어야 한다는 것인데, 산개성단 NGC 188의 경우(Geller & Mathieu 2011)와 구상성단의 BSS 중 일부의 변광형이 W Ursae Major형이라는 것 외에는 아직 동반성의 유무를 알 수 있는 관측 자료가 없다.

따라서 우리는 GMT/GMACS를 사용하여 구상성단에 존재하는 많은 BSS에 대한 시계열 중분산(R > 3000) 분광관측을 제안하고자 한다. 이는 구상성단의 BSS에서의 쌍성계의 존재 여부 및 그 비율을 구할 수 있는 최초의 관측 자료가 될 것이다. 이렇게 해서 구한 결과는 BSS의 기원과 진화, 그리고 구상성단의 역학적 상태 등에 대해 매우 중요한 정보를 제공할 것이다. 또한 시계열 자료로부터 매우 높은 신호잡음비를 가지는 BSS의 분광자료를 얻을 수 있는데, 이로부터 개별 BSS의 분광학적 특성도 알아낼 수 있을 것이다.

## 2. 연구 필요성, 배경 및 동향

### 1) 연구의 배경 및 필요성

BSS는 성단의 역학적 진화의 산물로서, 성단을 역학적 관점에서 바라보는 데 유용한 도구이다 (Ferraro et al. 2012). BSS의 존재가 알려진 지는 오래되었으나 (Sandage 1953), 아직도 BSS의 물리적 성질에 대해서는 알려진 바가 적다. 이들

을 만들기 위해서는 질량 증가 과정이 있어야 하는데, 이를 설명하는 두 대표적인 가설이 쌍성계에서의 질량 전달과 별의 충돌 합병이다.

각 생성 기작을 직접적으로 대변하는 물리량은 쌍성계의 비율과 별의 충돌 빈도이다. 따라서 이와 관계가 있는 모성단의 물리량(질량, 밀도, 밝기, 속도분산 등)과 BSS의 특성들 사이에서 상관관계가 나타날 것이라 예상하였고, 그로부터 BSS의 서로 다른 생성 기작의 증거를 찾으려 하였다. 그러나 현재까지 알려진 BSS의 특성들은 모 구상성단의 대부분의 물리량과 강한 상관관계를 보이지 않고 있다. 다만 그림 1에서 보이듯, 구상성단의 중심부 반지름(core radius) 안에 존재하는 BSS의 개수와 중심부 질량(core mass)은 강한 상관관계를 보이고 있다(Knigge et al., 2009). 구상성단의 중심부 질량이 크다는 것은 중심부에서 별의 밀도가 높아서 쌍성계가 존재할 확률이 높다는 것이므로, 이 결과는 쌍성계의 질량 전달에 의해 BSS가 만들어진다는 주장을 간접적으로 뒷받침하고 있다. 한편 구상성단의 충돌 빈도와 BSS는 상관관계가 잘 보이지 않았으나, 최근 경험적으로 구상성단의 쌍성계 비율을 보정해준 이후에는 그림 2에서처럼 별의 충돌 빈도와 BSS의 개수 사이에서 약한 상관관계를 볼 수 있었다는 보고도 있다(Leigh et al., 2013).

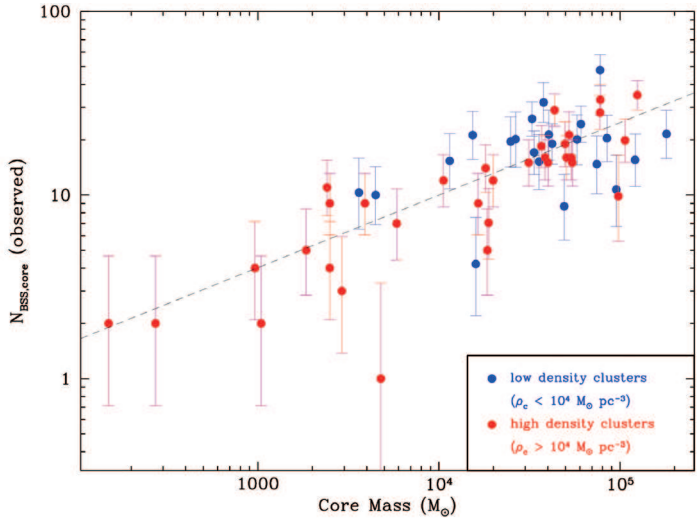


**그림 1.** 구상성단 중심부의 질량과 중심부 반지름 안에 있는 BSS의 개수 사이의 관계. 붉은 점은 중심부 질량 밀도가 $10^4 M_\odot pc^{-3}$보다 큰 성단을, 파란 점은 그보다 작은 성단을 나타낸다. 오차 범위는 68% 푸아송 신뢰 구간이다. 파선은 전체 자료에 대한 추세선이다(Knigge et al. 2009).

BSS의 개수는 모성단의 물리량과 어느 정도 상관관계가 보이는 반면, 생성 원인에 따른 BSS의 구분은 그렇지 못하다. Mapelli et al.(2006)은 BSS가 대체로 성단의 중심부와 외곽 지역에 많이 분포한다는 사실로부터 BSS의 생성 기작과 성단 내에서의 공간적 위치가 관련이 있을 것이라 주장하였으나, Ferraro et al.(2013)은 이것이 구상성단의 역학적 진화의 결과로 나타나는 것이라고 하였다. 결과적으로, 다른 생성 원인을 가지는 BSS를 서로 구분할 방법은 아직 발견되지 않았다.

최근 구상성단의 BSS에 대한 연구들은 충돌 합병도 발생하지만 그보다는 질량 전달에 의한 생성이 BSS를 만드는 주요 기작이라고 여긴다. 충돌 합병이 일어날 수 있는 환경은 구상성단의 중심부 같은 고밀도 지역으로 한정되는데, Knigge et al.(2009)에서는 그런 환경에서조차 별의 충돌 빈도와 BSS의 개수가 관련성이 없음을 보였기 때문이다. 실제로 쌍성계의 질량 전달이 주 생성 기작이라면, BSS의 쌍성비율은 같은 성단 내의 다른 별들에 비해 높아야 할 것이다. 이것을 확인하는 가장 강력한 방법은 시계열 분광관측을 통해 시선속도의 변화를 측정하는 것이다. 측광학적인 방법으로는 식쌍성 또는 접촉 쌍성 등에서 일어나는 변광을 관측하는 수밖에 없는데, 이것이 보이려면 두 별이 굉장히 가까운 곳에서 공전해야 하고 공전궤도면의 각도도 매우 제한적일 수밖에 없다. 반면 시선속도의 변화 측정은 분광분해능과 시간 분해능의 정도에 따라 그보다 더 많은 경우의 쌍성계를 발견해낼 수 있는 장점이 있다. 그러나 시계열 분광은 굉장히 많은 관측 시간을 필요로 하기 때문에 그동안은 거의 이루어지지 않았다.

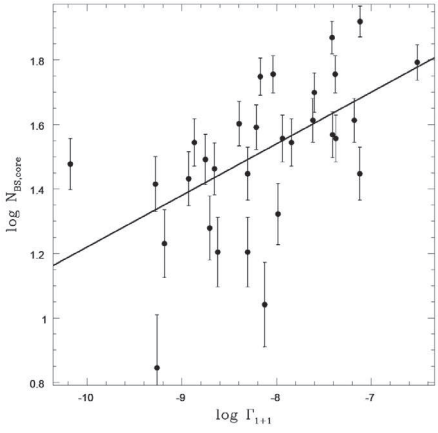


**그림 2.** 낱별-낱별 충돌 빈도와 중심부 반지름 안에 있는 BSS 개수 사이의 관계. 실선은 추세선이다(Leigh et al. 2013).

시계열 분광관측을 한 유일한 선행 연구는 Geller & Mathieu(2011)로, 이들은 WIYN, Dominion Astrophysical Observatory, Palomar에서 오랜 기간 동안 관측되었던 자료를 모아서 산개성단 NGC 188을 집중적으로 분석했다. 저자들은 NGC 188의

BSS가 대부분이 보이지 않는 동반성을 가지고 있음을 발견했다. 그림 3은 공전주기가 1,000일 정도에 이르는 12개 BSS의 동반성 질량 분포인데, 전형적인 탄소-산소 백색왜성의 질량인 0.5M⊙를 중심으로 몰려 있음을 볼 수 있다(검은 히스토그램). 이 분포는 별의 충돌이 일어난 이후 합병되지 않고 쌍성계가 형성되거나(점선), 삼중성계의 진화 결과로 동반성이 생겼을 때(빗금 히스토그램)와는 분포가 다르다. 이로부터, 이 성단의 BSS는 점근거성이 항성풍을 통해 질량을 동반성에 공급하여 BSS를 만들고 자신은 백색왜성으로 일생을 마감한 것으로 추정된다. 그러나 이것이 보편적인 BSS의 형성 과정인지 이 성단만의 특수한 경우인지는 아직 알 수 없다. Gosnell et al.(2014)은 이를 뒷받침하는 후속 연구로, NGC 188의 BSS 중 3개가 만들어진 지 얼마 되지 않은 백색왜성이 정말로 동반성으로 존재하고 있음을 자외선 관측을 통해 보여주었다.

구상성단의 BSS 가운데서 쌍성계를 찾아내고 그에 대해 많은 정보를 이끌어내기 위해서는 분광관측이 필요하다. GMACS를 이용하여 BSS의 시계열 분광관측을 수행한다면 BSS 중에서의 쌍성계의 비율 및 쌍성계 자체의 성질(궤도 장반경, 공전주기, 질량비) 등을 알아낼 수 있을 것이다. 이로부터 구상성단 및 다른 환경(산개성단 또는 왜소은하)에서의 BSS의 기원에 대하여 중요한 정보를 얻을 수 있을 것이다.

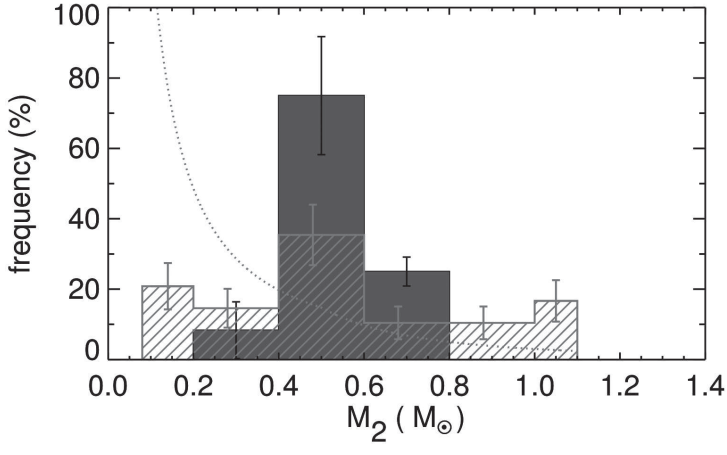


**그림 3.** NGC 188에 있는 BSS의 동반성의 질량 분포. 검은색 히스토그램이 관측 결과이다. 회색 빗금 히스토그램은 삼중성계가 70억 년을 진화하여 안쪽의 두 별이 합쳐졌을 때에, 바깥쪽에 있는 세 번째 별이 가지는 질량의 분포를 보여준다. 점선은 낱별의 최초질량함수(Initial Mass Function)이다(Geller & Mathieu 2011).

### 2) GMT의 필요성

지금까지의 BSS에 대한 분광관측은 산개성단 NGC 188과 몇 개의 구상성단에 대해서만 이루어진 바 있다. NGC 188의 BSS는 V < 15로, 구상성단의 BSS에 비해 매우 밝다. 또한 적위가 매우 높아서 시기에 관계없이 항상 관측이 가능하다는 장점도 가지고 있는 대상이다. 따라서 5m급 이하의 망원경을 오랫동안 사용하여 긴 기간 동안의 분광관측 자료를 모을 수가 있었다. 반면 가장 가까운 구상성단인 M4의 BSS는 그보다 1등급 정도 어둡고, 다른 구상성단의 BSS는 그보다도 더 어둡다. Lovisi et al.(2010)은 M4 BSS의 분광자료를 얻는 데 VLT로 5시간 노출을 주었다. 이 정도의 시간 분해능으로는 case A 질량 전달(주계열-주계열) 쌍성계를 거의 찾아낼 수 없고, case B(적색거성-주계열)나 case C(점근거성-주계열) 쌍성계는 발견 가능하나 현실적으로 그만큼의 망원경 사용 시간을 확보할 수가 없다. 이로 미루어볼 때 8m급 망원경으로는 시계열 분광관측을 시도하기는 매우 힘들다고 판단된다.

그러나 GMT는 비약적으로 관측의 효율을 증가시킬 수 있다. 큰 구경은 같은 시간 동안 더 어두운 천체를 볼 수 있게 해주고, 같은 밝기라면 더 짧은 시간을 사용해서 같은 품질의 자료를 얻을 수 있다. 그러면서도 많은 대상을 동시에 관측할 수 있어야 하는데, GMACS는 이러한 조건을 모두 만족한다. 대략적인 계산으로는 V = 19에서 20분 노출만으로도 신호잡음비가 20에 이르는 분광자료를 얻을 수 있는데, 이는 구상성단 BSS의 시선속도의 변화를 측정하기에는 낮지 않은 값이다. 또한 20분마다 분광자료를 얻어낼 수 있다는 것은 case A 쌍성계도 어렵지 않게 찾아낼 수 있다는 것을 의미한다.

### 3) 국내외 연구 동향

앞서 서술한 것과 같이, BSS에 대해 분광관측을 실시한 경우가 드물다. 대부분의 BSS는 구상성단에 있고 어두운 편이기 때문이다. Lovisi et al.(2010, 2012, 2013a, 2013b)은 네 개의 구상성단(M4, NGC 6397, M30, NGC 6752)의 BSS에 대해 분광학적 특성을 살펴본 적 있다. 이들은 이론적으로 예측되던 BSS의 특징들(C/O 고갈, 빠른 자전)을 확인하려고 했으나 각 성단마다 경향이 조금씩 다르다는 것만을 확인하였다.

Geller et al.(2009)부터 이어지는 산개성단 NGC 188의 BSS에 대한 분광 연구

는 속도 정보만을 이용해서 이 성단의 쌍성계의 비율과 관련 물리량들을 구하였다. 이 성단의 BSS의 쌍성계 비율은 76%에 이르고, 그중에서도 75%의 BSS의 공전주기가 1,000일 정도인 것을 보였다. 다만 이러한 특성이 이 성단의 고유한 것인지 일반적인 것인지는 아직 알려지지 않았는데, 관측 결과를 비교할 만한 BSS 분광관측이 존재하지 않기 때문이다.

#### 4) 8m급 망원경을 사용해서 GMT 완성 전에 수행 가능한 사전 연구

질량 전달을 통해 만들어진 BSS에서는 탄소와 산소의 고갈 현상이 나타날 것이라고 예측되었다(Sarna & De Greve 1996). 반대로 충돌 합병을 통해 만들어진 BSS의 경우에는 아무런 화학적 이상 현상이 나타나지 않을 것이라는 예측이 있다(Lombardi et al. 1995). 한편, 굉장히 빠른 자전 속도를 가지는 BSS들이 가끔 발견되는데, 이는 질량 증가 과정에서 각운동량이 같이 증가했기 때문에 나타나는 현상으로 보인다. 탄소/산소 고갈과 빠른 자전은 BSS의 기원을 구분할 수 있는 특성으로 생각되었으나, Lovisi et al.(2010, 2012, 2013a, 2013b)은 적은 수의 BSS만이 이러한 모습을 보이는 것으로 보아 BSS 생성 시의 일시적인 현상이라고 생각하였다.

우리는 더 많은 수의 구상성단에 대해, 8m급 망원경으로 근적외선 영역에서 분광관측을 수행하여 이 탄소/산소 고갈과 빠른 자전을 추가로 확인해볼 수 있을 것이다. 근적외선 영역에는 사용할 수 있는 흡수선이 가시광 영역에 비해 굉장히 많으므로, 이전 연구에 비해서 분광분해능이 떨어지더라도 비슷한 수준의 정밀도를 가질 수 있을 것으로 예상할 수 있다. 또한, 근적외선 영역에서는 적응광학(Adaptive Optics)을 사용할 수 있다는 또 하나의 장점이 있다. 적응 광학을 통해 공간 분해능을 향상시키면 성단 중심부에 존재하는 BSS에 대한 분광이 가능해진다. 이러한 조건을 만족하는 8m급 망원경과 관측기기로는 Gemini south의 Flamingos-2가 있다. 이 근적외선 다천체분광기의 분광분해능은 R~3000 정도로, Lovisi et al.이 사용했던 기기인 VLT의 FLAMES와 GIRAFFE 등의 분해능인 R=10000~18000에 비하면 1/4~1/5에 지나지 않는다. 그러나 굉장히 넓은 파장 대역에서 많은 수의 흡수선들을 측정할 수 있으므로, 소수의 흡수선만을 사용한 기존의 분석에 비할 수 있을 정도의 정밀도를 기대할 수 있다.

주 관측 대상은 FG dwarf(BSS)와 K giant(RGB)가 된다. 적색거성들은 성단

을 대변하는 기준 역할을 할 것인데, $^{12}$CO 흡수선이 2.36~2.45μm 영역에 존재하고 있어서 이로부터 성단의 탄소/산소 함량을 정할 수 있을 것이다. 반면 FG dwarf의 경우 온도가 높아서 $^{12}$CO 흡수선은 기대할 수 없으나, 대신 J 필터 영역에 C I 흡수선이 많이 존재하고 있으며 H 필터 영역에는 그보다 다소 약하지만 O I 흡수선이 존재하고 있다.

이 흡수선들의 세기와 선폭을 측정하면 BSS에서의 탄소/산소 고갈과 빠른 자전이 어느 정도의 빈도로 나타나는지를 알 수 있다. 이 결과가 추후 GMT로 수행할 BSS의 시계열 분광관측에서 구해질 BSS의 쌍성계 비율과 합쳐지면, 해당 현상의 일시성 및 BSS의 기원을 알아낼 수 있는 도구로서 유효한지를 알 수 있게 될 것이다. 또한 이 사전 연구는 근적외선 영역에서 BSS를 처음으로 분광하는 시도로써, BSS의 근적외선 특성에 대해 파악할 수 있는 기회가 될 것이다.

## 3. 연구의 내용 및 방법

### 1) 연구 대상

관측 대상이 갖춰야 할 조건은 다음과 같다.

(1) 남반구에 위치한 구상성단이어야 한다. GMT가 남반구에 위치하고 있기 때문이다.

(2) 크기가 지나치게 커서는 안 된다. GMACS의 시야에는 너무 큰 구상성단(예:ω Cen)은 담기가 힘들기 때문이다.

(3) 색등급도로부터 BSS를 선정하는 것이 힘들지 않아야 한다. 배경별에 의한 오염이 심하거나, 다중종족이 복잡하게 분포해 있는 구상성단은 본 관측에 적절하지 않다.

(4) BSS의 개수가 너무 적으면 안 된다. (예:20개 이하) 또한 관측 가능한 BSS의 수가 많을수록 좋다. BSS가 관측기기의 시야를 벗어나거나, 성단 중심부에서의 별의 겹침 때문에 사용하기가 힘든 경우가 적어야 한다.

HST ACS 구상성단 목록(Sarajedini et al. 2007)으로부터 조사해본 결과, 이 조건들을 만족하는 구상성단은 약 10여 개이다. 추후 LSST 자료를 이용한다면 관측 후보군을 더 좁힐 수 있을 것이다.

### 2) 사용 GMT 기기 및 관측 전략

본 관측에는 다중분광관측이 가능한 GMACS가 적합하다. 관측 대상이 될 구상성단의 half-light 반지름은 GMACS의 시야보다 충분히 작으므로, 가능한 모든 BSS들을 한 mask 안에 담을 수 있다. 앞에서 언급한 대로라면 V=19인 별을 20분 노출하면 신호잡음비 20 정도의 자료를 얻을 수 있는데, 사실 이 등급은 구상성단의 BSS 중 가장 어두운 축에 들어가는 것이다. 관측하려는 BSS는 대체로 이보다 밝으므로 이 정도의 신호잡음비로 시선속도를 구하는 데에는 전혀 문제가 없다. 따라서 20분을 시계열 관측의 단위로 삼아서 BSS와 대조군(거성, 준거성, 또는 주계열성)을 번갈아가며 관측을 하려 한다.

20분 단위의 관측은 case A와 B 질량전달 쌍성계를 탐지하는 데에 적합한 시간 분해능이다. 구상성단 같은 고밀도 지역에서는 가까이 붙어 있는 쌍성이 생존에 더 유리하고, NGC 188과 같이 case C 질량 전달이 일어날 수 있는 긴 장반경을 가진 쌍성계가 안정적으로 유지될 것으로 보기는 쉽지 않기 때문이다. Case A나 B 쌍성계라면, 예측되는 공전주기는 짧은 경우 수 시간에서 길어야 수십 일이다. 따라서 이러한 가까운 쌍성계를 찾기 위해서는 여러 날에 걸쳐서 하루에 1~2시간씩 관측을 해야 할 것이다.

분광분해능은 가능한 한 높을수록 좋다. 사용할 수 있는 선이 많고 신호잡음비가 높을수록 속도 측정을 정밀하게 할 수 있기 때문이다. GMACS의 최고 분해능은 3000 정도인데, 본 관측의 주목적은 속도 측정이므로 파장 대역은 중요하지 않다. Blue channel 쪽에서는 사용할 수 있는 선이 red channel에 비해 적은데, 만약 red channel만을 사용하는 경우에 한해 분광분해능을 더욱 높일 수 있다면 그 방법을 선택하려 한다. Red channel이 근적외선대로 확장된다면 속도 측정에 사용할 수 있는 선은 더욱 많아지므로 더 정밀한 측정이 가능해질 것이다.

## 4. 연구 결과의 기대 성과

본 관측은 BSS에 대한 분광관측 자료 자체가 적은 상황에서 시계열 분광자료를 얻어내려고 한다. 8m급 망원경에서는 불가능했던 관측을 GMT의 집광력을 이용해 가능케 하려는 것이다. 이 관측으로부터 말하고 싶은 것은 구상성단 BSS

의 쌍성계 비율로, 이는 구상성단 BSS의 기원을 추적할 수 있는 최초의 직접적인 증거가 될 것이다. 또한 이 자료는 높은 신호잡음비를 갖는 분광자료로도 쓸 수 있는데, 이로부터 지금은 측광학적으로 분류가 되지 않는 다른 기원을 가지는 BSS가 서로 간에 분광학적인 차이점이 있는지, 항성 진화의 양상은 어떠한지, 또는 성단의 역학적 진화와는 어떠한 관계를 가지는지 등 지금까지 알려지지 않은 BSS에 대한 여러 정보를 새로이 제공해줄 것이다.

## 5. 인용문헌


Ferraro, F. R., Lanzoni, B., Dalessandro, E., et al., 2012, Nature, 492, 393

Geller, A. M., Mathieu, R. D., Harris, H. C., & McClure, R. D., 2009, AJ, 137, 3743

Geller, A. M., & Mathieu, R. D., 2011, Nature, 478, 356

Gosnell, N. M., Mathieu, R. D., Geller, A. M., et al., 2014, ApJL, 783, L8

Knigge, C., Leigh, N., & Sills, A., 2009, Nature, 457, 288,

Leigh, N., Knigge, C., Sills, A., et al., 2013, MNRAS, 428, 897,

Leonard, P. J. T., 1989, AJ, 98, 217

Lombardi, J. C. Jr., Rasio, F. A., & Shapiro, S. L., 1995, ApJ, 445, L117

Lovisi, L., Mucciarelli, A., Ferraro, F. R., et al., 2010, ApJL, 719, L121

Lovisi, L., Mucciarelli, A., Lanzoni, B., et al., 2012, ApJ, 754, 91

Lovisi, L., Mucciarelli, A., Lanzoni, B., et al., 2013, ApJ, 772, 148

Lovisi, L., Mucciarelli, A., Dalessandro, E., Ferraro, F. R., & Lanzoni, B., 2013, ApJ, 778, 64

Mapelli, M., Sigurdsson, S., Ferraro, F. R., et al., 2006, MNRAS, 373, 361

McCrea, W. H., 1964, MNRAS, 128, 335

Sandage, A. R., 1953, AJ, 58, 61

Sarajedini, A., Bedin, L. R., Chaboyer, B., et al., 2007, AJ, 133, 1658

Sarna, M. J., & De Greve, J.-P., 1996, QJRAS, 37, 11