

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Fisica e Astronomia “Galileo Galilei”

Corso di Laurea in Astronomia

Tesi di Laurea

STELLE DI MASSA MOLTO RIDOTTA NEGLI AMMASSI GLOBULARI

Relatore
Prof. Antonino Milone

Laureanda
Michela Posenato

Correlatore
Dr. Emanuele Bortolan

Anno Accademico 2022/2023

Indice

Abstract	iii
1 Introduzione	1
2 Evidenze osservative	3
2.1 Secondo parametro del ramo orizzontale	3
2.2 Analisi dei diagrammi colore magnitudine	4
2.2.1 Popolazioni stellari multiple in 47 Tucanae	5
3 Teorie sull'origine delle popolazioni stellari multiple	9
3.1 Modelli multigenerazionali	9
3.1.1 Scenario del ramo gigante asintotico	9
3.1.2 Scenario con stelle massicce a rapida rotazione	10
3.1.3 Scenario di sistemi binari massivi in interazione	10
3.1.4 Evento esteso di formazione di ammassi	10
3.2 Modelli di formazione simultanea	11
3.2.1 Scenario di accrescimento primordiale del disco	11
3.2.2 Scenario della separazione turbolenta degli elementi	11
3.2.3 Scenario della stella super massiva	11
3.2.4 Scenario dell'ordine inverso della popolazione	11
4 Stelle di massa molto ridotta	13
4.1 Predizioni teoriche	13
4.1.1 Conclusioni dello studio	15
5 Analisi di fotometria JWST di 47 Tucanae	17

Abstract

Nella presente tesi analizzo la tematica delle popolazioni multiple all'interno degli ammassi globulari. Dopo aver illustrato l'argomento in generale, discuto le varie evidenze osservative che hanno portato gli astronomi dapprima a sospettare della presenza di popolazioni stellari diverse, e poi ad identificarle e caratterizzarle con grande dettaglio tra le stelle più massicce della maggior parte degli ammassi globulari galattici. Discuterò i vari scenari evolutivi che sono stati proposti per spiegare l'origine degli ammassi globulari che osserviamo oggi e le loro popolazioni multiple. Alcuni scenari predicono che gli ammassi globulari primordiali siano stati di gran lunga più massicci di adesso e che abbiano perduto oltre il 90% delle loro stelle. Di conseguenza, avrebbero dato un contributo significativo alla formazione dell'alone Galattico e, probabilmente, alla reionizzazione dell'Universo.

In particolare, mi soffermo sulle stelle di piccola massa, tra cui le nane di tipo spettrale M e le nane brune, che sono ancora poco studiate negli ammassi globulari a causa di limiti strumentali. L'importanza di queste stelle di piccola massa, nel contesto delle popolazioni multiple, è legata al fatto che tramite il confronto tra le stelle di piccola e grande massa è possibile discriminare gli scenari di formazione degli ammassi globulari e capire il ruolo che essi hanno avuto nella formazione dell'alone della Via Lattea. Illustrerò i risultati di lavori teorici che mostrano come sia possibile identificare le popolazioni stellari multiple tra le stelle di piccola massa a partire da osservazioni condotte con il telescopio spaziale James Webb. Infine, analizzo un diagramma colore-magnitudine ottenuto da recenti immagini profonde della camera NIRCam di James Webb Space Telescope e discuto i risultati preliminari di questa analisi nel contesto della formazione delle popolazioni multiple.

Capitolo 1

Introduzione

Gli ammassi globulari sono oggetti sferoidali caratterizzati da oltre 10^5 stelle e sono comunemente osservati negli aloni delle galassie. L'origine di questi oggetti è quindi connessa alle primissime fasi di assemblaggio delle galassie e questo li rende tra gli oggetti più antichi presenti nel nostro universo e ci permettono così di dare un limite inferiore all'età di quest'ultimo. Per molto tempo sono stati considerati degli oggetti molto semplici, costituiti da una singola popolazione di stelle con la stessa composizione chimica, prodotte in una singola fase di formazione stellare e con cinematica simile e per questo motivo sono stati usati come campione per stimare età e distanze degli oggetti che li ospitavano. Gli ammassi globulari includono in realtà popolazioni stellari multiple e la realizzazione che questi oggetti sono in realtà molto più complessi di ciò che si credeva fu resa possibile da diversi dati osservativi. I diversi ammassi globulari infatti presentano sempre la stessa struttura base, ciò che cambia sono le popolazioni arricchite in He, N e Na e popolazioni povere di O e C. Queste diverse composizioni chimiche che caratterizzano gli ammassi si traducono in diagrammi colore-magnitudine decisamente complessi. Queste variazioni di abbondanza da stella a stella all'interno degli ammassi sono appunto conosciute come popolazioni multiple ed attualmente non si è ancora in grado di comprenderne completamente l'origine.

Lo studio degli ammassi globulari e delle loro popolazioni multiple ci permette di ricavare informazioni sulle primissime fasi del nostro Universo e sulle sue caratteristiche a quel tempo. Come è stato detto gli ammassi globulari sono composti da centinaia di migliaia, a volte addirittura miliardi, di stelle che sono tra le più antiche nel nostro Universo e che si formarono pochi migliaia di anni dopo il Big Bang, al tempo in cui si verificò la re-ionizzazione dell'Universo. Lo studio degli ammassi globulari ci consente quindi di comprendere meglio l'epoca alla quale questi oggetti si formarono in cui l'Universo aveva poche centinaia di migliaia di anni. Ci permettono inoltre di far luce sulla formazione delle galassie, in particolare il loro studio ci consente di comprendere se essi siano stati i mattoni dai quali si sono formati poi gli aloni galattici.

Dopo questa introduzione sugli ammassi globulari e l'importanza del loro studio, nel capitolo 2 sono presentate le diverse evidenze osservative relative alle popolazioni multiple all'interno degli ammassi, con particolare attenzione all'ammasso 47 Tucanae. Il capitolo 3 invece illustra le diverse teorie proposte per la formazione degli ammassi globulari e delle popolazioni multiple, mentre il capitolo 4 si focalizza sulle stelle di massa molto ridotta, fino ad oggi praticamente inesplorate, e sul nuovo studio di Gerasimov et al.[44] rivolto proprio a queste. Infine nel capitolo 5 è presentato un diagramma colore-magnitudine dai dati recentissimi ottenuti grazie alla camera NIRCam di James Webb Space Telescope e una discussione dei risultati preliminari di questa analisi.

Capitolo 2

Evidenze osservative

Negli anni sessanta del secolo scorso, gli astronomi e le astronome hanno scoperto che le stelle giganti rosse con la stessa magnitudine mostravano delle variazioni nell'intensità delle righe di assorbimento di molecole come CH, CN, NH a causa delle diverse abbondanze di C e N nelle varie stelle. In particolare, è stato trovato che le molecole del CN e NH anti-correlano con quelle del CH: questo implica che stelle che presentano righe molto intense di CN sono anche caratterizzate da righe deboli di CH. In aggiunta alle stelle con composizione chimica anomala di C ed N, si è visto che gli ammassi globulari contengono anche stelle che sono caratterizzate dagli stessi andamenti di abbondanza osservati nelle stelle di campo con la stessa metallicità.

Questo ha portato gli astronomi a supporre che gli ammassi globulari siano in realtà costituiti da diverse popolazioni stellari: una popolazione con una composizione chimica simile alle stelle di campo e una seconda popolazione, tipica solamente degli ammassi, che presenta delle abbondanze chimiche anomale. Inizialmente si credette che la presenza delle popolazioni multiple all'interno degli ammassi si potesse spiegare con l'evoluzione stellare. Questa però non è in accordo con le osservazioni perché non è in grado di spiegare le anomalie nelle abbondanze chimiche delle stelle appena entrate nella fase di sequenza principale e nella fase di Turn-off. Le anomalie chimiche non si sono quindi originate durante le fasi evolutive delle stelle ma devono essere state prodotte da qualche altra parte, potenzialmente all'interno delle stelle più massive.

Oggi sappiamo che la maggior parte degli ammassi globulari ospita due o più popolazioni formate da stelle con circa la stessa metallicità ma diverso contenuto di alcuni elementi leggeri, tra cui He, C, N, O, Al, Na ed in alcuni casi anche Mg, Si e K. Queste popolazioni stellari multiple si osservano in tutti gli ammassi globulari della Via Lattea la cui massa iniziale supera le $\sim 10^5 M_{\odot}$ (Gratton et al. [3, 4, 5], Bastian & Lardo [6], Milone & Marino [1]). Le abbondanze di elementi leggeri all'interno degli ammassi globulari seguono degli andamenti ben definiti. Tra questi, le anti-correlazioni (figura 2.1) tra C ed O, Na ed O, Mg ed Al sono le più studiate (Marino et al. [7], Carretta et al. [8]). L'estensione di queste anti-correlazioni, insieme alle variazioni massime di He, N, ed O correlano con la massa dell'ammasso globulare (Milone et al. [9], Lagioia et al. [10]).

La variazione dell'andamento delle abbondanze è difficilmente associata alla variazione da stella a stella degli elementi pesanti. Infatti, oltre l'80% degli ammassi globulari Galattici ha un contenuto omogeneo di elementi pesanti, ma variazioni significative degli elementi leggeri. Inoltre, la composizione chimica della maggior parte delle stelle degli ammassi globulari non è osservata in nessun'altra struttura nota. Questo implica la presenza di un meccanismo che opera solamente negli ammassi globulari in grado di spiegare i dati osservativi.

2.1 Secondo parametro del ramo orizzontale

Diversi studi di evoluzione stellare hanno mostrato che fissata l'abbondanza di elio e l'età dell'ammasso, le stelle ricche di metalli al picco del ramo gigante rosso risultano essere più massive e più fredde delle stelle che presentano una metallicità più bassa. Proprio per questo motivo la metallicità è considerata il primo parametro che influenza la morfologia dei rami orizzontali nei diagrammi colore-magnitudine degli ammassi globulari. Gli ammassi più ricchi di metalli presentano dei rami orizzontali rossi, mentre quelli

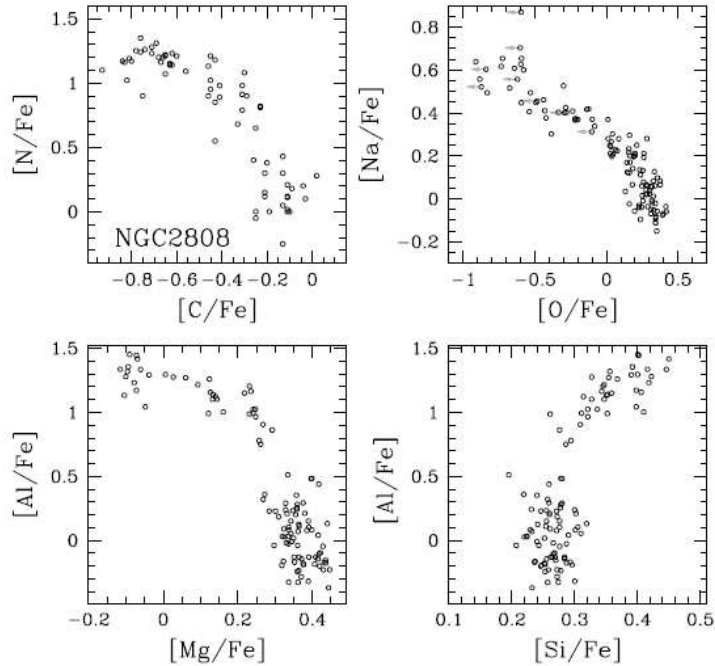


Figura 2.1: Anti-correlazione C-N e Na-O, e correlazione Al-Si per stelle del ramo delle giganti nell'ammasso globulare NGC 2808.

poveri di metalli generalmente hanno rami orizzontali blu. Il problema del secondo parametro sorge in quanto ammassi globulari con metallicità comparabili mostrano rami orizzontali con morfologie diverse (fig. 2.2). Diversi sono i candidati che sono stati proposti negli anni per rappresentare questo secondo parametro: la rotazione stellare, l'età dell'ammasso, l'abbondanza di elio, ma nessuno di questi è in grado di riprodurre completamente le osservazioni [11].

L'ammasso M4, che è tra i più studiati per quanto riguarda le popolazioni multiple, presenta infatti un andamento bimodale nel colore delle stelle di ramo orizzontale, ed è ben popolato da entrambi i lati della fascia di instabilità delle RR Lirae. Analisi spettroscopiche ad alta risoluzione delle stelle giganti rosse hanno rivelato la presenza di due popolazioni stellari distinte che occupano il ramo gigante rosso con diverse abbondanze di ossigeno e sodio [29]. Grazie allo spettrografo FLAMES del Very-Large Telescope (VLT) si è scoperto che la parte blu del ramo orizzontale è composta solo da stelle ricche di Na e povere di O, mentre la parte rossa presenta la stessa composizione delle stelle di prima popolazione.

Inizialmente si credette che la posizione distinta delle due popolazioni lungo il ramo orizzontale si potesse spiegare solamente con le diverse abbondanze di elio. Le stelle ricche di He infatti evolvono più velocemente delle stelle più povere. Negli ammassi globulari monometallici, per un fissato tasso di perdita di massa delle giganti rosse e una determinata età dell'ammasso, vengono prodotte stelle meno massive, ma con temperature più alte. Come conseguenza di questo, le stelle di prima generazione popolerebbero la parte rossa del ramo orizzontale, mentre quelle di seconda, che sono più ricche di elio, popolerebbero la parte più blu. Queste predizioni teoriche sembrano supportate dalle forti correlazioni tra l'estensione dei colori del ramo orizzontale e la variazione interna massima di He. Freeman e Norris [13] suggerirono la necessità di almeno due parametri per riprodurre l'andamento dei rami orizzontali: uno di questi dovrebbe essere un parametro globale che varia da un ammasso all'altro, mentre l'altro dovrebbe essere un parametro non globale in grado di variare con l'ammasso. Studi recenti mostrano che sia la metallicità che l'età dell'ammasso correlano con la separazione dei colori tra la parte più rossa del ramo orizzontale e il ramo gigante rosso, mentre le variazioni di elio e il tasso di perdita di massa potrebbero essere i parametri non globali.

2.2 Analisi dei diagrammi colore magnitudine

Per molto tempo la spettroscopia è stata la tecnica principale per analizzare le popolazioni multiple negli ammassi globulari. Negli ultimi due decenni, la cooperazione tra fotometria e spettroscopia ha avuto un ruolo fondamentale nell'esplorazione e lo studio di queste diverse popolazioni stellari. Sono stati introdotti nuovi strumenti, i quali si basano su tecniche fotometriche multibanda che coinvolgono anche la sintesi

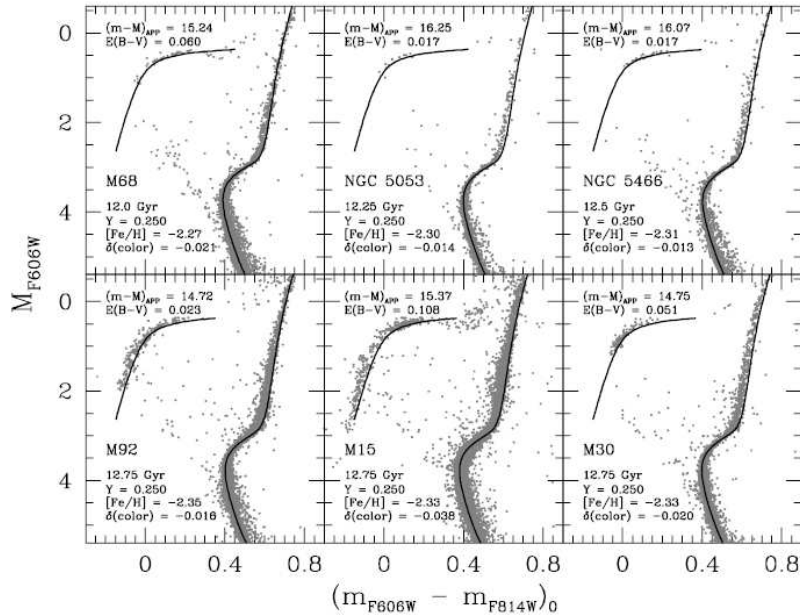


Figura 2.2: Diagrammi colore-magnitudine di sei diversi ammassi globulari con $[\text{Fe}/\text{H}] < -2.2$, come si può notare nonostante le metallicità comparabili dei diversi ammassi la morfologia del ramo orizzontale risulta diversa.

degli spettri e la deduzione delle abbondanze chimiche da essi. I diagrammi colore-magnitudine ottenuti con fotometria in banda U risultano essere degli ottimi strumenti per identificare le popolazioni multiple all'interno degli ammassi nelle loro varie fasi evolutive. Quello che si sfrutta è la diversa composizione chimica: stelle con abbondanze chimiche diverse di C, N, O, Na definiscono delle sequenze distinte nel ramo gigante rosso nel diagramma colore-magnitudine U vs. U-B. La divisione che si osserva è dovuta al fatto che il filtro ultravioletto è sensibile alle bande molecolari del NH e CN, mentre quello filtro blu alle bande del CH. Quindi le stelle di seconda popolazione presentano magnitudini in banda U più deboli e colori U-B più rossi delle stelle di prima a causa della maggior quantità di H e minore di C.

Grazie ai dati fotometrici di centinaia di ammassi di stelle si hanno prove ulteriori della presenza delle popolazioni multiple. Anderson nel 1997 scoprì che la sequenza principale allargata di ω Centauri poteva in realtà essere costituita da due sequenze. Lee et al. [14] invece identificarono la presenza di sottopopolazioni nel ramo gigante rosso e sottolinearono le analogie tra i diagrammi colore-magnitudine di NGC 2808 e M22 che furono confermate quasi dieci anni dopo. È stato scoperto inoltre che questo ammasso presenta almeno quattro rami sub-giganti e rami giganti rossi, i quali non differiscono solo per il contenuto di metalli, ma probabilmente anche in età. Diversi diagrammi colore-magnitudine di altri ammassi presentano sequenze multiple. Sono state infatti trovate in NGC 2808 ([15, 16]), NGC 1851 ([17, 18]), M4, NGC 3201, NGC 1261 ([19, 20, 21]), NGC 6752 e 47 Tucanae ([22, 23, 24]). Lo studio dei diagrammi colore-magnitudine utilizzando i filtri sopraccitati permette quindi l'identificazione delle popolazioni multiple sfruttando la differenza delle abbondanze chimiche, in particolare dell'azoto, che si presentano soprattutto nel ramo gigante rosso e nella bassa sequenza principale. Quest'ultima però risulta essere ancora poco studiata a causa dei limiti strumentali fino ad oggi presenti.

Come vedremo nei prossimi capitoli, l'esplorazione delle popolazioni multiple tra le stelle di piccola massa (M-dwarfs e persino tra le nane brune) ed il confronto con le proprietà delle popolazioni multiple tra le stelle di massa più grande (come l'RGB) permetterà di discriminare i vari scenari evolutivi che sono stati proposti per spiegare l'origine e l'evoluzione degli ammassi globulari.

2.2.1 Popolazioni stellari multiple in 47 Tucanae

Un caso di particolare interesse nello studio delle popolazioni stellari multiple risulta essere l'ammasso 47 Tucanae, su cui è focalizzata questa tesi. Diversi studi, basati su fotometria ad alta precisione ottenuta da immagini riprese dal telescopio spaziale Hubble hanno evidenziato una sequenza principale divisa in due bracci principali, se osservata tramite bande fotometriche che evidenziano le popolazioni stellari con diverso contenuto di elementi leggeri. Questa dualità è stata trovata poi anche nel ramo sub-gigante, nel ramo orizzontale, e nelle regione delle giganti rosse.

Le prime evidenze fotometriche di popolazioni multiple in 47 Tucanae risalgono a circa 15 anni fa. Già Anderson trovò nel 2009 che il ramo sub-gigante dell'ammasso in questione aveva una certa dispersione in magnitudine e presentava almeno due bracci distinti di uno più brillante e con un allargamento intrinseco in luminosità.

Le evidenze spettroscopiche di anomalie chimiche in questo ammasso sono ancora più antiche. Già dai primi anni '70, analisi spettroscopiche mostrarono che le stelle giganti rosse si dividevano in due gruppi distinti che presentavano delle variazioni nell'intensità delle bande del CN e questa dicotomia si presentava anche nella fase di sequenza principale.

Per illustrare le principali caratteristiche associate a popolazioni multiple tra stelle più massicce di circa $0.6 M_{\odot}$, nelle prossime figure si mostrano dei diagrammi fotometrici ottenuti da immagini multi-banda di HST.

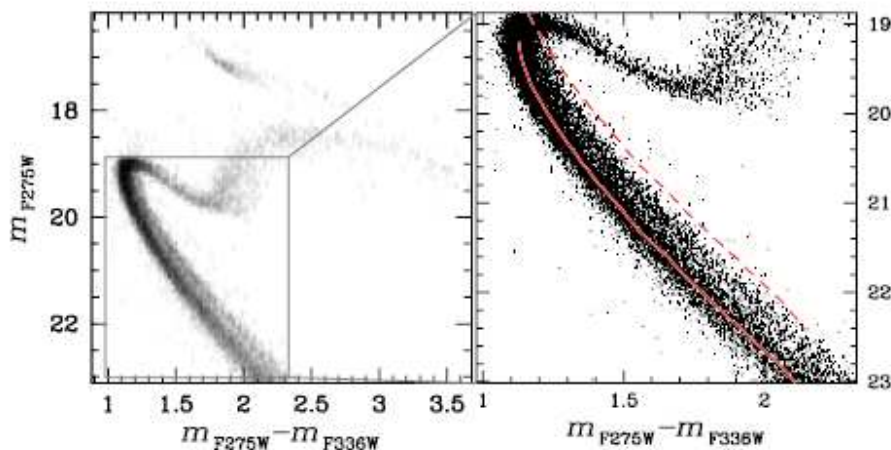


Figura 2.3: Diagrammi colore-magnitudine di 47 Tucanae ricavati da fotometria ultravioletta HST, nelle bande F275W ed F336W. Nel pannello di sinistra è rappresentato il diagramma di Hess, mentre a destra si evidenzia il diagramma colore-magnitudine della regione di sequenza principale. La linea rossa continua rappresenta la linea di fiducia della sequenza principale, mentre la linea tratteggiata marca la sequenza delle binarie di ugual massa. Questo mostra che la sequenza principale rossa, visibile nei diagrammi di 47 Tucanae non può essere associata a stelle binarie.

In figura 2.3 si nota immediatamente un ampio allargamento del ramo gigante rosso, un andamento bimodale del ramo sub-gigante e una doppia sequenza principale. A destra si può notare che la maggior parte delle stelle nella fase di sequenza principale hanno dei colori più blu, mentre solo una piccola frazione di esse si trova nella parte più rossa. Queste due sequenze distinte sembrano convergere nel punto di Turn-off, ma la loro separazione aumenta con la magnitudine. Focalizzandosi invece sul ramo sub-gigante si può notare che anch'esso risulta essere costituito da due componenti distinte: la parte più brillante presenta un allargamento intrinseco in magnitudine, mentre la porzione meno brillante contiene una minore frazione di stelle. In figura 2.4 sono presentati diversi diagrammi colore-magnitudine di questa zona nei quali le stelle indicate in rosso sono quelle più deboli. Più a sinistra, nel visibile, si può infatti vedere la chiara separazione di queste dalle restanti stelle, mentre i pannelli più a destra (che sono in ultravioletto) permettono di vedere che la popolazione delle stelle più brillanti si divide anch'essa in due sequenze separate, portando quindi il conteggio totale a tre rami sub-giganti ben riconoscibili ed identificabili.

Anche analizzando il ramo gigante rosso dell'ammasso in esame si può notare la presenza di un allargamento intrinseco di questa zona, la diffusione dei colori osservata è inoltre maggiore degli errori fotometrici. Nel riquadro a) in figura 2.5 è riportato il diagramma colore-magnitudine dove le stelle di RGB sono state codificate con il colore nero, mentre nei pannelli b) e c) si ha il diagramma due colori. La distribuzione è chiaramente bimodale e nell'ultimo pannello è stata graficata anche una linea arbitraria per segnalare la separazione tra i due gruppi di stelle indicate con RGBa e RGBb, codificate con i colori verde e magenta rispettivamente.

Si sospettava da tempo che il ramo orizzontale di 47 Tucanae avrebbe potuto ospitare popolazioni multiple di stelle. Nel 1982 Norris e Freeman [25] misurarono l'intensità delle bande molecolari del CN e del CH degli spettri di 14 stelle di questa regione e il loro studio li portò a concludere che il comportamento osservato era consistente con una dicotomia come quella osservata nelle stelle giganti. La connessione tra

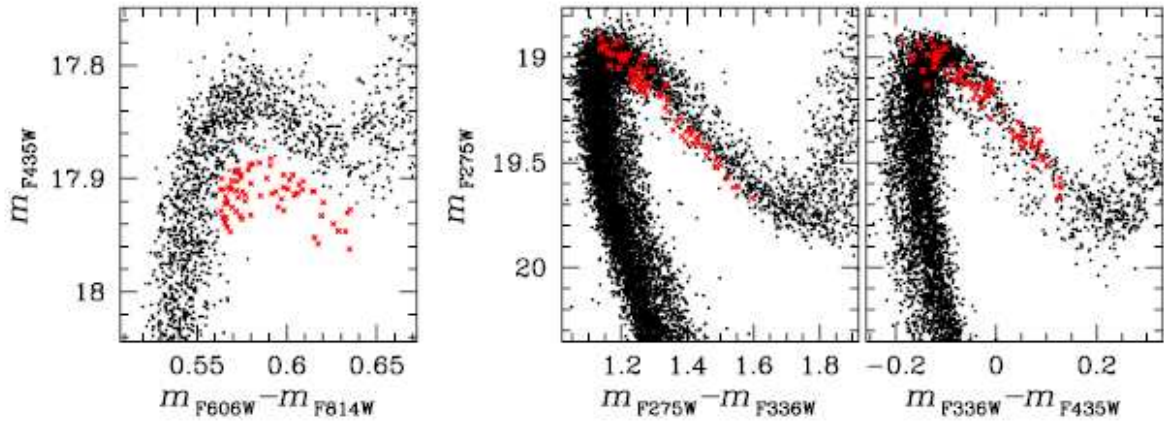


Figura 2.4: Il pannello di sinistra mostra il diagramma colore-magnitudine ottico di 47 Tucanae nella regione del ramo delle sub-giganti. In rosso sono indicate le stelle che popolano il SGB piú debole, che è costituito da stelle con contenuto estremo di CNO. Gli altri due riquadri illustrano i diagrammi colore-magnitudine ma in banda ultravioletta.

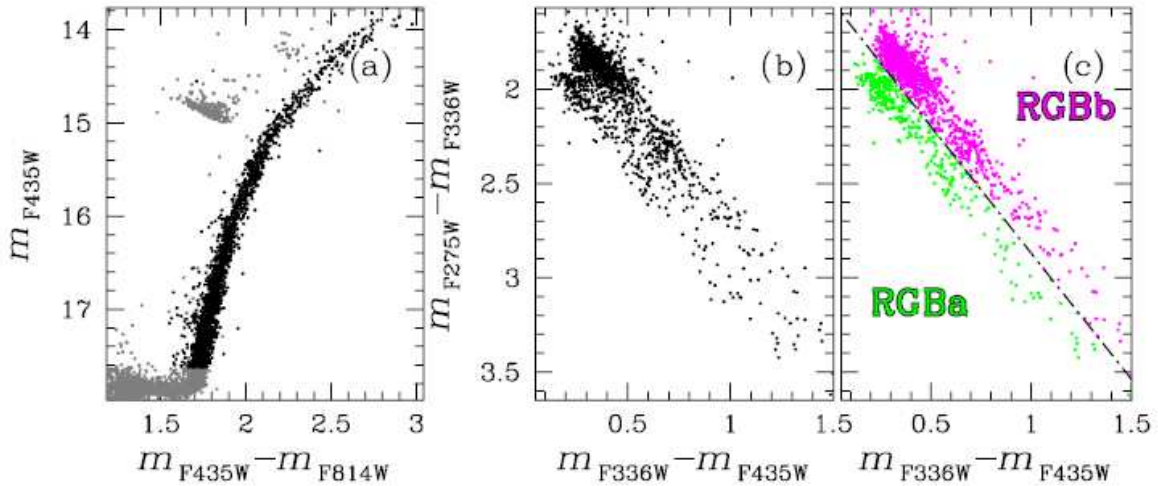


Figura 2.5: Evidenza di popolazioni multiple lungo il ramo delle giganti di 47 Tucanae. Nel riquadro a destra (pannello a), che mostra il CMD ottico, sono evidenziate in nero le stelle giganti rosse. I pannelli b) e c) sono riportate le stesse stelle ma in un diagramma colore-colore, le due diverse popolazioni sono indicate con la dicitura RGBa e RGBb.

la morfologia del ramo orizzontale negli ammassi globulari e i gruppi di stelle con diverse abbondanze chimiche degli elementi leggeri non è solo una caratteristica di 47 Tucanae, ma è stata inoltre osservata in altri ammassi globulari come è stato detto al paragrafo precedente.

Capitolo 3

Teorie sull'origine delle popolazioni stellari multiple

Diversi sono gli scenari evolutivi proposti dagli astronomi per spiegare la formazione e l'evoluzione delle popolazioni multiple. Una delle primissime ipotesi che fu avanzata fu quella evolutiva: le variazioni degli elementi leggeri sarebbero dovute ai processi che avvengono all'interno delle stelle. I prodotti del bruciamento nucleare verrebbero trasportati negli strati più superficiali grazie ai meccanismi di mescolamento che avvengono all'interno delle stelle quando diventano giganti rosse. Tuttavia questa ipotesi evolutiva è stata esclusa dopo la scoperta della variazione degli elementi leggeri nelle stelle non evolute nella fase di sequenza principale, le quali hanno zone convettive trascurabili. La scoperta della variazione delle abbondanze di elementi leggeri come Na, Al, Mg ha portato a supporre che questi non siano stati prodotti all'interno delle stelle di piccola massa che osserviamo noi oggi, ma all'interno di quelle più massive. Sono stati proposti diversi scenari che si possono suddividere in due macrocategorie: modelli multigenerazionali e modelli di formazione simultanea.

3.1 Modelli multigenerazionali

Questi scenari sostengono che gli ammassi globulari abbiano subito una formazione stellare prolungata nel tempo: gli episodi di formazione stellare devono essere avvenuti ad intervalli di tempo distanziati per permettere alle stelle di prima generazione (indicata con 1G) di formare una riserva di gas arricchito da cui poi si sarebbero formate le generazioni successive. Questa tipologia di scenari richiede che i progenitori degli ammassi siano stati da 5 a 20 volte più massivi di quelli che osserviamo oggi e che abbiano perso una buona parte della loro prima generazione di stelle nel campo. Questo implica che gli ammassi globulari abbiano contribuito maggiormente alla formazione della componente di alone rispetto a quella di bulge nelle galassie. Questi proto-ammassi così massivi potrebbero inoltre aver contribuito alla re-ionizzazione cosmica.

3.1.1 Scenario del ramo gigante asintotico

Le stelle in fase di AGB sono considerate, in questa teoria, come le responsabili della contaminazione del materiale dal quale si sarebbero formate poi le altre stelle. Risulta essere una teoria che ha riscontrato molto successo in letteratura e diversi aspetti di questo modello sono stati poi ripresi da altri scenari.

Questo scenario prevede la formazione di una prima generazione di stelle della stessa età e con le stesse abbondanze chimiche. Dopo circa 30 Myr, le stelle di 1G raggiungono la fase di AGB e, a causa della loro bassa velocità, i venti di queste stelle non sono in grado di fuggire dall'ammasso e iniziano così a formare una riserva di gas contaminato all'interno di esso. Questo gas si raffredda rapidamente e sprofonda verso il centro dando così inizio alla formazione di una seconda generazione (indicata con 2G) di stelle non appena la densità del gas raggiunge un valore critico (D'Ercole et al. [27], Bekki [28]). Questo scenario non produce anti-correlazioni Na-O che sono previste dai dati osservativi, ma correlazioni. Per riprodurle questo scenario prevede il ri-accrescimento di una grande quantità di materiale incontaminato iniziale dall'ambiente circostante, cioè una diluizione del materiale emesso dalle stelle AGB con materiale che presenta le stesse caratteristiche e la stessa composizione chimica della popolazione di prima generazione.

La diluizione delle stelle AGB con il gas incontaminato è in grado di spiegare l'andamento delle abbondanze chimiche che si osservano all'interno degli ammassi. Le stelle di seconda generazione si sarebbero

quindi formate dal materiale accumulato che si è poi successivamente mescolato con le espulsioni delle stelle AGB, comportando come conseguenza le diverse abbondanze chimiche nelle stelle di seconda generazione rispetto a quelle di prima. Solo una piccola frazione di stelle di 1G e con una specifica massa può produrre il materiale che verrà poi utilizzato per le stelle di 2G. Per ottenere quindi la frazione di stelle primordiali osservata, il modello assume che l'ammasso perda una sostanziale frazione di stelle di prima generazione, fino a quasi il 95 % della loro massa iniziale, e che mantenga quasi tutta la massa di stelle di seconda generazione. Una delle caratteristiche che rende le stelle di AGB dei candidati promettenti per fornire il materiale arricchito è il fatto che esse sono in grado bruciare H a temperature più elevate delle stelle che invece si trovano della fase di sequenza principale. Questo permette loro di attivare la catena di bruciamento Al-Mg.

3.1.2 Scenario con stelle massicce a rapida rotazione

Decressin et al. [29] e Decressin, Charbonell & Meyenet [30] svilupparono uno scenario in cui le stelle massive sono la fonte di arricchimento di materiale all'interno degli ammassi globulari. Vengono prese in esame solamente le stelle che ruotano ad elevata velocità perché sono quelle in grado di trasportare in superficie i prodotti della fase di hot bottom burning che avviene nel nucleo di queste stelle. Questo scenario risulta essere abbastanza simile a quello precedente ma viene considerato valido solo per ammassi più giovani di 10-20 Myr. L'emissione da parte di questa tipologia di stelle deve essere anch'essa diluita per essere in accordo con le abbondanze chimiche osservate. Tuttavia, dato che gli ammassi considerati sono giovani non è necessario, contrariamente al modello precedente, richiedere del materiale dall'esterno del cluster perché viene già assunto in precedenza che questo abbia conservato una grande quantità di polvere e gas dalla formazione delle stelle di prima generazione. Le stelle massive ad elevata rotazione sono in grado di spiegare l'anti-correlazione Na-O, ma non sono in grado di attivare la catena di bruciamento Al-Mg prima della fine della fase di sequenza principale, quindi lo scenario non è in grado di spiegare l'allargamento dovuto al Mg presente in alcuni ammassi. Il disco equatoriale che circonda queste stelle, che si forma dal materiale che viene rilasciato da esse, è in grado di accumulare del materiale nel mezzo inter-ammasso ricco di gas. Secondo questo scenario la prima generazione di stelle avrebbe dovuto avere una funzione di massa iniziale (IMF) molto elevata, ovvero le stelle dovevano essere molto massive, e la seconda generazione avrebbe dovuto consistere solamente in stelle di piccola massa.

3.1.3 Scenario di sistemi binari massivi in interazione

Le interazioni tra coppie di stelle binarie massive è un altro modo per rilasciare materiale nel mezzo inter-ammasso. de Mink et al.[31] hanno analizzato l'interazione tra una stella di $20 M_{\odot}$ e una di $15 M_{\odot}$: le simulazioni mostrano che la prima stella perde quasi completamente il suo involucro, corrispondente a circa $10 M_{\odot}$ di materiale. L'espulsione di quest'ultimo, mescolandosi con il gas incontaminato, darebbe origine ad episodi successivi di formazione stellare dai quali hanno poi origine le stelle di seconda generazione. L'interazione tra stelle binarie ha il vantaggio di motivare le variazioni osservative tra un ammasso e l'altro ma ha difficoltà a spiegare la discrezione dei rapporti di abbondanza trovata in molte sottopopolazioni. Un problema fondamentale però di questo modello è la presenza di supernove, il cui nucleo dopo circa 3-8 Myr collasa ed esplose. La conservazione anche di solo una piccola quantità di questo materiale si traduce in una diffusione del Fe che risulta essere in conflitto con le osservazioni (Renzini [32]).

3.1.4 Evento esteso di formazione di ammassi

Il modello proposto da Prantzos & Charbonell [33], poi esteso da Elmegreen [34], prevede delle condizioni ben specifiche della galassia e delle nubi molecolari per permettere la formazione delle popolazioni multiple prima che si siano formate le supernove. La prima generazione di stelle si deve essere formata nel nucleo denso, massivo e turbolento di una nube molecolare gigante. Dati gli elevatissimi valori di densità e massa delle stelle, queste persero il loro involucro velocemente. Questo, mescolandosi con il materiale rimasto dalle stelle di 1G, comporta la formazione delle generazioni successive. Si ritiene che le stelle di prima generazione di piccola massa siano state espulse a causa di interazioni dinamiche tra sistemi binari o a causa del potenziale gravitazionale dell'ammasso. I venti rilasciati dalle stelle più massive possono diventare così densi in un piccolo ammasso da causare un catastrofico raffreddamento e comportare il collasso dell'ammasso su se stesso. Il materiale si può in questo modo mescolare con il materiale non contaminato e formare un'altra generazione di stelle (Wünsch et al. [35]).

3.2 Modelli di formazione simultanea

I modelli di formazione simultanea invece suppongono che le stelle si siano formate tutte in un'unica fase, una frazione di esse è stata poi successivamente contaminata e arricchita dalle emissioni da parte delle stelle più massive.

3.2.1 Scenario di accrescimento primordiale del disco

Bastian et al. [36] considerarono il materiale espulso dalle stelle binarie massive e dalle stelle ad elevata rotazione, presenti all'interno dell'ammasso, come responsabile dell'arricchimento delle stelle di piccola massa le quali si sono formate contemporaneamente a quelle più massive. Le stelle con massa inferiore a $2 M_{\odot}$ sono in grado di trattenere il disco proto-planetario che le circonda per circa 10 Myr il quale spazzerebbe via il materiale arricchito che verrebbe infine accumulato su una stella ospite. Questo scenario richiede che queste stelle ospiti siano completamente convettive il che comporta tempi scala di accrescimento decisamente brevi (Salaris & Cassisi [37], D'Antona et al. [38]). Simulazioni idrodinamiche condotte da Wijnen et al. [39] dimostrano che, senza la presenza del disco proto-planetario, non sarebbe possibile la fase di accrescimento e inoltre il tempo scala richiesto è nell'ordine di 10^4 anni, indubbiamente più breve dei 10^7 anni richiesti a questa teoria per verificarsi.

3.2.2 Scenario della separazione turbolenta degli elementi

Hopking in [40] propose che le popolazioni multiple avrebbero potuto essere il risultato di episodi estremamente turbolenti avvenuti all'interno dell'ammasso nelle sue primissime fasi. I grani di polvere più grandi, in queste condizioni, sono in grado di muoversi separatamente dalle particelle del gas e dai più piccoli grani di polvere. Nelle regioni ad elevata densità, i grani saranno decisamente numerosi e quindi le stelle che si formeranno in queste zone saranno arricchite dagli elementi chimici associati a questi. Invece il gas e i piccoli grani di polvere saranno distribuiti omogeneamente. Questo scenario è in grado di spiegare in maniera naturale come gli elementi chimici si siano separati nelle prime fasi di formazione degli ammassi. Dato che però questo meccanismo dipende dal grado di turbolenza presente, la diffusione delle abbondanze chimiche dipenderà notevolmente dalla massa della nube del proto-ammasso, come si osserva effettivamente. Na e O però si verificano sugli stessi grani di polvere quindi questo modello prevede una correlazione tra questi anziché un'anti-correlazione. È necessario inoltre introdurre un ulteriore meccanismo in grado di spiegare la distribuzione dell'He poiché questo non è influenzato dai grani di polvere.

3.2.3 Scenario della stella super massiva

Secondo il modello proposto da Gieles et al. [41], il proto-ammasso avrebbe subito una contrazione adiabatica a causa dell'accrescimento del gas causando così l'aumento della densità e quindi anche del tasso di collisione tra le stelle. Una serie di collisioni fuori controllo sarebbe quindi in grado di formare una stella super massiva, con massa superiore a $10^3 M_{\odot}$, la quale rilascerebbe attraverso i suoi venti stellari i prodotti della fase di bruciamento dell'H (Denissenkov & Harwick [42]). Il materiale processato dalla stella andrebbe a contaminare le stelle di prima generazione fino a quando la stella super massiva iniziale non brucia completamente o esplose a causa di instabilità. Un inconveniente di questo scenario è che questa tipologia di stelle, con massa così elevata, è ancora solamente una predizione, non si hanno ancora prove della loro esistenza.

3.2.4 Scenario dell'ordine inverso della popolazione

Lo scenario proposto da Marcolini et al. [43] prevede che le stelle si siano formate in una zona interna dell'ammasso dove il gas è stato arricchito localmente da supernove di tipo Ia e stelle AGB in un mezzo pre-arricchito da supernove di tipo II con bassa metallicità. Se una stella si formò nel volume più interno sarebbe allora impoverita di O e Mg, grazie alle supernove Ia, e arricchita di N, Na e Al, grazie alle stelle AGB. Esternamente a questo volume può essere trovata una regione con la stessa composizione del gas del proto-alone all'epoca di formazione dell'ammasso. Dopo che si è formata una generazione di stelle, le supernove di tipo II inizierebbero a contaminare ed espandere il volume più interno mescolando così il materiale con quello a bassa metallicità presente nel guscio più esterno. Il rapporto $[\text{Fe}/\text{H}]$ e la somma degli atomi di C, N e O rimane costante durante tutta l'evoluzione dell'ammasso e le anti-correlazioni

N-C e Na-O possono essere riprodotte. La realizzazione dello scenario non è stata testata con simulazioni idrodinamiche ed è necessario fare delle ipotesi rigorose sul contenuto di Fe del mezzo interstellare all'epoca della formazione dell'ammasso così come sulla dimensione della regione interna da cui si sarebbero formate le stelle.

Entrambe le categorie di scenari evolutivi presentano delle discrepanze: dato che il bruciamento nucleare avviene principalmente nelle stelle massive, le quali sono in numero inferiore rispetto a quelle di piccola massa dato IMF assunto per questi modelli, non è chiaro come può essere stata prodotta la grande quantità di materiale richiesta per formare la popolazione arricchita. Questo problema, conosciuto come “problema del bilancio di massa” non è presente nel secondo gruppo di scenari in quanto questi prevedono che la popolazione arricchita si sia formata dal gas incontaminato prima della comparsa delle prime supernove.

Uno studio delle stelle di massa molto ridotta permette di discriminare i vari scenari appena descritti.

Capitolo 4

Stelle di massa molto ridotta

La maggior parte degli studi effettuati sulle popolazioni multiple all'interno degli ammassi hanno avuto come target stelle con massa superiore a $0.6 M_{\odot}$, questo perché lo studio delle stelle di massa più piccola necessita di spettroscopia ad elevata precisione in NIR. Le stelle di massa molto ridotta risultano essere degli ottimi traccianti chimici in quanto l'assorbimento molecolare è meno influenzato dal non equilibrio del campo di radiazione, l'interno di queste stelle è inoltre completamente miscelato e subisce un processo di bruciamento nucleare minimo. Non è ancora chiaro se le eterogeneità chimiche che si osservano nelle stelle degli ammassi globulari siano dovute ad interazione con altri oggetti o siano una caratteristica intrinseca di esse. Per studiare meglio questi scenari è possibile indagare sulla dipendenza dalla massa delle stelle: è necessario quindi analizzare le abbondanze anche nel regime delle stelle di massa molto ridotta. Grazie alle osservazioni con Hubble Space Telescope e James Webb Space Telescope sono stati fatti dei progressi incredibili nell'analisi fotometrica dei diagrammi colore-magnitudine delle stelle con massa $\geq 0.1 M_{\odot}$ localizzate vicino alla fine della sequenza principale. Ci si aspetta infatti che i diagrammi colore-magnitudine degli ammassi globulari si estendano ben oltre la fine della fase di sequenza principale, fino al regime delle nane brune. Queste, a differenza delle stelle, non sono in grado di raggiungere l'equilibrio energetico e quindi subiscono un raffreddamento prolungato nel tempo, creando così il vuoto che si osserva tra le stelle più deboli della sequenza principale e le più brillanti nane brune nei diagrammi colore magnitudine.

4.1 Predizioni teoriche

Gerasimov et al.[44] hanno sviluppato un nuovo metodo per determinare le abbondanze chimiche e altri parametri fondamentali degli ammassi globulari dallo studio dei diagrammi colore-magnitudine dal ramo sub-gigante alla zona sub-stellare. Lo studio si basa sulla realizzazione di modelli evolutivi e modelli di atmosfere con abbondanze chimiche completamente autoconsistenti. I modelli isocronici sono calcolati e adattati alla distribuzione dei colori fotometrici osservati in modo iterativo. Le loro analisi sono state applicate poi all'ammasso 47 Tucanae: sono state derivate le proprietà di questo ammasso comparando modelli isocronici teorici con il diagramma colore-magnitudine osservato. A causa della presenza di popolazioni multiple, un modello accurato del diagramma colore-magnitudine richiede diverse isocrone teoriche in grado di tener conto della distribuzione dei colori fotometrici osservata. Il loro obiettivo è stato quindi quello di trovare tre isocrone con diverse e distinte composizioni chimiche che tracciano la coda rossa, la coda blu e la linea di cresta del diagramma colore-magnitudine. Le abbondanze degli elementi chimici sono in grado di influenzare notevolmente la forma del diagramma colore-magnitudine, in particolare la bassa sequenza principale. Per questo motivo il gruppo ha considerato la variazione delle abbondanze di 11 elementi: [C/Fe], [N/Fe], [O/Fe], [Na/Fe], [Mg/Fe], [Al/Fe], [Si/Fe], [S/Fe], [Ca/Fe], [Ti/Fe], [V/Fe]. La variazione delle abbondanze è in grado di spostare l'equilibrio chimico delle atmosfere e la distribuzione dell'opacità, comportando così dei colori fotometrici alterati ed uno spostamento del punto finale del percorso evolutivo delle stelle ad una T_{eff} diversa. Per stelle con massa $0.1 M_{\odot} < M < 0.5 M_{\odot}$, questa analisi è maggiormente concentrata su [O/Fe] e [Ti/Fe] a causa delle bande di assorbimento TiO e H_2O prominenti. Questo duplice effetto della variazione delle abbondanze chimiche dipende dalla banda fotometrica scelta: per il range ottico la sequenza principale è leggermente influenzata dall'abbondanza di ossigeno, dato che le righe relative all' H_2O sono localizzate a lunghezze d'onda infrarosse, mentre il tasso di produzione del TiO nell'atmosfera è principalmente determinato da [Ti/Fe].

In figura 4.1 è stata calcolata la distribuzione di $[O/Fe]$ nella bassa sequenza principale: l'analisi fotometrica in NIR di 47 Tucanae in questa regione risulta essere particolarmente sensibile all'abbondanza di ossigeno. Ognuna delle tre isocrone presenti definisce la relazione tra la massa iniziale della stella e la sua posizione nel diagramma colore magnitudine per una data abbondanza di ossigeno.

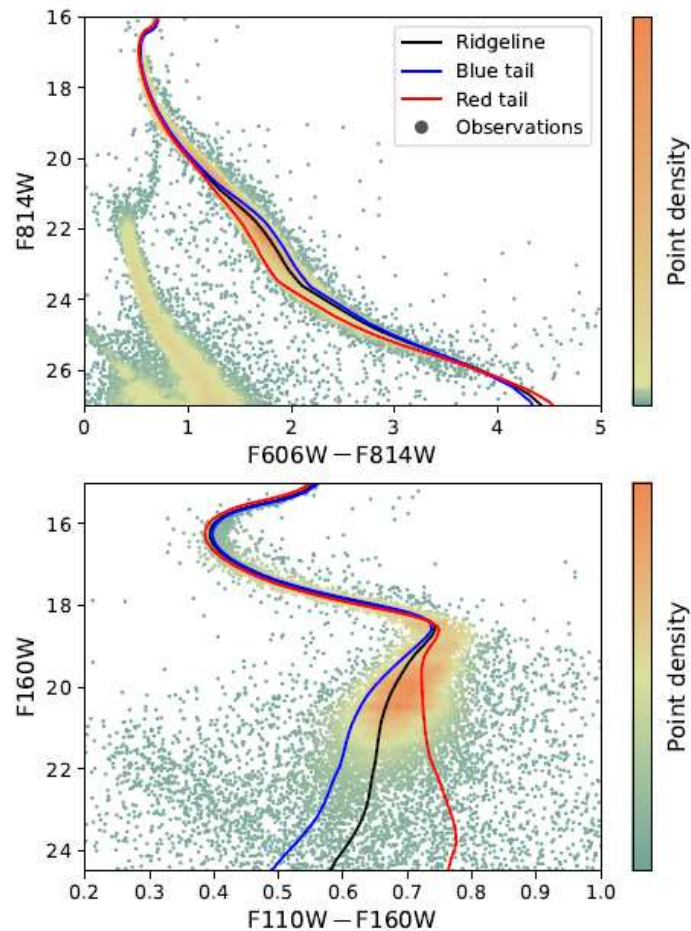


Figura 4.1: Distribuzione $[O/Fe]$ della bassa sequenza principale. Si può notare nella banda NIR che la diffusione fotometrica supera notevolmente l'isocrona della coda rossa attorno al ginocchio della sequenza principale.

Dato che le nane brune sono più facilmente individuabili a lunghe lunghezze d'onda, a causa delle loro deboli magnitudini, i filtri considerati in questo studio sono stati F322W2 vs F150W2 - F322W2, ipotizzando che 47 Tucanae sia osservato con JWST NIRCам. Le predizioni nella regione sub-stellare suppongono che le funzioni di massa, le isocrone calcolate e la distribuzione delle abbondanze chimiche rimangano inalterate. È stata calcolata la distribuzione della magnitudine sintetica dell'ammasso in esame per 30 intervalli di magnitudine equispaziati. In figura 4.2 si può vedere il risultato per tre diverse età. La funzione di magnitudine presenta un chiaro e netto vuoto sub-stellare a $m \simeq 26$. Questo implica che la densità per magnitudine delle nane brune risulti essere ridotta di quasi un ordine di magnitudine. Il modello suggerisce che questo vuoto si formi a circa 0.5 Gyr in ammassi simili a quello in esame e che diventi più ampio e profondo all'avanzare del tempo. Mentre la bassa sequenza principale è teoricamente non influenzata dall'età dell'ammasso, sia il punto di Turn-Off che la sequenza sub-stellare mostrano invece una certa dipendenza.

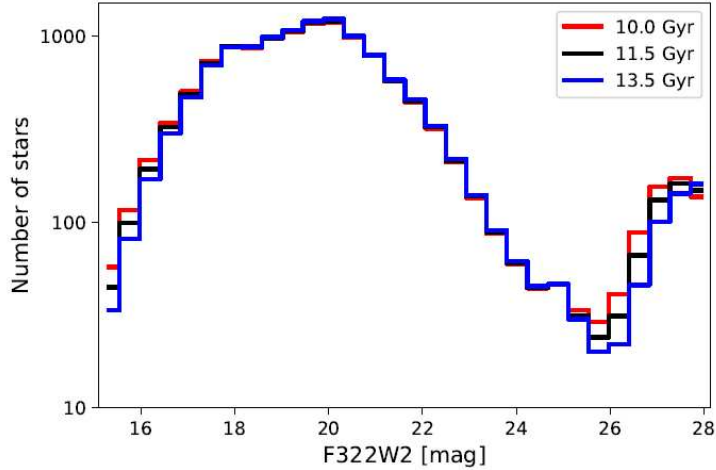


Figura 4.2: Distribuzione prevista della magnitudine delle stelle in 47 Tucanae a tre diverse età. Il picco corrispondente a $m \simeq 20$ si riferisce alle stelle di sequenza principale mentre quello a $m \simeq 28$ corrisponde alle nane brune.

È stato infine riprodotto il diagramma colore-magnitudine di 47 Tucanae basato sull'abbondanza di ossigeno dedotta: dato che le isocrone risultano essere praticamente parallele alle linee di isomassa, come si può vedere in fig. 4.3, l'effetto dell'evoluzione dei colori delle nane brune degenera velocemente con $[O/Fe]$. Questo rappresenta una potenziale sfida per l'uso delle nane brune come traccianti chimici in quanto la loro massa non è nota a priori.

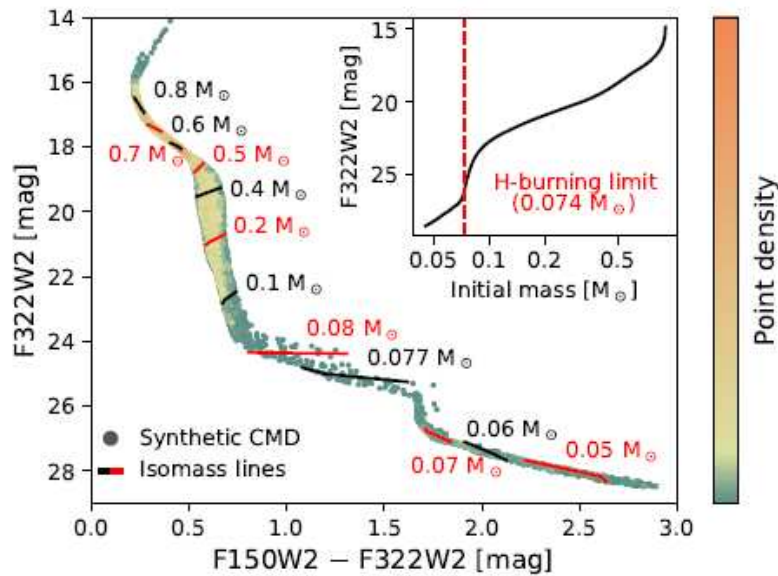


Figura 4.3: Diagramma colore-magnitudine previsto di 47 Tucanae dal ramo sub-gigante alla sequenza sub-stellare. La distribuzione dei colori è derivata dalla distribuzione di $[O/Fe]$ dedotta vicino alla fine della sequenza principale. La figura inserita rappresenta la relazione tra massa e magnitudine con indicato il limite di massa per il bruciamento dell'H.

4.1.1 Conclusioni dello studio

Come conclusione dello studio conseguito da Gerasimov et al.[44], è stato trovato che la dispersione fotometrica di 47 Tucanae può essere riprodotta dalla variazione delle abbondanze chimiche di tutti gli elementi eccetto $[O/Fe]$ e $[Ti/Fe]$ sia nel regime ottico che quello NIR e l'allargamento fotometrico risulta essere predominato da $[O/Fe]$. La distribuzione fotometrica dell'abbondanza dell'ossigeno stimata in questo studio per stelle con $M < 0.4 M_{\odot}$ è statisticamente consistente, tenendo conto degli errori

sistematici, con quella spettroscopica, come si può vedere in figura 4.4. Questi errori sono comparabili con le incertezze sperimentali e dimostrano così che la parte bassa della sequenza principale può essere utilizzata per le analisi chimiche.

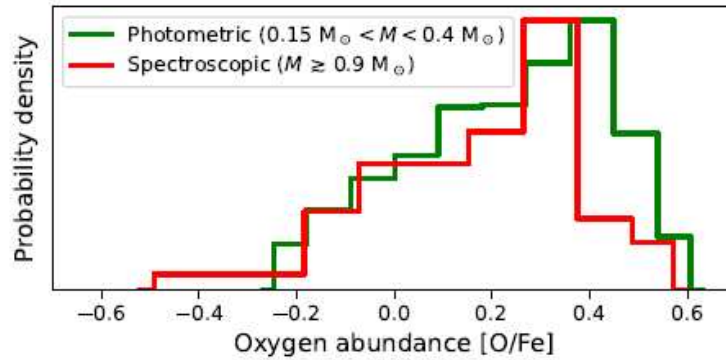


Figura 4.4: Il grafico presenta la distribuzione di $[O/Fe]$ per $0.15 M_{\odot} < M < 0.4 M_{\odot}$ e la distribuzione di misurazioni spettroscopiche in letteratura.

La discrepanza tra i valori spettroscopici e fotometrici di $[O/Fe]$ appare maggiore nella coda ricca di ossigeno (primordiale) della distribuzione. Se una reale dipendenza chimica dalla massa apportasse un contributo significativo alla discrepanza osservata, la variazione di $[O/Fe]$ con la massa stellare sarebbe più evidente nella popolazione arricchita dell'ammasso invece che nella popolazione primordiale. Dato che questa conclusione contraddice ciò che il gruppo si aspettava, loro suggeriscono che la dipendenza delle abbondanze chimiche dalla massa fornisca un contributo di scarsa importanza rispetto agli eventuali errori sistematici. Uno studio effettivo, e non teorico, della bassa sequenza principale permetterà di risolvere questo dubbio.

Capitolo 5

Analisi di fotometria JWST di 47 Tucanae

In questo capitolo, vengono analizzati dei diagrammi colore-magnitudine di 47 Tucanae ottenuti con la camera NIRCam che si trova a bordo del telescopio spaziale James Webb, al fine di analizzare le popolazioni stellari multiple tra le stelle di piccola massa.

Questi dati consistono in 16 immagini da 859 secondi ciascuna in F150W2 ed altrettante immagini con tempi di esposizioni identici osservate in simultanea in F322W2. Il campo analizzato copre un'area di 129×129 arcosecondi e si trova ad ovest rispetto al centro dell'ammasso, ad una distanza di circa 7 arcominuti.

Tale distanza è stata scelta in modo da evitare le regioni centrali dell'ammasso, dove la densità elevata di stelle, impedirebbe di osservare le stelle di piccola massa. I filtri adottati hanno entrambi una banda passante molto larga e pertanto sono ottimali per identificare sorgenti celesti molto deboli. Ad esempio, la figura 5.1 di questo capitolo mostra un'immagine in falsi colori di una porzione del campo di vista. L'immagine è ottenuta in tricromia RGB usando i dati in F150W2 per il canale B, quelli in F322W2 per il canale R, mentre il canale G è ottenuto da un'immagine media ottenuta a partire da quelle nei due filtri disponibili.

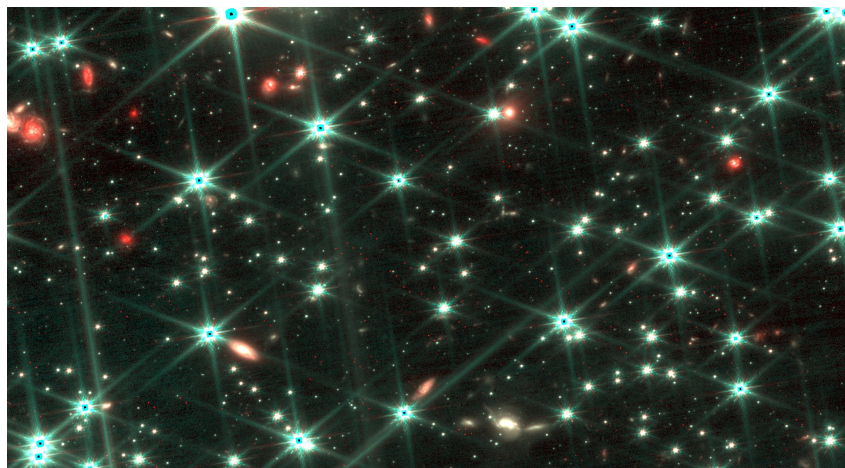


Figura 5.1: Immagine in falsi colori di una porzione del campo di vista.

In figura 5.2 è illustrato il diagramma colore magnitudine $F322W2$ vs. $F150W2-F322W2$ di 47 Tucanae. Le stelle che molto probabilmente appartengono alla sequenza principale di 47 Tucanae e le nane brune sono evidenziate in giallo. La dispersione dei colori nella bassa sequenza principale ($m_{F322W2} > 23.2$ mag) è comparabile con l'allargamento dovuto ai soli errori osservativi, se invece si sale lungo la sequenza principale l'estensione aumenta repentinamente lungo tutte le M-dwarfs, fino ad arrivare al ginocchio della sequenza principale.

Questo "ginocchio", visibile intorno a $m_{F322W2} \sim 19$ mag, è una caratteristica tipica dei diagrammi colore-magnitudine delle popolazioni stellari ed è dovuto a due fenomeni che caratterizzano le stelle con $M < 0.4 M_{\odot}$ in questa fase. L'aumento dell'assorbimento della molecola di H_2 , causato dalla collisione,

sposta il flusso stellare verso il blu, ma la diminuzione della temperatura effettiva sposta il colore delle stelle verso il rosso.

La dispersione dei colori che osserviamo in questa zona è dovuta principalmente alla variazione da stella a stella dell'abbondanza di ossigeno. Il filtro F322W2 utilizzato è particolarmente sensibile a queste bande chimiche, mentre F150W2 lo è di meno, per questo motivo le molecole composte da ossigeno, che sono più abbondanti nelle stelle di 1G, mostrano delle magnitudini F322W2 più deboli e colori più rossi rispetto a quelle di seconda.

In questa regione del digramma colore-magnitudine l'allargamento osservato nel colore F150W2–F322W2 è di circa 0.15 magnitudini ed è significativamente più grande del tipico errore in colore che è di circa 0.02 magnitudini. Tale allargamento è consistente con la presenza di popolazioni stellari multiple con diverso contenuto di ossigeno. In particolare, le relazioni che descrivono la relazione tra il colore ed il contenuto di ossigeno tra le M-dwarfs di 47 Tucanae (Milone et al. 2023) indicano che la variazione in colore osservata corrisponde ad una differenza di ossigeno di 0.5 dex, che corrisponde con quella osservata lungo il ramo delle giganti tramite spettroscopia ad alta risoluzione (Carretta et al. 2009). Il fatto che stelle di piccola massa ($0.1-0.4 M_{\odot}$) e stelle del ramo delle giganti (massa di circa $0.9 M_{\odot}$) abbiano le stesse variazioni di ossigeno supporta gli scenari di formazione in cui gli ammassi hanno avuto diversi episodi di formazione stellare. Infatti, negli scenari in cui tutte le stelle degli ammassi sono coeve, la composizione chimica delle stelle di seconda generazione dipende da fenomeni di accrescimento di materiale processato da stelle massicce in stelle già esistenti (Gieles et al. [41]). In questi scenari, nel caso di un accrescimento alla Bondi, ci aspettiamo che la quantità di materiale inglobato sia proporzionale al quadrato della massa della stella. Di conseguenza, ci aspetteremmo che le M-dwarfs mostrino minori variazioni di ossigeno rispetto alle giganti.

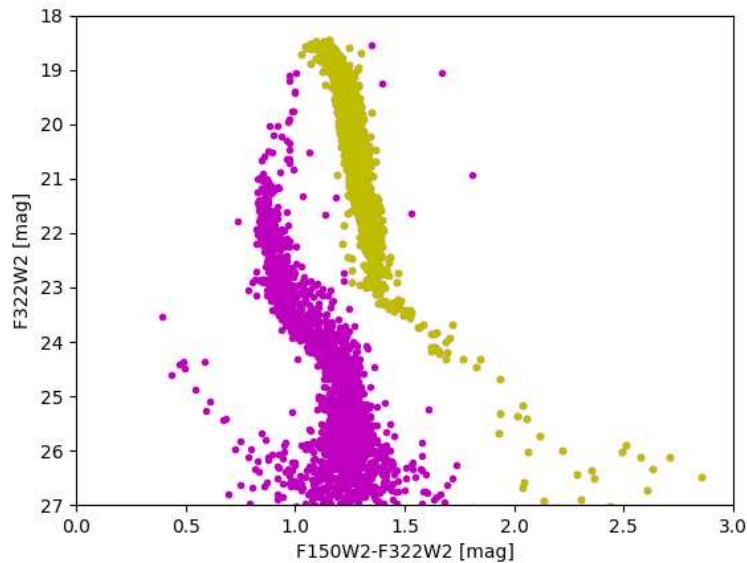


Figura 5.2: Diagramma colore magnitudine, in giallo sono identificate le stelle che probabilmente appartengono a 47 Tucanae e in magenta quelle della Piccola Nube di Magellano. Si noti la presenza delle nane bianche appartenenti a 47 Tucanae posizionate nella parte più a sinistra del diagramma quando il colore $F150W2-F322W2 < 1$

Nel diagramma colore magnitudine di Figura 5.2 è chiaramente visibile una diminuzione nella densità di stelle di ammasso a magnitudine $m_{F322W2} \sim 25$ mag, più facilmente identificabile nell'istogramma in figura 5.3, in cui mostro la funzione di luminosità delle stelle di sequenza principale (identificate ad occhio in giallo). Tale diminuzione, che è prevista dai modelli teorici (vedi ad esempio la Figura 4.2), è associata al limite di bruciamento dell'idrogeno e segna l'inizio della sequenza delle nane brune.

Per le magnitudini più brillanti (23.2-25.0) è presente una coda di stelle stretta legata alle M-dwarfs più blu della sequenza principale che si estende in direzione dei colori più rossi del diagramma. Questa sequenza del diagramma colore-magnitudine è caratterizzata da stelle che hanno una massa circa inferiore a $0.1 M_{\odot}$. L'allargamento della bassa sequenza principale sembra essere comparabile con la dispersione dei colori dovuta alle sole incertezze osservative. Questo fatto potrebbe essere dovuto alla mancanza di stelle di seconda generazione tra le stelle di massa molto ridotta.

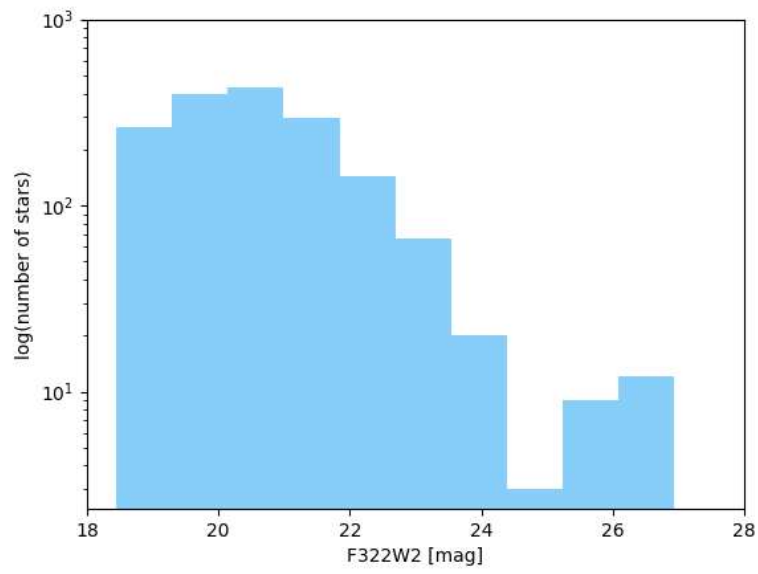


Figura 5.3: Istogramma della distribuzione logaritmica del numero di stelle in funzione della m_{F322W2} .

Bibliografia

- [1] Milone, A. P. ; Marino, A. F. (2022) *Multiple Populations in Star Clusters* <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2022Univ....8..359M/abstract>
- [2] Bastian, N.; Lardo, C. (2017) *Multiple Stellar Populations in Globular Clusters* <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2018ARA%26A..56...83B/abstract>
- [3] Gratton, R.; Sneden, C.; Carretta, E. (2004) *Abundance Variations within Globular Clusters* <https://www.annualreviews.org/doi/10.1146/annurev.astro.42.053102.133945>
- [4] Gratton, R.; Carretta, E.; Bragaglia, A. (2012) *Multiple populations in globular clusters* <https://link.springer.com/article/10.1007/s00159-012-0050-3>
- [5] Gratton, R.; Bragaglia, A.; Carretta, E.; D'Orazi, V.; Lucatello, S.; Sollima, A. (2019) *What is a globular cluster? An observational perspective* <https://link.springer.com/article/10.1007/s00159-019-0119-3>
- [6] Bastian, N.; Lardo, C. (2018) *Multiple Stellar Populations in Globular Clusters* <https://www.annualreviews.org/doi/10.1146/annurev-astro-081817-051839>
- [7] Marino, A. F.; Villanova, S.; Piotto, G.; Milone, A. P.; Momany, Y.; Bedin, L. R.; Medling, A. M. (2008) *Spectroscopic and photometric evidence of two stellar populations in the Galactic globular cluster NGC 6121 (M4)* <https://www.aanda.org/articles/aa/abs/2008/41/aa10389-08/aa10389-08.html>
- [8] Carretta, E.; Bragaglia, A.; Gratton, R.; Lucatello, S. (2009) *Na-O anticorrelation and HB. VIII. Proton-capture elements and metallicities in 17 globular clusters from UVES spectra.* https://www.aanda.org/articles/aa/full_html/2009/37/aa12097-09/aa12097-09.html
- [9] Milone, A. P.; Marino, A. F.; Mastrobuono-Battisti, A.; Lagioia, E. P. (2018) *Gaia unveils the kinematics of multiple stellar populations in 47 Tucanae* <https://academic.oup.com/mnras/article/479/4/5005/5055622>
- [10] Lagioia, E. P.; Milone, A. P.; Marino, A. F.; Dotter, A. (2019) *Helium Variation in Four Small Magellanic Cloud Globular Clusters* <https://iopscience.iop.org/article/10.3847/1538-4357/aaf729>
- [11] Dotter, A.; Sarajedini, A.; Anderson, J.; Aparicio, A.; Bedin, L. R.; Chaboyer, B.; Majewski, S.; Marín-Franch, A.; Milone, A.; Paust, N.; Piotto, G.; Reid, I. N.; Rosenberg, A.; Siegel, M. (2009) *THE ACS SURVEY OF GALACTIC GLOBULAR CLUSTERS. IX. HORIZONTAL BRANCH MORPHOLOGY AND THE SECOND PARAMETER PHENOMENON* <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0004-637X/708/1/698>
- [12] Marino, A. F.; Villanova, S.; Milone, A. P.; Momany, Y.; Bedin, L. R.; Medling, A. M. (2008) *Spectroscopic and photometric evidence of two stellar populations in the Galactic globular cluster NGC 6121 (M4)* <https://www.aanda.org/articles/aa/abs/2008/41/aa10389-08/aa10389-08.html>
- [13] Freeman, K. C.; Norris, J. (1981) *The chemical composition, structure, and dynamics of globular clusters* <https://www.annualreviews.org/doi/10.1146/annurev.aa.19.090181.001535>
- [14] Lee, Y. -W.; Joo, J. -M.; Sohn, Y. -J.; Rey, S. -C.; Lee, H. -C.; Walker, A. R. (1999) *Multiple stellar populations in the globular cluster ω Centauri as tracers of a merger event* <https://www.nature.com/articles/46985>

- [15] D'Antona, F.; Bellazzini, M.; Caloi, V.; Fusi Pecci, F.; Galletti, S.; R. T. Rood, R. T. (2005) *A Helium Spread among the Main-Sequence Stars in NGC 2808* <https://iopscience.iop.org/article/10.1086/431968>
- [16] Piotto, G.; Bedin, L. R.; Anderson, J.; King, I. R.; Cassisi, S.; Milone, A. P.; Villanova, S.; Pietrinferni, A.; Renzini, A. (2007) *A Triple Main Sequence in the Globular Cluster NGC 2808* <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2007ApJ...661L..53P/abstract>
- [17] Milone, A. P.; Bedin, L. R.; Piotto, G.; Anderson, J.; King, I. R.; Sarajedini, A.; Dotter, A.; Chaboyer, B.; Marín-Franch, A.; Majewski, S.; Aparicio, A.; Hempel, M.; Paust, N. E. Q.; Reid, I. N.; Rosenberg, A.; Siegel, M. (2008) *The ACS Survey of Galactic Globular Clusters. III. The Double Subgiant Branch of NGC 1851* <https://iopscience.iop.org/article/10.1086/524188/meta>
- [18] Han, S. -I.; Lee, Y.-W.; Joo, S. -J.; Sohn, S. T.; Yoon, S. -J.; Kim, H. -S.; Lee, J. -W. (2009) *THE PRESENCE OF TWO DISTINCT RED GIANT BRANCHES IN THE GLOBULAR CLUSTER NGC 1851* <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0004-637X/707/2/L190/meta>
- [19] Marino, A. F.; Villanova, S.; Piotto, G.; Milone, A. P.; Momany, Y.; Bedin, L. R.; Medling, A. M. (2008) *Spectroscopic and photometric evidence of two stellar populations in the Galactic globular cluster NGC 6121 (M4)* <https://www.aanda.org/articles/aa/abs/2008/41/aa10389-08/aa10389-08.html>
- [20] Kravtsov, V.; Alcaíno, G.; Marconi, G.; Alvarado, F. (2011) *Strong radial segregation between sub-populations of evolutionary homogeneous stars in the Galactic globular cluster NGC 6752* https://www.aanda.org/articles/aa/full_html/2011/03/aa15975-10/aa15975-10.html
- [21] Kravtsov, V.; Alcaíno, G.; Marconi, G.; Alvarado, F. (2010) *Wide-field multi-color photometry of the Galactic globular cluster NGC 1261* <https://www.aanda.org/articles/aa/abs/2010/08/aa13449-09/aa13449-09.html>
- [22] Anderson, J.; Piotto, G.; King, I. R.; Bedin, L. R.; Guhathakurta, P. (2009) *MIXED POPULATIONS IN GLOBULAR CLUSTERS: ET TU, 47 TUC?* <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0004-637X/697/1/L58/meta>
- [23] Milone, A. P.; Piotto, G.; King, I. R.; Bedin, L. R.; Anderson, J.; Marino, A. F.; Momany, Y.; Malavolta, L.; Villanova, S. (2010) *MULTIPLE STELLAR POPULATIONS IN THE GALACTIC GLOBULAR CLUSTER NGC 6752* <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0004-637X/709/2/1183/meta>
- [24] Sbordone, L.; Salaris, M.; Weiss, A.; Cassisi, S. (2011) *Photometric signatures of multiple stellar populations in Galactic globular clusters* https://www.aanda.org/articles/aa/full_html/2011/10/aa16714-11/aa16714-11.html
- [25] Norris, J.; Freeman, K. C. (1982) *The anticorrelation of carbon and nitrogen on the horizontal branch of 47 Tucanae* <https://adsabs.harvard.edu/full/1982ApJ...254..143N>
- [26] Milone, A. P.; Piotto, G.; Bedin, L. R.; King, I. R.; Anderson, J.; Marino, A. F.; Bellini, A.; Gratton, R.; Renzini, A.; Stetson, P. B.; Cassisi, S.; Aparicio, A.; Bragaglia, A.; Carretta, E.; D'Antona, F.; Di Criscienzo, M.; Lucatello, S.; Monelli, M.; Pietrinferni, A.; (2012) *MULTIPLE STELLAR POPULATIONS IN 47 Tucanae* <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0004-637X/744/1/58>
- [27] D'Ercole, A.; Vesperini, E.; D'Antona, F.; McMillan, S. L. W.; Recchi, S. (2008) *Formation and dynamical evolution of multiple stellar generations in globular clusters* <https://academic.oup.com/mnras/article/391/2/825/1747100?login=true>
- [28] Bekki, K. (2017) *Globular cluster formation with multiple stellar populations from hierarchical star cluster complexes* <https://academic.oup.com/mnras/article/467/2/1857/2924799>
- [29] Decressin, T.; Meynet, G.; Charbonnel, C.; Prantzos, N.; Ekström, S. (2007) *Fast rotating massive stars and the origin of the abundance patterns in galactic globular clusters* <https://www.aanda.org/articles/aa/abs/2007/12/aa6013-06/aa6013-06.html>
- [30] Decressin, T.; Charbonnel, C.; Meynet, G. (2007) *Origin of the abundance patterns in Galactic globular clusters: constraints on dynamical and chemical properties of globular clusters* <https://www.aanda.org/articles/aa/abs/2007/45/aa8425-07/aa8425-07.html>

- [31] de Mink, S. E.; Pols, O. R.; Langer, N.; Izzard, R. G. (2009) *Massive binaries as the source of abundance anomalies in globular clusters* https://www.aanda.org/articles/aa/full_html/2009/43/aa13205-09/aa13205-09.html
- [32] Renzini, A. (2008) *Origin of multiple stellar populations in globular clusters and their helium enrichment* <https://academic.oup.com/mnras/article/391/1/354/1124279>
- [33] Prantzos, N.; Charbonnel, C. (2006) *On the self-enrichment scenario of galactic globular clusters: constraints on the IMF* <https://www.aanda.org/articles/aa/abs/2006/40/aa5374-06/aa5374-06.html>
- [34] Elmegreen, B. G. (2017) *Globular Cluster Formation at High Density: A Model for Elemental Enrichment with Fast Recycling of Massive-star Debris* <https://iopscience.iop.org/article/10.3847/1538-4357/836/1/80/meta>
- [35] Wünsch, R.; Palouš, J.; Tenorio-Tagle, G.; Ehlerová, S. (2017) *The Formation of Secondary Stellar Generations in Massive Young Star Clusters from Rapidly Cooling Shocked Stellar Winds* <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2017ApJ...835...60W/abstract>
- [36] Bastian, N.; Lamers, H. J. G. L. M.; de Mink, S. E.; Longmore, S. N.; Goodwin, S. P.; Gieles, M. (2013) *Early disc accretion as the origin of abundance anomalies in globular clusters* <https://academic.oup.com/mnras/article/436/3/2398/1255530>
- [37] Salaris, M.; Cassisi, S. (2014) *Lithium and oxygen in globular cluster dwarfs and the early disc accretion scenario* https://www.aanda.org/articles/aa/full_html/2014/06/aa23722-14/aa23722-14.html
- [38] Renzini, A.; D'Antona, F.; Cassisi, S.; King, I. R.; Milone, A. P.; Ventura, P.; Anderson, J.; Bedin, L. R.; Bellini, A.; Brown, T. M.; Piotto, G.; van der Marel, R. P.; Barbuy, B.; Dalessandro, E.; Hidalgo, S.; Marino, A. F.; Ortolani, S.; Salaris, M.; Sarajedini, A. (2015) *The Hubble Space Telescope UV Legacy Survey of Galactic Globular Clusters - V. Constraints on formation scenarios* <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2015MNRAS.454.4197R/abstract>
- [39] Wijnen, T. P. G.; Pols, O. R.; F. I. Pelupessy, F. I.; Portegies Zwart, S. (2016) *Face-on accretion onto a protoplanetary disc* <https://www.aanda.org/articles/aa/pdf/2016/10/aa27886-15.pdf>
- [40] Hopkins, P. F. (2014) *Some stars are totally metal: a new mechanism forming dust across star-forming clouds, and consequences for planets, stars, and galaxies*. HopkinsPF.2014.ApJ797:59
- [41] Gieles, M.; Charbonnel, C.; Krause, M. G. H.; Hénault-Brunet, V.; Agertz, O.; Lamers, H. J. G. L. M.; Bastian, N.; Gualandris, A.; Zocchi, A.; Petts, J. A. (2018) *Concurrent formation of supermassive stars and globular clusters: implications for early self-enrichment* <https://academic.oup.com/mnras/article/478/2/2461/4987226>
- [42] Denissenkov, P. A.; Hartwick, F. D. A. (2014) *Supermassive stars as a source of abundance anomalies of proton-capture elements in globular clusters* <https://academic.oup.com/mnrasl/article/437/1/L21/1012786>
- [43] Marcolini, A.; Gibson, B. K.; Karakas, A. I.; Sánchez-Blázquez, P. (2009) *The chemical evolution of globular clusters - I. Reactive elements and non-metals* <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2009MNRAS.395..719M/abstract>
- [44] Gerasimov, R.; Burgasser, A. J.; Caiazzo, I.; Homeier, D.; Richer, H. B.; Correnti, M.; Heyl, J. (2023) *Exploring the Chemistry and Mass Function of the Globular Cluster 47 Tucanae with New Theoretical Color-Magnitude Diagrams* <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2023arXiv231011800G/abstract>

Ringraziamenti

Al termine di questa tesi e del mio percorso di laurea triennale ringrazio innanzitutto la mia mamma e il mio papà: questi anni non sono stati facili e alcune volte durante il tragitto sono inciampata, ma loro hanno sempre creduto in me e mi hanno incoraggiata, per questo a loro dedico il mio lavoro.

Un grande ringraziamento va al mio relatore Antonino Milone, una persona molto disponibile e cordiale, mi ha dato l'opportunità di capire come lavora un gruppo di ricerca, per una studentessa come me, oggi laureata, questa è stata una grandissima occasione.