

UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA



Dipartimento
di Fisica
e Astronomia
Galileo Galilei

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Fisica e Astronomia “Galileo Galilei”

Corso di Laurea in Astronomia

Tesi di Laurea Triennale

**Popolazioni multiple
in ammassi globulari:
Studio di M22 con JWST**

Relatore:

Prof. Antonino P. Milone

Laureando:

Gianmarco Tosarello

Matricola 2110904

Anno Accademico 2025–2026

“L’azoto nel nostro DNA, il calcio nei nostri denti, il ferro nel nostro sangue, il carbonio nelle nostre torte di mele sono stati creati dentro stelle che collassano. Siamo fatti di materia stellare.”

– Carl Sagan, *Cosmos* (1980)

Abstract

In astrofisica, il fenomeno delle popolazioni multiple che caratterizza gli ammassi globulari consiste nella presenza di gruppi di stelle con diversa composizione chimica nei singoli oggetti. Nella prima parte di questa tesi, ho riportato le principali evidenze osservative alla base di questo fenomeno, tra cui la presenza di distinte sequenze stellari nei diagrammi fotometrici degli ammassi e il riscontro di anomalie tramite la spettroscopia. In campo fotometrico, ho messo in evidenza l'utilizzo di filtri studiati appositamente per costruire indici di colore che evidenziano determinate differenze negli elementi chimici delle stelle e diagrammi capaci di separare le diverse popolazioni. Sono poi passato alla classificazione degli ammassi globulari di Tipo-I e di Tipo-II, distinti principalmente in base all'omogeneità e alla variazione di metallicità nelle loro stelle.

Per poter spiegare l'origine di questo fenomeno, ho riportato le ipotesi più importanti sugli scenari di formazione, principalmente divise tra molteplici focolai che hanno dato origine alle generazioni stellari e l'inquinamento delle stelle in formazione da parte delle generazioni precedenti.

In seguito, sono passato all'elenco di varie proprietà comuni riscontrabili in oggetti anche al di fuori della Via Lattea, tra cui la dipendenza dalla massa dell'ammasso, fondamentale per ipotizzare l'origine di quelli di Tipo-II.

Nell'ultima parte di questo lavoro, ho analizzato l'ammasso M22 utilizzando dati ottenuti da osservazioni fotometriche del James Webb Space Telescope, ponendo particolare attenzione all'allargamento del Ginocchio della sequenza principale, dovuto alla variazione di Fe nelle stelle.

Tramite il fit di isocrone con diversi valori di $[\text{Fe}/\text{H}]$, ho applicato una proporzione tra l'estensione delle stelle contenute nell'intervallo di metallicità delle isocrone $\Delta[\text{Fe}/\text{H}] = 0.20$ dex, centrate su quella con $[\text{Fe}/\text{H}] = -1.70$ dex, e quelle presenti nell'intervallo di indice di colore del Ginocchio. In questo modo ho potuto calcolare la variazione di Fe tra le stelle di questa zona, pari a $\Delta[\text{Fe}/\text{H}] \sim 0.47$ dex, tramite un metodo indipendente. Questo valore fa pensare che gli effetti della differente metallicità, osservati in

spettroscopia nelle stelle del ramo delle giganti rosse e delle sub-giganti, non siano artefatti evolutivi. Questi sarebbero una proprietà delle stelle di M22, prova di una storia chimica più complessa, non da ammasso globulare, ma da nucleo di una galassia nana distrutta e catturata dalla Via Lattea. Considerando che, tra gli ammassi di Tipo-II, sia M54 che ω Centauri sono considerati nuclei galattici, il risultato di questa tesi potrebbe quindi avere anche implicazioni cosmologiche, come una maggiore comprensione del Missing Satellites Problem.

Infine, ho analizzato le eventuali variazioni di He lungo la sequenza principale, osservando che non assumono valori abbastanza grandi da risultare in effetti rilevanti nel diagramma colore-magnitudine, e anche quelle di O nella bassa sequenza tramite considerazioni dal punto di vista fisico dell'assorbimento delle molecole nelle atmosfere stellari.

Indice

1	Introduzione	9
2	Caratterizzazione delle popolazioni multiple	13
2.1	Strumenti di osservazione	13
2.2	Classificazione	18
3	Scenari di formazione	21
3.1	Generazioni multiple stellari	21
3.2	Fenomeni di accrescimento	24
4	Composizione chimica delle popolazioni	27
4.1	Elementi leggeri	27
4.2	Variazioni di metallicità	29
4.2.1	Disomogeneità chimica nella prima popolazione . .	29
4.2.2	Composizione ammassi di Tipo-II	30
5	Proprietà delle popolazioni multiple	33
5.1	Dipendenza dalla massa dell'ammasso	34
5.2	Popolazioni multiple e massa stellare	34
5.3	Popolazioni multiple lungo l'AGB	35
5.4	Distribuzione spaziale	36
5.5	Età dell'ammasso e popolazioni multiple	36
5.6	Popolazioni multiple e la galassia ospite	37
6	James Webb Space Telescope	39
6.1	Struttura del James Webb	40
6.2	Near-Infrared Camera	42
7	Studio di M22	43
7.1	Fotometria di M22	43
7.1.1	Costruzione del diagramma colore-magnitudine . .	45

INDICE

7.1.2	Analisi osservative	47
7.2	Fit delle Isocrone	47
7.2.1	Variazioni di Fe	48
7.2.2	Variazioni di He	51
7.2.3	Variazioni di O	52
8	Risultati e Conclusioni	55
	Bibliografia	59

Capitolo 1

Introduzione

In una sera del 1665, quando l'astronomo tedesco Johann Abraham Ihle puntò il suo telescopio sulla costellazione del Sagittario, non poteva immaginare di aver identificato il primo ammasso globulare della storia dell'umanità. Questo corpo celeste sarebbe stato successivamente nominato come M22 da Charles Messier.

Nel 1782, William Herschel cominciò a utilizzare telescopi di apertura maggiore rispetto a Ihle, con lo scopo di individuare altri di questi oggetti e costruire ciò che sarebbe stato alla base del *New General Catalogue* (NGC).

Ad oggi si contano circa 200 ammassi globulari presenti nella Via Lattea, comprendendo sia quelli conosciuti con certezza che quelli candidati e ancora incerti, e con tutti gli studi scientifici fatti a riguardo, sono diventati una vera e propria finestra osservativa delle prime fasi di vita dell'Universo.

Gli ammassi globulari sono densi sistemi sferoidali di centinaia di migliaia di antiche stelle che orbitano nell'alone delle galassie. Per molto tempo, sono stati usati come laboratorio di applicazione dei modelli di evoluzione stellare, dato che si pensava che le loro stelle avessero un'origine comune da un singolo focolaio di formazione.

Quello che però ha rivoluzionato le prospettive in campo astronomico negli ultimi anni è stata la scoperta di più di una singola popolazione di stelle in questi ammassi. Dato che questi si originano a redshift $z \gtrsim 3$, quando solo una piccola frazione di massa stellare della Via Lattea si era formata, possono dunque offrire nuovi scenari sulla costruzione delle galassie nelle loro prime fasi di vita ([[Antonino P. Milone et al. 2022](#)] e riferimenti all'interno).

Sono stati principalmente tre i fattori osservativi che hanno messo in

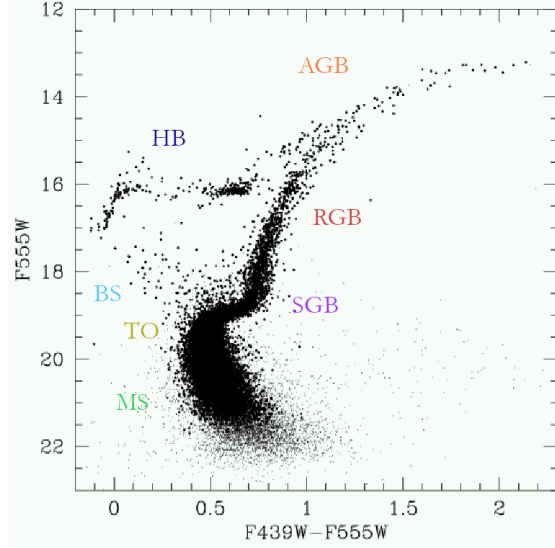
discussione l'idea della singola popolazione:

- **Anomalie chimiche.** La composizione chimica delle stelle negli ammassi globulari non è omogenea, soprattutto per quanto riguarda gli elementi interessati dal bruciamento dell'H, come C, N, O, Na, Al, Mg, Si e K. La variazione di questi elementi è alla base di modelli chimici ben noti [Kraft 1994]; infatti, le stelle con meno abbondanza di N e Na e più di C ed O ricordano quelle nel piano galattico con la stessa metallicità (Z), mentre quelle con più abbondanza di N e Na e minore di C ed O si trovano di più negli ammassi globulari.
- **Il secondo parametro del ramo orizzontale.** Grazie a studi degli anni '60 del secolo scorso [Sandage et al. 1967], si è osservato che vari ammassi globulari con la stessa Z presentavano una diversa morfologia del ramo orizzontale (HB), indicando così una dipendenza da un ulteriore parametro, come l'abbondanza di He [Catelan 2009].
- **Sequenze multiple nel diagramma colore-magnitudine (CMD).** Dalla fine degli anni novanta del secolo scorso, c'è stato un susseguirsi di evidenze di sequenze principali (MS), rami delle giganti rosse (RGB) e delle sub-giganti (SGB) divisi o allargati nei CMD degli ammassi globulari (un esempio di CMD di un ammasso globulare con tutte le sequenze è riportato in **Fig. 1** nella pagina successiva), mostrando così sequenze multiple continue di fasi evolutive delle stelle, dalla MS fino al raffreddamento delle nane bianche ([Nate Bastian et al. 2018; Antonino P. Milone et al. 2022] e referenze all'interno).

Oltre ad essere il primo ammasso globulare mai osservato, M22 rappresenta un caso prototipo in astrofisica. Le sue variazioni di metallicità, quindi nella presenza di Fe e di elementi-s¹ nelle stelle, potrebbero implicare un forte legame con il nucleo della Via Lattea, permettendo di ipotizzare ulteriori scenari di formazione oltre a quelli già noti.

¹Dato che i bruciamenti nucleari, nelle stelle più massicce, smettono di produrre energia quando si raggiunge il Fe come prodotto, gli elementi più pesanti vengono generati dallo s-process (slow neutron-capture process). Questi processi avvengono principalmente nella fase AGB delle stelle di piccola massa e consistono in una catena di reazioni che coinvolgono neutroni e nuclei e che portano alla produzione di circa metà degli elementi più pesanti del Fe, come Y, Zr e Ba. Molti altri vengono prodotti durante le supernove delle stelle più massicce.

Figura 1: Diagramma colore-magnitudine di NGC 1851 (preso dal catalogo di ammassi globulari [Piotto et al. 2002]) dove sono elencate le diverse sequenze evolutive delle varie stelle, comprese le Blue Stragglers (BS), il ramo asintotico delle giganti (AGB) e il Turn-Off (TO).



La comprensione dell'origine del fenomeno delle popolazioni multiple (MP) è uno dei principali obiettivi nell'evoluzione stellare e nella nucleosintesi ad alti z ed è alla base della formazione degli ammassi globulari.

Di conseguenza, non si ha ancora una piena conoscenza del fenomeno e ci sono tuttora due principali scenari di formazione che vengono dibattuti nel mondo dell'astrofisica stellare.

Lo scopo di questa tesi è dunque quello di presentare una visione ampia delle evidenze e implicazioni delle popolazioni multiple (**Cap. 2, 3, 4, 5**), andando poi a studiare in particolare le abbondanze chimiche nelle stelle di piccola massa² dell'ammasso M22 che, tramite l'uso di tecniche fotometriche sui dati acquisiti dal James Webb Space Telescope, potrebbe permettere di fare chiarezza sulla dibattuta origine di questo oggetto (**Cap. 6, 7, 8**).

²Per lo studio della bassa MS, le stelle di piccola massa avranno $M \sim 0.1M_{\odot}$ e quelle di grande massa $0.9M_{\odot} \lesssim M \lesssim 1.1M_{\odot}$, con $M_{\odot} \simeq 1.99 \cdot 10^{30} kg$ la massa del Sole.

Capitolo 2

Caratterizzazione delle popolazioni multiple

Per molto tempo, la tecnica principale per studiare le popolazioni stellari negli ammassi globulari è stata la spettroscopia, che permetteva di individuare le abbondanze chimiche delle stelle, a cui solo negli ultimi decenni è stata affiancata anche la fotometria.

Grazie alle prime rilevazioni di diverse sequenze nel CMD contenenti stelle con differenti abbondanze di elementi leggeri [Marino et al. 2008], si sono potuti ideare strumenti che hanno permesso di massimizzare la separazione tra popolazioni con distinta composizione chimica.

Oltre all'ideazione di queste nuove tecniche, un contributo fondamentale è stato fornito anche dalle osservazioni ad alta precisione dei telescopi da terra e di quelli spaziali, come l'Hubble Space Telescope (HST) e il James Webb Space Telescope (JWST).

2.1 Strumenti di osservazione

Di seguito è riportato un elenco delle varie tecniche fotometriche usate per individuare e studiare le diverse popolazioni:

- **Fotometria a banda larga nell'UV.** I CMD fatti nella banda U (con $\lambda_{max,U} = 365$ nm e larghezza a mezza altezza (FWHM) pari a 66 nm) sono strumenti potenti per il riconoscimento di popolazioni stellari multiple in diverse fasi evolutive. Si è riusciti infatti a dimostrare che le stelle con diverse abbondanze di C, N, O e Na definiscono distinti RGB nel diagramma U vs. $(U - B)$ (con $\lambda_{max,B} = 445$ nm e FWHM pari a 95 nm) (**Fig. 2**). La ragione principale dietro questa divisione sta nel fatto che il filtro U include le bande molecolari di

NH e CN, mentre quello B comprende anche quella del CH [Marino et al. 2008].

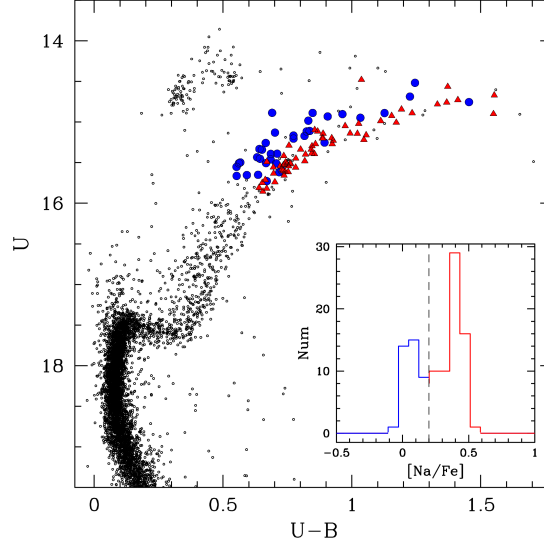


Figura 2: Diagramma colore-magnitudine U vs. $(U - B)$ dell'ammasso globulare M4, dove le stelle nel ramo delle giganti rosse sono state divise in due colori in base all'abbondanza di Na indicata nell'istogramma nella parte inferiore [Marino et al. 2008].

Si nota dunque che le stelle della seconda popolazione (2P) hanno una magnitudine in U minore e un indice di colore $(U - B)$ più rosso di quelle della prima popolazione (1P).

- **Fotometria a banda stretta.** Nei CMD può essere utilizzato anche l'indice di Strömgren:

$$c_1 = (U - V) - (V - B)$$

(con $\lambda_{max,V} = 550$ nm e FWHM pari a 89 nm). Ideato inizialmente per studiare la discontinuità di Balmer, questo indice si è rivelato un efficiente strumento per evidenziare la variazione della forza delle righe del CN tra varie stelle e, dunque, per analizzare le popolazioni multiple lungo il RGB in vari ammassi globulari [Grundahl et al. 1998].

Entrambi questi strumenti, però, presentano limitazioni per le stelle di grande massa.

- **Wide color baseline.** I modelli stellari prevedono che le stelle in MS e nel RGB con diverso contenuto di He e stessa luminosità abbiano differenti temperature efficaci T_{eff} ³. Dunque, le stelle ricche di He mostrano colori più blu rispetto alle stelle con maggiore abbondanza di He primordiale, dovuto alle loro T_{eff} maggiori.

Inoltre l'He altera la struttura della stella, lasciando così una traccia fotometrica e permettendo di creare CMD con larghe bande di indici di colore sensibili alla variazione di abbondanza di He [Girardi, L. et al. 2007].

- **Diagrammi a due colori e pseudo CMD.** Per l'individuazione di popolazioni multiple lungo diverse fasi evolutive, sono molto utilizzati i diagrammi a due colori con i filtri nel visibile, nell'UV e nel lontano-UV. La tipologia di diagramma più comune è quella $m_{F275W} - m_{F336W}$ vs. $m_{F336W} - m_{F438W}$ (con tre filtri lunghezze d'onda centrali di 275 nm, 336 nm e 438 nm). Questo perché i filtri F275W e F336W includono le righe molecolari dell'OH e dell'NH, mentre l'F438W comprende quelle del CN e del CH. Di conseguenza, le stelle 1P, ricche di O e C e povere di N, sono più luminose nell'F336W ma più deboli negli F275W e F438W rispetto alle 2P [A. P. Milone et al. 2011].

Per poter analizzare le popolazioni multiple lungo tutte le linee evolutive delle stelle, questi colori sono stati combinati per creare lo pseudo-colore [A. P. Milone et al. 2013]:

$$C_{F275W,F336W,F438W} = (m_{F275W} - m_{F336W}) - (m_{F336W} - m_{F438W})$$

- La **Mappa Cromosomica (ChM)** è uno pseudo-diagramma a due colori, ideato separatamente per le stelle in MS, RGB o AGB. Diversamente dai normali diagrammi a due colori, le varie sequenze evolutive delle stelle sono verticalizzate in modo da raggruppare le diverse popolazioni in piccole regioni del grafico (**Fig. 3**). Le ChM sono create tramite indici di colore sensibili a specifiche composizioni chimiche delle stelle degli ammassi, così da poter differenziare al massimo le diverse popolazioni [A. P. Milone et al. 2015a; A. P. Milone et al. 2017b].

³Per T_{eff} si intende la temperatura che avrebbe un corpo nero che emette la stessa energia totale dell'oggetto considerato, come una stella o un pianeta.

Le normali ChM sono costruite combinando $m_{F275W} - m_{F814W}$ con $C_{F275W,F336W,F814W}$ per osservare le differenze di He e N, ma ne esistono anche per lo studio delle nane rosse⁴ con fotometria in ottico e nel vicino infrarosso [A. P. Milone et al. 2017a].

Esistono anche le mappe cromosomiche universali [Marino et al. 2019], che consentono il confronto tra mappe di diversi ammassi globulari.

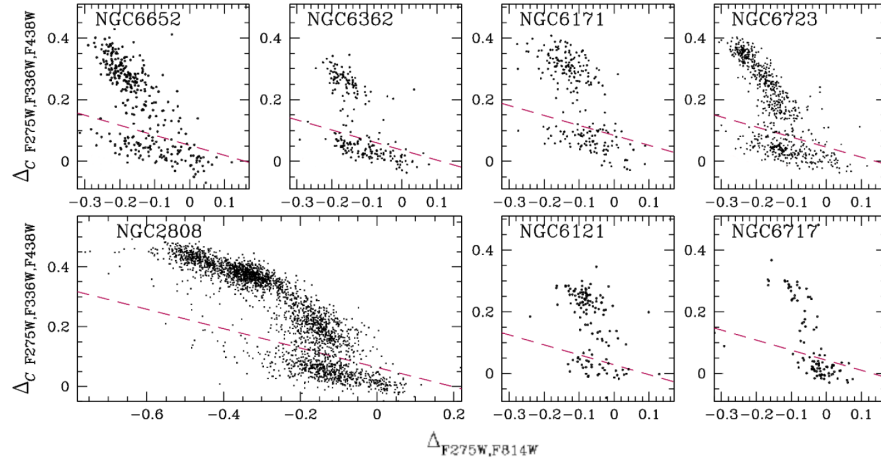


Figura 3: Esempi di mappe cromosomiche di diversi ammassi globulari, dove la linea magenta indica approssimativamente la divisione fra le popolazioni [A. P. Milone et al. 2017b].

- **Fotometria integrata.** Tramite l'utilizzo di diagrammi con lo pseudo-colore $C_{F275W,F336W,F438W}$ e l'indice di colore $m_{F275W} - m_{F814W}$ si possono efficacemente trovare informazioni sulle proprietà delle popolazioni multiple dalla luce integrata degli ammassi globulari. Questo strumento ha le potenzialità per poter studiare le popolazioni stellari al di fuori del gruppo locale [Jang et al. 2021].
- La **fotometria nel vicino infrarosso (IR)** è uno dei principali strumenti per l'identificazione delle popolazioni multiple delle nane rosse.
I filtri F110W e F160W (con lunghezza d'onda centrale rispettivamente pari a $1.10 \mu m$ e $1.60 \mu m$) della camera NIR/WFC3 di HST sono

⁴Dette anche *M dwarfs*, sono le stelle meno massicce e luminose e più fredde della MS, con temperature superficiali nell'intervallo $2100 K \lesssim T \lesssim 3900 K$ e con massa $0.075 M_{\odot} \lesssim M \lesssim 0.61 M_{\odot}$, caratterizzate da spettri dominati dalle righe di assorbimento del H_2O e del TiO [Henry et al. 2024].

fortemente utilizzati a questo scopo; in particolare, l’F160W è molto sensibile alle bande di assorbimento delle molecole che contengono O, contrariamente all’F110W, che è poco influenzato da questo. Infatti, si è riscontrato che le stelle 2P sono povere di O e hanno, dunque, minori magnitudini m_{F160W} e indici di colore $m_{F110W} - m_{F160W}$ più rossi rispetto alle 1P [A. P. Milone et al. 2011; Dondoglio et al. 2022]. Questo è il più potente strumento osservativo applicato ai dati del JWST che, grazie alla sua enorme risoluzione, ha permesso di rilevare le stelle di piccola massa nella bassa MS di M22, rimaste fino ad ora invisibili all’HST.

Tutte queste tecniche riguardano soltanto il campo fotometrico tramite l’utilizzo di filtri e falsi colori per studiare le abbondanze chimiche delle stelle. Quest’ultima caratteristica, però, si può analizzare con maggiore dettaglio usando la spettroscopia che, purtroppo, presenta una problematica fondamentale: la raccolta dei dati delle stelle deboli, come le nane rosse, richiederebbe tempi di osservazione estremamente lunghi, facendo così convergere lo studio delle popolazioni su pochi membri dell’ammasso globulare in questione.

In un singolo caso è stato possibile usare dati spettroscopici per stelle di piccola massa, cioè per l’ammasso 47 Tucanae (o NGC 104, **Fig. 4**), data la sua grande vicinanza al Sole ($D = 4.52 \pm 0.03 \text{ kpc}$ [H. Baumgardt et al. 2021]) [Marino et al. 2024].



Figura 4: Composizione a colori di un campo largo contenente 47 Tucanae, la Small Magellanic Cloud e altri ammassi globulari non appartenenti alla Via Lattea, ottenuta dalla *Digitized Sky Survey 2* [ESO/M.-R. Cioni/VISTA Magellanic Cloud survey 2013].

Per quanto riguarda lo studio di M22, è stata ampiamente usata la fotometria nel vicino infrarosso per l’osservazione delle stelle di piccola

massa, permettendo così di analizzare gli effetti fisici delle differenze di O e He nelle diverse sequenze del CMD create dalle popolazioni multiple. Data le variazioni nell'abbondanza di Fe di M22, la combinazione tra fotometria nell'IR e tecniche di interpolazione delle isocrone mi ha permesso di quantificare le differenze di metallicità nelle sue popolazioni stellari.

2.2 Classificazione

Durante tutta la trattazione, molte delle proprietà delle popolazioni multiple cambieranno per ogni ammasso globulare, come la composizione chimica, la frazione di stelle 1P e 2P e le sotto-popolazioni che contengono. Conviene dunque classificare gli ammassi in due gruppi principali: quelli di Tipo-I e di Tipo-II, in base alla distribuzione delle loro stelle nelle ChM e/o alla variazione degli elementi pesanti in ogni componente.

Gli ammassi di Tipo-I contengono stelle 1P e 2P con simile metallicità, ma diversa abbondanza di elementi leggeri. Quelli di Tipo-II presentano almeno una delle seguenti proprietà: due o più sequenze nella ChM, ampi o divisi SGB nei CMD in ottico e UV, e significative variazioni nella metallicità. Queste tre caratteristiche potrebbero essere legate fisicamente tra loro. In **Fig. 5** è presentato un esempio di distinzione fra ammassi globulari di entrambi i tipi con le ChM.

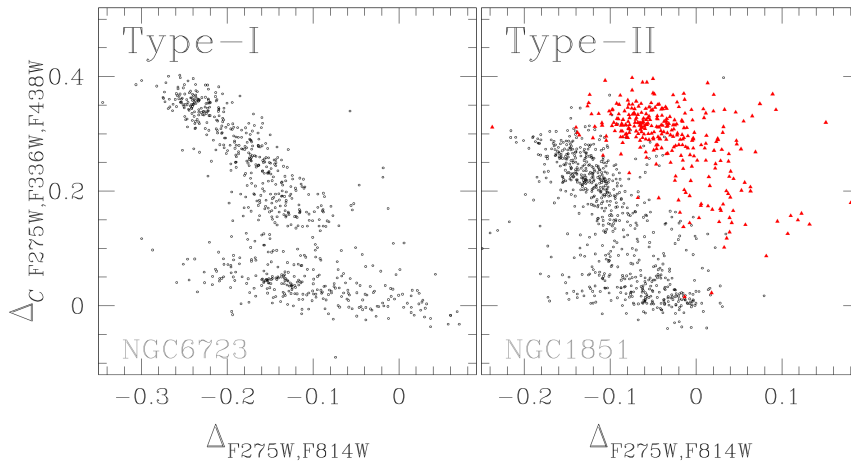


Figura 5: Mappe cromosomiche di due ammassi globulari prototipi di Tipo-I e Tipo-II, nel secondo ammasso le stelle colorate in rosso sono quelle nel ramo delle giganti rosse [A. P. Milone et al. 2017b].

Gli ammassi di Tipo-II costituiscono una classe di oggetti "anomali" dal punto di vista chimico. Questi, infatti, possiedono forti variazioni di elementi pesanti tra le stelle 2P, come una grande presenza di elementi-s e alta metallicità. M22 è un esempio prototipo di ammasso di Tipo-II, il quale, però, manifesta una modesta variazione degli elementi-s rispetto a tutti gli altri ammassi globulari [Marino et al. 2009].

Queste differenze sono, con molta probabilità, dovute a inquinatori con diversi intervalli di massa. Un'ipotesi che è stata avanzata afferma che, negli ammassi globulari più massicci, la formazione stellare è avvenuta in un intervallo di tempo maggiore rispetto agli altri, consentendo ai venti delle stelle di piccola massa in fase di AGB di arricchirli di elementi-s. Durante questo processo, il mezzo interstellare⁵, coinvolto dalle supernove delle stelle più massicce, ha avuto il tempo di ricadere nell'ammasso, arricchendo ulteriormente le nubi di gas che poi formeranno le stelle della popolazione successiva [Marino et al. 2021].

⁵Il mezzo interstellare (ISM) è l'insieme di materia (polveri, gas) che riempie lo spazio vuoto nelle galassie e che andrà a formare le nuove stelle.

Se le varie nubi sono costituite da atomi più pesanti di H ed He, come Fe ed elementi-s, le stelle che verranno create li conterranno in diverse abbondanze.

Capitolo 3

Scenari di formazione

Negli ultimi 40 anni, sono stati proposti diversi scenari di formazione e di evoluzione per spiegare l'origine delle popolazioni multiple e la composizione chimica delle stelle 2P che osserviamo oggi.

La proposta più importante fu quella dell'Ipotesi Evoluzionaria, che interpretava la presenza di diversi elementi leggeri nelle stelle RGB tramite un insieme di processi di mescolamento e reazioni termonucleari nei loro interni. Tuttavia, questa teoria venne smontata grazie alla scoperta di stelle nella MS che presentavano variazioni degli elementi leggeri. Questa evidenza osservativa portò a pensare che atomi come Na, Al e Mg si formassero negli interni delle stelle massicce, dato che quelle più leggere non hanno le temperature del nucleo ideali per formarli [Gratton et al. 2001].

La maggior parte degli scenari può essere raggruppata in due tipologie principali: episodi multipli di formazione stellare e fenomeni di accrescimento. Vengono riassunti di seguito i più importanti scenari di formazione delle popolazioni multiple negli ammassi globulari, con lo scopo di dare una visione generale sulle origini più probabili di questo fenomeno.

3.1 Generazioni multiple stellari

Questi scenari prevedono che gli ammassi globulari abbiano avuto diversi focolai di formazione stellare, in cui il gas emesso dalle stelle massicce 1P, durante la loro vita, si mescola con il materiale da cui si sono originate, per poi andare a formare le 2P.

Una delle conseguenze più importanti dello scenario multi-generazionale è il fenomeno del bilancio della massa, che consiste nella possibilità che gli

ammassi globulari siano stati più massicci ai loro albori, rispetto a quelli che osserviamo oggi, di un fattore $\sim 5\text{--}20$ [Renzini 2013]. Questo è dovuto al fatto che solo una piccola frazione della massa delle stelle 1P è stata emessa con la composizione richiesta per formare le 2P. Quindi, dato che attualmente osserviamo una grande quantità di queste stelle, i progenitori degli ammassi globulari odierni dovevano essere molto più massicci.

A seguito di ciò, si è potuto dedurre che gli ammassi primordiali hanno avuto un forte contributo nella formazione dell'alone e del nucleo della Via Lattea e potrebbero anche aver avuto un ruolo importante nella reionizzazione dell'universo⁶[Renzini 2017].

- **Scenario del Ramo Asintotico delle giganti.** Prevede che gli ammassi globulari abbiano avuto un importante evento di formazione stellare riguardante le stelle 1P. A seguito delle esplosioni di supernova, il mezzo interstellare ricco di metalli del proto-ammasso viene perso, mentre il gas espulso dalle stelle in fase di AGB viene accumulato. Successivamente, le stelle 2P si formano da questo mezzo, permettendo di riprodurre le osservazioni sull'anticorrelazione O-Na. Questo scenario ipotizza, inoltre, che le interazioni con la galassia, insieme all'espansione delle regioni esterne dell'ammasso, dovute alle supernove delle stelle 1P, siano responsabili della perdita di una grande frazione di queste stelle. Le 2P, presenti inizialmente solo nel centro dell'ammasso, diventerebbero poi quantitativamente dominanti [D'Ercole et al. 2010; D'Antona et al. 2016].
- **Scenario della stella massiccia in rapida rotazione (FRMS).** In questo caso, si ipotizza che i prodotti del bruciamento dell'H ad alte temperature (ciclo CNO) siano generati nel nucleo di stelle mas-

⁶L'epoca della reionizzazione è quel periodo della storia dell'universo avvenuto fra redshift $z \sim 20$ e $z \sim 6$, dunque, tra circa 200 milioni e 1 miliardo di anni dopo il Big Bang, in cui sono comparse le prime sorgenti astrofisiche in grado di ionizzare quasi completamente gli atomi e le molecole nel mezzo interstellare [Ellis 2014].

A seguito del disaccoppiamento materia-radiazione, che aveva portato all'emissione della CMB ($z \approx 1090$), l'universo ha raggiunto la Dark Age, cioè un'epoca in cui non erano ancora stati creati oggetti emittenti in grado di oltrepassare la barriera opaca creata da tutti gli elementi e composti neutri fino a quel momento formati. Questo, infatti, costituisce un periodo in cui non è possibile rilevare alcun tipo di radiazione e, dunque, solo dall'epoca della reionizzazione in poi è stato possibile osservare i primi fotoni dopo la CMB.

sicce rotanti vicino al limite di rottura⁷. La forte rotazione permette di portare in superficie e mescolare il materiale che verrà espulso. Questo contribuirà poi alla formazione delle stelle 2P.

Per poter spiegare al meglio le osservazioni, si ipotizza che il materiale proveniente dalle FRMS si mescoli con i rimasugli di gas della formazione delle stelle 1P (**Fig. 6**) [Decressin et al. 2007].

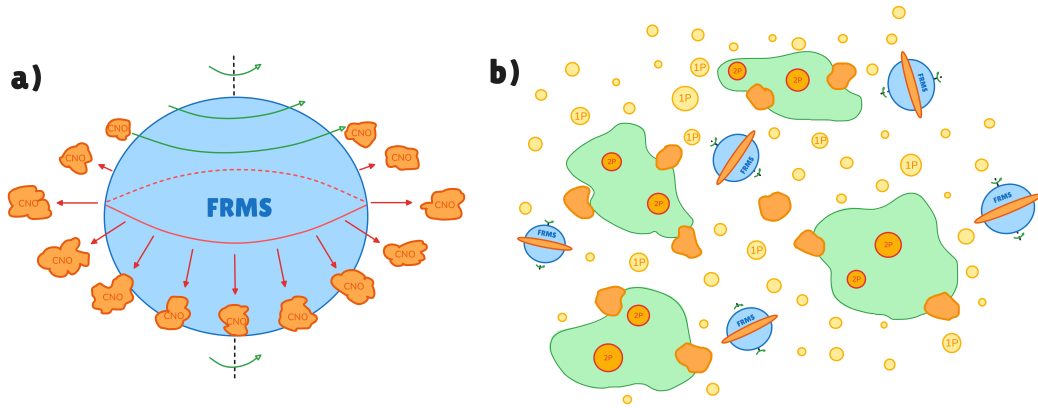


Figura 6: a) Schema di una FRMS, dove i prodotti del ciclo CNO sono espulsi (freccie rosse) intorno all'equatore stellare (linea rossa) formando un disco circumstellare. b) Visione schematica dell'ammasso, dove il materiale espulso dalle FRMS (arancione) si mescola con il gas primordiale che ha formato le stelle 1P (verde), generando le 2P.

- **Scenario delle binarie massicce interagenti.** In [Mink et al. 2009] sono state proposte le interazioni tra stelle massicce in sistemi binari come fonte del materiale di formazione delle stelle 2P.

Tramite simulazioni con stelle interagenti di diversa massa, si è osservato che quella più massiccia distrugge completamente l'involucro dell'altra, distribuendone il gas nel mezzo dell'ammasso primordiale. Queste emissioni di materia rispecchiano le stesse abbondanze di He, C, N, O, Na e Al negli ammassi globulari che osserviamo oggi.

- **Scenario del raffreddamento.** Una proposta che è stata avanzata ipotizza che la maggior parte degli ammassi globulari si siano formati

⁷Per una stella che ruota, esiste una velocità massima di rotazione all'equatore oltre la quale la forza centrifuga supera quella gravitazionale superficiale, rompendo così l'equilibrio idrostatico all'equatore della stella e portandola a espellere massa.

all'interno di Nane pre-galattiche⁸, quando ancora il corpo principale della Via Lattea non era stato creato [Renzini et al. 2022]. Le condizioni per la formazione di popolazioni multiple si sono avverate durante la generazione del nucleo galattico in ammassi globulari ricchi di metalli. Dato che la maggioranza degli ammassi presenta stelle 2P e 1P con simile abbondanza di elementi pesanti, il materiale da cui si sono formate le 2P non deve essere stato contaminato dalle supernove. Per permettere ciò, le stelle più massicce di $\sim 20\text{--}40 M_{\odot}$ eviterebbero questa fase finale di vita, collassando e formando dei buchi neri [Krause et al. 2013], ma sopprimendo i feedback di formazione stellare⁹ dopo la prima generazione di stelle dell'ammasso per un periodo di $\sim 5\text{--}10 Myr$.

La principale implicazione di questo scenario è una continua formazione stellare dal gas residuo e dalle emissioni delle binarie fino all'inizio delle supernove. Di conseguenza, le emissioni di materia dei sistemi binari sono i maggiori responsabili della composizione chimica delle stelle 2P e, inoltre, questa ipotesi è simile a quella dell'overcooling nell'universo primordiale, secondo cui, senza il feedback, tutta la materia ordinaria sarebbe stata trasformata in stelle [Renzini et al. 2022].

3.2 Fenomeni di accrescimento

Una tipologia alternativa di scenari di formazione delle popolazioni multiple suggerisce che tutte le stelle di un ammasso globulare siano coeve, cioè nate nello stesso periodo di tempo da una singola nube, e che le composizioni peculiari nelle 2P si siano originate da fenomeni di accrescimento nella fase di pre-MS [N. Bastian et al. 2013].

- **Scenario del disco di accrescimento primordiale.** In questa ipotesi, il materiale espulso dalle binarie interagenti e dalle stelle massicce in rapida rotazione inquina il disco proto-planetario delle

⁸Sono primordiali sistemi stellari di piccola massa, dominati da materia oscura, che si sono formati prima della reionizzazione dell'universo [Bovill et al. 2009].

⁹Si intendono quell'insieme di processi con cui i venti e l'energia, provenienti da stelle giovani, favoriscono o impediscono la formazione di nuove stelle.

stelle in pre-MS, influenzando così la composizione chimica delle 2P all’inizio della loro vita [N. Bastian et al. 2013].

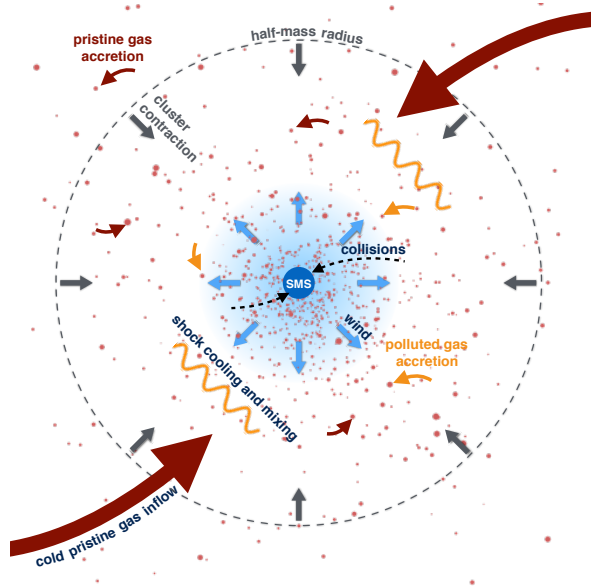
- **Scenario della stella supermassiccia.** [Denissenkov et al. 2013] hanno ipotizzato che il gas da cui sono nate le 2P provenga da stelle con $M > 10^3 M_{\odot}$. Grazie all’attrito dinamico, le stelle più massicce dell’ammasso si sono compattate nel suo centro, fondendosi e dando origine alla stella supermassiccia (SMS).

Date le loro grandi masse e luminosità, queste stelle superano il limite di Eddington¹⁰ perdendo così, a causa di forti venti e instabilità, enormi quantità di materia ricca di He e di prodotti del ciclo CNO e delle catture protoniche.

Un altro tipo di scenario che prevede le SMS ipotizza che nel proto-ammasso, a causa dell’accrescimento del gas, avvenga una contrazione adiabatica che aumenta drasticamente il tasso di collisioni tra le stelle (**Fig. 7**). Quando si raggiunge un’alta densità, questo fenomeno porta alla formazione di una SMS che, in seguito, emetterà il materiale secondo l’ipotesi precedente [Gieles et al. 2018].

Figura 7: Immagine schematica che mostra lo scenario di formazione di una SMS proposto da [Gieles et al. 2018].

Il gas primordiale (freccie rosse grandi) porta l’ammasso a contrarsi (freccie grigie), aumentando la densità al centro e formando la SMS tramite collisioni stellari. In seguito, i venti emessi dalla SMS (freccie azzurre) portano il materiale espulso a mescolarsi con quello primordiale e ad accrescere le stelle 2P in fase di pre-sequenza principale.



¹⁰Questo è un limite superiore alla luminosità delle stelle, espresso da $L < L_{Edd} = \frac{4\pi cGM}{\kappa(R)}$. Se la stella raggiunge o supera tale luminosità, allora viene violato l’equilibrio idrostatico, il che comporta una forte accelerazione della materia dovuta alla pressione di radiazione, con conseguente violenta perdita di massa.

In entrambi i casi, il gas espulso dalle SMS si mescola con quello primordiale, andando ad accrescere le proto-stelle che formeranno le 2P.

- **Scenario delle fusioni stellari.** Le fusioni tra stelle massicce in ammassi globulari ricchi di sistemi binari sono state considerate come possibili responsabili della presenza di popolazioni multiple [Wang et al. 2020]. I modelli a N corpi di ammassi molto giovani hanno mostrato che più della metà delle stelle massicce ($M > 30 M_{\odot}$) si fondono entro i primi 5 *Myr* di vita. Il materiale emesso durante le fusioni può fondersi con i venti delle stelle massicce in rapida rotazione e delle SMS, formando le 2P insieme al gas primordiale dell'ammasso.

Capitolo 4

Composizione chimica delle popolazioni

Gli ammassi globulari contengono due gruppi principali di stelle, le 1P e le 2P, con diversa composizione chimica: le 1P sono chimicamente molto simili alle stelle di campo¹¹ con la stessa metallicità, mentre le 2P presentano particolari abbondanze di elementi leggeri, una caratteristica poco comune nelle stelle di campo.

Di seguito vengono elencate le principali proprietà chimiche delle diverse popolazioni degli ammassi globulari, tramite le varie abbondanze che le caratterizzano.

4.1 Elementi leggeri

Come già detto nella precedente trattazione, la caratteristica principale delle popolazioni multiple è che le stelle 2P presentano abbondanze differenti di alcuni elementi leggeri rispetto alle 1P. Variazioni simili sono osservate sia nelle stelle nel RGB che in quelle della bassa MS, mostrando, quindi, la scarsa correlazione con l'evoluzione stellare.

Nelle stelle 2P si notano forti abbondanze di N e Na, mentre scarseggiano C e O rispetto alle 1P. Queste variazioni sono regolate da pattern ben definiti, come le anti-correlazioni Na-O e C-N e le correlazioni Na-N e C-O, presenti universalmente negli ammassi con popolazioni multiple [Kraft 1994].

In un gruppo ristretto di ammassi massicci, sono state osservate variazioni

¹¹Sono quelle stelle della Via Lattea presenti lungo la linea di vista dell'ammasso (o in generale dell'oggetto considerato), che però non risultano legate gravitazionalmente ad esso.

di Mg e Si, con $[\text{Mg}/\text{Fe}]$ ¹² tipicamente più ampio in quelli con bassa metallicità. Al contrario, le variazioni di Al sono osservate in quasi tutti gli ammassi, trovando, inoltre, una correlazione tra $[\text{Al}/\text{Fe}]$ e $[\text{Na}/\text{Fe}]$ [Pancino et al. 2017]. Gli ammassi con variazioni interne di questi ultimi 3 elementi presentano un'anti-correlazione Mg-Al e una correlazione Si-Al. Inoltre, le stelle 2P sono impoverite di Mg e ricche di Al e Si rispetto alle 1P. Infine, variazioni interne di K sono state rilevate solo in tre ammassi globulari, tra cui ω Centauri [Alvarez Garay et al. 2022].

In **Fig. 8** sono mostrati esempi di correlazioni e anti-correlazioni per gli elementi leggeri di un dato ammasso globulare.

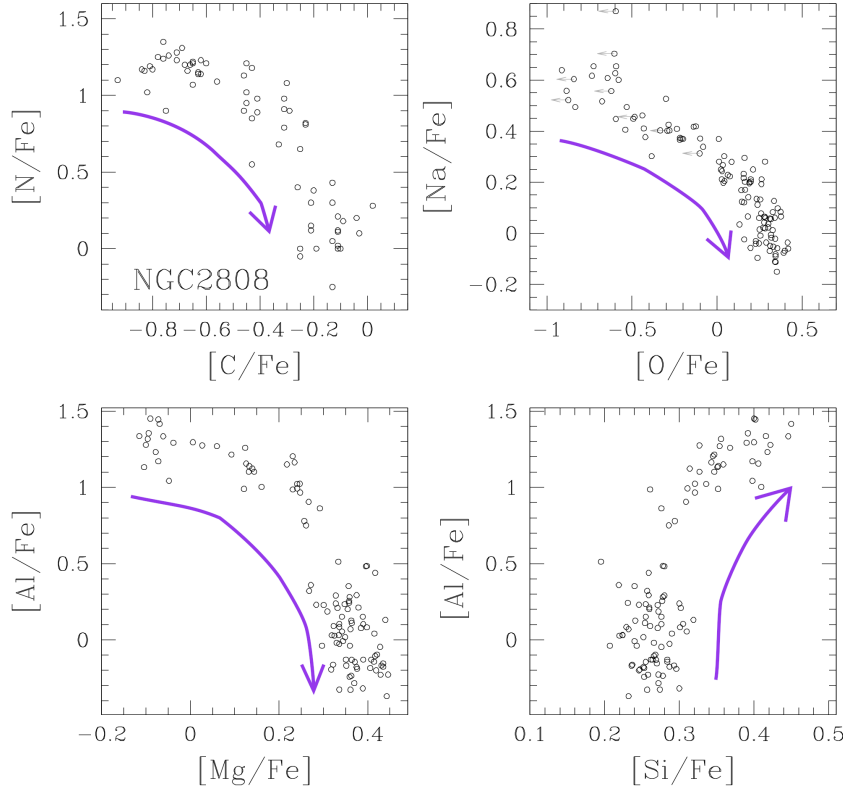


Figura 8: Anti-correlazioni C-N, Na-O, Mg-Al (freccie viola che puntano verso il basso) e correlazione Si-Al (freccia viola che punta verso l'alto) per NGC 2808, con le abbondanze dei vari elementi prese da [Carlos et al. 2023; Carretta 2015; Carretta et al. 2018].

Dato che i vari elementi leggeri sono prodotti e bruciati a diverse tempe-

¹²In ambito astrofisico, le abbondanze relative degli elementi vengono indicate in frazioni di Fe o di H ($[\ast/\text{Fe}]$, $[\ast/\text{H}]$), in base agli atomi considerati o all'uso che se ne vuole fare.

rature, i pattern chimici spiegati prima permettono di ricavare informazioni su dove avvengono questi processi. Le varie relazioni che comprendono C, N, O e Na potrebbero, infatti, rispecchiare la composizione chimica risultante dal ciclo CNO e dalle catture protoniche ad alte temperature. Nelle stelle in MS, per trasformare C in N vengono richieste $T \gtrsim 10 \cdot 10^6 K$; per il processo che passa da Ne a Na, responsabile dell'anti-correlazione Na-O, c'è bisogno di $T \gtrsim 35 \cdot 10^6 K$ [Denisenkov et al. 1990]. Per innescare poi le reazioni che contribuiscono all'abbondanza di Mg e Al si arriva a $T \gtrsim 70 \cdot 10^6 K$ [Prantzos et al. 2006], per il Si a $T \gtrsim 80 \cdot 10^6 K$ e per le variazioni di K si raggiungono temperature estreme di $T \gtrsim 150 \cdot 10^6 K$ [Ventura et al. 2012].

Sapendo poi che stelle di massa diversa arrivano a temperature interne differenti, la composizione chimica delle 2P sarebbe completamente dipendente dalla natura della stella che ha inquinato le nubi da cui si sono formate.

4.2 Variazioni di metallicità

Solitamente, le variazioni della metallicità sono associate a sistemi stellari più massicci degli odierni ammassi globulari, come le galassie. Per molto tempo, infatti, l'omogeneità della metallicità venne considerata uno dei tratti caratteristici di questi ammassi, se non per rare eccezioni. Questo fino a quando, tramite studi con spettroscopia ad alta risoluzione e con ChM, si scoprì che la variazione della Z nel complesso era, in realtà, un tratto abbastanza comune [Marino et al. 2015; Yong et al. 2014].

Qui di seguito vengono discussi i due principali fenomeni associati alla variazione della metallicità.

4.2.1 Disomogeneità chimica nella prima popolazione

Uno dei risultati più importanti dell'analisi delle ChM è l'allargamento della sequenza delle stelle 1P nella maggior parte degli ammassi globulari che, in alcuni casi, presenta accenni di bimodalità [A. P. Milone et al. 2015b]. Evidenze di questo allungamento sono state trovate sia in stelle evolute, come nel RGB e nel HB, sia in quelle nelle fasi iniziali della MS, provando così che le nubi di gas da cui si sono originate le 1P non erano

chimicamente omogenee [Legnardi et al. 2022].

Inizialmente, queste anomalie furono associate a una pura variazione di He, senza considerare molto quelle di C, N e O. Tuttavia, questa assunzione andava in contrasto con ciò che ci si aspettava dalla nucleosintesi primordiale¹³ [A. P. Milone et al. 2018], sottintendendo che le disomogeneità dell'He derivassero da fenomeni particolari avvenuti agli albori dell'universo.

Solo tramite la spettroscopia ad alta risoluzione si è potuto capire che le variazioni di Fe nel materiale che ha dato origine alle stelle 1P sono responsabili dell'estensione della loro sequenza nelle ChM [Marino et al. 2019].

Le evidenze della variazione di metallicità, nel mezzo interstellare primordiale dell'ammasso, permetterebbero di restringere il campo degli scenari di formazione, fornendo un limite inferiore alle variazioni di abbondanze presenti inizialmente nel gas [Armillotta et al. 2018].

Inoltre, la dispersione della Z nelle stelle 1P è anche un indicatore dell'efficienza diffusiva durante il collasso della nube iniziale, permettendo di capire se era estesa e a bassa densità oppure turbolenta e ad alta densità [Legnardi et al. 2022].

4.2.2 Composizione ammassi di Tipo-II

Un fenomeno più complesso, sempre associato alle differenze interne di metallicità, è la presenza di una classe "anomala" ben definita di ammassi globulari, in cui si osservano variazioni negli elementi pesanti tra le stelle 2P e proprietà fotometriche e spettroscopiche distinte rispetto a tutti gli altri ammassi. Questi oggetti vengono racchiusi sotto la classificazione di Tipo-II e presentano una particolare abbondanza di elementi-s nelle stelle già arricchite in metallicità [Marino et al. 2009; Marino et al. 2015].

M22, come già detto in precedenza, fa parte della classe degli ammassi "anomali" che, però, differisce abbastanza da tutti gli altri della sua categoria: presenta infatti una moderata variazione di elementi-s rispetto agli ammassi con metallicità simile.

Nel lavoro di [Marino et al. 2021] è stato ipotizzato che l'arricchimento di

¹³Avvenuta nei primi minuti di vita dell'universo, è quella fase in cui si sono formati elementi più pesanti dell' ^1H , come ^2H , ^3He , ^4He e ^7Li , grazie alle altissime temperature che hanno permesso le prime reazioni termonucleari [Cyburt et al. 2016].

elementi-s potrebbe non essere una caratteristica universale degli ammassi di Tipo-II e che l'abbondanza di metalli non sia collegata a quella di questi atomi.

Le variazioni in $[\text{Fe}/\text{H}]$ e $[\text{s}/\text{Fe}]$ derivano molto probabilmente da stelle di diversi intervalli di massa che hanno inquinato, con il loro materiale, il mezzo interstellare dell'ammasso. Uno scenario basato su questo è già stato descritto nella **Sezione 2.2**.

Da un punto di vista puramente chimico, gli ammassi di Tipo-II sono una via di mezzo tra quelli più classici (come quelli di Tipo-I) e sistemi stellari più massicci, come le galassie nane con cui condividono lo stesso arricchimento in metallicità. In **Fig. 9** è esposto un esempio della natura ibrida di M22.

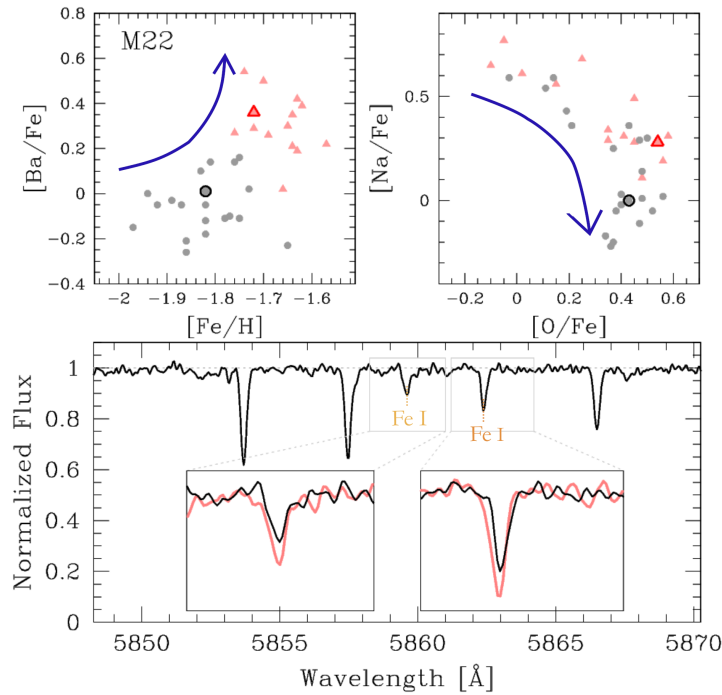


Figura 9: (Sopra) Correlazione Ba-Fe e anti-correlazione Na-O per stelle ricche di elementi-s e Fe (punti rossi) e povere di questi (punti grigi) nell'ammasso M22. (Sotto) Spettro normalizzato (nero) della stella cerchiata di nero nei diagrammi in alto, con zoom su due righe del Fe I per confrontarle con lo spettro (rosso) della stella contornata di rosso [Marino et al. 2009; Marino et al. 2011a]. Si noti come le due stelle abbiano parametri simili ma che la profondità delle righe di assorbimento denoti la differenza di metallicità.

Negli ammassi di Tipo-II, la correlazione Ba-Fe è una delle varie evidenze chimiche che si usano per dividerli da quelli ordinari di Tipo-I, dove non vi è alcun legame tra i due metalli [Marino et al. 2015]. Per quanto riguarda l'anti-correlazione Na-O, questa, insieme a variazioni di altri elementi leggeri, è presente in stelle con differente metallicità in parecchi ammassi globulari di Tipo-II, tra cui è incluso M22. Questo fatto pone ancora dei dubbi sull'evoluzione chimica di questi oggetti "anomali" [Marino et al. 2011b; Johnson et al. 2010].

Capitolo 5

Proprietà delle popolazioni multiple

Grazie agli innumerevoli studi fatti a riguardo, si è potuta constatare l'enorme complessità del fenomeno delle popolazioni multiple, in termini di quantità dei membri delle popolazioni stellari, delle loro proprietà chimiche e dell'eterogeneità tra gli ammassi.

Tramite l'analisi di un gran numero di mappe cromosomiche, sono state individuate le principali proprietà delle popolazioni multiple:

- **Un fenomeno diffuso.** Le recenti survey hanno rivelato che le popolazioni multiple sono presenti nella maggior parte degli ammassi globulari della Via Lattea [Piotto et al. 2015], con pochi oggetti o candidati aventi popolazioni stellari singole.
- **Specificità degli ammassi globulari.** Mentre le stelle 2P sono presenti in quasi tutti gli ammassi globulari, risultano però rare nella Via Lattea, consistendo in circa 1–3% delle stelle nell'alone e nel piano galattico [Schiavon et al. 2017]. Recenti studi hanno trovato che, a qualche kilo-parsec di distanza dal nucleo galattico, le stelle 2P costituiscono meno del 20% della massa totale dell'alone, percentuale che diminuisce man mano che aumenta la distanza [Horta et al. 2021]. Si pensa che queste fossero stelle appartenenti ad ammassi globulari, ma che siano state isolate a causa di interazioni gravitazionali o eventi maggiori [Vesperini et al. 2010].
- **Varietà.** Dato che gli ammassi globulari presentano diverse popolazioni stellari, la morfologia delle ChM varia tra i vari oggetti [A. P. Milone et al. 2017b]. Solitamente, il numero di sotto-popolazioni che si possono distinguere in questi diagrammi va da 2 fino a oltre 17.

- **Discretezza 1P-2P.** Le ChM della maggior parte degli ammassi sono divise in due raggruppamenti principali di stelle 1P e 2P. Queste sono tipicamente associate a una popolazione discreta, in contrasto con una distribuzione stellare continua (vedi **Fig. 3** nella **Sezione 2.1**).

Anche se il fenomeno delle popolazioni multiple ha un alto grado di variabilità, le popolazioni stellari presentano però diverse proprietà comuni.

5.1 Dipendenza dalla massa dell'ammasso

Studi recenti hanno dimostrato come, all'aumentare della complessità del fenomeno delle popolazioni multiple, cresca la massa dell'ammasso globulare, cambiando le quantità relative e le variazioni chimiche interne delle stelle 1P e 2P.

Negli ammassi della Via Lattea, la frazione di 2P sul totale va dal 40%, in quelli di piccola massa, fino al 90% in quelli più massicci. Si possono infatti trovare due anti-correlazioni: una tra la percentuale di stelle 1P e la massa odierna dell'ammasso, e l'altra con la percentuale delle 2P [A. P. Milone et al. 2020]. Inoltre, anche la variazione interna di elementi leggeri dipende dalla massa dell'ammasso.

Gli ammassi di Tipo-II risultano essere i più massicci tra quelli della Via Lattea, suggerendo che sia necessaria una maggiore massa per poter generare le loro popolazioni ricche di metalli [Da Costa 2015]. Gli ammassi con variazione di metallicità sono spesso associati a sistemi stellari massicci, come le galassie nane, che sono state in grado di trattenere il materiale espulso dalle supernove. Risulta utile notare anche che gli ammassi di Tipo-II più leggeri presentano un contenuto omogeneo di elementi-s.

5.2 Popolazioni multiple e massa stellare

Le stelle di piccola massa negli ammassi globulari, argomento su cui è incentrata questa tesi, sono ancora poco studiate nell'ambito delle popolazioni multiple, dato che richiedono fotometria nel vicino-IR ad altissima precisione. Però, l'importanza dell'analisi di queste stelle è data dal fatto

che, tramite il confronto con quelle di massa maggiore, è possibile discriminare i vari scenari di formazione per i vari ammassi.

Tramite l'utilizzo di HST e dei filtri F110W e F160W con la camera NIR/WFC3, si sono potute trovare le prime funzioni di massa (MF)¹⁴ e composizioni chimiche delle stelle di piccola massa. È stato trovato che, tramite lo studio delle abbondanze relative di O di varie popolazioni di stelle con diverse masse (e quindi anche in diverse fasi evolutive), è possibile restringere la visione degli scenari di formazione: se infatti si ipotizzassero fenomeni di accrescimento in stelle già esistenti, la composizione chimica delle 2P dovrebbe dipendere dalla massa stellare [N. Bastian et al. 2013]. Inoltre, l'evidenza che le diverse popolazioni stellari presentino la stessa PDMF è consistente con uno scenario che prevede un'origine con stessa IMF [Vesperini et al. 2010].

5.3 Popolazioni multiple lungo l'AGB

Le survey fotometriche delle popolazioni multiple hanno mostrato come la frazione di stelle 1P e 2P lungo l'AGB sia comparabile con quella osservata nella MS e nel RGB [Lagioia et al. 2021]. Però, almeno un $\sim 25\%$ degli ammassi osservati ha una minore frazione di stelle 2P nell'AGB rispetto al RGB [Lagioia et al. 2019].

Queste scoperte supportano le teorie di evoluzione stellare, secondo cui le stelle di vecchia popolazione, ricche di He, potrebbero evitare la fase di AGB. Infatti, le 2P più estreme, arricchite in He, non sarebbero in grado di entrare nell'AGB, passando direttamente alla sequenza di raffreddamento delle nane bianche. Le simulazioni nei CMD, però, mostrano che una forte variazione di He non basterebbe a spiegare questa minore presenza di stelle 2P in fase di AGB, implicando che, probabilmente, queste perdono una quantità maggiore di massa nel RGB rispetto alle 1P [Marino et al. 2017]. Un'altra particolare scoperta è stata fatta sugli ammassi di Tipo-II, tra cui M22, dove il rapporto tra le popolazioni stellari in fase di AGB e quelle

¹⁴Per funzione di massa si intende la distribuzione del numero di stelle dell'ammasso in funzione della loro massa. Può essere chiamata initial mass function (IMF) se si parla di funzioni di massa all'epoca della formazione dell'ammasso, oppure present day mass function (PDMF) se si parla invece dell'epoca attuale.

in RGB è molto più piccolo per le stelle ricche di metalli rispetto a quelle che ne sono impoverite [Lagioia et al. 2021]:

$$\left(\frac{AGB_{\star}}{RGB_{\star}}\right)_{Metal-rich} \ll \left(\frac{AGB_{\star}}{RGB_{\star}}\right)_{Metal-poor}$$

5.4 Distribuzione spaziale

La distribuzione spaziale delle popolazioni stellari negli ammassi globulari potrebbe fornire informazioni sulle loro configurazioni iniziali, permettendo di restringerne gli scenari di formazione [Vesperini et al. 2013].

Per parecchi ammassi di Tipo-I, le stelle 2P sono più concentrate al centro rispetto alle 1P [Simioni et al. 2016], mentre per altri le due popolazioni hanno distribuzioni radiali simili [Lee 2017]. La ripartizione delle due popolazioni è studiata tramite fit con ellissi che mostrano stessa forma o diversa ellitticità.

La distribuzione spaziale è però poco studiata negli ammassi di Tipo-II, tranne che per pochi casi, tra cui M22. In questi si è osservato che le popolazioni con maggiori abbondanze di He e N sono presenti per lo più al centro degli ammassi rispetto a quelle con quantità minori di questi elementi [Sollima et al. 2007]. Le stelle con diversa presenza di Fe mostrano ellitticità simili, mentre la distribuzione di quelle ricche di N è più schiacciata rispetto a quelle povere di N. Queste osservazioni sono consistenti con uno scenario in cui diversi processi sono responsabili dell'arricchimento in Fe e in prodotti delle catture protoniche [Cordoni et al. 2020].

5.5 Età dell'ammasso e popolazioni multiple

La maggior parte degli ammassi globulari della Via Lattea che presentano il fenomeno delle popolazioni multiple sono sistemi stellari antichi, con età maggiore di $\sim 11-12$ Gyr [Dotter et al. 2010]. Al contrario, gli ammassi aperti, più giovani e meno densi, risultano essere più omogenei nella chimica delle stelle [Bragaglia et al. 2012].

Questa evidenza potrebbe indicare che gli ammassi stellari vecchi e giovani

si siano originati con meccanismi differenti, e che la formazione delle popolazioni multiple avvenga solo ad alti redshift. Però, la possibilità che questo fenomeno sia presente solo negli ammassi più vecchi è stata messa in dubbio dalla scoperta di stelle con diversa abbondanza di N in oggetti di età intermedia ($\sim 2\text{--}10$ Gyr) nelle Large e Small Magellanic Cloud (LMC e SMC). In contrasto con ciò, non ci sono ancora evidenze della presenza di popolazioni multiple in ammassi globulari più giovani di ~ 2 Gyr. Questi risultati hanno suggerito l'esistenza di un limite sull'età degli ammassi per permettere l'insorgenza delle popolazioni multiple [Martocchia et al. 2018].

5.6 Popolazioni multiple e la galassia ospite

Il fenomeno delle popolazioni multiple non è relegato agli ammassi globulari della Via Lattea, ma è stato osservato in ammassi che orbitano galassie anche al di fuori del Gruppo Locale e sembrano rispettare le stesse proprietà elencate in precedenza, se non con alcune eccezioni.

Si è notato che né la LMC né la SMC possiedono ammassi di Tipo-II e, inoltre, circa metà di questi sono stati associati a un singolo evento di accrescimento [Massari et al. 2019].

Un metodo che viene utilizzato per evidenziare il ruolo della galassia ospite nel fenomeno delle popolazioni multiple è confrontare le varie popolazioni tra ammassi globulari autoctoni, ammassi nati da processi di collisione e ammassi che non sono associati ad alcuna corrente di stelle¹⁵. In queste tre categorie, la frazione di 1P e la massa dell'oggetto che le ospita seguono andamenti simili, indicando che non vi è alcuna dipendenza tra il rapporto delle popolazioni all'epoca attuale e il sistema progenitore [A. P. Milone et al. 2020].

¹⁵Sono un insieme di stelle a forma di scia che orbitano attorno alla Via Lattea. Si formano quando le forze mareali disgregano una galassia nana o un ammasso globulare, lasciandone soltanto dei detriti stellari [Bonaca et al. 2024].

Dato che il fenomeno delle popolazioni multiple presenta grande ampiezza e complessità, finora è stata fornita una panoramica generale sull'argomento, contenente gli elementi necessari per comprendere l'oggetto di studio di questa tesi: l'ammasso M22 con le sue caratteristiche peculiari nel panorama degli ammassi globulari. Conviene, però, fare prima una digressione sull'apparato strumentale utilizzato per il progetto di ricerca.

Capitolo 6

James Webb Space Telescope

Considerato il telescopio spaziale più grande mai costruito, il James Webb Space Telescope (JWST) è stato lanciato dalla Guyana Francese il 25 dicembre 2021, arrivando nella sua destinazione finale, il punto Lagrangiano L_2 ¹⁶ (**Fig. 10**), nel gennaio del 2022. Questo telescopio prende il nome da James Edwin Webb, secondo amministratore della NASA dal 1961 al 1968, ed è stato creato con lo scopo di raccogliere l'eredità dell'Hubble Space Telescope (HST), osservare le prime galassie formatesi dopo il Big Bang, studiare la formazione di stelle e pianeti e analizzare l'atmosfera degli esopianeti.

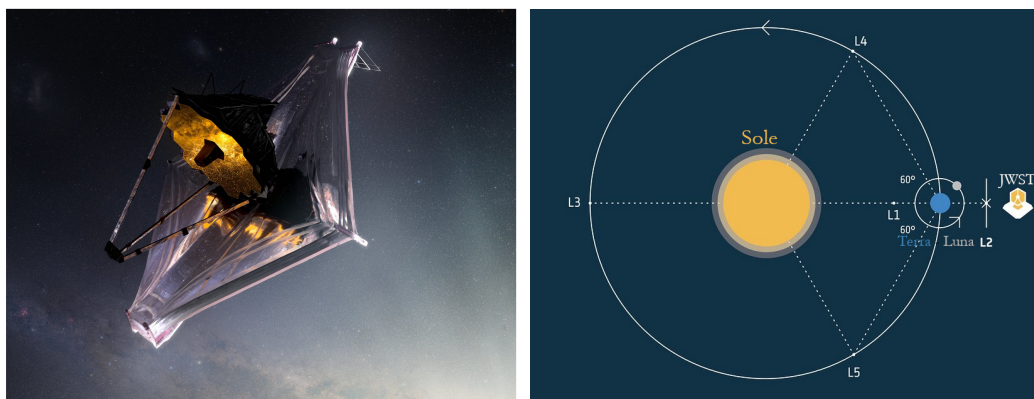


Figura 10: (**Sinistra**) Immagine digitale in 3D del James Webb Space Telescope [ESA/Webb, NASA & CSA 2022]. (**Destra**) Schema dell'orbita terrestre con indicati i cinque punti Lagrangiani L_1 , L_2 , L_3 , L_4 e L_5 e la posizione del telescopio, il quale, oltre a orbitare il Sole, compie allo stesso tempo un percorso quasi ellittico attorno al punto L_2 (orbita Halo) [ESA/Webb 2021].

¹⁶Dal problema dei 3 corpi ristretto, per il sistema Terra-Sole, le forze di gravità e centrifuga si bilanciano sull'oggetto di massa minore in cinque punti chiamati Lagrangiani, creando una situazione di equilibrio.

Contrariamente all'HST, questo telescopio è stato costruito per osservare un intervallo di lunghezze d'onda che va da $0.6\ \mu m$ (cade circa nell'arancione/rosso dello spettro visibile) fino a $28.5\ \mu m$ (medio infrarosso).

La necessità di avere un telescopio che osservi dallo spazio deriva dalla presenza dell'atmosfera terrestre; questa risulta opaca a molte lunghezze d'onda della radiazione elettromagnetica e presenta delle turbolenze (seeing) che vanno a diminuire drasticamente la risoluzione dei telescopi. Dallo spazio, tutti questi problemi vengono a mancare e, inoltre, si possono osservare più porzioni di cielo con meno limiti di tempo.

6.1 Struttura del James Webb

Il telescopio è costituito da un totale di quattro componenti (indicate in **Fig. 11**) che ne permettono il corretto funzionamento e il controllo da Terra:

- **Elementi ottici:** corrispondono all'occhio del telescopio, includendo gli specchi e le strutture di supporto, con lo scopo di catturare la luce che verrà poi registrata dagli strumenti scientifici.
Lo specchio primario è concavo, ha un diametro di $6.5\ m$ ed è costituito da 18 segmenti esagonali in Be; quello secondario è convesso, di forma circolare e riflette la luce su un terziario rettangolare. Con questo schema, denominato three-mirror anastigmat (TMA), vengono eliminate le aberrazioni sferiche, la coma e l'astigmatismo su un ampio campo di vista.
- **Strumenti scientifici integrati:** comprendono tutte le camere e gli strumenti necessari al loro funzionamento. Ci sono in totale quattro fotocamere e una singola guida: Near-Infrared Camera (NIRCam), Near-Infrared Spectrograph (NIRSpec), Near-Infrared Imager and Slitless Spectrograph (NIRISS), Mid-Infrared Instrument (MIRI) e Fine Guidance Sensor (FGS). Le prime tre coprono tutto lo spettro del vicino-infrarosso, la penultima si occupa del medio-infrarosso e l'ultima fotocamera è quella che si occupa della guida.

- **Scudo solare:** costituito da 5 strati, permette di separare la piattaforma spaziale, calda ed esposta al sole, dalla parte ottica e strumentistica, permettendo di avere bassissime temperature negli specchi e migliori risultati dalle osservazioni. Il telescopio entra in funzione soltanto se si raggiunge una temperatura inferiore a 50 K negli elementi ottici, perché, con valori maggiori, lo specchio produrrebbe emissioni in infrarosso che andrebbero a inquinare la luce raccolta dalle sorgenti osservate.
- **Piattaforma spaziale:** costituisce il supporto primario a tutte le funzioni dell'osservatorio, contenendo i sistemi di comunicazione, di propulsione e di produzione dell'energia tramite pannelli solari [NASA 2023].

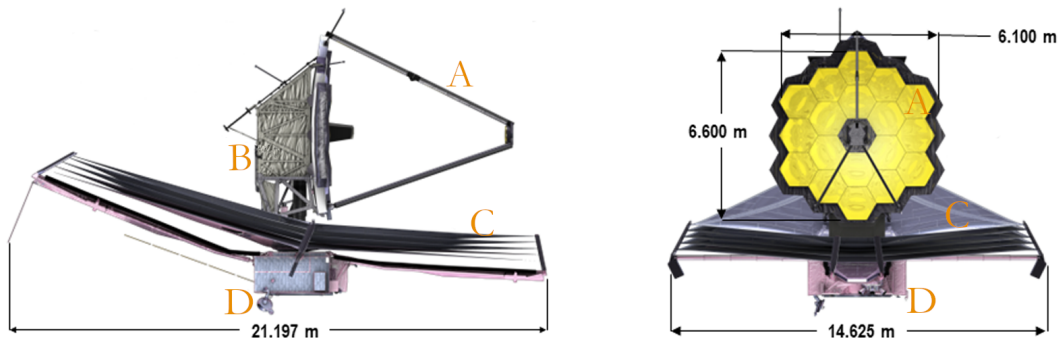


Figura 11: Visione laterale (**Sinistra**) e frontale (**Destra**) di JWST, con indicate le dimensioni e le varie componenti: elementi ottici (A), strumenti scientifici integrati (B), scudo solare (C) e piattaforma spaziale (D).

Una particolare caratteristica del James Webb, oltre al suo alto campionamento nell'infrarosso che varia per ogni strumento e per la lunghezza d'onda considerata, è la sua Point Spread Function (PSF). Essa viene definita come il modo in cui si distribuiscono i fotoni provenienti da una sorgente puntiforme, come una stella, attorno alla posizione centrale. Questa viene dunque alterata sia dalla configurazione a esagoni dello specchio primario del telescopio, sia dalle strutture che sorreggono il secondario, creando una figura con 8 spike di diffrazione. Un esempio di come il JWST registra le sorgenti puntiformi luminose è riportato in **Fig. 12** nella pagina successiva.



Figura 12: Immagine in falsi colori della Serpens Nebula, ottenuta tramite la NIRCam e i filtri F140M, F210M, F360M e F480M, dove è possibile osservare il modo in cui la luce delle stelle viene diffratta dagli elementi del telescopio [ESA/Webb, NASA, CSA 2024].

6.2 Near-Infrared Camera

Per lo studio dell'ammasso globulare M22, i dati sono stati raccolti con la NIRCam. Questa ha un intervallo di lunghezze d'onda osservabili che va da $0.6\ \mu m$ a $5\ \mu m$ e permette di produrre immagini, coronografia e spettroscopia a campo largo senza fenditura.

La NIRCam, nella modalità imaging, è costituita da due moduli identici che puntano su campi di vista adiacenti di area angolare $2.2' \times 2.2'$, con una separazione di $44''$ ed è inoltre associata a un set di 29 filtri. Per le Short Wavelength, da $0.6\ \mu m$ a $2.3\ \mu m$, la camera ha una pixel scale di $0.031\ arcsec/px$, mentre per le Long Wavelength, da $2.4\ \mu m$ a $5\ \mu m$, questa diventa $0.063\ arcsec/px$. Ciascuno dei due moduli, inoltre, è dotato di un dicroico che permette di dividere il fascio di luce in Short e Long Wavelength, associate rispettivamente a un totale di 8 e 2 sensori, consentendo di ottenere due osservazioni diverse durante la stessa esposizione.

I 29 filtri della NIRCam sono nominati secondo lo schema "FnnnX", dove "nnn" si riferisce alla lunghezza d'onda centrale e "X" alla larghezza del filtro: W2 sta per molto largo, W per largo, M per medio e N per stretto [JWST User Documentation 2016].

Capitolo 7

Studio di M22

Le osservazioni dell'ammasso M22 con la NIRCam di JWST sono state ottenute tramite l'utilizzo di 4 filtri larghi: F115W con $\lambda_{CTR} = 1.15 \mu m$, F200W con $\lambda_{CTR} = 2.00 \mu m$, F277W con $\lambda_{CTR} = 2.77 \mu m$ e F444W con $\lambda_{CTR} = 4.44 \mu m$ (**Fig. 13**). Le immagini sono state ricavate con due sessioni di osservazione separate, la prima il 20 settembre 2025 e la seconda il 25 settembre 2025, per un totale di 2832 s di integrazione. Dato che la NIRCam divide ogni esposizione in due filtri tramite un dicroico, F115W e F444W hanno 1548 s di integrazione, mentre F200W e F277W ne hanno 1284 s.

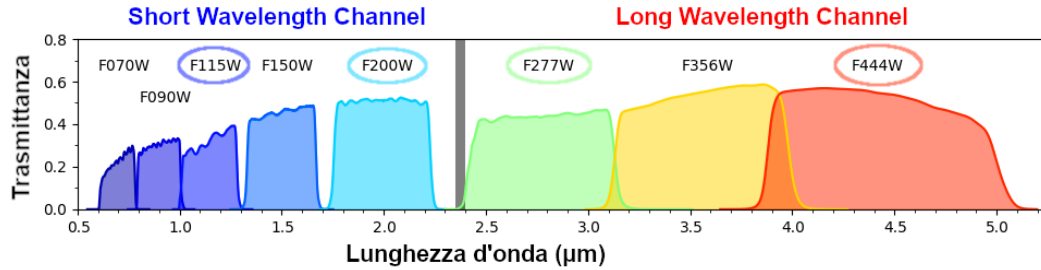


Figura 13: Filtri Wide della NIRCcam del James Webb Space Telescope. Le bande cerchiate sono quelle utilizzate per le osservazioni [JWST User Documentation 2016].

7.1 Fotometria di M22

Il campo visivo di M22, preso da JWST (**Fig. 14**), è una zona distante dal centro dell'ammasso, con coordinate equatoriali $\alpha = 18^h 36^m 46.96^s$ e $\delta = -23^\circ 57' 43.24''$, una posizione utile sia per evitare zone troppo affollate, sia per poter osservare con meno errori possibili le stelle di piccola massa (**Fig. 15a** e **Fig. 15b**).

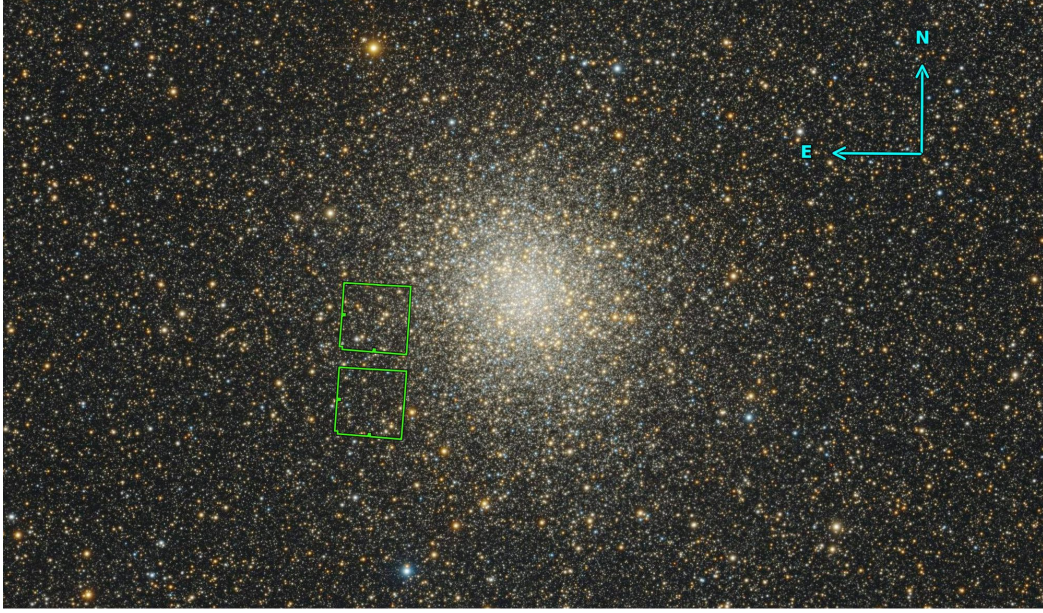


Figura 14: Immagine amatoriale del campo contenente M22 presa da [Herbert Walter 2024], dove ho indicato, tramite un programma in python, le inquadrature della NIRCam (in verde) e l'orientazione con le coordinate equatoriali (in ciano).

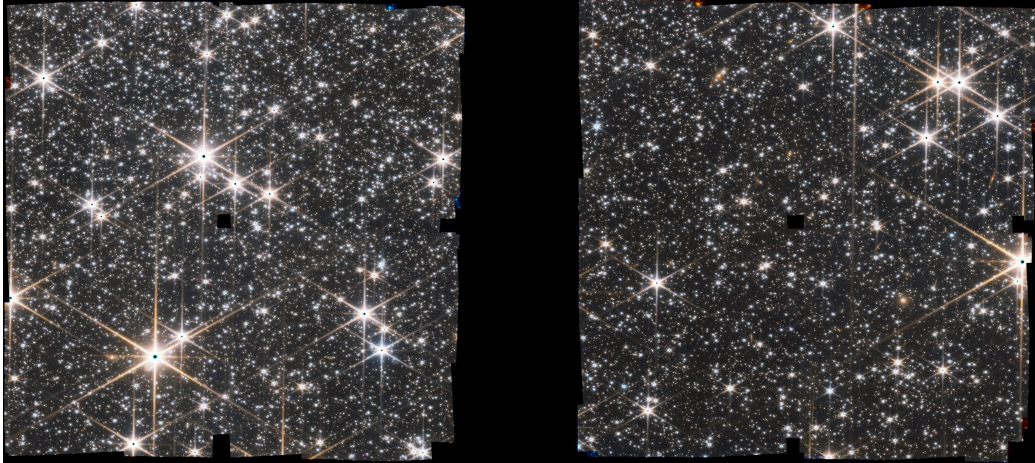


Figura 15a: Immagine RGB del campo, nella periferia di M22, osservato dal JWST, leggermente elaborata con PixInsight per aumentare il contrasto degli oggetti rispetto al fondo cielo. I dati grezzi erano suddivisi negli 8 riquadri dei canali Short Wavelength e, creando un programma in python, li ho uniti per formare un unico mosaico. L'associazione tra filtri e canali dei colori è la seguente: $R = F200W$, $G = \frac{F200W+F115W}{2}$, $B = F115W$.

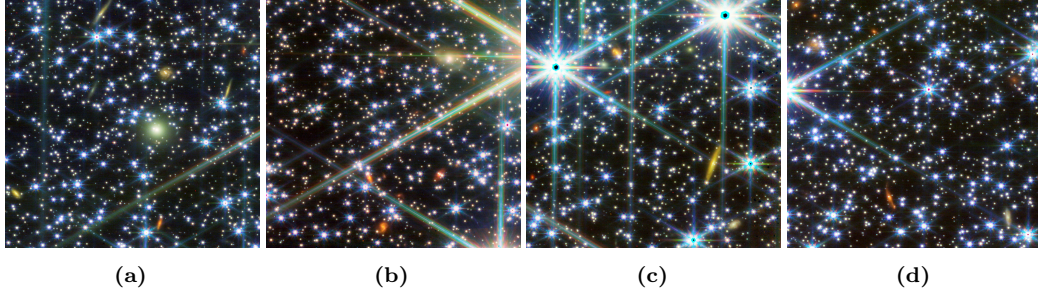


Figura 15b: Alcuni particolari del mosaico precedente, combinato con i filtri F277W e F444W, contenenti galassie che arrivano a distanze con valori di redshift $z \gtrsim 1$.

7.1.1 Costruzione del diagramma colore-magnitudine

Per lo studio delle popolazioni stellari, ho utilizzato soltanto i filtri F115W e F200W, dato che quelli nel canale Long Wavelength sono stati registrati dalla NIRCcam con un diverso campionamento e questo avrebbe richiesto un approccio differente all'analisi dei dati. Tramite tecniche fotometriche e calibrazioni, sono state ricavate le magnitudini delle stelle nel campo di vista, m_{F115W} e m_{F200W} . Con l'analisi dei moti propri presi da GAIA e HST [A. P. Milone et al. 2026], sono state escluse le stelle di campo e gli oggetti di natura insolita, lasciando soltanto le componenti dell'ammasso (Tab. 1).

#	$m_{F115W} - m_{F200W}$	m_{F200W}	Flag
1	0.6787	16.9951	1
2	0.9979	18.2040	1
3	1.0501	18.7910	1
4	0.6585	16.9805	0
5	1.0875	19.6391	0
...	...	...	...
143728	1.5166	25.2600	0

Tabella 1: Tabella contenente i dati del campione. Le colonne racchiudono, da sinistra a destra, il numero della stella osservata, l'indice di colore, la magnitudine nel filtro F200W e la Flag, che può assumere valore 1 se la stella appartiene all'ammasso o 0 se è un oggetto di campo.

Dato che M22 si trova a basse latitudini galattiche, la grande presenza

di polvere causa l'effetto di arrossamento delle stelle¹⁷, portando a dover correggere le magnitudini di ogni oggetto per l'eccesso di colore $E(B - V)$ secondo la formula:

$$(m - M)_0 = (m - M)_V - A_V = (m - M)_V - R_V \cdot E(B - V)$$

Questa è una correzione del modulo di distanza nella banda V, dove A_V è il coefficiente di assorbimento, definito come il prodotto tra l'eccesso di colore e il "total to selective ratio" R_V , che dipende dalla zona di osservazione. Poiché gli ammassi sono oggetti estesi, è dunque necessario costruire delle mappe per osservare l'arrossamento in ogni zona (Reddening differenziale), trovando un valor medio dell'eccesso di colore di $E(B - V) = 0.34$ [Harris 1996]. Una volta fatte tutte queste correzioni, ho potuto usare i dati della **Tab. 1** per poter generare il diagramma colore-magnitudine di M22 (**Fig. 16**).

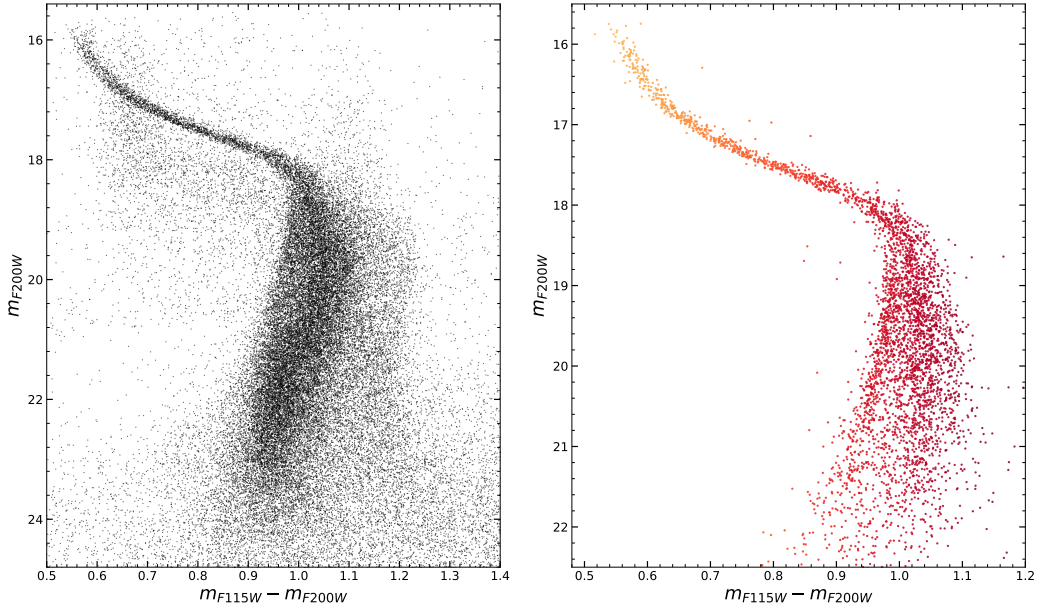


Figura 16: Diagrammi colore-magnitudine ($m_{F115W} - m_{F200W}$) vs m_{F200W} delle stelle in tutto il campo di vista di JWST (**Sinistra**) e delle sole componenti di M22 (**Destra**).

¹⁷Quando la luce di una stella passa attraverso una nube di gas e polvere, questa assorbe fortemente le lunghezze d'onda più corte, scatterandole in ogni direzione e permettendo il passaggio di quelle meno energetiche. Il JWST, in particolare, osservando nell'infrarosso, è molto sensibile agli oggetti affetti da arrossamento.

7.1.2 Analisi osservative

Guardando il CMD di M22 sulla sinistra della **Fig. 16**, si può notare la sequenza principale delle stelle. Seguendo la curva dall'alto verso il basso, si arriva al Ginocchio della MS, caratteristica morfologica dei CMD nel vicino-IR che introduce alla sequenza bassa, attorno a $m_{F200W} \sim 18.20$. L'analisi fotometrica del campo non ha permesso il calcolo delle magnitudini $m_{F200W} < 15.80$, a causa della saturazione delle stelle, che ha reso inutilizzabili i dati delle componenti più brillanti. In questo modo non è possibile visualizzare il momento in cui le stelle da MS si spostano nel RGB, cioè il Turn-off, e non è dunque calcolabile l'età dell'ammasso tramite le isocrone. Si può notare che il CMD di M22 presenta un andamento continuo delle popolazioni stellari lungo la MS e non discreto, come si può trovare in altri ammassi (vedi gli oggetti studiati da [A. P. Milone et al. 2026]). Dunque, la traccia visibile delle popolazioni multiple è osservabile nella bassa MS, dove varia l'abbondanza di molecole assorbenti contenenti l'O, come H₂O, nelle atmosfere stellari. Queste portano le stelle più calde a andare verso indici di colore maggiori (poca presenza di H₂O), mentre quelle più fredde verso valori più blu (grandi quantità di H₂O), creando così un allargamento della sequenza. Infine, le stelle che si discostano leggermente dall'andamento del CMD potrebbero essere oggetti di varia natura, come i sistemi binari.

La cosa su cui bisogna porre maggiore attenzione è la forma del Ginocchio: contrariamente agli altri ammassi osservati in [A. P. Milone et al. 2026], dove i CMD presentano un ginocchio ristretto rispetto all'andamento della MS, quello di M22 presenta una forma allargata, indice di variazioni di Fe. Per poter analizzare al meglio questo andamento e capire la natura dell'ammasso, ho analizzato delle isocrone basate sulla metallicità e sull'abbondanza di He¹⁸, variando i valori di [Fe/H].

7.2 Fit delle Isocrone

Le isocrone sono definite come curve teoriche che seguono il CMD degli ammassi, rappresentando stelle con stessa età e composizione chimica

¹⁸Da qui in poi verrà espressa in frazioni di massa Y , cioè il rapporto fra la massa dell'He e quella totale della stella, mentre le variazioni saranno scritte come ΔY .

iniziale, ma con masse diverse. Sono fortemente influenzate dal modulo di distanza e, dunque, dall'arrossamento dell'oggetto considerato. Il problema è che quest'ultimo effetto non è uguale in ogni punto dell'ammasso e bisogna, dunque, cambiare i valori che si trovano nei cataloghi per poter ottenere un fit accettabile. Tutte le isocrone che verranno presentate in seguito sono state scaricate da [BaSTI - INAF abruzzo 2021].

7.2.1 Variazioni di Fe

Per poter rappresentare al meglio l'andamento del Ginocchio del CMD di M22, ho preso una prima isocrona con $[\text{Fe}/\text{H}] = -1.70 \text{ dex}$ ¹⁹ [Harris 1996] e con arricchimento di elementi α ²⁰ ($[\alpha/\text{Fe}] = 0.40 \text{ dex}$), dato che è un ammasso vecchio, di età $t \sim 13.5 \text{ Gyr}$. Questa è stata interpolata partendo dai valori di riferimento $E(B-V) = 0.34$ e $(m-M)_V = 13.60$ [Holger Baumgardt 2024] e cambiandoli per seguire l'andamento del CMD ($E(B-V) = 0.335$ e $(m-M)_V = 13.65$). Infine, ho calcolato il modulo di distanza intrinseco, sommando prima il coefficiente di assorbimento per l'F115W e poi quello dell'F200W:

$$A_{F115W} = 0.7647 \cdot E(B - V) \quad A_{F200W} = 0.3214 \cdot E(B - V)$$

Dato che studi spettroscopici come [Marino et al. 2011b; McKenzie et al. 2022] hanno riscontrato una variazione di metallicità tra i due gruppi di stelle RGB di M22 pari a $\Delta[\text{Fe}/\text{H}] \sim 0.20 \text{ dex}$, ho preso altre due isocrone con gli stessi parametri della prima, cambiando soltanto la metallicità seguendo questa variazione chimica.

Si possono quindi notare in **Fig. 17** un totale di 3 isocrone, dove le più esterne hanno valori di $[\text{Fe}/\text{H}] = -1.60 \text{ dex}$ per le stelle ricche di Fe e $[\text{Fe}/\text{H}] = -1.80 \text{ dex}$ per quelle povere di Fe.

Tuttavia, la variazione di Fe considerata per queste isocrone è valida per stelle evolute. Si vede infatti, sempre in **Fig. 17 (Destra)**, che

¹⁹Abbreviazione di "decimal exponent", indica variazioni in logaritmo in base 10, rispetto ai valori del Sole, della quantità considerata.

²⁰Sono nuclei leggeri formati da un numero intero di particelle α (cioè nuclei di ^4He). Il valore elevato del rapporto $[\alpha/\text{Fe}]$ è un indicatore della natura antica dell'ammasso e della rapidità con cui le sue stelle si sono formate. Gli elementi α vengono, infatti, prodotti in stelle massicce ed emessi in tempi brevi tramite supernove a collasso (come quelle di Tipo II), mentre il Fe viene maggiormente prodotto da quelle Ia.

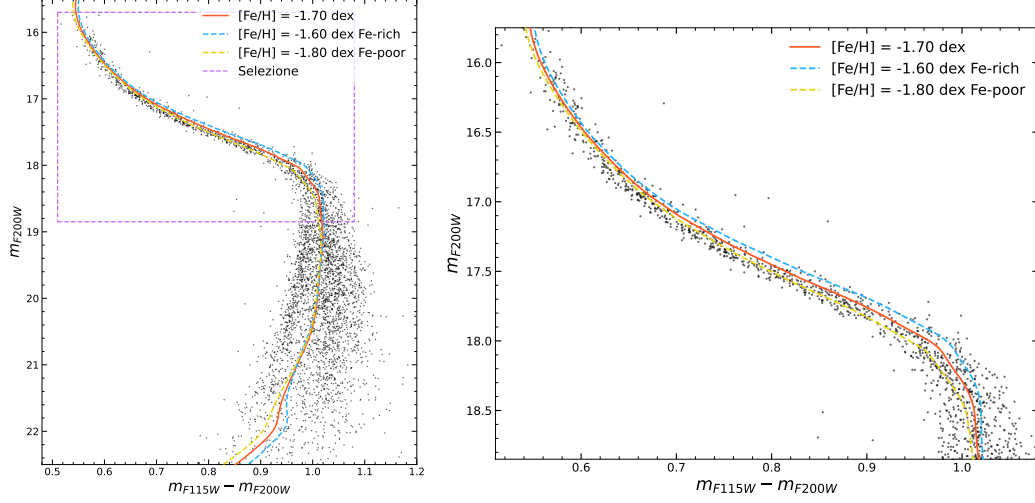


Figura 17: A **Sinistra** si ha il diagramma colore-magnitudine totale di M22 con il fit delle tre isocrone in cui è indicata una selezione di ingrandimento riportata a **Destra**. Questo perché le isocrone basate sulla metallicità non tengono conto della variazione di elementi leggeri, quindi dopo il Ginocchio non risultano accurate.

nell'intervallo di metallicità non sono contenute tutte le stelle del Ginocchio e bisogna dunque trovare una $\Delta[\text{Fe}/\text{H}]$ tra stelle Fe-rich e Fe-poor più accurata.

Per fare ciò, ho selezionato le stelle contenute all'interno del ginocchio, negli intervalli $0.94 \leq m_{F115W} - m_{F200W} \leq 1.05$ e $18.00 \leq m_{F200W} \leq 18.30$ (**Fig. 18**), e ho creato un istogramma che indica il numero di stelle al

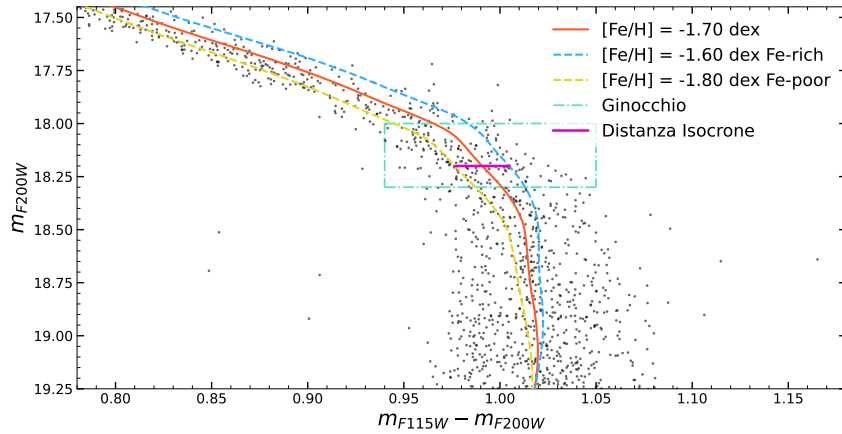


Figura 18: Sezione del CMD con indicato il riquadro contenente le stelle del Ginocchio e il segmento usato per il calcolo della distanza tra le isocrone esterne.

variare dell'indice di colore (**Fig. 19**). Qui ho escluso i dati sotto il 10% e sopra il 90% del totale, in modo da non considerare i valori estremi, calcolando così la larghezza del Ginocchio lungo l'indice di colore entro l'80% delle misure, $(m_{F115W} - m_{F200W})_{\star}$.

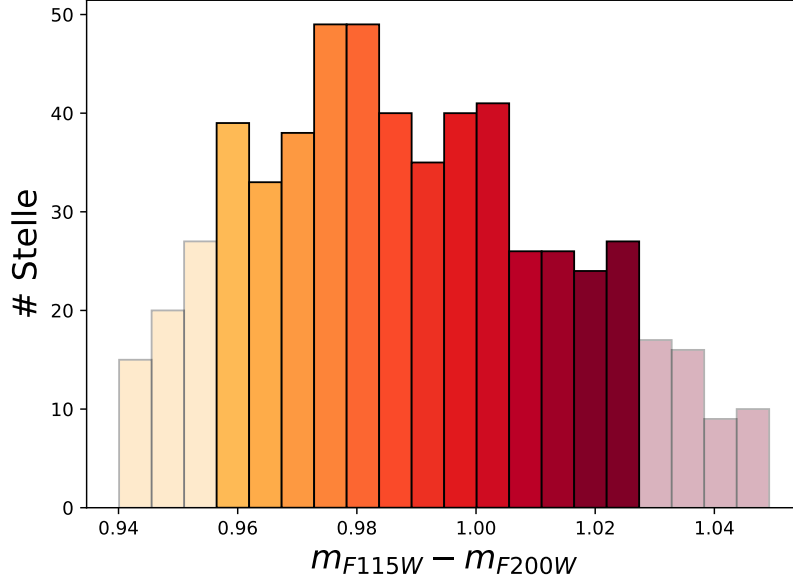


Figura 19: Istogramma, con bins = 20, che mostra il numero di stelle al variare dell'indice di colore. Le parti del grafico sbiadite sono i dati esclusi per il calcolo della larghezza del Ginocchio. Sono state selezionate in totale 581 stelle.

Infine, ho calcolato la distanza media tra le isocrone delle stelle Fe-rich e Fe-poor nella zona del Ginocchio, $(m_{F115W} - m_{F200W})_{Iso}$ (segmento orizzontale rosa nella **Fig. 18**).

In questo modo, sono presenti tutti i dati per ottenere la variazione di Fe tra le stelle di piccola massa di M22 secondo la seguente proporzione:

$$(m_{F115W} - m_{F200W})_{Iso} : \Delta[Fe/H]_{Iso} = (m_{F115W} - m_{F200W})_{\star} : \Delta[Fe/H]_{\star}$$

$$\Delta[Fe/H]_{\star} = \frac{\Delta[Fe/H]_{Iso} \cdot (m_{F115W} - m_{F200W})_{\star}}{(m_{F115W} - m_{F200W})_{Iso}} \sim 0.47 \text{ dex}$$

Per concludere l'analisi del Fe, ho rappresentato le isocrone con il $\Delta[Fe/H]$ appena trovato, quindi una con $[Fe/H] = -1.46$ dex e l'altra con $[Fe/H] = -1.94$ dex, ottenendo una buona riproduzione del Ginocchio della MS (**Fig. 20**).

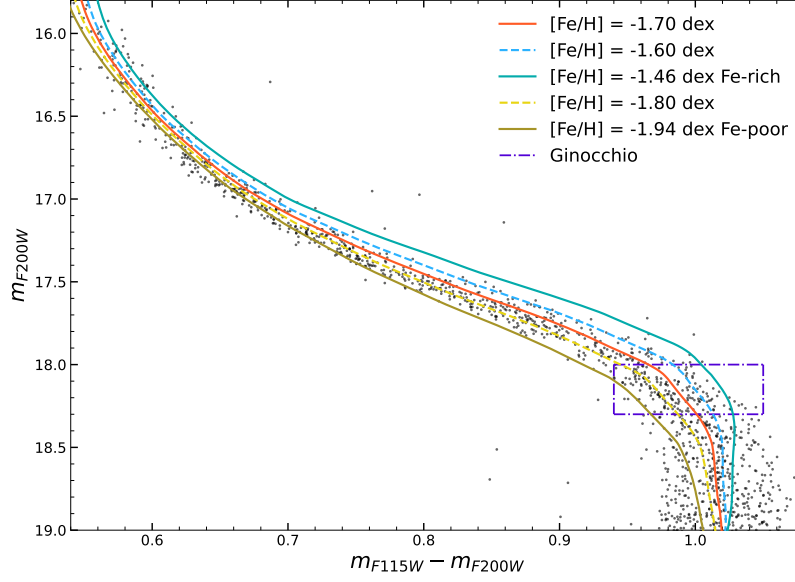


Figura 20: Sequenza principale del diagramma colore-magnitudine in cui sono riportate tutte le isocrone studiate e con indicata in viola la selezione del Ginocchio.

7.2.2 Variazioni di He

Per tutte le isocrone precedenti, i vari parametri erano rimasti intoccati, variando soltanto la metallicità. Tra questi, vi è la perdita di massa $\eta = 0.3$, che permette di parametrizzare il materiale espulso dai venti stellari durante le fasi evolutive avanzate, come RGB e AGB, e la quantità di He nelle stelle, con valore $Y = 0.247$.

Guardando l'articolo [A. P. Milone et al. 2026], si notano diversi ammassi che presentano popolazioni divise lungo la MS, indice di variazione di He nelle stelle più calde. Per vedere se anche M22 riporta questo comportamento, ho fatto un'analisi qualitativa, creando un'isocrona con $Y = 0.275$ e una con $Y = 0.300$ (valore massimo possibile su [BaSTI - INAF abruzzo 2021]), entrambe con $[\text{Fe}/\text{H}] = -1.80$ dex. Come si osserva in **Fig. 17** (curva gialla tratteggiata), questa isocrona rappresenta al meglio l'andamento della MS dell'ammasso a valori normali di He, in accordo con i risultati di [Marino et al. 2009]. Dalla **Fig. 21** si nota come queste ultime isocrone differiscano dalla MS del CMD e che una $\Delta Y \sim 0.05$, tra i valori di He delle curve più esterne, non risulta presente nelle stelle di M22.

Un arricchimento di He porta a un peso molecolare medio maggiore negli

interni stellari, aumentando così le pressioni e, dunque, le temperature del nucleo, rendendo più efficienti le reazioni di combustione nucleare. Come conseguenza, le stelle ricche di He hanno una T_{eff} maggiore, a parità di luminosità, e presentano colori più blu (quindi valori di $(m_{F115W} - m_{F200W})$ minori) rispetto a quelle con abbondanze di He normali [A. P. Milone et al. 2026].

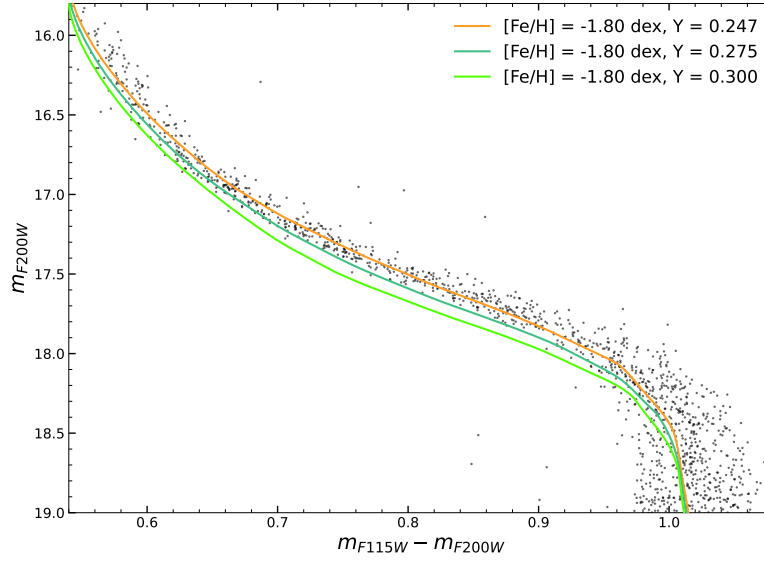


Figura 21: Zoom sulla sequenza principale di M22 con tre isocrone di uguale abbondanza di Fe ma diverso quantitativo di He. Si nota come più questo elemento cresce in abbondanza, più la traccia evolutiva delle stelle in sequenza principale vada verso indici di colore più blu, indicando corpi celesti più caldi.

7.2.3 Variazioni di O

Come già detto nella **Sottosezione 7.1.2**, gli spettri delle stelle di piccola massa, come le nane rosse, sono dominati dalla variazione dell'O. Infatti, si trovano molte righe di assorbimento di molecole, come TiO, CO, OH e soprattutto H₂O, presenti nelle regioni dello spettro interessate dai filtri F200W, F277W e F444W, mentre hanno un minore impatto nel F115W. Queste proprietà fisiche risultano, dunque, in $(m_{F115W} - m_{F200W})$ maggiori per le stelle con poca abbondanza di O e minori per quelle con atmosfere ricche di O [Marino et al. 2024; A. P. Milone et al. 2012]. Visto che M22 presenta importanti variazioni di Fe tra le popolazioni

stellari, mi sono concentrato sulla loro quantificazione. Non è stato, dunque, possibile preparare in tempo delle isocrone che tengano conto sia della metallicità che delle variazioni di O, per poter riprodurre le tracce evolutive delle stelle nella bassa MS. In **Fig. 22** sono riportate delle simulazioni di isocrone, prese da [A. P. Milone et al. 2026], che mostrano come la variazione di O influenzi la forma delle curve lungo i CMD degli ammassi.

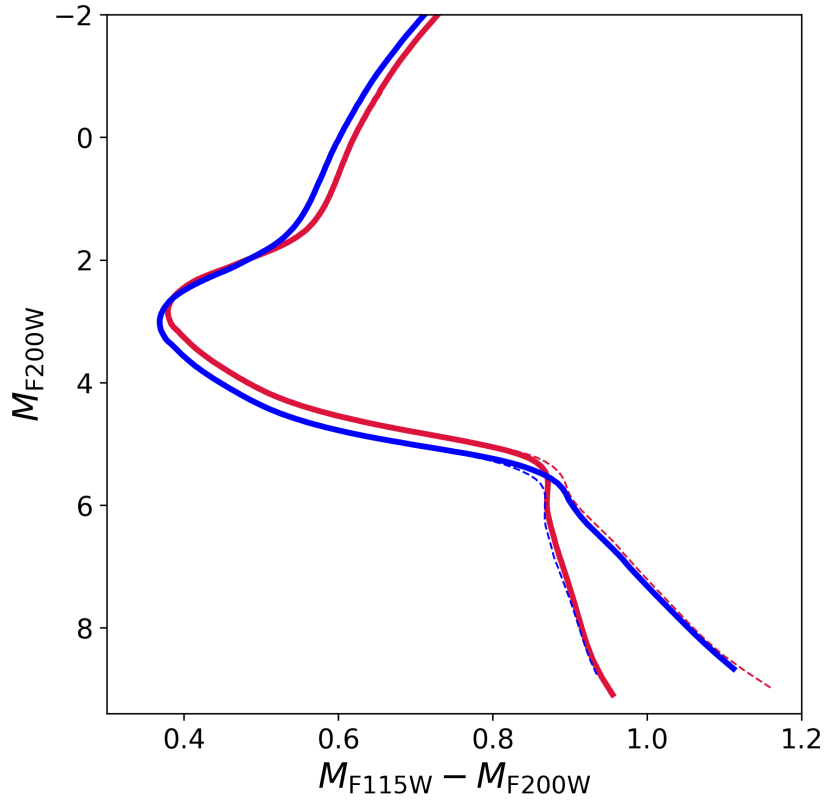


Figura 22: Esempio di 4 isocrone Dartmouth [Dotter et al. 2008] in magnitudini assolute, con età $t = 13 \text{ Gyr}$, $[\text{Fe}/\text{H}] = -1.50 \text{ dex}$ e $[\alpha/\text{Fe}] = 0.40 \text{ dex}$ che coprono stelle con $M > 0.1 M_{\odot}$. Le curve rosse (continua e tratteggiata) hanno $Y = 0.246$, mentre quelle blu hanno $Y = 0.330$. Quelle blu continua e rossa tratteggiata assumono un impoverimento di C e O rispettivamente di 0.5 e 0.9 dex e un arricchimento in N di 1.2 dex rispetto agli altri due modelli. Le ultime due isocrone (curve blu tratteggiata e rossa continua) hanno $[\text{O}/\text{Fe}] = 0.4 \text{ dex}$ e abbondanze solari di C e N.

Capitolo 8

Risultati e Conclusioni

Dalla spiegazione dettagliata del fenomeno delle popolazioni multiple negli ammassi globulari, se ne deduce l'enorme grado di variabilità. Ogni ammasso, di conseguenza, mostrerà delle particolarità nella composizione chimica delle proprie stelle e non esiste uno schema interpretativo unico per descrivere questo fenomeno in ogni singolo oggetto.

Nel lavoro di ricerca di questa tesi, ho potuto analizzare le diverse popolazioni di M22 lungo l'intermedia e bassa sequenza principale, osservando e descrivendo le variazioni di Fe, He e O. L'analisi che ho effettuato sui risultati ottenuti mi ha permesso di giungere ad alcune conclusioni.

La variazione del Fe in M22, nel panorama astrofisico, è una questione dibattuta da oltre un decennio, dato che permetterebbe di spiegare la natura di questo oggetto. Le ipotesi che sono state discusse principalmente sono due. La prima è quella di [\[Mucciarelli et al. 2015\]](#), dove, tramite lo studio spettroscopico di alcune stelle giganti di M22, si è giunti alla conclusione che le variazioni di Fe non sono una proprietà intrinseca dell'ammasso. Queste sarebbero, dunque, associabili a fenomeni astrofisici non ancora ben noti, che avvengono nelle atmosfere di stelle evolute, suggerendo così una distribuzione omogenea del Fe nell'ammasso. La seconda ipotesi, presentata da studi come [\[Marino et al. 2009; Marino et al. 2012; McKenzie et al. 2022\]](#), suggerisce che M22 sia un ammasso che possiede popolazioni distinte con reali variazioni di Fe tra le stelle nel ramo delle giganti rosse e delle sub-giganti. Questa ipotesi implica, dunque, che M22 abbia avuto una storia chimica complessa, tipica di un oggetto più massiccio di un ammasso globulare, ovvero una galassia nana.

Il mio lavoro di tesi è quindi servito ad avvalorare uno dei due scenari. Dato che entrambe le ipotesi hanno a che fare con stelle evolute, ho

analizzato le variazioni di Fe nella sequenza principale di M22, soprattutto nella zona del Ginocchio, dove non sono presenti processi dovuti all'evoluzione stellare. Con i calcoli riportati nella **Sottosezione 7.2.1**, ho trovato una variazione di Fe tra le stelle del Ginocchio della sequenza principale pari a $\Delta[\text{Fe}/\text{H}]_{\star} \sim 0.47$ dex.

Questo risultato permette di confermare le variazioni massime e minime di metallicità ritrovate nelle stelle del ramo delle giganti rosse da [Da Costa et al. 2009], suggerendo che la loro natura non derivi da effetti riconducibili all'evoluzione stellare, bensì dal modo in cui le popolazioni stesse si sono formate. Attraverso trattazioni più complesse, che richiederebbero risultati più precisi di un singolo valore della variazione di Fe nelle stelle del Ginocchio, l'ipotesi portata avanti da [Mucciarelli et al. 2015] potrebbe essere scartata; ma, considerando soltanto il lavoro fatto in questa tesi, la natura di M22 può essere associata a quella di una galassia nana che si è fusa con la Via Lattea, confermando l'ipotesi di [Marino et al. 2009; Marino et al. 2012; McKenzie et al. 2022].

Le variazioni nella metallicità delle stelle, in questi oggetti, sono dovute alle supernove, principali sorgenti di arricchimento di Fe nel mezzo interstellare. Il potenziale gravitazionale delle galassie nane è abbastanza forte da poter trattenere il gas ad alta energia espulso dalle supernove, consentendo così la formazione di diverse popolazioni stellari con varie abbondanze di metallicità.

Come conseguenza principale di questa ipotesi, vi è una nuova visione sugli ammassi di Tipo-II. Dato che M54 e ω Centauri sono considerati, con grande sicurezza, nuclei galattici, se anche M22 venisse confermato avere la stessa natura, allora anche tutti gli altri oggetti di questa classe "anomala" avrebbero bisogno di ulteriori studi per provarne l'origine diversa da quella degli ammassi globulari (coerente con quanto detto nella **Sezione 5.1**).

Le implicazioni si estenderebbero anche in campo cosmologico. Con le attuali simulazioni del modello standard dell'universo, Λ CDM, è stato messo in evidenza il Missing Satellites Problem: per avere galassie, all'epoca attuale, con massa come quella della Via Lattea, queste dovrebbero possedere molti più satelliti rispetto a quelli che si osservano [Bullock et al. 2017].

Se gli ammassi di Tipo-II fossero in realtà una classe di nuclei galattici

che in origine erano contenuti in galassie nane distrutte dalle forze mareali della Via Lattea, allora gli oggetti che osserviamo oggi sarebbero i fossili più compatti di questi satelliti e potrebbero fornire un contributo alla comprensione del problema.

Per quanto riguarda la presenza di He nelle stelle di M22, come si vede in **Fig. 21**, non si osservano significative variazioni di Y tramite le isocrone lungo la sequenza principale, a parità di $[\text{Fe}/\text{H}]$. Questa omogeneità chimica potrebbe suggerire che, durante la formazione dell'ammasso, non si siano verificati scenari che implicano l'inquinamento del mezzo interstellare con l'He, come quelli del ramo asintotico delle giganti o delle stelle massicce in rapida rotazione, contrariamente a quanto successo a ω Centauri, nucleo galattico con importanti ΔY [Bekki et al. 2006]. L'analisi che ho fatto dell'He è stata, però, più semplice e qualitativa di quella del Fe, utile solo a evidenziare la continuità delle popolazioni stellari e l'assenza di sequenze di oggetti caldi lungo la sequenza principale di M22. Questo mette in risalto come l'allargamento del Ginocchio sia completamente determinato dall'abbondanza di Fe nelle diverse popolazioni stellari.

Infine, per l'analisi dell'O, come già spiegato nella **Sottosezione 7.2.3**, saranno necessari studi più avanzati per creare spettri sintetici e modelli per le atmosfere delle nane rosse. In questo modo sarà possibile creare delle isocrone che riproducano al meglio sia la variazione di metallicità, sia quella di $[\text{O}/\text{Fe}]$ [Marino et al. 2024]. La creazione di queste curve potrebbe permettere un'analisi, simile a quella fatta nella **Sottosezione 7.2.1**, per quantificare le abbondanze di questo elemento tra le stelle O-rich e O-poor della bassa sequenza principale di M22 (**Fig. 22**).

I risultati ottenuti in questa tesi hanno mostrato il potenziale del James Webb Space Telescope nello studio delle popolazioni multiple nell'infrarosso. Tramite i set di filtri a disposizione, è possibile analizzare le principali abbondanze chimiche delle stelle, permettendo di ricavare discriminanti tra gli scenari di formazione e le origini degli ammassi più accurati. Con l'uso di "semplici" osservazioni fotometriche è, dunque, possibile ottenere implicazioni che spaziano dall'astrofisica stellare alla cosmologia e che, sicuramente, permetteranno di acquisire in futuro maggiori conoscenze su questo fenomeno ancora pieno di incognite.

Bibliografia

- Alvarez Garay, D. A. et al. (2022). “The Mg–K Anticorrelation in ω Centauri”. In: *ApJL* 928.1, p. L11. DOI: [10.3847/2041-8213/ac5ccf](https://doi.org/10.3847/2041-8213/ac5ccf). URL: <https://doi.org/10.3847/2041-8213/ac5ccf>.
- Armillotta, L., M. R. Krumholz, and Y. Fujimoto (2018). “Mixing of metals during star cluster formation: statistics and implications for chemical tagging”. In: *MNRAS* 481.4, pp. 5000–5103. DOI: [10.1093/mnras/sty2625](https://doi.org/10.1093/mnras/sty2625). URL: <https://doi.org/10.1093/mnras/sty2625>.
- BaSTI - INAF abruzzo (2021). *A Bag of Stellar Tracks and Isochrones (BaSTI)*. URL: <http://basti-iac.oa-abruzzo.inaf.it/isocs.html>.
- Bastian, N. et al. (2013). “Early disc accretion as the origin of abundance anomalies in globular clusters”. In: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 436.3, pp. 2398–2411. DOI: [10.1093/mnras/stt1745](https://doi.org/10.1093/mnras/stt1745). URL: <https://doi.org/10.1093/mnras/stt1745>.
- Bastian, Nate and Carmela Lardo (2018). “Multiple Stellar Populations in Globular Clusters”. In: *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* 56.1, pp. 83–136. DOI: [10.1146/annurev-astro-081817-051839](https://doi.org/10.1146/annurev-astro-081817-051839). URL: <http://dx.doi.org/10.1146/annurev-astro-081817-051839>.
- Baumgardt, H. and E. Vasiliev (2021). “Accurate distances to Galactic globular clusters through a combination of Gaia EDR3, HST and literature data”. In: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 505.4, pp. 5957–5977. DOI: [10.1093/mnras/stab1474](https://doi.org/10.1093/mnras/stab1474). URL: <https://doi.org/10.1093/mnras/stab1474>.
- Baumgardt, Holger (2024). *Fundamental Parameters of Milky Way Globular Clusters*. School of Mathematics and Physics, The University of Queensland. URL: <https://people.smp.uq.edu.au/HolgerBaumgardt/globular/> (visited on 08/05/2026).
- Bekki, Kenji and John E. Norris (Jan. 2006). “The Origin of the Double Main Sequence in ω Centauri: Helium Enrichment due to Gas Fueling from Its Ancient Host Galaxy?” In: *The Astrophysical Journal* 637.2,

- pp. L109–L112. ISSN: 1538-4357. DOI: [10.1086/500413](https://doi.org/10.1086/500413). URL: <http://dx.doi.org/10.1086/500413>.
- Bonaca, Ana and Adrian M. Price-Whelan (2024). *Stellar Streams in the Gaia Era*. arXiv: [2405.19410](https://arxiv.org/abs/2405.19410) [astro-ph.GA]. URL: <https://arxiv.org/abs/2405.19410>.
- Bovill, Mia S. and Massimo Ricotti (2009). “Pre-reionization fossils, ultra-faint dwarfs, and the missing Galactic satellite problem”. In: *The Astrophysical Journal* 693.2, pp. 1859–1870. DOI: [10.1088/0004-637X/693/2/1859](https://doi.org/10.1088/0004-637X/693/2/1859). URL: <https://doi.org/10.1088/0004-637X/693/2/1859>.
- Bragaglia, A. et al. (Dec. 2012). “Searching for multiple stellar populations in the massive, old open cluster Berkeley 39”. In: *Astronomy & Astrophysics* 548, A122. DOI: [10.1051/0004-6361/201220366](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201220366). URL: <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201220366>.
- Bullock, James S. and Michael Boylan-Kolchin (2017). “Small-Scale Challenges to the Λ CDM Paradigm”. In: *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* 55, pp. 343–387. DOI: [10.1146/annurev-astro-091916-055318](https://doi.org/10.1146/annurev-astro-091916-055318).
- Carlos, M. et al. (2023). “The chemical compositions of multiple stellar populations in the globular cluster NGC 2808”. In: *MNRAS* 519.2, pp. 1695–1716. DOI: [10.1093/mnras/stac3561](https://doi.org/10.1093/mnras/stac3561). arXiv: [2212.01319](https://arxiv.org/abs/2212.01319) [astro-ph.SR]. URL: <https://doi.org/10.1093/mnras/stac3561>.
- Carretta, E. (2015). “Five groups of red giants with distinct chemical composition in the globular cluster NGC 2808”. In: *ApJ* 810.2, p. 148. DOI: [10.1088/0004-637X/810/2/148](https://doi.org/10.1088/0004-637X/810/2/148). URL: <https://doi.org/10.1088/0004-637X/810/2/148>.
- Carretta, E. et al. (2018). “Aluminium abundances in five discrete stellar populations of the globular cluster NGC 2808”. In: *A&A* 615, A17. DOI: [10.1051/0004-6361/201732324](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201732324). URL: <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201732324>.
- Catelan, M. (Feb. 2009). “Horizontal branch stars: the interplay between observations and theory, and insights into the formation of the Galaxy”. In: *Astrophysics and Space Science* 320.4, pp. 261–309. ISSN: 1572-946X. DOI: [10.1007/s10509-009-9987-8](https://doi.org/10.1007/s10509-009-9987-8). URL: <http://dx.doi.org/10.1007/s10509-009-9987-8>.

- Cordoni, G. et al. (Aug. 2020). “Gaia and Hubble Unveil the Kinematics of Stellar Populations in the Type II Globular Clusters ω Centauri and M22”. In: *The Astrophysical Journal* 898.2, p. 147. DOI: [10.3847/1538-4357/aba04b](https://doi.org/10.3847/1538-4357/aba04b).
- Cyburt, R. H. et al. (2016). “Big Bang nucleosynthesis: Present status”. In: *Rev. Mod. Phys.* 88.1, p. 015004. DOI: [10.1103/RevModPhys.88.015004](https://doi.org/10.1103/RevModPhys.88.015004). URL: <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.88.015004>.
- D’Antona, F. et al. (2016). “A single model for the variety of multiple-population formation(s) in globular clusters: a temporal sequence”. In: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 458.2, pp. 2122–2139. DOI: [10.1093/mnras/stw387](https://doi.org/10.1093/mnras/stw387). URL: <https://doi.org/10.1093/mnras/stw387>.
- D’Ercole, Annibale et al. (2010). “Abundance patterns of multiple populations in globular clusters: a chemical evolution model based on yields from AGB ejecta”. In: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 407.2, pp. 854–869. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2010.16996.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2010.16996.x). URL: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2010.16996.x>.
- Da Costa, G. S. (2015). “Are the globular clusters with significant internal [Fe/H] spreads all former dwarf galaxy nuclei?” In: *Proceedings of the International Astronomical Union* 11.S317, pp. 110–115. DOI: [10.1017/S174392131500678X](https://doi.org/10.1017/S174392131500678X). URL: <https://doi.org/10.1017/S174392131500678X>.
- Da Costa, G. S. et al. (2009). “M 22: An [Fe/H] Abundance Range Revealed”. In: *The Astrophysical Journal* 705.2, pp. 1481–1491. DOI: [10.1088/0004-637X/705/2/1481](https://doi.org/10.1088/0004-637X/705/2/1481).
- Decressin, T. et al. (2007). “Fast rotating massive stars and the origin of the abundance patterns in galactic globular clusters”. In: *Astronomy & Astrophysics* 464.3, pp. 1029–1044. DOI: [10.1051/0004-6361:20066013](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20066013). URL: <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20066013>.
- Denisenkov, P. A. and S. N. Denisenkova (1990). “Possible explanation of the correlation between nitrogen and sodium overabundances for red giants in globular clusters”. In: *Sov. Astron. Lett.* 16, pp. 275–277.
- Denissenkov, P. A. and F. D. A. Hartwick (2013). “Supermassive stars as a source of abundance anomalies of proton-capture elements in globular clusters”. In: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*

- 437.1, pp. L21–L25. DOI: [10.1093/mnrasl/slt133](https://doi.org/10.1093/mnrasl/slt133). URL: <https://doi.org/10.1093/mnrasl/slt133>.
- Dondoglio, E. et al. (2022). “Survey of Multiple Populations in Globular Clusters among Very-low-mass Stars”. In: *The Astrophysical Journal* 927.2, p. 207. DOI: [10.3847/1538-4357/ac5046](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac5046). URL: <http://dx.doi.org/10.3847/1538-4357/ac5046>.
- Dotter, Aaron et al. (Sept. 2008). “The Dartmouth Stellar Evolution Database”. In: *The Astrophysical Journal Supplement Series* 178.1, p. 89. DOI: [10.1086/589654](https://doi.org/10.1086/589654). URL: <https://doi.org/10.1086/589654>.
- Dotter, Aaron et al. (Dec. 2010). “The ACS Survey of Galactic Globular Clusters. IX. Horizontal Branch Morphology and the Second Parameter Phenomenon”. In: *The Astrophysical Journal* 708.1, pp. 698–716. DOI: [10.1088/0004-637X/708/1/698](https://doi.org/10.1088/0004-637X/708/1/698). URL: <https://doi.org/10.1088/0004-637X/708/1/698>.
- Ellis, Richard S. (2014). *Cosmic Dawn: Studies of the Earliest Galaxies and Their Role in Cosmic Reionization*. arXiv: [1411.3330](https://arxiv.org/abs/1411.3330) [astro-ph.CO]. URL: <https://arxiv.org/abs/1411.3330>.
- ESA/Webb (2021). *Webb’s Orbit at L2*. URL: <https://esawebb.org/about/general/orbit/> (visited on 08/03/2026).
- ESA/Webb, NASA & CSA (2022). *Artist impression of Webb in space*. Illustration ID: ann2204a. URL: <https://esawebb.org/images/ann2204a/> (visited on 08/03/2026).
- ESA/Webb, NASA, CSA (June 20, 2024). *Serpens Nebula (NIRCam image)*. European Space Agency (ESA). URL: <https://esawebb.org/images/weic2415a/>.
- ESO/M.-R. Cioni/VISTA Magellanic Cloud survey (2013). *Wide-field view of 47 Tucanae and the Small Magellanic Cloud*. ESO Photo Release eso1302c. Accessed: 2026-07-15. URL: <https://www.eso.org/public/images/eso1302c/>.
- Gieles, Mark et al. (Aug. 2018). “Concurrent formation of supermassive stars and globular clusters: implications for early self-enrichment”. In: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 478.2, pp. 2461–2479. ISSN: 0035-8711. DOI: [10.1093/mnras/sty1059](https://doi.org/10.1093/mnras/sty1059). URL: <https://doi.org/10.1093/mnras/sty1059>.
- Girardi, L. et al. (2007). “On the effect of helium enhancement on bolometric corrections and Teff-colour relations”. In: *A&A* 468.2, pp. 657–662.

- DOI: 10.1051/0004-6361:20077129. URL: <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20077129>.
- Gratton, R. G. et al. (2001). “The O-Na and Mg-Al anticorrelations in turn-off and early subgiants in globular clusters”. In: *Astronomy & Astrophysics* 369.1, pp. 87–98. DOI: 10.1051/0004-6361:20010144. URL: <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20010144>.
- Grundahl, Frank, Don A. Vandenberg, and Michael I. Andersen (June 1998). “Strömgren Photometry of Globular Clusters: The Distance and Age of M13, Evidence for Two Populations of Horizontal-Branch Stars*”. In: *The Astrophysical Journal* 500.2, p. L179. DOI: 10.1086/311419. URL: <https://doi.org/10.1086/311419>.
- Harris, William E. (1996). “A Catalog of Parameters for Globular Clusters in the Milky Way”. In: *The Astronomical Journal* 112. Versione aggiornata al 2010. Dati disponibili all’indirizzo <https://physics.mcmaster.ca/~harris/mwgc.dat>, p. 1487. URL: <https://physics.mcmaster.ca/~harris/mwgc.dat> (visited on 08/05/2026).
- Henry, Todd J. and Wei-Chun Jao (2024). “The Character of M Dwarfs”. In: *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* 62, pp. 593–633. ISSN: 1545-4282. DOI: 10.1146/annurev-astro-052722-102740. URL: <https://www.annualreviews.org/content/journals/10.1146/annurev-astro-052722-102740>.
- Herbert Walter (2024). *Messier 22 - Uno di circa 150*. AstroBin. URL: <https://www.astrobin.com/cdo09j/>.
- Horta, Danny et al. (Feb. 2021). “The contribution of N-rich stars to the Galactic stellar halo using APOGEE red giants”. In: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 500.4, pp. 5462–5478. DOI: 10.1093/mnras/staa3598.
- Jang, S. et al. (2021). “Integrated Photometry of Multiple Stellar Populations in Globular Clusters”. In: *The Astrophysical Journal* 920.2, p. 129. DOI: 10.3847/1538-4357/ac1861. URL: <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac1861>.
- Johnson, Christian I. and Catherine A. Pilachowski (2010). “Chemical abundances for 855 giants in the globular cluster ω Centauri (NGC 5139)”. In: *ApJ* 722.2, p. 1373. DOI: 10.1088/0004-637X/722/2/1373. URL: <https://doi.org/10.1088/0004-637X/722/2/1373>.

- JWST User Documentation (2016). *JWST Near Infrared Camera (NIR-Cam)*. JDOx Article ID: NIRCam Overview. Space Telescope Science Institute (STScI). URL: <https://jwst-docs.stsci.edu/jwst-near-infrared-camera> (visited on 08/04/2026).
- Kraft, Robert P. (June 1994). “Abundance Differences among Globular Cluster Giants: Primordial vs. Evolutionary Scenarios”. In: *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* 106.700, p. 553. DOI: [10.1086/133416](https://doi.org/10.1086/133416). URL: <https://doi.org/10.1086/133416>.
- Krause, M. et al. (2013). “Superbubble dynamics in globular cluster infancy: II. Consequences for secondary star formation in the context of self-enrichment via fast-rotating massive stars”. In: *Astronomy & Astrophysics* 552, A121. DOI: [10.1051/0004-6361/201220694](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201220694). URL: <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201220694>.
- Lagioia, E. P. et al. (Oct. 2019). “The Role of Cluster Mass in the Multiple Populations of Galactic and Extragalactic Globular Clusters”. In: *The Astronomical Journal* 158.5, p. 202. DOI: [10.3847/1538-3881/ab45f2](https://doi.org/10.3847/1538-3881/ab45f2). URL: <https://doi.org/10.3847/1538-3881/ab45f2>.
- Lagioia, E. P. et al. (Mar. 2021). “Multiple Stellar Populations in Asymptotic Giant Branch Stars of Galactic Globular Clusters”. In: *The Astrophysical Journal* 910.1, p. 6. DOI: [10.3847/1538-4357/abdfcf](https://doi.org/10.3847/1538-4357/abdfcf). URL: <https://doi.org/10.3847/1538-4357/abdfcf>.
- Lee, Jae-Woo (July 2017). “Multiple Stellar Populations of Globular Clusters from Homogeneous Ca-CN Photometry. II. M5 (NGC 5904) and a New Filter System”. In: *The Astrophysical Journal* 844.1, p. 77. DOI: [10.3847/1538-4357/aa7b8c](https://doi.org/10.3847/1538-4357/aa7b8c).
- Legnardi, M. V. et al. (2022). “Constraining the original composition of the gas forming first-generation stars in globular clusters”. In: *MNRAS* 513.1, pp. 735–751. DOI: [10.1093/mnras/stac734](https://doi.org/10.1093/mnras/stac734). URL: <https://doi.org/10.1093/mnras/stac734>.
- Marino, A. F. et al. (Aug. 2008). “Spectroscopic and photometric evidence of two stellar populations in the Galactic globular cluster NGC 6121 (M4)”. In: *Astronomy & Astrophysics* 490.2, pp. 625–640. ISSN: 1432-0746. DOI: [10.1051/0004-6361:200810389](https://doi.org/10.1051/0004-6361:200810389). URL: <http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361:200810389>.
- Marino, A. F. et al. (2009). “A double stellar generation in the globular cluster NGC 6656 (M 22). Two stellar groups with different iron and

- s-process element abundances”. In: *Astronomy & Astrophysics* 505.3, pp. 1099–1113. DOI: [10.1051/0004-6361/200911827](https://doi.org/10.1051/0004-6361/200911827). URL: <https://doi.org/10.1051/0004-6361/200911827>.
- Marino, A. F. et al. (2011a). “Sodium–oxygen anticorrelation among horizontal branch stars in the globular cluster M4”. In: *ApJL* 730.2, p. L16. DOI: [10.1088/2041-8205/730/2/L16](https://doi.org/10.1088/2041-8205/730/2/L16). URL: <https://doi.org/10.1088/2041-8205/730/2/L16>.
- Marino, A. F. et al. (2011b). “The two metallicity groups of the globular cluster M22: a chemical perspective”. In: *A&A* 532, A8. DOI: [10.1051/0004-6361/201116546](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201116546). URL: <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201116546>.
- Marino, A. F. et al. (Apr. 2012). “The double sub-giant branch of NGC 6656 (M 22): a chemical characterization”. In: *A&A* 541, A15. DOI: [10.1051/0004-6361/201118381](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201118381). URL: <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201118381>.
- Marino, A. F. et al. (2015). “Iron and s-elements abundance variations in NGC 5286: comparison with ‘anomalous’ globular clusters and Milky Way satellites”. In: *MNRAS* 450.1, pp. 815–845. DOI: [10.1093/mnras/stv420](https://doi.org/10.1093/mnras/stv420). URL: <https://doi.org/10.1093/mnras/stv420>.
- Marino, A. F. et al. (July 2017). “Spectroscopy and Photometry of Multiple Populations along the Asymptotic Giant Branch of NGC 2808 and NGC 6121 (M4)*”. In: *The Astrophysical Journal* 843.1, p. 66. DOI: [10.3847/1538-4357/aa7852](https://doi.org/10.3847/1538-4357/aa7852). URL: <https://doi.org/10.3847/1538-4357/aa7852>.
- Marino, A. F. et al. (2019). “Chemical Abundances along the 1G Sequence of the Chromosome Maps: The Globular Cluster NGC 3201”. In: *The Astrophysical Journal* 887.1, p. 91. DOI: [10.3847/1538-4357/ab53d9](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab53d9). URL: <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab53d9>.
- Marino, A. F. et al. (2021). “Spectroscopy and photometry of the least massive Type II globular clusters: NGC 1261 and NGC 6934”. In: *ApJ* 923.1, p. 22. DOI: [10.3847/1538-4357/ac282c](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac282c). arXiv: [2106.15978](https://arxiv.org/abs/2106.15978) [astro-ph.SR]. URL: <https://arxiv.org/abs/2106.15978>.
- Marino, A. F. et al. (2024). *A JWST project on 47 Tucanae. Overview, photometry and early spectroscopic results of M dwarfs, and observation of brown dwarfs*. arXiv: [2401.06681](https://arxiv.org/abs/2401.06681) [astro-ph.SR]. URL: <https://arxiv.org/abs/2401.06681>.

- Martocchia, S. et al. (Jan. 2018). “Age as a major factor in the onset of multiple populations in stellar clusters”. In: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 473.2, pp. 2688–2700. DOI: [10.1093/mnras/stx2556](https://doi.org/10.1093/mnras/stx2556). URL: <https://doi.org/10.1093/mnras/stx2556>.
- Massari, D., H. H. Koppelman, and A. Helmi (2019). “Origin of the system of globular clusters in the Milky Way”. In: *Astronomy & Astrophysics* 630, p. L4. DOI: [10.1051/0004-6361/201936135](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201936135). URL: <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201936135>.
- McKenzie, M et al. (Aug. 2022). “The complex stellar system M 22: confirming abundance variations with high precision differential measurements”. In: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 516.3, pp. 3515–3531. ISSN: 1365-2966. DOI: [10.1093/mnras/stac2254](https://doi.org/10.1093/mnras/stac2254). URL: <http://dx.doi.org/10.1093/mnras/stac2254>.
- Milone, A. P. et al. (2011). “Multiple Stellar Populations in 47 Tucanae”. In: *The Astrophysical Journal* 744.1, p. 58. DOI: [10.1088/0004-637X/744/1/58](https://doi.org/10.1088/0004-637X/744/1/58). URL: <https://doi.org/10.1088/0004-637X/744/1/58>.
- Milone, A. P. et al. (July 2012). “The Infrared Eye of the Wide-Field Camera 3 on the Hubble Space Telescope Reveals Multiple Main Sequences of Very Low Mass Stars in NGC 2808”. In: *The Astrophysical Journal Letters* 754.2, p. L34. DOI: [10.1088/2041-8205/754/2/L34](https://doi.org/10.1088/2041-8205/754/2/L34). arXiv: [1206.5242](https://arxiv.org/abs/1206.5242) [astro-ph.SR].
- Milone, A. P. et al. (2013). “A WFC3/HST View of the Three Stellar Populations in the Globular Cluster NGC 6752”. In: *The Astrophysical Journal* 767.2, p. 120. DOI: [10.1088/0004-637X/767/2/120](https://doi.org/10.1088/0004-637X/767/2/120). URL: <https://doi.org/10.1088/0004-637X/767/2/120>.
- Milone, A. P. et al. (2015a). “The Hubble Space Telescope UV Legacy Survey of galactic globular clusters – II. The seven stellar populations of NGC 7089 (M2)”. In: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 447.1, pp. 927–938. ISSN: 0035-8711. DOI: [10.1093/mnras/stu2446](https://doi.org/10.1093/mnras/stu2446). URL: <https://doi.org/10.1093/mnras/stu2446>.
- Milone, A. P. et al. (2015b). “The Hubble Space Telescope UV Legacy Survey of Galactic globular clusters. III. A quintuple stellar population in NGC 2808”. In: *ApJ* 808.1, p. 51. DOI: [10.1088/0004-637X/808/1/51](https://doi.org/10.1088/0004-637X/808/1/51). URL: <https://doi.org/10.1088/0004-637X/808/1/51>.
- Milone, A. P. et al. (2017a). “The HST large programme on ω Centauri – I. Multiple stellar populations at the bottom of the main sequence probed

- in NIR–Optical”. In: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 469.1, pp. 800–812. ISSN: 0035-8711. DOI: [10.1093/mnras/stx836](https://doi.org/10.1093/mnras/stx836). URL: <https://doi.org/10.1093/mnras/stx836>.
- Milone, A. P. et al. (2017b). “The Hubble Space Telescope UV Legacy Survey of Galactic globular clusters – IX. The Atlas of multiple stellar populations”. In: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 464.3, pp. 3636–3656. ISSN: 0035-8711. DOI: [10.1093/mnras/stw2531](https://doi.org/10.1093/mnras/stw2531). URL: <https://doi.org/10.1093/mnras/stw2531>.
- Milone, A. P. et al. (2018). “The Hubble Space Telescope UV legacy survey of galactic globular clusters – XVI. The helium abundance of multiple populations”. In: *MNRAS* 481.4, pp. 5098–5122. DOI: [10.1093/mnras/sty2573](https://doi.org/10.1093/mnras/sty2573). URL: <https://doi.org/10.1093/mnras/sty2573>.
- Milone, A. P. et al. (Jan. 2020). “Multiple populations in globular clusters and their parent galaxies”. In: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 491.1, pp. 515–531. ISSN: 0035-8711. DOI: [10.1093/mnras/stz2999](https://doi.org/10.1093/mnras/stz2999). URL: <https://doi.org/10.1093/mnras/stz2999>.
- Milone, A. P. et al. (2026). *Globular Clusters in the Time of the JWST. I. Survey Design and First Results on Multiple Populations and Beyond*. arXiv: [2606.20979](https://arxiv.org/abs/2606.20979) [astro-ph.GA]. URL: <https://arxiv.org/abs/2606.20979>.
- Milone, Antonino P. and Anna F. Marino (2022). *Multiple Populations in Star Clusters*. arXiv: [2206.10564](https://arxiv.org/abs/2206.10564) [astro-ph.GA]. URL: <https://arxiv.org/abs/2206.10564>.
- Mink, S. E. de et al. (2009). “Massive binaries as the source of abundance anomalies in globular clusters”. In: *Astronomy & Astrophysics* 507.1, pp. L1–L4. DOI: [10.1051/0004-6361/200913205](https://doi.org/10.1051/0004-6361/200913205). URL: <https://doi.org/10.1051/0004-6361/200913205>.
- Mucciarelli, A. et al. (Aug. 2015). “A Chemical Trompe-l’œil: No Iron Spread in the Globular Cluster M22”. In: *The Astrophysical Journal* 809.2, p. 128. ISSN: 1538-4357. DOI: [10.1088/0004-637x/809/2/128](https://doi.org/10.1088/0004-637x/809/2/128). URL: <http://dx.doi.org/10.1088/0004-637x/809/2/128>.
- NASA (2023). *JWST Spacecraft Overview: Major Components*. NASA Science Mission Directorate. URL: <https://science.nasa.gov/mission/webb/spacecraftoverview/#majorComponents> (visited on 08/03/2026).

- Pancino, E. et al. (2017). “The Gaia-ESO Survey – Mg-Al anti-correlation in iDR4 globular clusters”. In: *A&A* 601, A112. DOI: [10.1051/0004-6361/201730474](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201730474). URL: <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201730474>.
- Piotto, G. et al. (2002). “HST color-magnitude diagrams of 74 galactic globular clusters in the HST *F*439W and *F*555W bands”. In: *Astronomy & Astrophysics* 391.3, pp. 945–965. DOI: [10.1051/0004-6361:20020820](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20020820). URL: <http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361:20020820>.
- Piotto, G. et al. (Feb. 2015). “The Hubble Space Telescope UV Legacy Survey of Galactic Globular Clusters. I. Overview of the project and detection of multiple stellar populations”. In: *The Astronomical Journal* 149.3, p. 91. DOI: [10.1088/0004-6256/149/3/91](https://doi.org/10.1088/0004-6256/149/3/91).
- Prantzos, N. and C. Charbonnel (2006). “On the self-enrichment scenario of galactic globular clusters: constraints on the IMF”. In: *A&A* 458.1, pp. 135–149. DOI: [10.1051/0004-6361:20065374](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20065374). URL: <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20065374>.
- Renzini, Alvio (2013). “Rethinking globular clusters formation”. In: *Memorie della Società Astronomica Italiana* 84.1, p. 162. URL: <https://www.memsait.it/volumi/Vol.%2084%20n.%201,%202013/2013MmSAI.84..162R.pdf>.
- (2017). “Finding forming globular clusters at high redshifts”. In: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters* 469.1, pp. L63–L67. DOI: [10.1093/mnrasl/slx057](https://doi.org/10.1093/mnrasl/slx057). URL: <https://doi.org/10.1093/mnrasl/slx057>.
- Renzini, Alvio, Anna F Marino, and Antonino P Milone (Apr. 2022). “The formation of globular clusters as a case of overcooling”. In: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 513.2, pp. 2111–2117. ISSN: 1365-2966. DOI: [10.1093/mnras/stac973](https://doi.org/10.1093/mnras/stac973). URL: <http://dx.doi.org/10.1093/mnras/stac973>.
- Sandage, A and R Wildey (Jan. 1967). “The Anomalous Color-Magnitude Diagram of the Remote Globular Cluster NGC 7006.” In: *Astrophys. J.*, 150: 469-82(Nov. 1967). DOI: [10.1086/149350](https://doi.org/10.1086/149350). URL: <https://www.osti.gov/biblio/4511468>.
- Schiavon, Ricardo P. et al. (Feb. 2017). “Chemical tagging with APOGEE: discovery of a large population of N-rich stars in the inner Galaxy”. In:

- Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 465.1, pp. 501–524. DOI: [10.1093/mnras/stw2162](https://doi.org/10.1093/mnras/stw2162).
- Simioni, M. et al. (Nov. 2016). “The Hubble Space Telescope UV Legacy Survey of Galactic globular clusters – X. The radial distribution of stellar populations in NGC 2808”. In: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 463.1, pp. 449–458. DOI: [10.1093/mnras/stw2003](https://doi.org/10.1093/mnras/stw2003).
- Sollima, A. et al. (Jan. 2007). “Deep FORS1 Observations of the Double Main Sequence of ω Centauri”. In: *The Astrophysical Journal* 654.2, pp. 915–922. DOI: [10.1086/509711](https://doi.org/10.1086/509711).
- Ventura, P. et al. (2012). “Super-AGB–AGB evolution and the chemical inventory in NGC 2419”. In: *ApJL* 761.2, p. L30. DOI: [10.1088/2041-8205/761/2/L30](https://doi.org/10.1088/2041-8205/761/2/L30). URL: <https://doi.org/10.1088/2041-8205/761/2/L30>.
- Vesperini, Enrico et al. (July 2010). “The Fraction of Globular Cluster Second-Generation Stars in the Galactic Halo”. In: *The Astrophysical Journal Letters* 718.2, pp. L112–L116. DOI: [10.1088/2041-8205/718/2/L112](https://doi.org/10.1088/2041-8205/718/2/L112).
- (Mar. 2013). “Dynamical evolution and spatial mixing of multiple population globular clusters”. In: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 429.3, pp. 1913–1921. DOI: [10.1093/mnras/sts434](https://doi.org/10.1093/mnras/sts434).
- Wang, Long et al. (Jan. 2020). “The possible role of stellar mergers for the formation of multiple stellar populations in globular clusters”. In: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 491.1, pp. 440–454. ISSN: 0035-8711. DOI: [10.1093/mnras/stz3033](https://doi.org/10.1093/mnras/stz3033). URL: <https://doi.org/10.1093/mnras/stz3033>.
- Yong, D. et al. (2014). “Iron and neutron-capture element abundance variations in the globular cluster M2 (NGC 7089)”. In: *MNRAS* 441.4, pp. 3396–3416. DOI: [10.1093/mnras/stu806](https://doi.org/10.1093/mnras/stu806). URL: <https://doi.org/10.1093/mnras/stu806>.

Ringraziamenti

Ho pensato a lungo su come scrivere questi ringraziamenti. Ogni volta che ci provavo, chiudevo il computer e rimandavo al giorno dopo, perché non volevo che diventassero una lista infinita di nomi seguiti da aneddoti.

Penso infatti che sia più importante ringraziare tutti quelli che mi sono stati vicini in questi anni tramite i gesti piuttosto che con le parole.

Qui posso solo scrivere un enorme grazie alla mia famiglia, a Chiara e alla sua famiglia, e a tutte le persone che sanno di essere importanti per me.

Ce n'è solo una in particolare a cui vorrei rivolgere un grazie più speciale degli altri.

Ringrazio mia nonna per avermi cresciuto, permettendomi di raggiungere i miei obiettivi e per avermi aiutato a diventare quello che sono adesso.

L'unico modo che ho per sdebitarmi è dedicarle questa tesi, sperando un giorno di ritrovarla tra ammassi di galassie e buchi neri in evaporazione.

*– Ad Antonietta e a tutti quelli
che mi vogliono bene.*