

Alma Mater Studiorum - Università di Bologna

Dipartimento di Fisica e Astronomia

Corso di Laurea Magistrale in Astrofisica e Cosmologia

**Analisi chimica e cinematica di stelle giganti
della Grande Nube di Magellano**

Tesi di laurea

Presentata da:
Alice Minelli

Relatore:

Dott. Alessio Mucciarelli

Correlatori:

Chiar.mo Prof. Francesco R. Ferraro

Prof.ssa Barbara Lanzoni

Sessione II

Anno Accademico 2017-2018

Ad Anna Maria Fabbri

*“Non potete neanche immaginare quanto sia
divertente capire come funziona una stella.
E il bello è che tutte queste cose si possono studiare
anche senza lasciarsi divorare dalle solite eterne
domande intrise di presunzione: «Chi siamo noi?
Da dove veniamo? Qual è il senso della nostra vita?
Cosa ci aspetta dopo la morte?».”*

Margherita Hack

Abstract

Questo lavoro di tesi è volto a fornire una caratterizzazione chimica e cinematica delle popolazioni stellari nella Grande Nube di Magellano (LMC). Sono stati analizzati spettri ad alta risoluzione acquisiti con lo spettrografo FLAMES del VLT per circa 400 stelle giganti della LMC, localizzate in 6 campi posti in diverse regioni della galassia. Si tratta del primo studio sulla LMC realizzato su un campione così ampio di spettri ad alta risoluzione analizzati in modo omogeneo.

I principali risultati ottenuti sono:

1. lo studio ha fornito la prima evidenza di rotazione della LMC da spettri ad alta risoluzione;
2. la dispersione di velocità si mantiene costante intorno a 25 km/s entro i primi 5 kpc, ma un campo tra i più esterni presenta un valore di 19 km/s , suggerendo un possibile calo della dispersione di velocità nel disco esterno della LMC;
3. la distribuzione di metallicità della LMC è dominata da una componente ad alta metallicità ($[Fe/H] \sim -0.5$) che costituisce $\sim 90\%$ del campione e da una componente secondaria metal-poor che si estende fino a $[Fe/H] \sim -2$. La componente principale è associata al burst di formazione avvenuto 4-5 Gyr fa con la cattura mareale della SMC da parte della LMC. La componente metal-poor è invece associata al lungo periodo di bassa formazione stellare che ha preceduto questo burst, quando la LMC è evoluta in isolamento;
4. il picco della distribuzione di metallicità della componente dominante varia da $[Fe/H] \sim -0.6$ nei campi più interni e in quello a nord, ad un valore di $[Fe/H] \sim -0.8$ nei campi più esterni a sud della Barra. La presenza di un gradiente suggerisce un modello di formazione galattico outside-in;
5. non sono state trovate stelle con $[Fe/H] < -2$ e quelle con $[Fe/H] < -1.5$ sono meno dell'1% del campione analizzato;

6. la dispersione di velocità delle componente più metallica ($\sigma = 23.6 \pm 1.0$ km/s) è paragonabile a quella delle stelle metal-poor ($\sigma = 26.0 \pm 2.0$ km/s), indicando che le due popolazioni non sono cinematicamente distinte.

Indice

1	La Grande Nube di Magellano	3
1.1	Struttura della LMC	3
1.2	Storia di formazione della LMC	4
1.3	Cinematica della LMC	6
1.4	Distribuzione di metallicità della LMC	9
2	Dati analizzati	11
2.1	Cataloghi fotometrici	11
2.1.1	SOFI	11
2.1.2	2MASS	12
2.2	Lo Spettrografo FLAMES	13
2.2.1	VLT	13
2.2.2	Flames	14
2.3	Selezione dei target	16
2.3.1	Campi studiati	19
3	Derivazione dei parametri atmosferici	23
3.1	Temperatura	23
3.1.1	Indice di colore	24
3.2	Gravità	25
3.3	Velocità di Microturbolenza	27
4	Analisi Spettroscopica	29
4.1	Operazioni di Preriduzione	29
4.2	Operazioni di Riduzione	30
4.3	Analisi Spettrale	31
4.3.1	Selezione lista di righe	32
4.4	Determinazione delle Velocità Radiali	34
4.4.1	DAOSPEC	34
4.4.2	Stima delle incertezze	36

4.4.3	4DAO	37
4.5	Determinazione delle Abbondanze	39
4.5.1	Abbondanze chimiche da EW	39
4.5.2	GALA	40
4.5.3	Determinazione delle metallicità nei target FLAMES	44
4.5.4	Analisi dello spettro di Arturo	45
5	Distribuzione di Velocità Radiale nella LMC	49
5.1	Risultati	49
5.2	Cinematica della LMC	53
6	Distribuzione di metallicità della LMC	59
6.1	Risultati	59
6.2	Confronto con la letteratura	63
6.2.1	Osservazioni ad alta risoluzione	63
6.2.2	Osservazioni a bassa risoluzione	65
6.3	Discussione	67
6.3.1	Arricchimento chimico della LMC	67
6.3.2	Gradiente di metallicità	68
6.3.3	Stelle metal-poor	70
6.3.4	Legame tra cinematica e metallicità	71
7	Conclusioni	73
7.1	Risultati	73
7.2	Sviluppi futuri	75
A	Dati fotometrici	77
B	Risultati	97
C	Lista di righe	109

Introduzione

La Grande Nube di Magellano (LMC) è il più massivo tra i satelliti della Via Lattea (MW) e rappresenta un laboratorio ideale per studiare le popolazioni stellari di una galassia caratterizzata da una vigorosa formazione stellare ed in interazione gravitazionale con altri sistemi, ovvero la MW e la Piccola Nube di Magellano (SMC). In particolare, la sua vicinanza (~ 50 kpc) permette di risolvere in dettaglio le sue stelle e di studiare le diverse popolazioni stellari che la compongono.

Le popolazioni stellari della LMC e della SMC sono caratterizzate da un ampio intervallo di età e metallicità, alcune generate contemporaneamente ai primi burst di formazione stellare nelle altre galassie del Gruppo Locale, altre nate successivamente, fino ad appena pochi Myr fa, segno dell'intensa attività di formazione stellare tuttora in corso.

La disponibilità di telescopi della classe degli 8-10 metri permette di ottenere spettri ad alta risoluzione per stelle fino a $V \sim 17 - 17.5$, che corrispondono a stelle del braccio delle giganti rosse (RGB) in galassie esterne alla MW, come le Nubi di Magellano o altri sistemi del Gruppo Locale.

Negli ultimi anni, le osservazioni spettroscopiche ad alta risoluzione si sono concentrate sullo studio delle galassie sferoidali nane del Gruppo Locale. Tali sistemi sono evoluti in isolamento, senza interazioni con altre galassie, mentre LMC e SMC rappresentano un laboratorio ideale per investigare le proprietà chimiche e cinematiche di popolazioni stellari nate in galassie in interazione.

Nonostante la sua vicinanza, la maggior parte delle informazioni ricavate sulla LMC è stata ottenuta da studi fotometrici o da spettri a bassa risoluzione, che quindi forniscono solo una stima indiretta delle metallicità stellari e misure meno precise delle loro velocità radiali. I pochi lavori precedenti basati su spettri ad alta risoluzione sono relativi solo ad alcune regioni della LMC ed eseguiti con metodologie differenti e non facilmente confrontabili tra di loro.

Questo lavoro di tesi presenta l'analisi chimica e cinematica del più ampio dataset di spettri ad alta risoluzione di stelle giganti della LMC eseguita in maniera omogenea. Sono state studiate circa 400 stelle di RGB appartenenti alla LMC, utilizzando spettri ottici ad alta risoluzione ($R \sim 20000$), acquisiti con lo spettrografo

FLAMES al VLT (ESO, Paranal). Le stelle analizzate sono situate in diverse regioni della LMC, nei campi circostanti ad ammassi globulari studiati in precedenza. Con questo studio si vuole ottenere una dettagliata caratterizzazione cinematica e chimica della popolazione stellare della LMC, misurando velocità radiali e abbondanze chimiche in diverse regioni della galassia, per determinare:

- la distribuzione di metallicità delle stelle della LMC, interpretandola alla luce della Star Formation History (SFH) della galassia;
- la presenza di eventuali gradienti di metallicità;
- la presenza di effetti di rotazione e variazioni nella dispersione di velocità;
- la presenza di possibili sottostrutture cinematicamente distinte, combinando le informazioni spettroscopiche e chimiche;
- la frazione di stelle con $[Fe/H] \ll -2$ dex, corrispondente alla metallicità attesa per le prime popolazioni della LMC, ma finora mai osservate.

L'elaborato è organizzato come segue: nel Capitolo 1 vengono presentate le caratteristiche chimiche e cinematiche della LMC note finora. Nel Capitolo 2 vengono discussi i dati analizzati in questo lavoro, entrando nel dettaglio dei cataloghi fotometrici adottati e degli strumenti utilizzati per le osservazioni, specificando le strategie di selezione dei target e offrendo una panoramica delle caratteristiche principali dei campi analizzati. Segue il Capitolo 3, nel quale vengono spiegati i metodi per ricavare i parametri atmosferici e il Capitolo 4 nel quale si descrivono le procedure di riduzione dati e misura delle velocità radiali e della metallicità delle singole stelle. Nel Capitolo 5 si riportano i risultati dell'analisi cinematica e il confronto con la letteratura. Il Capitolo 6 discute le distribuzioni di metallicità. Nel capitolo 7, infine, si presentano le conclusioni a cui si è giunti in questo lavoro e le prospettive di studi futuri.

Capitolo 1

La Grande Nube di Magellano

1.1 Struttura della LMC

La LMC è classificata come una galassia a spirale barrata SB(s)m (de Vaucouleurs et al., 1991), ed è considerata il prototipo delle così dette Spirali Magellaniche Barrate (de Vaucouleurs & Freeman, 1972).

Nelle bande ottiche-infrarosse, la sua struttura è dominata da una regione centrale ad alta brillantezza superficiale, detta Barra, e da una struttura stellare a simmetria circolare, solitamente definita "disco". Se la presenza di queste due strutture è confermata da studi basati su diversi indicatori (van der Marel & Cioni, 2001; van der Marel, 2001; Olsen & Salyk, 2002), la LMC mostra un aspetto completamente differente quando osservata attraverso il gas neutro o ionizzato (Kim et al., 1998; Staveley-Smith et al., 2003) dove non vi sono evidenze della Barra centrale mentre rimane la struttura del disco e la presenza di bracci a spirale.

Un esempio della complessità della struttura della LMC è fornita dal fatto che diversi traccianti forniscono differenti posizioni per il centro della galassia. In particolare il centro fotometrico si trova a 0.4 kpc rispetto al centro del disco stellare, che si trova a sua volta a 1 kpc di distanza rispetto al centro dinamico dell'idrogeno neutro nel disco (van der Marel, 2001). Il centro dinamico delle stelle è ancora dibattuto, in quanto il centro dinamico delle Carbon-stars è consistente con il centro fotometrico (van der Marel et al., 2002; Olsen et al., 2011), a differenza del centro stellare dinamico determinato studiando i moti osservati con Hubble Space Telescope, che coincide con il centro misurato dall'HI. Ancora differente è il centro determinato dallo studio di stelle giganti di campo (van der Marel & Cioni, 2001).

La struttura della LMC è quindi estremamente complessa ed intimamente connessa alla SMC, a cui è gravitazionalmente legata. Indice di queste interazioni (Bekki & Chiba, 2005) sono il *Magellanic Bridge*, una debole struttura di gas che collega le due Nubi, segno che hanno avuto un incontro ravvicinato nella loro sto-

ria recente (Putman et al., 2003), e il *Magellanic Stream*, una scia filamentare di idrogeno neutro, senza stelle, che traccia il passaggio delle Nubi, interpretato come il prodotto delle interazioni mareali e idrodinamiche tra le Nubi e la MW (Hammer et al., 2015). Contrariamente a quanto ci si aspettava, da misure del moto proprio delle Nubi con Hubble Space Telescope è emerso che queste sono solo al loro primo passaggio intorno alla MW, al più hanno compiuto un'orbita attorno alla Galassia (Besla et al., 2010; Besla, 2015).

1.2 Storia di formazione della LMC

La storia di formazione stellare (SFH) della galassia è molto complessa a causa delle forti interazioni con la SMC e la MW. In particolare, il contenuto stellare della LMC è caratterizzato da popolazioni di diversa età e metallicità, come chiaramente visibile dal diagramma colore-magnitudine (CMD) della galassia. Figura 1.1 mostra il CMD della regione centrale della LMC ottenuto con la Data Release 2 della missione Gaia (Gaia Collaboration et al., 2018). Il CMD della LMC è dominato da due features principali, un RGB (e un He-Clump) estremamente popolato, indice della presenza di stelle di età vecchia/intermedia (> 1 Gyr), ed una estesa Sequenza Principale blu, che dimostra la presenza di stelle giovani (e quindi di una formazione stellare recente).

La SFH della LMC è stata ricostruita da diversi studi basati sul confronto tra CMD osservati e sintetici (Holtzman et al., 1999; Smecker-Hane et al., 2002; Harris & Zaritsky, 2009; Rubele et al., 2012). Inoltre lo studio degli ammassi globulari, che permettono di determinare sia età che metallicità con maggiore accuratezza rispetto a stelle di campo, fornisce la possibilità di verificare la SFH e ricostruire la relazione età-metallicità per la galassia.

La SFH della LMC inizia circa 13 Gyr fa, epoca del primo burst di formazione stellare in tutte le galassie del Gruppo Locale, quando si forma la popolazione di ammassi più vecchia (Brocato et al., 1996; Olsen et al., 1998) e meno metallica ($[Fe/H] < -1$ dex) della LMC (Olszewski et al., 1991; Grocholski et al., 2006; Johnson et al., 2006a; Mucciarelli et al., 2010; Mateluna et al., 2012).

Le osservazioni hanno mostrato l'assenza di ammassi di età compresa tra circa 3 Gyr e 10 Gyr fa, con l'esclusione dell'ammasso ESO121, con un'età di $8 - 9$ Gyr (Geisler et al., 1997; Mackey et al., 2006). L'assenza di ammassi globulari in un ampio intervallo di età è riscontrato solo nella LMC, mentre la distribuzione di età degli ammassi della SMC risulta continua. Si pensa perciò che essa abbia attraversato un periodo di quiescenza, fino a circa 3-4 Gyr fa, momento in cui inizia l'interazione tra le Nubi. Deve essere stata infatti l'interazione mareale tra queste a riattivare la formazione stellare e a generare la componente dominante di ammassi,

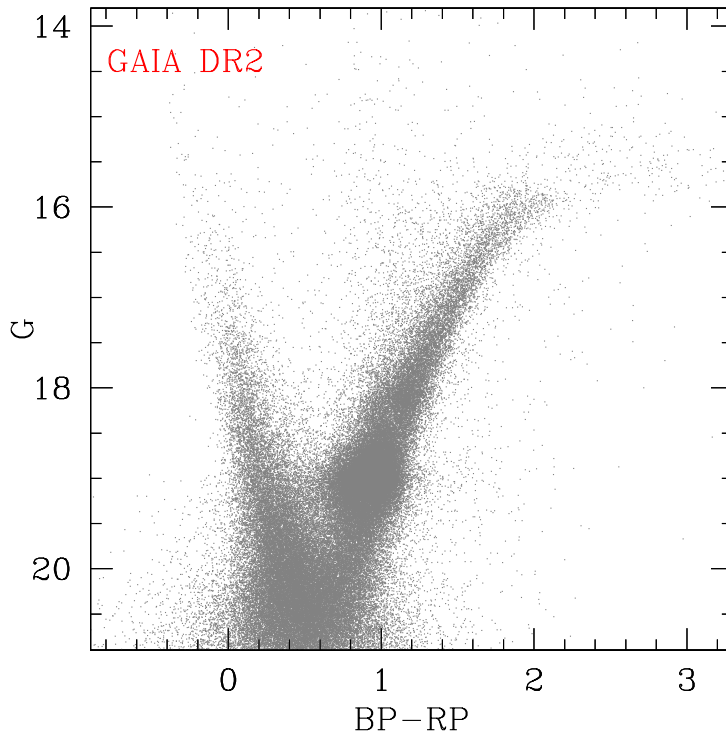


Figura 1.1: CMD della regione centrale della LMC ottenuto con la Data Release 2 della missione Gaia (Gaia Collaboration et al., 2018).

con età compresa tra gli 1 e i 3 Gyr, formata da stelle più metalliche (Gallart et al., 2003; Ferraro et al., 2004). Sembra infatti esserci un collegamento tra i passaggi ravvicinati delle Nubi con i periodi di massima formazione stellare (Bekki et al., 2004).

Sono però previsti altri possibili scenari per spiegare l'*Age Gap Problem* che non prevedono l'interruzione della formazione stellare, quali il fatto che gli ammassi formati in quel periodo hanno subito uno stripping mareale oppure siano stati distrutti dai campi mareali della LMC (Bekki & Chiba, 2005). La ricerca di stelle metal-poor è quindi particolarmente interessante per risolvere questo dubbio e per ricavare informazioni sull'entità del primo burst di formazione.

È stata poi trovata una terza componente costituita dagli ammassi appena formati, di età inferiore a 1 Gyr (Brocato et al., 2003; Grocholski et al., 2006).

Per confermare la SFH ricavata dagli ammassi e per avere informazioni sul periodo di tempo durante il quale non si osservano ammassi, è importante studiare le stelle di campo, per le quali la SFH è leggermente diversa: Dopo il primo burst di formazione, nelle stelle di campo non si riscontra il Gap, bensì la LMC continua

a produrre stelle con un rate lento. Successivamente, intorno a 4-5 Gyr la Nube ha un episodio di forte formazione stellare, coincidente con la nuova creazione di ammassi e con la cattura mareale nella SMC (Bekki & Chiba, 2005). Infine sono stati osservati burst di minore entità nei periodi successivi, molti dei quali sono stati riscontrati contemporaneamente della SMC, indice della loro interazione. Tutto questo viene rappresentato in figura 1.2, realizzata da Harris & Zaritsky (2009) dallo studio di CMD sintetici da diverse zone della nube.

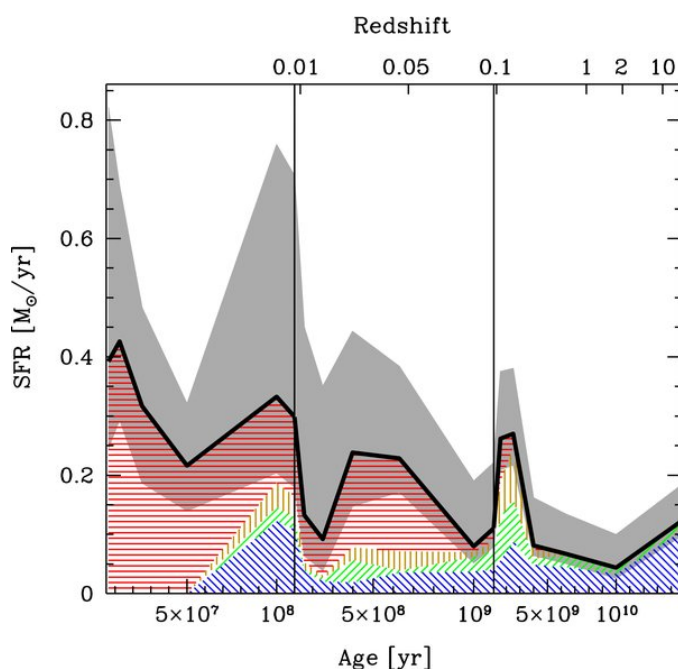


Figura 1.2: SFH globale della LMC ottenuta Harris & Zaritsky (2009). La riga nera rappresenta il best-fit ottenuto dai dati e l'ombreggiatura grigia la barra d'errore. I diversi colori rappresentano le distribuzioni di metallicità ad ogni età: in blu $Z=0.001$, in verde $Z=0.0025$, in arancio $Z=0.004$ e in rosso $Z=0.008$.

1.3 Cinematica della LMC

Grazie all'avvento della classe dei telescopi di 8-10 metri è stato possibile per la prima volta eseguire osservazioni ad alta risoluzione di stelle della LMC fino a magnitudine $V \sim 17$. Gli studi precedenti erano limitati alle stelle più brillanti della galassia, quindi fornivano informazioni solo sulle popolazioni giovani, senza permettere di studiare le popolazioni di età vecchia/intermedia.

La maggior parte delle informazioni sulla cinematica e sulla chimica delle stelle di campo di LMC appartenenti alla popolazione vecchia/intermedia provengono

da studi a bassa risoluzione ($R \sim 5000$). Questi studi permettono di osservare campioni statisticamente significativi di stelle ma a discapito della precisione delle misure, a causa della risoluzione spettrale. Il principale interesse nell'investigare la cinematica delle popolazioni stellari della LMC è l'identificazione di possibili strutture cinematicamente distinte.

I principali studi riguardanti la cinematica della LMC sono quello di [Cole et al. \(2005\)](#) e di [Carrera et al. \(2008, 2011\)](#), nei quali viene determinata la velocità radiale dalle righe del tripletto del calcio. Nel primo lavoro vengono analizzati 373 spettri di stelle giganti situate a 2° dal centro, nel quale si trova che le stelle della LMC presentano un'ampia distribuzione di RV, da circa $\sim +170 \text{ km/s}$ a circa $\sim +340 \text{ km/s}$ e con un valore tipico di $+250 \text{ km/s}$.

Questi studi hanno evidenziato la presenza di rotazione nel disco della LMC, già evidenziata in base allo studio della mappa di velocità dell'idrogeno neutro mostrata in figura 1.3 ([Kim et al., 1998](#)).

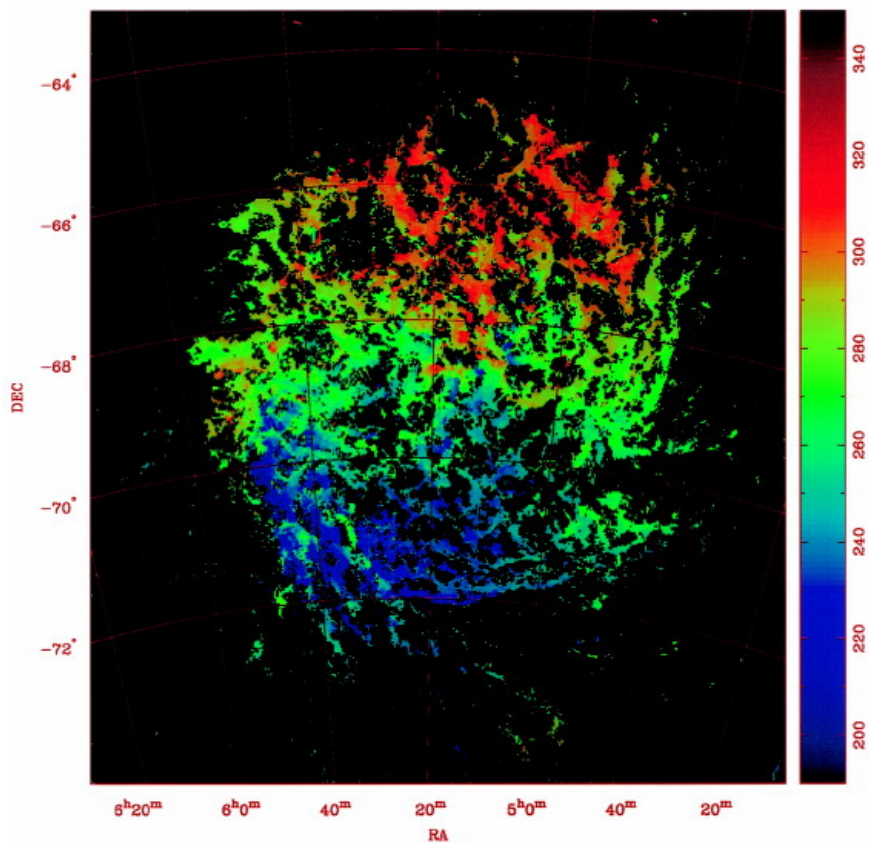


Figura 1.3: Campo di velocità medio dell'HI della LMC ottenuto da [Kim et al. \(1998\)](#).

Inoltre è stato evidenziato un andamento particolare della dispersione di velocità in funzione della distanza dal centro della LMC: la dispersione di velocità tende a crescere al di fuori della Barra per poi diminuire progressivamente lungo il disco della galassia.

Un altro studio cinematico ampio è stato svolto da [Kunkel et al. \(1997\)](#) nel quale si analizzano 759 Carbon-stars e viene costruita una curva di rotazione che spazia tra i 3 e i 12 kpc che evidenzia un picco di velocità intono a 4 kpc, seguita da un declino fino a circa 6.5 kpc. La risalita che si osserva per raggi maggiori, viene associata alle interazioni mareali con la SMC e la MW. I risultati sono rappresentati in figura 1.4 insieme ai dati di [Carrera et al. \(2011\)](#). L'andamento della dispersione di velocità ottenuto per la popolazione giovane, tracciata dalle Carbon-stars, è qualitativamente simile a quella ottenuta dalle stelle di RGB studiate attraverso il tripletto del calcio, anche se risulta evidente una differenza nel valore della dispersione, più alta per popolazioni con età maggiore di 1 Gyr.

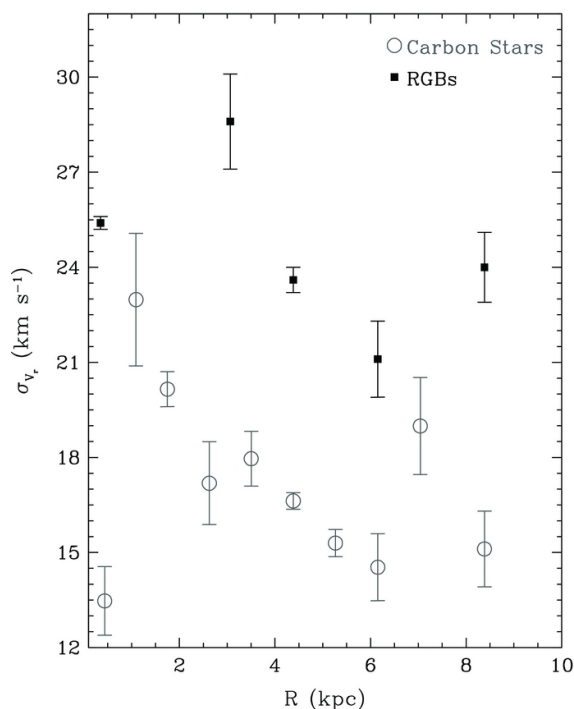


Figura 1.4: Dispersione di velocità in funzione del raggio per le stelle di RGB (quadrati pieni) ottenuta da [Carrera et al. \(2011\)](#) e per le Carbon-stars (cerchi vuoti) misurata da [Kunkel et al. \(1997\)](#).

Un altro aspetto molto dibattuto sulla cinematica della LMC è se vi sia la presenza di un alone cinematicamente caldo e costituito da stelle vecchie e metal-poor, simile all'alone osservato nella MW o in altre galassie a spirale. Le evidenze osser-

vative raccolte finora sono discordanti come quelli che [Hughes et al. \(1991\)](#); [Minniti et al. \(2003\)](#) che sostengono la presenza dell'alone, a differenza di [Grocholski et al. \(2006\)](#) che non ne trova nessuna indicazione.

1.4 Distribuzione di metallicità della LMC

Come detto precedentemente, la maggior parte delle informazioni sulla distribuzione di metallicità delle stelle di età intermedia della LMC è basata su spettri a bassa risoluzione. In particolare, è importante notare che gli studi basati sulle righe del tripletto del Calcio in banda I forniscono solo una stima indiretta della metallicità stellare (non basata sulla misura diretta di righe di Ferro) senza inoltre fornire dettagli sulla composizione chimica dettagliata delle stelle.

Gli studi più ampi finora effettuati sono quelli di [Cole et al. \(2005\)](#) e [Carrera et al. \(2008, 2011\)](#)

[Carrera et al. \(2008\)](#) trovano che la distribuzione di metallicità mostra un picco a $[Fe/H] \sim -0.5$ dex nelle regioni più interne, per poi diminuire verso valori più bassi ($[Fe/H] \sim -0.8$ dex) nelle regioni a 8° a nord dal centro della LMC.

Dopo l'avvento della nuova classe di telescopi di 8-10 m sono stati effettuati anche studi basati sull'analisi di spettri ad alta risoluzione di stelle appartenenti ad ammassi vecchi ([Hill et al., 2000](#); [Johnson et al., 2006b](#); [Mucciarelli et al., 2009, 2010](#)) e di età giovane/intermedia ([Mucciarelli et al., 2008](#); [Mucciarelli, 2011](#)).

Gli studi sulla composizione chimica delle stelle di campo della LMC e basati su spettri ad alta risoluzione sono limitati a poche regioni della galassia, ovvero la Barra centrale ([Van der Swaelmen et al., 2013](#); [Song et al., 2017](#)) e due campi del disco della LMC ([Pompéia et al., 2008](#); [Van der Swaelmen et al., 2013](#); [Lapenna et al., 2012](#)). Anche se questi campioni includono circa 500 stelle analizzate, si tratta di analisi chimiche basate su assunzioni e metodologie differenti, quindi non facilmente confrontabili tra di loro. Questi lavori identificano una componente dominante nella distribuzione di metallicità della LMC attorno a $[Fe/H] \sim -0.5$ dex. La disomogeneità delle analisi chimiche di questi lavori non permette un confronto diretto tra le distribuzioni e quindi non è facile capire se le metallicità di questa componente stellare rimanga costante o vari a seconda della posizione nella galassia. Inoltre, le distribuzioni di metallicità mostrano una coda di stelle metal-poor.

Analizzando spettri ad alta risoluzione inoltre si possono ottenere informazioni riguardo l'abbondanza di diverse specie chimiche, lavoro che sulle stelle di campo della LMC è stato fatto solo da pochi studi ([Hill et al., 1995](#); [Smith et al., 2002](#); [Pompéia et al., 2008](#); [Van der Swaelmen et al., 2013](#)), malgrado queste informazioni siano importanti per una migliore conoscenza della storia d'evoluzione della

LMC. In particolare [Van der Swaelmen et al. \(2013\)](#) afferma che la storia chimica della LMC è stata influenzata maggiormente dalle supernovae di tipo Ia e da processi di cattura neutronica lenta dal vento di stelle metal-poor in fase di AGB, mentre le stelle più massive hanno contribuito in modo minore all'arricchimento chimico.

Facendo un confronto tra la popolazione stellare della Barra ([Van der Swaelmen et al., 2013](#)) con quella della disco ([Pompéia et al., 2008](#)), si trova una leggera discrepanza nel valore di $[\alpha/Fe]$ in quanto si osserva una dispersione maggiore nella Barra, così come degli offset nella distribuzione delle abbondanze di Ittrio, Zirconio, Sodio e Vanadio.

Queste differenze sono da ricondurre alla formazione di una nuova popolazione di stelle nella parte centrale della LMC: la popolazione del disco e della Barra sembrano aver mantenuto un tasso di formazione stellare (SFR) circa costante con l'eccezione di un periodo tra 2 e 5 Gyr durante il quale la Barra ha accresciuto lo SFR ([Van der Swaelmen et al., 2013](#)). Questo era già emerso da un lavoro precedente di [Harris & Zaritsky \(2009\)](#), nel quale risulta che il principale episodio di formazione stellare avvenuto 5 Gyr fa è stato molto più pronunciato nella Barra che in qualsiasi altro posto.

Capitolo 2

Dati analizzati

2.1 Cataloghi fotometrici

I target spettroscopici analizzati in questa tesi sono stati selezionati utilizzando due cataloghi fotometrici nelle bande del vicino-infrarosso.

Le stelle nelle regioni più vicine agli ammassi globulari (dove sono centrati i diversi puntamenti) sono state selezionate dalla fotometria ottenuta con la camera alta-risoluzione SOFI, in modo da ridurre le condizioni di *crowding* dovute all'elevata densità stellare. Per le regioni più esterne di circa $2.5'$ dal centro di ogni ammasso globulare si è utilizzata la survey fotometrica 2MASS (Skrutskie et al., 2006) che fornisce una mappatura completa del cielo nelle bande J, H, K. Entrambi i cataloghi sono astrometrizzati, fornendo per ogni target Ascensione Retta e Declinazione. Per rendere i due cataloghi (SOFI e 2MASS) omogenei fra di loro, le magnitudini dei cataloghi SOFI sono state calibrate nel sistema fotometrico 2MASS utilizzando le magnitudini delle stelle in comune tra i due cataloghi. Di seguito sono spiegate nel dettaglio le caratteristiche dei due cataloghi.

2.1.1 SOFI

SOFI è uno strumento montato sul fuoco Nasmyth di NTT (New Technology Telescope), un telescopio altazimutale di diametro 3,58 m dell'ESO, situato in Cile nel deserto dell'Atacama. La prima luce rivelata risale al dicembre 1997.

SOFI è sensibile alla luce con lunghezza d'onda tra $0.9\mu m$ e $2.5\mu m$, copre un campo di vista di $5' \times 5'$ ed offre diverse modalità d'osservazione permettendo di fare spettroscopia a bassa e media risoluzione e fotometria.

Quello che però rende SOFI così speciale rispetto alle camere infrarosse precedenti è il suo detector, formato da circa 300 pixel in più, con un rumore elettronico 100 volte inferiore, rendendolo significativamente più sensibile. Inoltre viene raffreddato con sistemi criogenici per diminuire il rumore termico, permettendo di andare

più in profondità con le osservazioni.

SOFI è stato costruito per rivelare la luce nel vicino infrarosso, che riesce a propagarsi meglio attraverso la polvere, permettendo agli astronomi di studiare gli oggetti più estinti.

Ha raggiunto risultati notevoli nell'ambito dell'osservazione delle nane brune, tra gli oggetti più freddi dell'universo, riuscendo ad osservare la prima nana bruna compagna di un esopianeta, orbitanti attorno ad una stessa stella.

2.1.2 2MASS

Two Micron All-Sky Survey è una survey che copre l'intera volta celeste, composta da dati fotometrici in banda infrarossa acquisiti per 5 anni, tra il 1997 ed il 2001. Sono stati utilizzati due telescopi di 1.3 m di diametro, quali Mount Hopkins in Arizona e Cerro Tololo/CTIO in Cile, dotati di camere a tre canali per l'osservazione simultanea in tre diverse bande spettrali, che hanno monitorato rispettivamente l'emisfero boreale e quello australe. Le osservazioni sono state effettuate in modalità automatica mediante la tecnica osservativa del mosaicing. I dati sono stati resi pubblici nel 2003.

Grazie alle nuove tecnologie a disposizione per i detector infrarossi, questa survey ha permesso di osservare sorgenti 100 milioni di volte più deboli rispetto alla precedente survey infrarossa (TMSS -Two Micron Sky Survey del 1969) che spaziava il 70% del cielo e comprendeva circa 5700 sorgenti.

L'obiettivo per il quale è stata realizzata 2MASS è di ottenere informazioni fotometriche ed astrometriche per l'intero cielo nelle bande del vicino infrarosso J ($1, 25\mu m$), H ($1, 65\mu m$) e K_s ($2, 17\mu m$). Inoltre ha permesso di comprendere meglio la struttura su larga scala della Via Lattea e dell'universo locale dato che in questo range di lunghezze d'onda si è liberi dagli effetti oscuranti della polvere, ha reso possibile la scoperta di galassie nella cosiddetta Zone of Avoidance, una vasta fascia di cielo oscurata nel visibile dai gas interstellari della nostra galassia, e ancora, ha consentito le prime osservazioni di nane brune ed un massiccio rilevamento di stelle di piccola massa, le più comuni nell'universo, catalogando tutti gli oggetti con magnitudini in banda K_s minore di 14, oltre 300 milioni sorgenti puntiformi e circa 1 milione di strutture estese.

Per raggiungere questi scopi, 2MASS ha osservato l'intero cielo nelle tre bande sopracitate per identificare tutte le sorgenti puntiformi con un flusso limite superiore ad $1mJy$ in ogni banda, con rapporto segnale-rumore (SNR) maggiore di 10, utilizzando un pixel di dimensione $2.0''$. In particolare il filtro K_s (K short) si distingue dal classico filtro K del sistema Johnson per la curva di trasmissione che termina a $\sim 2.3\mu m$ al fine di ridurre il rumore dovuto al background termico

ambientale (Carpenter, 2001). Si continuerà a riferirsi a questo filtro chiamandolo semplicemente K.

2.2 Lo Spettrografo FLAMES

Gli spettri analizzati in questo lavoro sono stati acquisiti con lo spettrografo FLAMES montato sul VLT dell'ESO, che offre la possibilità di osservare simultaneamente con 132 fibre a risoluzione $R \sim 20000$ di GIRAFFE e 8 fibre a risoluzione $R \sim 45000$ di UVES. Per questo studio sono stati utilizzati solo gli spettri acquisiti da GIRAFFE, le cui fibre sono state posizionate sulle stelle di campo circostanti alcuni ammassi globulari di LMC osservati utilizzando UVES ed impiegati per uno studio precedente, specifico sugli ammassi globulari della Nube.

Descriviamo ora più nel dettaglio il telescopio e lo spettrografo utilizzato.

2.2.1 VLT

Gli spettri a disposizione sono stati acquisiti con il VLT (Very Large Telescope array), situato all'osservatorio del Paranal, sul Cerro Paranal, un promontorio alto 2635 m nel deserto dell'Atacama in Cile.

Gestito dall'ESO e inaugurato nel 1999, è composto da 4 telescopi principali (Unit Telescope, UT) che possiedono uno specchio primario delle dimensioni di 8,2 metri di diametro (il secondario di 0,94 m di diametro, il terziario è uno specchio ellittico 1,242 x 0,866 m), dei quali UT4 è dotato di ottica adattiva, e da 4 telescopi ausiliari mobili aventi un diametro di 1,8 metri. Le montature sono altazimutali ed in grado di ruotare in maniera sincrona con il telescopio durante le osservazioni. È stato costruito in modo da minimizzare gli effetti indesiderati delle condizioni atmosferiche come turbolenza e variazioni di temperatura, e il tutto viene tenuto controllato termicamente.

I telescopi possono essere usati anche combinati a formare un interferometro gigante, il Very Large Telescope Interferometer (VLTI), che consente di fare osservazioni molto più profonde e dettagliate di quelle attuabili con l'utilizzo individuale; solitamente viene utilizzato per avere immagini ad alta risoluzione di oggetti compatti in quanto la configurazione VLTI riesce a raggiungere risoluzioni angolari effettive di circa 1 mas.

Sui singoli UT sono montati più strumenti nei diversi fuochi presenti (Cassegrain e Nasmyth A e B), elencati in tabella 2.1, ma che consentono di fare osservazioni in un range spettrale dal vicino ultravioletto al medio infrarosso. In particolare gli strumenti permettono di fare spettroscopia ad alta risoluzione, spettroscopia multi-oggetto e imaging ad alta risoluzione.

Telescopio	Fuoco Cassegrain	Fuoco Nasmyth A	Fuoco Nasmyth B
Antu (UT1)	FORS 2	NACO	KMOS
Kueyen (UT2)	X-Shooter	FLAMES	UVES
Melipal (UT3)	VISIR	SPHERE	VIMOS*
Yepun (UT4)	SINFONI	HAWK-I	MUSE

Tabella 2.1: Strumenti installati al VLT fino al 30 settembre 2018.

* VIMOS è stato dismesso il 24 marzo 2018

2.2.2 Flames

Lo strumento utilizzato per l'acquisizione dei dati analizzati in questa tesi è lo spettrografo multi-oggetto FLAMES (Fibre Large Array Multi Element Spectrograph), montato nel fuoco Nasmyth A di Kueyen (UT2), che possiede un campo di vista di 25' di diametro (Pasquini et al., 2002).

L'utilizzo della fibra ottica per la raccolta del segnale ha permesso di aumentare il numero di oggetti acquisiti simultaneamente, incrementando la quantità di informazioni a disposizione. Malgrado gli spettri acquisiti con le fibre perdano in SNR rispetto ad un'osservazione dello stesso oggetto eseguita con una fenditura a causa delle numerose riflessioni della luce lungo la fibra, esse presentano il vantaggio di poterle posizionare con grande precisione diminuendo la probabilità di centraggi errati dei target. È ovviamente necessaria un'elevata accuratezza astrometrica per garantire il corretto posizionamento delle fibre che il posizionatore è in grado di allocare con una precisione superiore a $0,1''$. Due target osservati simultaneamente devono essere separati da almeno $11''$.

FLAMES è costituito dai seguenti componenti:

- un correttore ottico, che fornisce un'eccellente *image quality* nell'intero campo di vista;
- un posizionatore di fibre che ha a disposizione due plate (identici fra loro e dove sono posizionate le fibre), in modo che mentre un plate è in fase d'osservazione, sull'altro vengono posizionate le fibre per l'esposizione successiva, diminuendo così i tempi morti tra un'osservazione e l'altra, che si riducono solo al *preset* del telescopio e allo scambio del plate;
- due diversi spettrografi che coprono l'intero range spettrale del visibile, quali, UVES, denominato Red Arm, che permette di raggiungere risoluzioni spettrali molto elevate ($R \sim 47000$) composto però solo da 8 fibre d'apertura $1''$, e GIRAFFE che permette invece l'osservazione di 132 target contemporaneamente mediante l'utilizzo di altrettante fibre, ciascuna con apertura

Spectrografo	Modalità	N.di oggetti	Apertura (")	Potere Risolutivo (R)	Finestra Spettrale (nm)
UVES	Red Arm	8	1.0	47000	200
UVES	Red Arm	7 + 1 calib	1.0	47000	200
GIRAFFE	MEDUSA	130	1.2	12000-24000	$\lambda/12 - \lambda/24$
GIRAFFE	MEDUSA	130	1.2	7000	$\lambda/9.5$
GIRAFFE	IFU	15 (+15)	2 x 3	19000-39000	$\lambda/12 - \lambda/24$
GIRAFFE	IFU	15 (+15)	2 x 3	11000	$\lambda/9.5$
GIRAFFE	ARGUS	1	11.5 x 7.3 or 6.6 x 4.2	19000-39000	$\lambda/12 - \lambda/24$
GIRAFFE	ARGUS	1	11.5 x 7.3 or 6.6 x 4.2	11000	$\lambda/9.5$

Tabella 2.2: Caratteristiche delle diverse modalità d'osservazione degli strumenti di FLAMES. La larghezza della spettrale dipende dalla lunghezza d'onda d'osservazione.

di 1,2", raggiungendo però risoluzioni minori (tipicamente tra $R \sim 5000$ e $R \sim 30000$);

- un software coordinante delle osservazioni, che permette l'acquisizione simultanea con UVES e GIRAFFE in diverse modalità elencate nella tabella 2.2. Per le osservazioni combinate, i tempi d'esposizione per UVES e GIRAFFE non devono necessariamente essere gli stessi, ma non si può osservare simultaneamente lo stesso target con i due spettrografi.

Nel dettaglio, GIRAFFE è dotato di 2 grating, ad alta e a bassa risoluzione, montati *back to back* su una piattaforma rotante, accoppiati con una grande varietà di filtri, necessari per selezionare il range spettrale per l'osservazione. Lo spettro di un singolo oggetto viene visualizzato su un solo ordine dell'echelle, dopo che la luce, proveniente da una delle 6 slit disponibili, passa attraverso un filtro, viene riflessa su di un collimatore e indirizzata sul grating. Spostandosi lungo il suo asse di rotazione si passano in rassegna diverse lunghezze d'onda. Sono montate anche cinque fibre ottiche addizionali che provvedono alla calibrazione in lunghezza d'onda di ogni esposizione.

GIRAFFE è dotato di tre differenti sistemi di fibre ottiche:

- MEDUSA, osserva simultaneamente 132 oggetti separati (sottolineando che alcune fibre devono essere riservate all'osservazione del cielo). Esiste un set di fibre MEDUSA per ciascun plate, ed ogni fibra ha un diametro effettivo di 1.2";

- IFU che è formato da un array rettangolare di 20 microlenti di ampiezza pari a 0,52' ognuna, che forniscono una dimensione effettiva totale di 2 x 3'. Per ogni plate ci sono 15 unità IFU dedicate all'osservazione dell'oggetto e 15 per quella del cielo;
- ARGUS, si articola in un array rettangolare di 22 x 14 microlenti che formano un'unità a largo campo integrale montata al centro del plate del posizionatore di fibre. Sono disponibili due scale d'ingrandimento: 1:1 con un campionamento di 0.52"/microlente ed un'apertura totale di 11.5 x 7.3", oppure 1:1.67 con dei valore di 0.3"/microlente e 6.6 x 4.2" rispettivamente. Inoltre, le 15 unità ARGUS utilizzate per l'osservazione del cielo possono essere posizionate in un campo di vista di 25' di diametro.

Questo spettrografo è composto da 31 setups ad alta risoluzione, con una estensione tipica di 300 Å, oltre ad 8 setups a bassa risoluzione.

Per questo studio si sono presi in esame dati acquisiti con due setups ad alta risoluzione, HR11 e HR13, le cui caratteristiche sono riportare nella tabella 2.3 nella quale sono inseriti i valori validi per le osservazioni eseguite tra ottobre 2003 e gennaio 2015, intervallo di tempo che include la data d'osservazione degli spettri a disposizione.

Filter	θ	Ordine	ETC name	λ_{ini}	λ_{centro}	λ_{fine}	R MEDUSA
11	62.0	10	HR11	559.7	572.8	584.0	29500
13	60.3	9	HR13	612.0	627.3	640.5	26400

Tabella 2.3: Lista dei setups ad alta risoluzione utilizzati. Le caratteristiche sono quelle valide nel periodo di tempo che intercorre tra ottobre 2003 e gennaio 2015. Con θ si indica all'angolo di diffrazione e con *ordine* ci si riferisce all'ordine di lavoro dell'echelle. Le lunghezze d'onda sono espresse in *nm*.

2.3 Selezione dei target

I target spettroscopici di questo lavoro sono stelle giganti rosse posizionate vicino al Tip dell'RGB e appartenenti al campo della LMC, in modo da campionare le popolazioni stellari della galassia con eta' maggiori di circa 1 Gyr.

Sono stati studiati un totale di 6 campi localizzati attorno ad altrettanti ammassi globulari e posizioni in diverse regioni della galassia. I campi sono stati nominati mantenendo anche il nome dell'ammasso globulare di riferimento.

Sono state selezionate stelle che hanno magnitudine in banda K compresa tra 12.3 e 14.0 . Il limite inferiore è stato scelto per assicurare un rapporto segnale-rumore (SNR) minimo di almeno 25-30, permettendo un'accurata analisi spettrale.

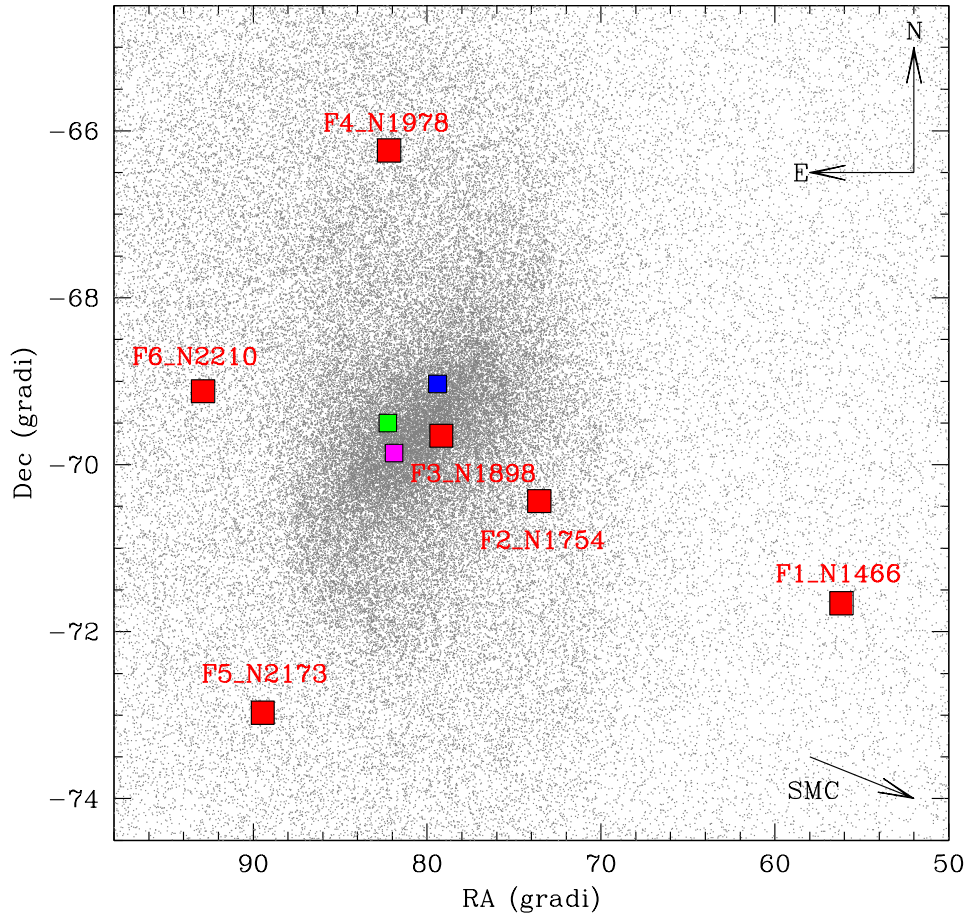


Figura 2.1: Posizione dei campi studiati della LMC (quadrati rossi). Inoltre si sono indicati con il quadrato verde la posizione scelta per il centro galattico, in accordo con [van der Marel & Cioni \(2001\)](#), quello blu rappresenta il centro di rotazione dell'HI ([Kim et al., 1998](#)) e il quadrato magenta il centro di rotazione delle stelle di età intermedia ([van der Marel et al., 2002](#)).

Per quanto riguarda il limite superiore invece si riferisce al valore tipico del Tip dell'RGB per la popolazione stellare dominante nel disco della LMC ([Cioni et al., 2006](#)); le stelle più luminose sono con maggiore probabilità delle stelle di AGB e appartenenti a popolazioni stellari più giovani.

Si sono adottati anche dei limiti in colore, per evitare stelle troppo rosse e quindi fredde che potrebbero essere affette da bande molecolari che rendono difficoltosa o impossibile l'analisi chimica delle righe di assorbimento, e stelle troppo blu che al contrario sono stelle calde e quindi stelle galattiche o facenti parte della popolazio-

ne più giovane della LMC. Perciò il range in colore adottato è $0.6 < (J-K) < 1.1$. Dopo questa prima selezione, effettuata utilizzando i cataloghi fotometrici di SOFI e 2MASS sopraccitati, si continua escludendo tutte le stelle che presentano entro $2''$ di raggio almeno una stella con magnitudine comparabile o superiore che potrebbe contaminare lo spettro osservato. Come esempio, la figura 2.2 mostra la posizione dei target osservati nel campo F3_N1898, mentre in figura 2.3 si mostra il CMD dello stesso campo, dove i dati fotometrici dei cataloghi 2MASS e SOFI sono rappresentati rispettivamente in grigio e nero, mentre i target selezionati in rosso. Come si nota, 2MASS ha una minore profondità rispetto a SOFI, raggiungendo una magnitudine limite di circa $K = 14$, quindi campionando solo la parte brillante dell'RGB. SOFI invece raggiunge una magnitudine limite di quasi $K = 18$, arrivando ad osservare anche il Red Clump delle popolazioni intermedie-vecchie

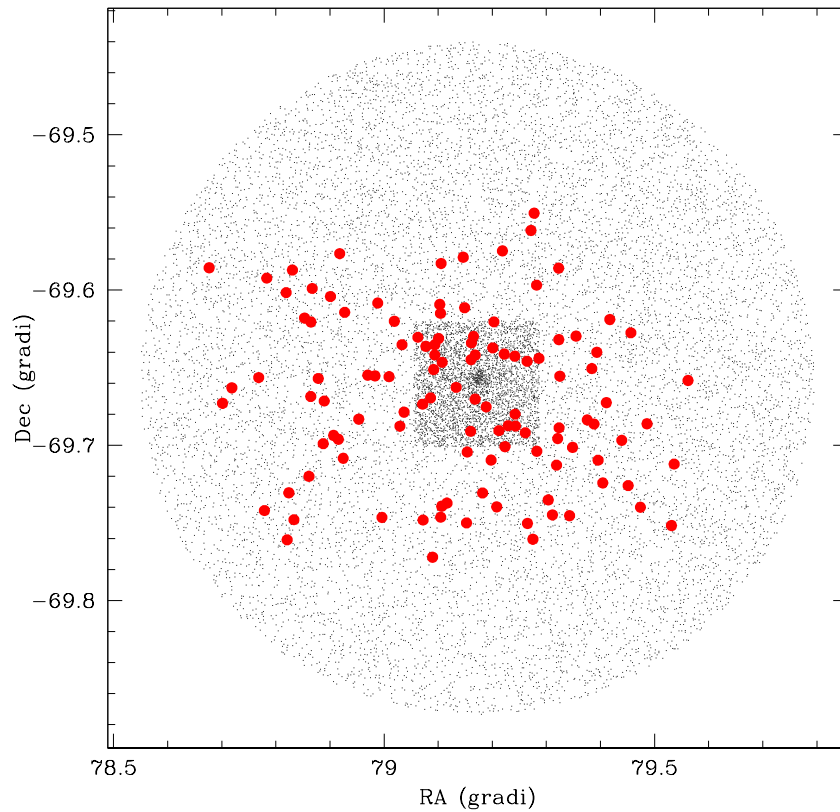


Figura 2.2: Mappa del campo F3_N1898: i cerchi neri rappresentano le stelle presenti nei cataloghi fotometrici SOFI e 2MASS, in particolare le stelle osservate con SOFI corrispondono alla regione centrale e più densa visibile nella mappa. I cerchi rossi rappresentano i target osservati con FLAMES.

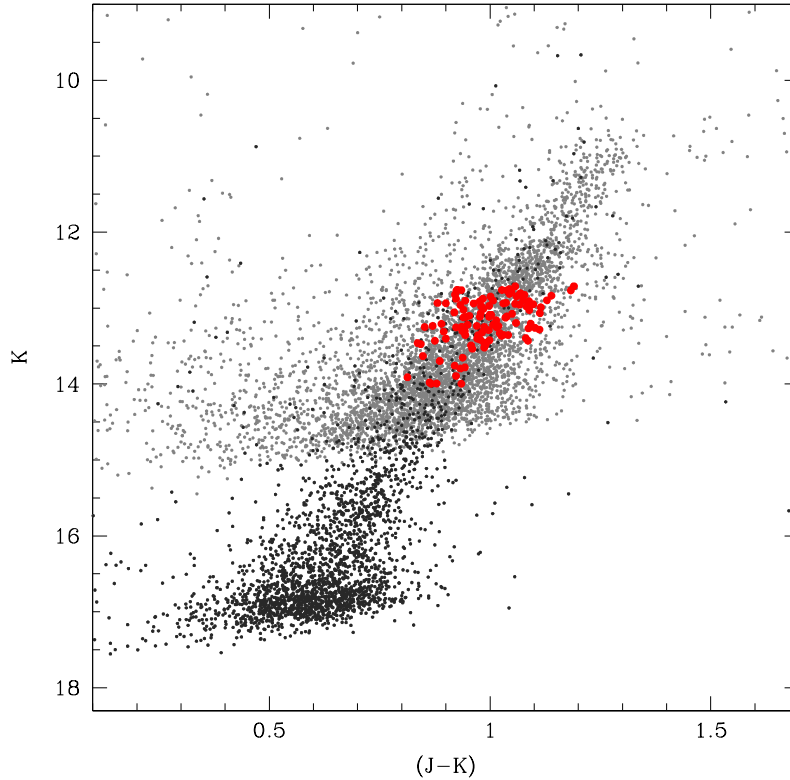


Figura 2.3: CMD del campo F3_N1898. In grigio sono rappresentati i dati dal catalogo 2MASS, in nero da SOFI e in rosso le stelle osservate con FLAMES.

2.3.1 Campi studiati

Nella presente sezione si vuole dare una breve descrizione delle caratteristiche rilevanti dei dati a disposizione. Il numero di fibre allocate su oggetti stellari durante le osservazioni varia da campo a campo a seconda della densità stellare della regione osservata.

In questo lavoro sono stati analizzati 6 diversi campi, le cui coordinate sono riportate in tabella 2.4. In essa si è inserito anche il valore della distanza dal centro della Nube, adottando quello proposto da [van der Marel & Cioni \(2001\)](#), e la distanza deproiettata, calcolata mediante la procedura descritta in [Cioni \(2009\)](#). Per il calcolo della distanza deproiettata si sono utilizzati un angolo d'inclinazione di $i = 34.7^\circ$ ([van der Marel & Cioni, 2001](#)) ed un *Position angle* pari a $P.A. = 189.3^\circ$ ([van der Marel, 2001](#)). Si farà riferimento a questa distanza per caratterizzare la posizione dei campi analizzati.

I campi sono posizionati a croce e sono stati scelti per poter studiare le proprie-

campo	RA (gradi)	Dec (gradi)	distanza (gradi)	distanza deproiettata (gradi)
F1_N1466	56.175981	-71.66018	8.5	10.0
F2_N1754	73.551873	-70.43534	3.1	3.6
F3_N1898	79.180321	-69.65379	1.1	1.3
F4_N1978	82.190454	-66.23567	3.3	3.3
F5_N2173	89.450802	-72.96928	4.1	4.5
F6_N2210	92.887742	-69.12027	3.8	4.6

Tabella 2.4: Coordinate delle posizioni dei vari campi, riportate in termini di Ascensione Retta e Declinazione espresse in gradi, così come la distanza dal centro della LMC secondo [van der Marel & Cioni \(2001\)](#) e la distanza deproiettata, calcolata con la procedura di [Cioni \(2009\)](#)

tà chimiche e cinematiche di diverse regioni della LMC, in particolare tre campi orientati lungo l'asse della Barra centrale e altri tre esterni per campionare diverse regioni spaziali della LMC, come si può apprezzare in figura 2.1. In essa oltre ai campi, rappresentati dai quadrati rossi, è stata inserita la posizione del centro di rotazione dell'idrogeno neutro determinata da [Kim et al. \(1998\)](#) (in blu) e delle stelle di età intermedia studiate da ([van der Marel et al., 2002](#)) (in magenta). Inoltre si riporta in verde la posizione del centro della galassia secondo [van der Marel & Cioni \(2001\)](#), determinata utilizzando stelle di campo come traccianti del disco della LMC. Per lo studio hanno osservato stelle al tip dell'RGB e dell'AGB, attribuendo al centro galattico le coordinate:

$$RA = 82.25 \qquad Dec = -69.50$$

F1_N1466

Posto a $\sim 10^\circ$ dal centro della LMC, si tratta del campo più esterno tra quelli analizzati, posizionato in direzione della SMC.

I dati sono stati acquisiti nella notte del 12 giugno 2013, effettuando 3 diverse osservazioni da 45 minuti l'una con il grating HR13 e 6 con HR11, di cui solo l'ultima con un tempo d'esposizione di 32 minuti.

Le ultime 3 osservazioni effettuate in HR11 non sono state utilizzate per l'analisi spettrale in quanto riportano un numero di conteggi molto inferiore alle altre 3. Il motivo del calo nei conteggi è da ricondurre al fatto che le prime 3 esposizioni sono state effettuate in condizioni di seeing migliori.

Le informazioni dal catalogo fotometrico 2MASS sono riportate nella tabella A.1 posta insieme a quelle analoghe per gli altri campi in appendice A. Nella suddetta tabella sono riportati i valori di coordinate, espresse in Ascensione Retta e Declinazione, e i valori di magnitudine in banda J e K, con i relativi errori, dei

diversi target selezionati.

F2_N1754

Campo collocato nel disco, dalla stessa parte rispetto alla SMC, situato ad una distanza di $\sim 3.6^\circ$ dal centro.

Osservato durante le notti del 29 e 30 novembre 2009, sono state eseguite 4 esposizioni con il setup HR11 da 45 minuti l'una, e altrettante in HR13, con la sola eccezione che la quarta esposizione con HR13 è stata eseguita con un tempo d'esposizione di 60 minuti. Nessuna esposizione viene scartata per la successiva analisi, in quanto non vengono riscontrati problemi evidenti nelle singole esposizioni o differenze significative nella qualità degli spettri delle diverse esposizioni.

In tabella [A.2](#) posta nell'appendice [A](#) si possono leggere le coordinate e le magnitudini in banda dei diversi target selezionati.

F3_N1898

F3_N1898 è il campo più centrale analizzato, posto ad una distanza di soli $\sim 1.3^\circ$ dal centro della LMC. Gli spettri sono stati acquisiti nelle notti del 27 e 28 novembre 2009.

Come per il campo precedente sono state fatte 4 osservazioni di 45 minuti ciascuna per banda. Tutte quante vengono utilizzate.

Anche per questo campo si allega la tabella [A.3](#) in appendice [A](#) con i valori di magnitudini e coordinate di tutti i target osservati.

F4_N1978

Campo non appartenente al disco della galassia, si colloca nella regione nord della LMC ad una distanza di $\sim 3.3^\circ$ dal centro della galassia.

Sono state eseguite 2 esposizioni da 50 minuti ciascuna in HR13 durante la notte del 15 febbraio 2005, mentre i dati con HR11 sono stati presi circa un anno prima, durante la notte del 2 marzo 2004, eseguendo 8 osservazioni con un tempo d'esposizione di 45 minuti, ad eccezione di 2 che sono durate 50 minuti.

Si vuole evidenziare che non tutti i target sono stati osservati in entrambi i grating, probabilmente a causa di alcune fibre danneggiate e non disponibili su uno dei due plate. È stato quindi inserita una colonna aggiuntiva, riportante l'informazione sul setup utilizzato per l'osservazione, nella tabella [A.4](#) posta in appendice [A](#), che raccoglie le informazioni su posizione e magnitudine dei target osservati.

F5_N2173

Campo collocato nella parte a sud del disco, ad una distanza di $\sim 4.5^\circ$ dal centro della LMC.

L'osservazione nei due grating è stata effettuata con un anno e mezzo di differenza, in particolare i dati con l'HR11 sono state eseguite nei giorni 17 e 18 ottobre 2003, mentre quelle in HR13 il 16 febbraio 2005. Sono state eseguite 3 esposizioni ciascuno setup di 50 minuti, con la sola eccezione della prima osservazioni con HR11 che riporta un tempo d'esposizione di circa 65 minuti. Nessuna è stata scartata per la successiva analisi.

Anche in questo campo non tutti i target sono stati osservati con entrambi i grating.

Tutte le informazioni riguardanti i target sono raccolte nella tabella [A.5](#) posta in appendice [A](#).

F6_N2210

Osservato nelle notti del 27 e 28 dicembre 2007, si colloca nella zona esterna al disco della LMC, ad una distanza dal centro di $\sim 4.6^\circ$ dalla parte opposta rispetto a dove si trova la SMC.

Le osservazioni svolte risultano differenti dai campi precedenti, con tempi d'esposizione di 50 minuti, 3 acquisizioni con il filtro 13 e 6 con il filtro 11, delle quali 2 sono caratterizzate da una peggiore qualità degli spettri, che presentavano meno conteggi rispetto agli altri, in quanto i tempi d'esposizione sono significativamente minori. Si è pertanto deciso di escluderli prima di procedere, utilizzando solo gli altri spettri, più uniformi tra loro, per gli step successivi.

In appendice [A](#) si trova la tabella [A.6](#) nella quale sono riportate le magnitudini e le coordinate dei target.

Capitolo 3

Derivazione dei parametri atmosferici

Un'accurata determinazione dei parametri atmosferici delle stelle studiate è un ingrediente fondamentale per la successiva determinazione delle abbondanze chimiche. Di seguito sono spiegati nel dettaglio come sono stati determinati temperatura, gravità e velocità di microturbolenza. In appendice B sono riportati i valori calcolati per i target analizzati.

3.1 Temperatura

Le temperature effettive (T_{eff}) sono state determinate utilizzando la calibrazione $(J - K)_0 - T_{eff}$ fornita da [González Hernández & Bonifacio \(2009\)](#) e basata sul metodo del flusso infrarosso. Tra le molte analoghe calibrazioni presenti in letteratura, questa ha il vantaggio di essere definitiva per i colori infrarossi direttamente nel sistema fotometrico 2MASS, evitando in questo modo la trasformazione tra di diversi sistemi fotometrici che può aumentare l'incertezza nelle temperature.

La relazione lega il parametro θ_{eff} ($= \frac{5040}{T_{eff}}$) all'indice di colore e alla metallicità della stella, attraverso opportuni coefficienti che cambiano al variare del colore utilizzato e dello stato evolutivo (nana o gigante) della stella. La relazione adoperata è:

$$\theta_{eff} = 0.6517 + 0.6312(J - K)_0 + 0.0168(J - K)_0^2 - 0.0381(J - K)_0 \left[\frac{Fe}{H} \right] + 0.0256 \left[\frac{Fe}{H} \right] + 0.0013 \left[\frac{Fe}{H} \right]^2 \quad (3.1)$$

Inoltre la relazione è definita in un ampio intervallo in colore e metallicità ($0.1 \leq (J - K)_0 \leq 0.9$ e $-4.0 \leq [Fe/H] \leq 0.2$), adeguato alle stelle osservate nel nostro campione.

3.1.1 Indice di colore

Per il calcolo della temperatura è necessario conoscere il colore vero dell'oggetto studiato. Per cui, prima di poter essere inserito nell'equazione (3.1), dobbiamo ricavare il colore dearrossato, tenendo conto dell'effetto differenziale della polvere sulla radiazione di diversa lunghezza d'onda. Spiegando meglio, gli effetti della polvere sono più intensi sulla luce blu, deviandola e assorbendola maggiormente rispetto alle lunghezze d'onda maggiori. Questo produce un arrossamento della radiazione che giunge fino a noi, effetto maggiore all'aumentare della quantità di polvere presente lungo la linea di vista.

Si procede quindi operando separatamente sulle magnitudini osservate in ciascuna banda riportate nei cataloghi fotometrici, prima di calcolare l'indice di colore vero $(J - K)_0$.

Come prima cosa si deve calcolare il valore dell'estinzione per un dato filtro come:

$$A_{\text{filtro}} = R_{\text{filtro}} \cdot E(B - V) \quad (3.2)$$

dove R_{filtro} è un coefficiente dipendente dalla natura del filtro, mentre il valore di $E(B - V)$, chiamato eccesso di colore, rappresenta l'effetto dell'assorbimento lungo una data linea di vista.

Si è scelto di utilizzare come valori di R_{filtro} quelli tabulati da [McCall \(2004\)](#), che valgono $R_J = 0.819$ e $R_K = 0.350$, mentre i valori di $E(B - V)$ sono diversi per ogni campo e sono riportati in tabella 3.1, con le referenze agli articoli che ne riportano i valori.

Come valori degli eccessi di colore in questione sono stati assunti quelli relativi agli ammassi su cui sono centrati i campi, in quanto è ragionevole pensare che le regioni circostanti l'ammasso abbiano valori molto simili e che l'eccesso di colore nella direzione della LMC sia abbastanza costante e senza significativi effetti di reddening differenziale.

campo	E(B-V)	referenza
F1_N1466	0.09	Walker (1992)
F2_N1754	0.09	Olsen et al. (1998)
F3_N1898	0.07	Olsen et al. (1998)
F4_N1978	0.10	Persson et al. (1983)
F5_N2173	0.07	Persson et al. (1983)
F6_N2210	0.07	Jeon et al. (2014)

Tabella 3.1: Valore dell'eccesso di colore per i campi analizzati in questo lavoro e relative referenze.

Una volta ricavato il valore di estinzione si può procedere con il calcolo della magnitudine dearrossata in banda, sottraendo l'estinzione alla magnitudine apparente tabulata nei cataloghi. Infine si può calcolare il colore dearrossato applicando la definizione di indice di colore:

$$(J - K)_0 = J_0 - K_0 \quad (3.3)$$

Questo valore è quello da inserire nella relazione (3.1) e ottenere così il valore di temperatura effettiva.

Le principali fonti d'errore nel calcolo della temperatura provengono dagli errori fotometrici sulle magnitudini tabulate, dall'eccesso di colore e dalla metallicità.

L'errore fotometrico, calcolato come la somma in quadratura degli errori sui diversi filtri dato che sono indipendenti, risulta essere la fonte d'errore principale nella valutazione della temperatura. Infatti un errore pari a 0.02 mag corrisponde ad una variazione di circa 50 K

Per quanto riguarda l'errore su $E(B - V)$, se il valore assunto è diverso dal valore vero si introdurrà un errore uguale su tutte le stelle, quindi un errore sistematico sulle temperature. Ma questo è trascurabile rispetto al precedente, in quanto una variazione del 10% nel valore assunto di $E(B - V)$ comporta un errore in temperatura inferiore a 20 K .

Dato che il valore di temperatura verrà utilizzato successivamente per la stima della metallicità, nella relazione (3.1) è necessario inserire un valore iniziale di $[Fe/H]$ per procedere nel calcolo. Il valore scelto corrisponde al picco atteso della distribuzione di metallicità della nube, ossia $[Fe/H] = -0.5$, come risulta da studi precedenti (Carrera et al., 2008, 2011; Lapenna et al., 2012). Assumere a priori un valore di metallicità per le stelle costituisce una fonte d'errore trascurabile dato che i coefficienti moltiplicativi relativi a $[Fe/H]$ sono piccoli. Ad esempio, una variazione di 1 dex comporta una variazione di temperatura intorno ai 50 K .

Le temperature sono state successivamente ricalcolate utilizzando i valori di metallicità appropriati per ogni stella dopo una prima analisi di abbondanza basata sul primo set di temperature.

3.2 Gravità

Per quanto riguarda il calcolo della gravità superficiale si parte dalla sua definizione:

$$g = G \frac{M}{R_*^2} \quad (3.4)$$

nella quale il valore della massa stellare è stato assunto di $1M_\odot$, caratteristico per stelle giganti di età intermedia.

Il raggio stellare viene stimato dal flusso ricevuto, mediante l'utilizzo della legge di Stefan-Boltzmann per i corpi neri:

$$\sigma T_{eff}^4 = \frac{L}{4\pi R_*^2} \quad (3.5)$$

Inserendo la formula (3.4) nella (3.5) si ricava:

$$g = \frac{4\pi GM\sigma T_{eff}^4}{L} \quad (3.6)$$

Indispensabile è la luminosità bolometrica della stella, mentre quello che si ha a disposizione è la magnitudine apparente in banda. Occorre quindi applicare alla magnitudine dearrossata la correzione bolometrica per passare alla magnitudine apparente bolometrica, il cui valore si ricava dalla relazione (3.7) (Buzzoni et al., 2010).

$$BC_K = -6.75 \log \frac{T_{eff}}{9500} \quad (3.7)$$

Dunque, per ottenere il valore di magnitudine assoluta si sottrae il modulo di distanza che tiene conto dell'attenuazione del segnale a causa esclusivamente della distanza dell'oggetto osservato, distanza che viene assunta pari a quella della LMC per tutte le stelle, ovvero $D \sim 49kpc$ che espresso in termini di modulo di distanza equivale a $(m - M)_0 = 18.5$.

$$K_{bol} = K_0 + BC_K - (m - M)_0 \quad (3.8)$$

Infine, sfruttando i valori noti di luminosità e magnitudine assoluta solari, si può calcolare la luminosità della stella, da inserire nella formula (3.6).

È opportuno soffermarsi sulle possibili fonti di incertezza nel calcolo delle gravità.

Una prima sorgente di errore si compie nell'assumere una massa uguale per tutte le stelle, poiché le stelle studiate possono avere differenti età e metallicità, anche se ci si spetta che la popolazione dominante copra un piccolo intervallo in età e metallicità. Comunque, l'errore in gravità dall'assumere un unico valore di massa risulta trascurabile, dell'ordine di 0.02 in $\log g$.

Le altre sorgenti d'errore sono la temperatura, che incide sulla correzione bolometrica ma ancora di più nel calcolo della gravità dato che nella formula (3.6) appare alla quarta potenza, e l'errore sulla magnitudine in banda K, il cui valore d'incertezza si legge dal catalogo fotometrico e si propaga nei passaggi successivi. Hanno circa la stessa importanza, in quanto un errore pari a 50 K comporta una differenza di 0.02 del valore di $\log g$, ed una variazione di 0.2 mag corrisponde ad una variazione di circa 0.01 della stessa.

3.3 Velocità di Microturbolenza

La velocità di microturbolenza è un fattore correttivo introdotto per ridurre il disaccordo tra le curve di crescita osservate e quelle teoriche lungo il regime saturo (quindi per le righe più intense). Tale disaccordo è dovuto al fatto che i modelli di atmosfera (che sono statici e basati su geometria 1-D) non sono in grado di riprodurre correttamente gli effetti dovuti alla convezione. Come conseguenza nel regime lineare della curva di crescita non si osservavano differenze, al contrario in regime piatto la teoria prevedeva un allargamento minore di quello osservato; il problema si è risolto con l'aggiunta di questo parametro, che si somma in quadratura all'allargamento Doppler così da riprodurre l'effettivo allargamento della riga. Il metodo tradizionalmente utilizzato per determinare questo parametro è di assumere come valore di microturbolenza quello che minimizza possibili trend tra l'abbondanza delle righe di ferro e la loro intensità. Infatti la microturbolenza ha un impatto trascurabile su righe localizzate sul ramo lineare della curva di crescita (quindi righe deboli) ma diventa più importante per righe intense e vicine alla saturazione.

Un primo tentativo è stato di ottenere i valori di microturbolenza usando questo approccio. Tale metodo diventa però incerto quando si ha a disposizione un numero limitato di righe, quindi i valori ottenuti sono estremamente soggetti alle fluttuazioni dovute alla bassa statistica. Infatti, i valori di microturbolenza ottenuti sono estremamente dispersi, diversamente da ciò che ci si aspetta poiché queste stelle hanno parametri molto simili tra di loro, quindi dovrebbero avere valori di microturbolenza paragonabili. La distribuzione di microturbolenza ottenuta spettroscopicamente per il campo di F3_N1898 è mostrata in 3.1.

Altro problema che emerge dai risultati dei valori di microturbolenza determinati per via spettroscopica è la comparsa di un trend non atteso che lega questa grandezza alla metallicità, trend che scompare utilizzando l'altro procedimento, come si può apprezzare in figura 3.2.

Si è quindi scelto di utilizzare la relazione di Kirby per il calcolo della velocità di microturbolenza (Kirby et al., 2009). Tale relazione (3.9) lega il valore di gravità superficiale alla microturbolenza, ed è stata determinata empiricamente mediante l'analisi di spettri ad alta risoluzione di giganti rosse, ottenendo la relazione di *best-fit*.

$$\xi = (2.13 \pm 0.05) - (0.23 \pm 0.03) \log g \quad (3.9)$$

Il legame tra le due grandezze si spiega ricordando che la convezione, e quindi il valore di microturbolenza, aumenta andando a luminosità maggiori, come il valore di gravità scala sempre con la luminosità. Per questo era atteso il legame espresso dalla relazione in letteratura.

Per questo parametro la principale fonte d'errore è la gravità superficiale, oltre all'incertezza legata ai valori utilizzati nella relazione di Kirby et al. (2009), ricavati appunto solo per via sperimentale.

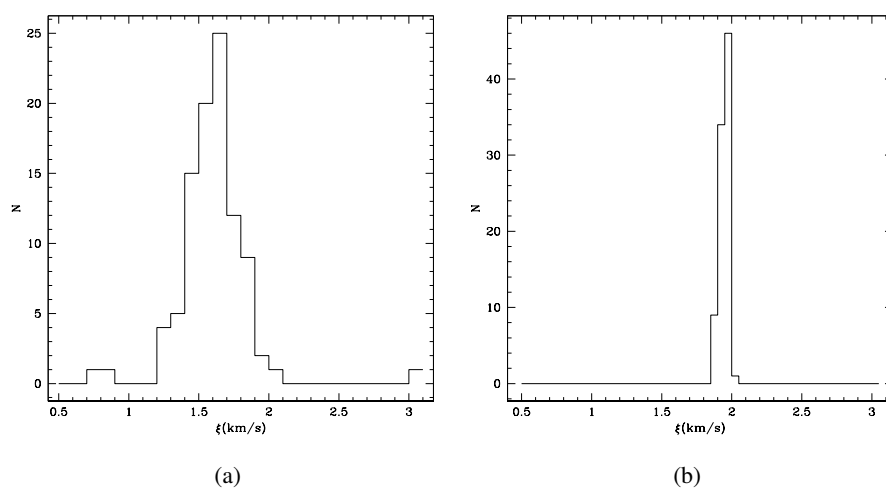


Figura 3.1: Istogramma della distribuzioni dei valori di velocità di microturbolenza per le stelle del campo F3_N1898 ricavati dall'analisi spettrale (pannello di sinistra) e con la relazione di Kirby et al. (2009) (pannello di destra).

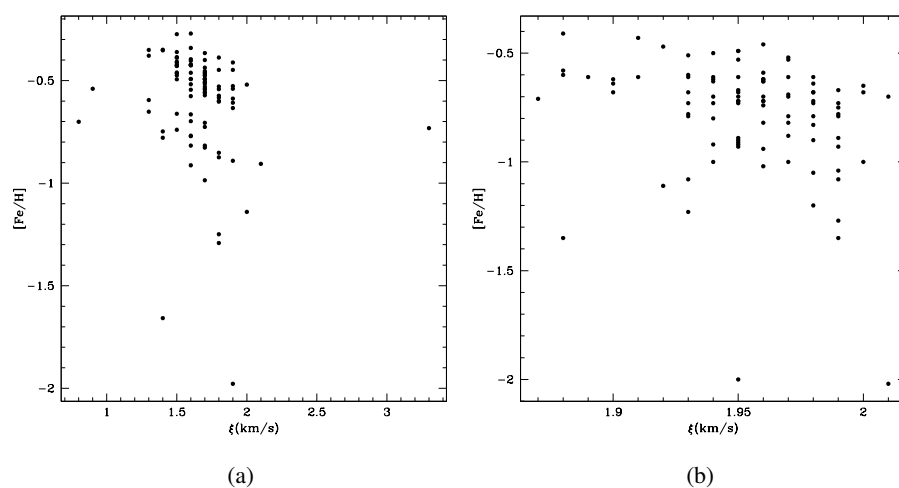


Figura 3.2: Andamento di $[Fe/H]$ in funzione della velocità di microturbolenza calcolata spettroscopicamente (pannello di sinistra) e con la relazione di Kirby et al. (2009) (pannello di destra).

Capitolo 4

Analisi Spettroscopica

In questo capitolo verranno spiegate le operazioni che portano dai dati forniti dallo spettrografo allo spettro mono-dimensionale, che verrà analizzato per trarre le informazioni ricercate, quali velocità radiale (RV) e abbondanze chimiche.

Le operazioni di preriduzione erano già state applicate ai dati in precedenza, ma si ritiene importante descriverle ugualmente per completezza.

4.1 Operazioni di Preriduzione

I passaggi di preriduzione dello spettro sono stati svolti automaticamente attraverso la pipeline sviluppata da ESO per gli spettri GIRAFFE. Si tratta di una serie di passaggi che portano dallo spettro bi-dimensionale ottenuto dallo strumento allo spettro mono-dimensionale espresso in termini di conteggi rispetto alla lunghezza d'onda.

L'operazione di preriduzione include la sottrazione del *bias*, ovvero del rumore di lettura del CCD, un segnale che si somma al segnale della sorgente, che deve essere sottratto per non sovrastimare i conteggi reali. Normalmente si eseguono più esposizioni che vengono combinate assieme per rimuovere eventuali outliers, con l'oculare chiuso per rilevare esclusivamente i conteggi dell'elettronica.

Un altro effetto da rimuovere è dovuto alla diversa sensibilità dei pixel che compongono lo strumento: ciascuno risponde in modo differente ai fotoni che lo raggiungono, misurando un numero variabile di conteggi anche se sottoposti alla stessa luce incidente. Si deve quindi normalizzare per il *flat field*, esposizione ottenuta illuminando in modo uniforme l'intero campo di vista del telescopio. Anche in questo caso si preferisce fare più esposizioni successive per poi combinarle assieme.

A differenza del *bias*, il *flat field* dipende dalla configurazione dello strumento, quindi si deve ripetere ogni volta che si utilizza un grating e/o un plate differente.

Si può ora procedere con la vera e propria estrazione dello spettro, che viene espresso in conteggi in funzione della loro lunghezza d'onda una volta che viene applicata la calibrazione: mediante l'osservazione della luce emessa da una lampada con spettro noto, si riesce ad associare ad ogni pixel la lunghezza d'onda corrispondente e calcolare con una relazione polinomiale la trasformazione pixel-lunghezza d'onda.

Dopo aver controllato che la calibrazione sia effettivamente andata a buon fine, verificando che la lunghezza d'onda di alcune righe di emissione dell'atmosfera terrestre facilmente riconoscibili, non soggette ad alcun tipo di effetto doppler, sia quella attesa, si può procedere con l'analisi.

4.2 Operazioni di Riduzione

Per ogni stella osservata nei differenti campi si hanno a disposizione esposizioni multiple in ognuno dei due grating. Le osservazioni di ogni grating per una data stella sono state opportunamente combinate per rimuovere il *background* ed eventuali problemi, quali raggi cosmici o *bad pixels*.

Descrivendo brevemente come si è operato, la pipeline di riduzione fornisce per ogni osservazione un unico file FITS (Flexible Image Transport System) file in cui sono inclusi tutti gli spettri monodimensionali delle singole stelle. Attraverso la task *SCOPY* del pacchetto *ONEDSPEC* di IRAF (Image Reduction and Analysis Facility) si estraggono gli spettri individuali di ciascun target.

L'operazione successiva riguarda la sottrazione del cielo, in modo da eliminare il contributo del *background* che agisce sia come un eccesso di conteggi del continuo sia con la presenza di alcune righe di emissione.

Viene quindi creato un *Master-Sky*, ovvero una combinazione degli spettri dei singoli cieli, circa una quindicina per ogni esposizione nei diversi campi, utilizzando la task *SCOMBINE* del medesimo pacchetto. Si è scelto di utilizzare l'opzione *MEDIAN*, in questo modo si eliminano i raggi cosmici, scartando i valori che si discostano significativamente da quelli degli altri spettri per un dato pixel.

Da notare che precedentemente si sono controllati singolarmente gli spettri dei cieli, in modo da scartare quelli eventualmente contaminati ad esempio dalla presenza di stelle molto brillanti nelle vicinanze, la cui luce potrebbe essere entrata nella fibra localizzata in una posizione del cielo, aggiungendo un contributo spurio allo spettro.

Una volta ottenuto il cielo medio, lo si sottrae da tutti gli spettri dei target, operazione che si effettua con la task *SARITH* di *ONEDSPEC*.

Lo step finale per ottenere gli spettri da analizzare è quello di combinare insieme i dati ottenuti dalle varie esposizioni appartenenti allo stesso oggetto, riconoscibili

tramite un numero identificativo (relativo al catalogo da cui l'oggetto è stato selezionato). Non è possibile utilizzare il numero della fibra come identificativo poiché potrebbe non essere stato mantenuto lo stesso plate durante tutte le esposizioni e quindi uno stesso oggetto potrebbe essere stato osservato con fibre diverse.

Per combinare gli spettri si opera ancora con la task *SCOMBINE*, utilizzando però l'opzione *AVERAGE* in quanto confrontando questi spettri con quelli ottenuti con l'opzione *MEDIAN*, presentano valori di SNR più alto. Bisogna però rimuovere gli spike prodotti dai raggi cosmici, non cancellati mediando gli spettri, che potrebbero dare problemi alle successive analisi; gli spettri sono stati quindi normalizzati e poi ai pixel con conteggi significativamente più alti del continuo è stato attribuito il valore 1 con la task *IMREPLACE*.

Prima di procedere con l'analisi resta un'ultima operazione per rendere gli spettri non dipendenti dal momento dell'osservazione: la correzione per la velocità eliocentrica. Essa è dovuta al moto di rotazione della Terra intorno al Sole, può assumere un valore compreso tra ± 30 km/s.

Si calcola con la task *RVCORRECT* del pacchetto *RV* di IRAF, specificando la data e l'orario d'osservazione, le coordinate del puntamento, e il nome dell'osservatorio da cui i dati sono stati acquisiti (le coordinate di riferimento sono memorizzate nel codice di calcolo della *RV*). Il valore restituito è in km/s.

4.3 Analisi Spettrale

Prima di procedere all'analisi vera e propria ogni spettro è stato visualizzato individualmente per notare la presenza di eventuali problemi o riconoscere strutture particolari. Alcune stelle sono state escluse dall'analisi, poiché chiaramente non appartenenti a LMC o perché presentano spettri che non permettono un'adeguata analisi chimica. In particolare abbiamo escluso dall'analisi le seguenti tipologie di stelle:

- stelle nane appartenenti alla Galassia, individuate attraverso la riga di calcio a 6162.17 che mostra ali estremamente estese a causa dell'alta gravità di queste stelle (a differenza di ciò che si osserva nelle giganti dove questa riga mostra ali molto meno pronunciate). È da notare che questo metodo permette di riconoscere facilmente stelle nane della Galassia ma altre stelle Galattiche in uno stadio evolutivo più avanzato (tipicamente alla base del RGB) possono essere ancora presenti. Tali stelle verranno in seguito riconosciute e scartate in base alla loro *RV*;
- stelle molto fredde (con $T_{eff} < 3700K$), caratterizzate dalla presenza di forti bande molecolari del TiO che generano delle strutture a "dente di sega", os-

servabili prevalentemente in HR13. Queste devono essere escluse dall'analisi in quanto rendono estremamente difficile il posizionamento del continuo, col risultato di rendere poco accurate le abbondanze chimiche derivate;

- Carbon Star, stelle che hanno subito il terzo *dredge up* durante la fase di AGB, che porta in superficie gli elementi chimici riprocessati con le reazioni nucleari interne durante la vita della stella. Si riconoscono attraverso una profonda banda molecolare ben visibile a ~ 5650 ;
- spettri senza righe, probabilmente dovuti alla presenza di stelle molto calde;
- spettri con un numero di conteggi basso, simili a quelli utilizzati per osservare il cielo. Si tratta presumibilmente di stelle con elevato moto proprio, quindi al momento dell'osservazione la loro posizione risultava lontana dalla posizione fornita dal catalogo, col risultato di non avere nessuna sorgente nella fibra.

In figura 4.1 si possono vedere gli spettri di alcune stelle che presentano i problemi appena citati.

4.3.1 Selezione lista di righe

Il primo passaggio per l'analisi cinematica e chimica del campione spettroscopico è la definizione di una lista di righe di assorbimento che verranno utilizzate sia per la misura delle RV tramite effetto Doppler, sia per la determinazione delle abbondanze chimiche.

Le righe selezionate devono rispettare precisi requisiti, in particolare è necessario selezionare righe che siano isolate (ovvero che non siano dovute alla sovrapposizione di diverse righe di assorbimento) e che siano localizzate nel regime lineare della curva di crescita, quindi sensibili ai cambi di abbondanze chimiche.

La selezione è stata eseguita attraverso il confronto di alcuni spettri osservati con spettri sintetici calcolati con dei parametri atmosferici rappresentativi dei target spettroscopici.

Il calcolo di spettri sintetici è stato effettuato tramite il codice *SYNTHE* sviluppato da Kurucz e Castelli (Kurucz, 2005). Tale codice calcola il flusso emergente della stella partendo da un modello di atmosfera (definito in base alla temperatura, gravità e metallicità della stella) che tabula la variazione delle principali quantità termodinamiche in funzione della profondità ottica.

I modelli di atmosfera utilizzati in questo studio sono stati calcolati col software ATLAS9 (Kurucz, 1993, 2005), che assume l'equilibrio termodinamico locale e l'approssimazione di strati piani e paralleli.

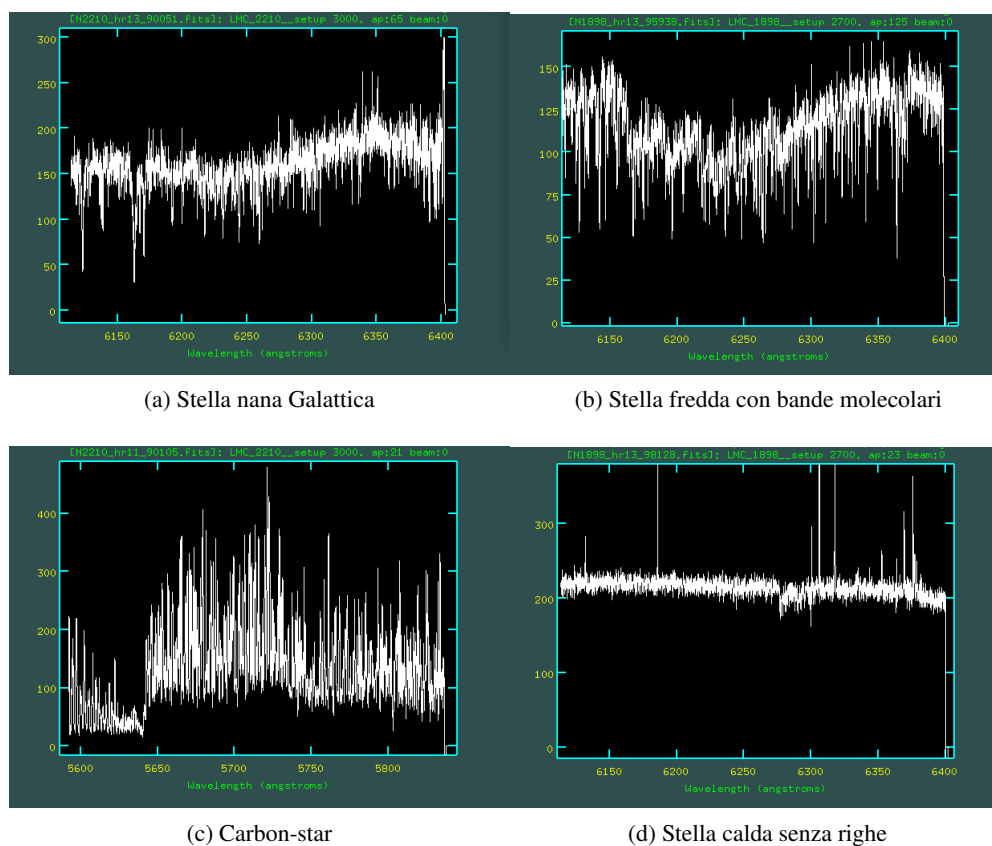


Figura 4.1: Spettri di alcune stelle dei campi F3_N1898 e F6_N2210 che riportano le caratteristiche spettrali nominate.

Oltre alle informazioni appena citate, il codice SYNTHE necessita anche di conoscere il range di lunghezza d'onda del sintetico da calcolare, di un file contenente la lista di righe con informazioni su tutte le transizioni atomiche, di un'eventuale velocità di rotazione e della risoluzione spettrale, espresso in $R = \lambda/\delta\lambda$. Per riprodurre l'allargamento strumentale dello spettro sintetico viene eseguita una convoluzione con un profilo gaussiano.

I dati atomici per tutte le transizioni atomiche e molecolari presenti nel range spettrale di interesse sono ottenuti dal database di Kurucz/Castelli.¹

Il codice genera un file con i valori di flusso uscenti dalla superficie della stella in funzione della lunghezza d'onda e anche una lista di tutte le transizioni usate nel calcolo del sintetico e la loro intensità.

Al fine di valutare se le righe siano sature o no, sono stati calcolati sintetici con gli stessi parametri ma variando l'abbondanza di Ferro, in modo da controllare se una

¹<http://wwwuser.oats.inaf.it/castelli/linelists.html>

data transizione sia sensibile ad una variazione di abbondanza.

La lista di righe creata è stata definita utilizzando spettri sintetici con $[Fe/H] = -0.5$ (corrispondente alla metallicità della componente dominante delle stelle di LMC fornita da studi precedenti). Questa rappresenta solo una prima lista di righe. Dopo l'analisi chimica, per alcune stelle con abbondanza in Ferro significativamente minore di -0.5 , sono state definite nuove liste ottimizzate per altre metallicità. In particolare, ci si è serviti di tre liste di righe diverse per tenere conto dell'ampio range di metallicità riscontrato, la prima ottimizzata su uno spettro con metallicità $-0.5 dex$, la seconda su uno spettro con $[Fe/H] \sim -1.0 dex$ e l'ultima, per le stelle estremamente metal-poor, su uno spettro con $[Fe/H] \sim -2.0 dex$. È stato necessario cambiare la lista di righe dato che al diminuire della metallicità, alcune righe scartate perchè sature possono diventare analizzabili, così come altre righe analizzabili potrebbero diventare troppo deboli e confondersi con il rumore.

In Appendice C si possono trovare 3 tabelle relative alle 3 liste di righe, nelle quali sono riportati i valori delle lunghezze d'onda di ciascuna riga selezionata, con l'aggiunta del rispettivo potenziale d'eccitazione e del logaritmo della forza dell'oscillatore.

4.4 Determinazione delle Velocità Radiali

4.4.1 DAOSPEC

La determinazione delle RV è stata effettuata con il codice DAOSPEC (Stetson & Pancino, 2008). DAOSPEC è un codice, scritto in linguaggio FORTRAN, in grado di misurare la larghezza equivalente (EW) delle righe d'assorbimento in spettri stellari ad alta risoluzione ($R > 15000$) e con $SNR > 30$ in modo automatico, realizzato con lo scopo di minimizzare l'interazione con l'utente (Stetson & Pancino, 2008).

Lo sviluppo di questo software si è resa necessaria con il progredire della tecnologia e la possibilità di osservare sempre più target contemporaneamente, il che ha condotto ad avere a disposizione una moltitudine di dati da analizzare. Prima dell'avvento di DAOSPEC venivano utilizzati programmi di riduzione e analisi non automatici, come IRAF, nei quali le righe venivano identificate manualmente richiedendo un tempo maggiore e introducendo un certo grado di soggettività nei risultati raggiunti, soprattutto per la scelta del livello del continuo, impedendone la riproducibilità e il confronto tra lavori diversi.

Il codice necessita, oltre agli spettri da analizzare, anche di un set di parametri di configurazione che specificano, tra le altre cose, la lunghezza d'onda della regione spettrale d'interesse, un valore di partenza per la FWHM delle righe e l'ordine del polinomio da usare per la normalizzazione dello spettro, altra procedura che

DAOSPEC svolge automaticamente.

Indispensabile è anche la lista di righe che deve contenere la lunghezza d'onda di laboratorio, il numero atomico dell'elemento e altri parametri atomici, tra cui il valore della forza dell'oscillatore ed il potenziale d'eccitazione, necessari per la creazione di un file da utilizzare con il codice GALA (spiegato in Sezione 4.5.2). Questi parametri sono contenuti nel database di Kurucz/Castelli.²

Il percorso di riduzione si articola in 3 passaggi fondamentali, ossia una prima fase di preparazione seguita da un ciclo iterativo che migliora progressivamente i risultati trovati, per concludere con una fase di rifinitura dei risultati e generazione dei file di output.

Il codice inizialmente esegue un primo fit polinomiale del continuo dello spettro utilizzando l'ordine del polinomio di Legendre scelto dall'utente e identifica le righe sullo spettro per eseguire una prima cross-correlazione con i valori di lunghezza di laboratorio ed attribuire una stima preliminare alla RV, calcolata dall'effetto Doppler, prendendo il valore di spostamento in lunghezza d'onda che corrisponde al maggior numero di righe che vengono riconosciute.

Per riconoscere le righe reali dal rumore, DAOSPEC utilizza il valore di FWHM assegnata. Per questo motivo una scelta non accurata di tale valore può portare a misure errate, in quanto assumere un valore maggiore della reale FWHM conduce ad escludere molte righe deboli che potrebbero essere analizzate, al contrario un valore minore porta a identificare come righe features relative al rumore.

A seguire il ciclo iterativo, che comincia con la sottrazione delle righe identificate precedentemente e la definizione del continuo, per essere successivamente normalizzato e dare una migliore stima al valore della FWHM.

Vengono poi identificate altre righe rimanenti per eseguire un nuovo fit del continuo.

La sottrazione delle righe viene svolta mediante un fit gaussiano che ne riproduce l'andamento. Questo è vantaggioso, permettendo di estendere il fit della riga per diversi pixel lontano dal centro, in regioni dove potrebbe essere sovrapposta ad altre righe, valutandone la vera EW. Inoltre il valore di FWHM viene forzato ad essere lo stesso o a scalare con la lunghezza d'onda, favorendo la separazione delle righe sovrapposte.

Il codice non è però in grado di eseguire un fit adeguato delle righe localizzate nel ramo di smorzamento della curva di crescita, poiché il profilo di queste righe non è più gaussiano ma caratterizzato da estese ali.

La stima del continuo viene effettuato sullo spettro dei residui. È molto importante stabilire il giusto livello di continuo in quanto il valore dell'EW viene definita rispetto a questo. Il livello di continuo che DAOSPEC adotta non è il vero continuo,

²<http://wwwuser.oats.inaf.it/castelli/linelists.html>

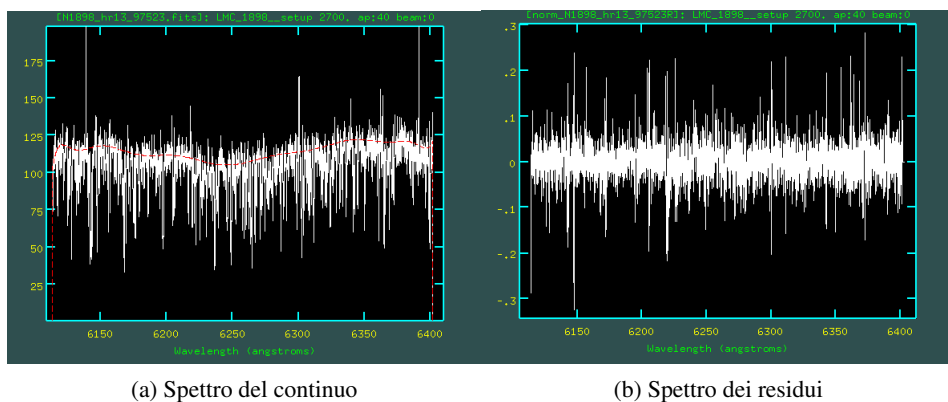


Figura 4.2: Spettri realizzati da DAOSPEC per la stella con identificativo 97523, appartenente al campo F3_N1898. A sinistra l'andamento del continuo sovrapposto in rosso allo spettro della stella, a destra lo spettro dei residui.

ossia il livello di flusso che si avrebbe senza righe o bande d'assorbimento, ma quello che viene definito continuo effettivo, che tiene conto della presenza di altre righe atomiche o molecolari troppo deboli o vicine per essere distinte, del rumore e di altri difetti presenti nello spettro, ad esempio dovuto ad un'imperfetta rimozione dei raggi cosmici, righe d'assorbimento telluriche o d'emissione del cielo che contaminano gli spettri.

Il tutto viene ripetuto fino a raggiungere la completa sottrazione delle righe, operazione che richiede tipicamente 5 iterazioni.

Terminato questo ciclo, DAOSPEC fornisce lo spettro con l'andamento del continuo e quello dei residui, mostrati in figura 4.2.

Inoltre fornisce un file contenente l'elenco di tutte le righe identificate, con indicazione di quelle corrispondenti alla lista di righe dove vengono forniti i valori di lunghezza d'onda, FWHM, EW di tutte le righe, ed i dati relativi alla RV misurata con errore standard e i residui espressi in termini di percentuale di flusso del continuo fittato.

Durante la fase di rifinitura, la lunghezza d'onda fittata sulle singole righe viene confrontata con il valore di laboratorio per migliorare ulteriormente il valore di RV utilizzando un algoritmo di sigma-clipping, che riconosce tra le righe identificate, quelle inserite nella lista di righe e richieste dall'utente.

4.4.2 Stima delle incertezze

Al valore trovato di velocità viene attribuito un errore calcolato a partire dalla dispersione e dal numero di righe utilizzate come $\sigma/\sqrt{N-1}$. È determinato in

termini di errore sui residui, ossia associato al flusso di residui rimasto dopo aver fittato il continuo ed aver sottratto tutte le righe dallo spettro osservato, calcolato nell'intorno della riga analizzata ed espresso sotto forma di errore standard, l'intervallo di confidenza al 68%.

Viene fornito anche un parametro di qualità Q definito come il rapporto tra lo scarto quadratico medio dei residui nella regione in cui si trova la riga e lo scarto quadratico medio dei residui ricavato considerando lo spettro per intero. Sostanzialmente indica se la regione in cui si trova la riga è riprodotta peggio ($Q > 1$) rispetto al residuo medio dello spettro. Se il valore del parametro di qualità è grande potrebbe significare che la riga in questione devia dal profilo gaussiano, conseguentemente l'operazione di sottrazione lascia maggiori residui nello spettro perché viene eseguita una sottrazione sbagliata della riga. Infine, il valore di Q può essere modificato anche dalla qualità dello spettro, dipendente dalla presenza di difetti spettrali e da SNR che non resta omogeneo lungo tutto il range di lunghezze d'onda ma risulta minore nella regione blu dello spettro, le cui righe tendono ad avere un Q maggiore.

4.4.3 4DAO

DAOSPEC viene lanciato mediante il codice 4DAO (Mucciarelli, 2013), realizzato appositamente per lanciare automaticamente DAOSPEC per un grande campione di spettri. Il vantaggio principale di usare DAOSPEC attraverso 4DAO, oltre ad una gestione più comoda dei files di input e di output, è la possibilità di ottimizzare automaticamente la FWHM, utilizzando iterativamente DAOSPEC finché la FWHM varia entro 0.1 pixel rispetto all'iterazione precedente. Inoltre 4DAO permette di escludere alcune regioni spettrali che potrebbero affiggere la corretta determinazione del continuo (come ad esempio regioni affette da righe di assorbimento dell'atmosfera terrestre).

Rispetto alla versione originale di DAOSPEC, 4DAO fornisce due output utili per valutare la qualità dei risultati ottenuti, realizzati per ciascun target analizzato. Il primo è uno spettro normalizzato e riportato a zero in RV, di cui si ha un esempio in figura 4.3, creato utilizzando il continuo e il valore di RV ottenuti da DAOSPEC. Il secondo consiste in un output grafico che mostra per ogni riga il fit gaussiano ottenuto da DAOSPEC (alcuni esempi sono riportati in figura 4.3), evidenziando eventuali transizioni presenti nella lista di righe iniziale ma non riconosciute dal programma (rappresentate in blu), in aggiunta ad informazioni sui valori di RC e EW ricavate azioni sul valore della RV e EW ricavata (vengono forniti diversi plot quali, il valore della RV da ciascuna riga, l'errore percentuale sull'EW e il parametro Q in funzione dell'EW e della lunghezza d'onda).

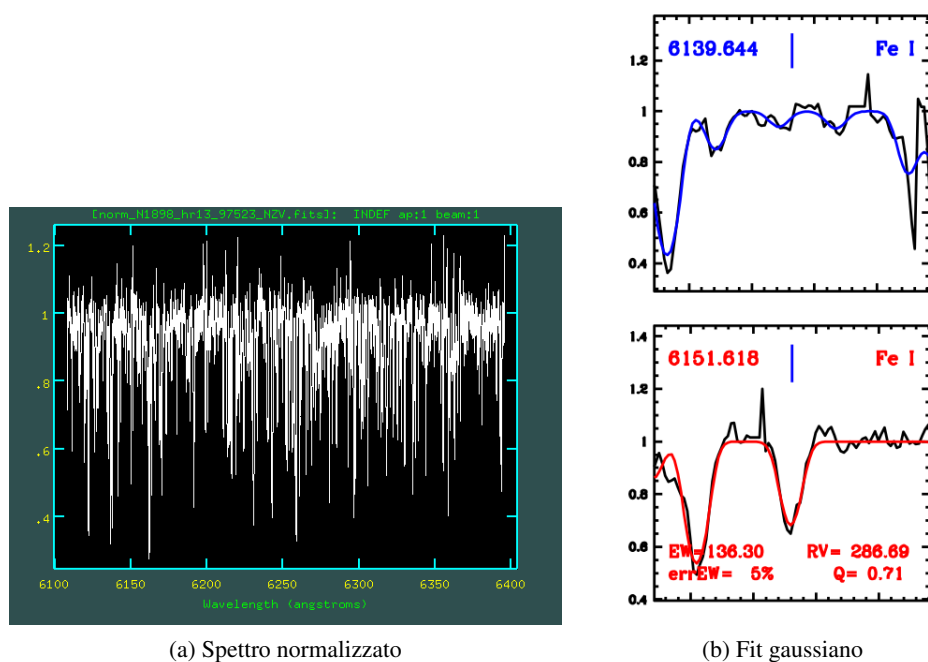


Figura 4.3: A sinistra spettro normalizzato e riportato a zero in RV da 4DAO per la stella con identificativo 97523, appartenente al campo F3_N1898. A destra due esempi di fit gaussiani di due righe nella lista: in blu la riga non identificata.

Se l'utente lo richiede, viene generato anche un file apposito per lo studio dell'abbondanza chimica mediante il codice GALA, spiegato in Sezione 4.5.2. Esso comprende varie informazioni tra cui la lunghezza d'onda, l'EW con relativo errore e il parametro Q.

Infine viene creato un file che riassume i principali parametri derivati da 4DAO per ogni spettro analizzato contenuto nella lista (4dao.list) da dare in input al codice. Fornisce infatti la FWHM, la RV con relativo errore, il numero di righe abbinata, la percentuale di flusso residuo e la lunghezza d'onda di inizio e di fine, più un flag in base al cui valore si capisce se si sono incontrati problemi durante la procedura.

Con DAOSPEC si ottengono due valori di RV ciascun target, ognuno dei quali derivanti dall'analisi dello spettro osservato con i due gratings. I valori devono essere in accordo, controllando quelli che presentano differenze maggiori di 2 km/s in quanto affetti da possibili errori, come una sbagliata valutazione della FWHM o di righe associate male, causati da uno spettro molto rumoroso o di peggiore qualità.

Per appianare la differenza si è provato a fissare a 4DAO il valore di FWHM non permettendogli l'ottimizzazione, stabilendolo pari al valore medio trovato negli al-

tri spettri osservati con lo stesso grating. Infatti per questi spettri il valore della FWHM è vincolato dalla dimensione della fibra, che è uguale per tutti i target, quindi non appare sensato che ci siano spettri con valori di questa molto diversi dalla media. In caso contrario potrebbe essere che si stiano osservando oggetti peculiari, che lo spettro sia talmente rumoroso da non permettere a DAOSPEC di distinguerlo dalle righe, oppure che ci siano stati problemi con la fibra durante l'osservazione. Questi oggetti occorre scartarli dalla successiva analisi in quanto potrebbero portare a risultati errati.

Se il problema non insorge dall'errata valutazione della FWHM si può restringere il range di velocità iniziale, altro parametro che l'utente è libero di impostare per facilitare il lavoro a DAOSPEC. Normalmente l'intervallo di RV in questo lavoro è stato impostato tra -100 e 400 km/s (range scelto in quanto il valore atteso per le stelle della Nube è intorno a 250 km/s , riuscendo però ad individuare anche stelle galattiche, non riconosciute dalla semplice osservazione degli spettri, la cui RV si aggira intorno a 0 km/s), ma può essere ristretto in modo da evitare di raggiungere dei massimi relativi della funzione di cross-correlazione tra target e sintetico, invece del massimo assoluto ricercato.

4.5 Determinazione delle Abbondanze

4.5.1 Abbondanze chimiche da EW

L'abbondanza di un elemento chimico può essere calcolata attraverso il metodo dell'EW. L'EW viene definita come la larghezza del rettangolo che sottende un'area pari a quella compresa tra la riga studiata e il continuo, avendo assunto una base unitaria. Quindi l'EW fornisce una misura dell'intensità della riga; tale intensità dipenderà dai parametri atmosferici e dall'abbondanza dell'elemento corrispondente ad una data transizione.

La relazione che si instaura tra questa grandezza e l'abbondanza dell'elemento che genera la riga mostra tre regimi:

1. regime lineare, nel quale le due grandezze sono legate in modo lineare in quanto domina il contributo della zona centrale ("core") della riga, che diventa sempre più profondo, fino a quando si satura diventando completamente opaco;
2. regime piatto, durante il quale la profondità della riga varia in modo non significativo, ma il contributo delle ali è ancora trascurabile. In questo caso il legame presente si esprime come $EW \propto \sqrt{\ln N}$, dove N rappresenta il numero di atomi che contribuiscono alla creazione della riga studiata;

3. regime di smorzamento, si raggiunge quando il contributo delle ali della riga al valore dell'EW diventa sempre più importante, e la relazione si modifica in $EW \propto \sqrt{N}$. Per queste righe il profilo delle ali non può più essere approssimato ad una gaussiana ma da una lorentziana, che tiene conto dell'allargamento.

Ogni riga ha quindi la propria curva di crescita che rappresenta il diverso andamento dei tre regimi.

I codici che calcolano l'abbondanza chimica in base all'EW si basano appunto sul calcolo della curva di crescita di ogni singola riga. In base ai parametri del modello di atmosfera (inclusa la metallicità), viene calcolata l'EW attesa per una data transizione e viene confrontata con quella misurata. L'abbondanza dell'elemento viene cambiata iterativamente finché l'EW teorica e quella misurata coincidono.

Ovviamente, come già specificato, una corretta selezione della lista di righe è indispensabile per una giusta riuscita dell'analisi, in quanto righe sature, oltre ad essere poco sensibili alla variazione dell'EW sono anche mal riprodotte da una gaussiana, provocando una stima sbagliata del parametro, così pure per righe che derivano da *blending* tra più transizioni.

4.5.2 GALA

L'analisi chimica viene svolta mediante l'utilizzo del software GALA ([Mucciarelli et al., 2013](#)). GALA, codice scritto in linguaggio Fortran77, permette di ricavare in modo automatico i parametri atmosferici, la metallicità e l'abbondanza chimica a partire dagli spettri stellari osservati, con il metodo classico basato sull'EW delle righe metalliche.

Il principale vantaggio nel ricavare i parametri atmosferici a partire dall'EW è la riproducibilità dei risultati, che permette di confrontare diversi risultati.

GALA è stato sviluppato per scegliere il migliore modello d'atmosfera, usato per misurare l'EW delle righe analizzate, fornendo grafici e quantità statistiche che permettono all'utente di valutare la qualità della soluzione finale e l'incertezza dei parametri derivati.

L'utente è libero di scegliere se ottimizzare tutti i parametri per via spettroscopica o solo alcuni, in quanto l'algoritmo modifica un parametro alla volta, controllando se il nuovo valore migliora o peggiora l'accordo con i dati.

L'approccio usato da GALA per stimare i parametri atmosferici si basa sull'utilizzo di alcuni indicatori spettroscopici sensibili ad ognuno dei parametri in questione. In particolare:

1. il coefficiente angolare della relazione tra l'abbondanza di Ferro e il potenziale d'eccitazione della riga, che deve essere il più possibile vicino a zero,

permettendo di vincolare la temperatura, dato che le righe a basso potenziale sono molto più sensibili alla temperatura rispetto a quelle a potenziale maggiore;

2. la differenza di abbondanza di Ferro ottenuta a partire dalle righe di FeI e FeII vincola la gravità perché pesa solo sulle righe ionizzate, poiché solo queste sono sensibili ai cambi di gravità;
3. il coefficiente angolare della relazione tra l'abbondanza di Ferro e il valore di EW determina se il valore trovato per la microturbolenza è corretto, in quanto tale parametro agisce sulle righe forti, quindi più vicine al ramo saturo della curva di crescita. Anche in questo caso il coefficiente angolare deve essere uguale a zero, mentre la presenza di un trend indica un valore sbagliato di microturbolenza.

Questi grafici vengono forniti da GALA, insieme ai dati statistici che permettono di valutare se il coefficiente angolare risultante è confrontabile con zero entro gli errori o se i parametri atmosferici ricavati dai dati fotometrici risultano sbagliati. Un esempio della relazione tra l'abbondanza di Ferro con il potenziale d'eccitazione è riportato in figura 4.4, nella quale si riporta un grafico relativo ad una corretta analisi e quello di una stella scartata, in quanto la retta si discosta molto dall'andamento piatto atteso per la corretta valutazione della temperatura. Grafici analoghi si ottengono per l'EW e la lunghezza d'onda.

Per quanto riguarda il valore di gravità invece non c'è modo di verificare la presenza di eventuali errori, in quanto la lista di righe utilizzata in questo studio comprende solo righe del FeI a motivo del fatto che si analizzano stelle fredde che mancano di righe del Ferro ionizzato.

A seconda dei parametri da ottimizzare richiesti in input, GALA esegue diverse iterazioni in modo da minimizzare le quantità discusse sopra. In caso in cui i parametri di input vengano tenuti fissi, GALA si limita a calcolare le abbondanze di ogni singola riga, escludendo eventuali outliers, ma fornendo sempre i grafici per valutare la correttezza della soluzione.

Una volta calcolate le abbondanze delle singole righe vengono escluse alcune righe considerate degli outliers. Vengono ritenuti outliers quelle righe che sono più forti o deboli del limite sull'EW dato in input dall'utente, in quanto righe troppo deboli possono essere affette dal rumore, mentre quelle troppo forti sono estremamente sensibili alla microturbolenza ma poco sensibili, in quanto vicine alla saturazione, all'abbondanza. Sono rigettate anche quelle righe la cui incertezza sulla misura dell'EW è maggiore di un limite stabilito dall'utente, così come quelle che si allontanano troppo dalla relazione trovata tra l'abbondanza dei Ferro e l'EW o il potenziale.

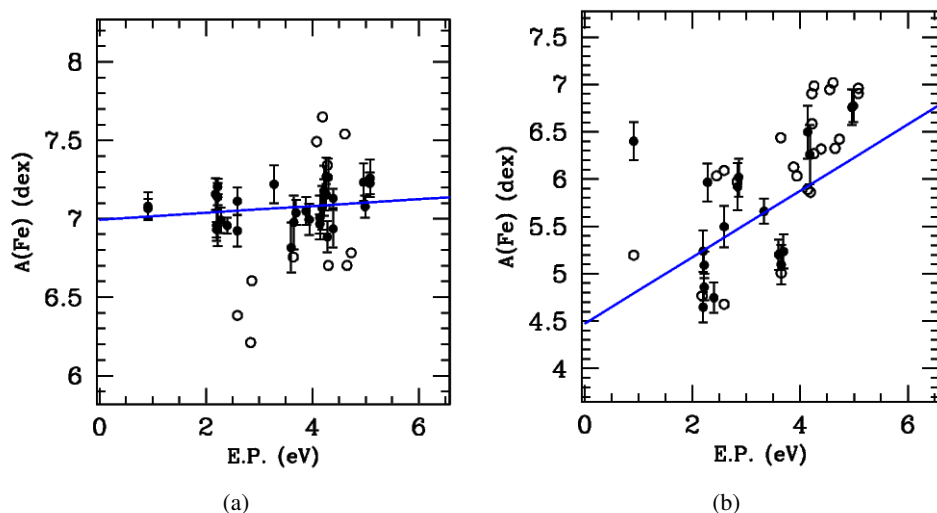


Figura 4.4: Andamento dell'abbondanza di Ferro in funzione del potenziale d'eccitazione. Nel plot (a) il valore di temperatura per la stella 283 del campo F3_N1898 è corretto, a differenza del plot (b), riferito alla stella 96392, dove la retta di best-fit mostra una pendenza significativa. I cerchi vuoti rappresentano righe scartate.

I motivi della presenza di outliers potrebbero essere vari, quali l'inaccuratezza dei dati atomici, sovrapposizioni di righe non riconosciute o misure sbagliate dell'EW. La loro rimozione risulta necessaria, e per evitare di introdurre degli effetti spurri durante l'analisi, essa viene effettuata solo all'inizio del ciclo per mantenere lo stesso campione di righe durante l'ottimizzazione dei parametri.

Per operare, GALA necessita in input di un file contenente tutti i parametri da impostare precedentemente citati, del file prodotto da 4DAO per ciascun target contenente tutte le informazioni relative alle righe appartenenti alla lista selezionata e di un file con l'elenco di tutti i target da analizzare, contenete i valori iniziali di temperatura, gravità, microturbolenza e metallicità, con la possibilità di inserire anche un eventuale aumento, rispetto al normale valore con cui scala con la metallicità, dell'abbondanza degli α -elements adottato nel calcolo del modello atmosferico.

GALA restituisce diversi output, tra cui un file per ogni spettro contenente l'elenco di tutte le righe analizzate e le informazioni utili, come il valore di EW con relativo errore e il valore di abbondanza che si ricava dalla riga in questione, segnalando se la riga è stata tenuta o rigettata e il motivo del rigetto. Sempre per ciascun target viene creato anche un output grafico, utile per valutare visivamente la bontà della soluzione raggiunta, nel quale sono riportati plot che mostrano il valore di abbondanza di Ferro ricavati da ciascuna riga in funzione del-

la rispettiva EW, potenziale d'eccitazione e lunghezza d'onda, dove i punti vuoti sono le righe scartate da GALA durante il calcolo. É rappresentata anche la curva di crescita teorica, che riproduce la relazione tra EW/λ e l'EW teorica, definita a partire dalla forza dell'oscillatore e dal potenziale d'eccitazione della riga, che da un'indicazione di quanto è intensa la riga.

I risultati ottenuti dall'analisi di tutti gli spettri sono riassunti in un unico file riportante il valore di abbondanza di ogni specie chimica presente nella lista di righe originale, con la relativa dispersione, e le informazioni sulla pendenza e relativo errore dei grafici presenti nell'output grafico.

Un ulteriore controllo che GALA opera consiste nella creazione di una curva di crescita teorica in cui inserisce tutte le righe analizzate in un grafico che lega il valore dell'EW misurata, riscalata con la lunghezza d'onda, al valore di EW teorica che viene calcolata come $EW_T = \log(gf) - \theta\xi$, dove f rappresenta la forza dell'oscillatore e g il peso statistico, rappresentando insieme la probabilità di transizione, mentre θ dipende dalla temperatura (definizione nel paragrafo 3.1) e ξ il potenziale d'eccitazione. Da questa si può comprendere se le righe analizzate sono in regime lineare o se occorre scartarne altre. Un esempio di curva di crescita teorica è riportato in figura 4.5.

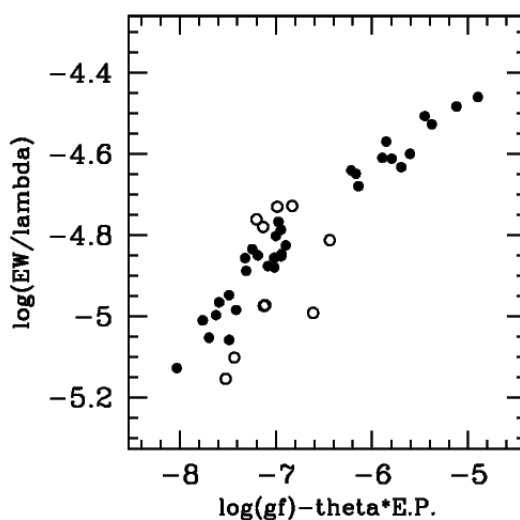


Figura 4.5: Curva di crescita teorica calcolata da GALA per la stella con numero identificativo 283 del campo F3_N1898.

4.5.3 Determinazione delle metallicità nei target FLAMES

Descriviamo ora brevemente la procedura utilizzata per ricavare le abbondanze nei target analizzati.

In questo studio si è scelto di fissare i valori di temperatura, gravità e velocità di microturbolenza, ricavati per via spettroscopica, e di permettere l'ottimizzazione solo della metallicità.

Il numero limitato di righe di Ferro disponibili negli spettri GIRAFFE delle stelle di LMC non permette una determinazione spettroscopica affidabile dei parametri atmosferici. La procedura di ottimizzazione descritta precedentemente rischia di fornire parametri altamente incerti in particolare per la determinazione della temperatura, a causa del basso numero di righe di Ferro con basso potenziale di eccitazione (quindi quelle più sensibili ai cambiamenti di temperatura).

L'analisi è stata eseguita in due steps: si effettua una prima analisi delle stelle utilizzando la lista di righe ottimizzata per la metallicità -0.5 dex. Questa prima analisi fornisce una prima stima della metallicità di ogni stella. In base al valore di metallicità ottenuta precedentemente si ripete l'analisi utilizzando per le stelle con metallicità molto diversa da -0.5 dex una lista di righe adeguata per la metallicità della stella. In questa fase dell'analisi la metallicità del modello di atmosfera è stata interpolata al valore ottenuto dalle righe di Ferro per ottenere una misura più precisa.

Inoltre si è operato un rigetto di tutte quelle righe con parametro $Q > 2.0$, per le quali è stata sicuramente data una stima sbagliata dell'EW, conducendo ad una proporzionale sottostima o sovrastima dell'abbondanza.

Un accertamento aggiuntivo per testare l'attendibilità dei risultati ottenuti consiste nella valutazione dei grafici forniti da GALA, andando a controllare che le pendenze delle relazioni che legano l'abbondanza di Fe con l'EW misurata e con il potenziale d'eccitazione non mostrino trend significativi, contrariamente il valore di microturbolenza e temperatura rispettivamente potrebbero risultare sbagliati.

In tal caso è stato permesso a GALA di ottimizzare entrambi i parametri, lasciando solo la gravità fissata dall'utente in quanto il suo valore non incide molto sulle righe studiate, oppure è stato modificato a mano il parametro sbagliato in base al trend osservato (ad esempio se si osserva una pendenza positiva nel grafico del potenziale è necessario alzare la temperatura in quanto le righe a basso potenziale sono quelle più sensibili), facendo alcune prove per trovare il miglior valore che riporta la pendenza confrontabile con zero.

Le stelle in questione sono state considerate affidabili se i nuovi parametri atmosferici trovati sono confrontabili con quelli degli altri target analizzati, se invece si discostano molto si è preferito scartarle in quanto potrebbero essere stelle non risolte, quindi i valori di magnitudine e colore misurati nel catalogo fotometrico

non hanno niente a che fare con la stella singola ma derivano dalla somma della luce proveniente da due stelle, e questo incide sicuramente anche nello spettro.

GALA crea un ulteriore grafico, che mostra il valore di abbondanza di Ferro determinato da una certa riga in funzione della sua lunghezza d'onda. Anche in questo caso non è atteso nessun legame tra le due grandezze, ma la metallicità deve restare invariata indipendentemente dal tipo di riga, distribuendosi in modo casuale intorno al valore vero. Se si osserva un trend tra le righe appartenenti ai due diversi gratings potrebbe essere indice di una cattiva normalizzazione degli spettri che ha condotto ad introdurre una dipendenza. In tal caso vanno ricontrollati gli spettri per trovare la causa della sbagliata normalizzazione, cercando di portare al valore unitario gli spettri manualmente, in modo da poterli analizzare in modo corretto.

L'ultimo parametro che GALA fornisce e che può dare un'indicazione della presenza di eventuali problemi è il valore di dispersione del valore di abbondanza di Ferro ricavato dalle varie righe appartenenti alla stessa stella. Se il valore è grande e distante dagli altri indica che potrebbe esserci un parametro atmosferico sbagliato o uno spettro molto rumoroso che conduce ad una sbagliata determinazione dell'EW.

4.5.4 Analisi dello spettro di Arturo

Prima di procedere all'analisi degli spettri dei target osservati, è utile testare la procedura scelta e la validità della lista di righe.

Il controllo viene svolto utilizzando Arturo, una stella Galattica molto brillante, i cui parametri atmosferici e i valori delle abbondanze chimiche sono noti, verificando l'assenza di discrepanze tra i valori in letteratura e i risultati otteniti con questo metodo. La scelta è ricaduta su questa stella in quanto si tratta di una gigante rossa di classe spettrale K1, della tipologia di quelle analizzate in questo lavoro di tesi e di metallicità paragonabile a quella della componente dominante della LMC.

Lo spettro a disposizione è stato acquisito con lo spettrografo echelle FEROS montato al telescopio 2.2 m dell'Osservatorio di LaSilla dell'ESO. Si tratta di uno spettro a $SNR \sim 250$ e con risoluzione di circa 48000. È stato quindi necessario degradarlo, convolvendolo con un profilo gaussiano, per riportarlo alle risoluzioni spettrali dei grating FLAMES utilizzati per le osservazioni.

Gli spettri di Arturo, alla risoluzione GIRAFFE, sono stati analizzati utilizzando la lista di righe precedentemente selezionata a metallicità maggiore e i valori dei parametri atmosferici stabiliti da [Ramírez & Allende Prieto \(2011\)](#), che sono stati fissati in GALA per ricavare il valore di metallicità. I valori tabulati sono:

$$T = 4286 \pm 30 \text{ K}$$

$$\log g = 1.66 \pm 0.05$$

$$\xi = 1.74 \text{ km/s}$$

Si è potuto anche testare la validità della relazione di Kirby et al. (2009) (equazione 3.9) inserendo nella formula il valore di gravità e calcolando la velocità di microturbolenza, che risulta essere in accordo con il valore atteso da Ramírez & Allende Prieto (2011).

Confrontando però il valore di metallicità ottenuti da GALA con il valore in letteratura, si osserva una discrepanza non trascurabile:

$$\begin{aligned} [Fe/H]_{GALA} &= -0.68 \text{ dex} \\ [Fe/H]_{letteratura} &= -0.52 \text{ dex} \end{aligned}$$

Tale discrepanza non è attribuibile ad un'errata stima della FWHM che è stata controllata in base ai fit delle singole righe ottenuti con 4DAO.

Se il problema non può essere ricondotto alla FWHM, potrebbe essere legato al valore di microturbolenza (in quanto T_{eff} e $\log g$ di Arturo sono conosciuti con elevata precisione), un parametro che influenza il valore della metallicità dato che la lista di righe comprende quelle più intense a causa del basso SNR degli spettri in esame, che sono in maggior misura influenzate dal valore di microturbolenza rispetto alle righe deboli, ancora in regime lineare.

Infatti diminuendo il valore di microturbolenza di 0.3 km/s si ottiene un'abbondanza in Ferro maggiormente confrontabile con quello in letteratura:

$$\begin{aligned} [Fe/H]_{GALA} &= -0.54 \text{ dex} \\ [Fe/H]_{letteratura} &= -0.52 \text{ dex} \end{aligned}$$

Questo offset può essere giustificato con la piccola estensione in lunghezza d'onda degli spettri osservati, a differenza di quelli utilizzati sia per ricavare la relazione di Kirby et al. (2009), sia per ricavare i valori di ξ di Ramírez & Allende Prieto (2011), che erano inoltre a maggiore risoluzione spettrale.

Inoltre la correttezza del risultato con il valore di microturbolenza riscalato è confermata anche dalla figura 4.6, nella quale non si riscontrano trend particolari.

Si decide quindi di modificare la relazione di Kirby et al. (2009) aggiungendo un fattore correttivo che diminuisce di 0.3 km/s il valore di microturbolenza dei target in esame:

$$\xi = (2.13 \pm 0.05) - (0.23 \pm 0.03) \log g - 0.3 \quad (4.1)$$

Dopo aver quindi verificato l'effettiva riuscita della procedura si può proseguire con l'analisi spettrale dei target.

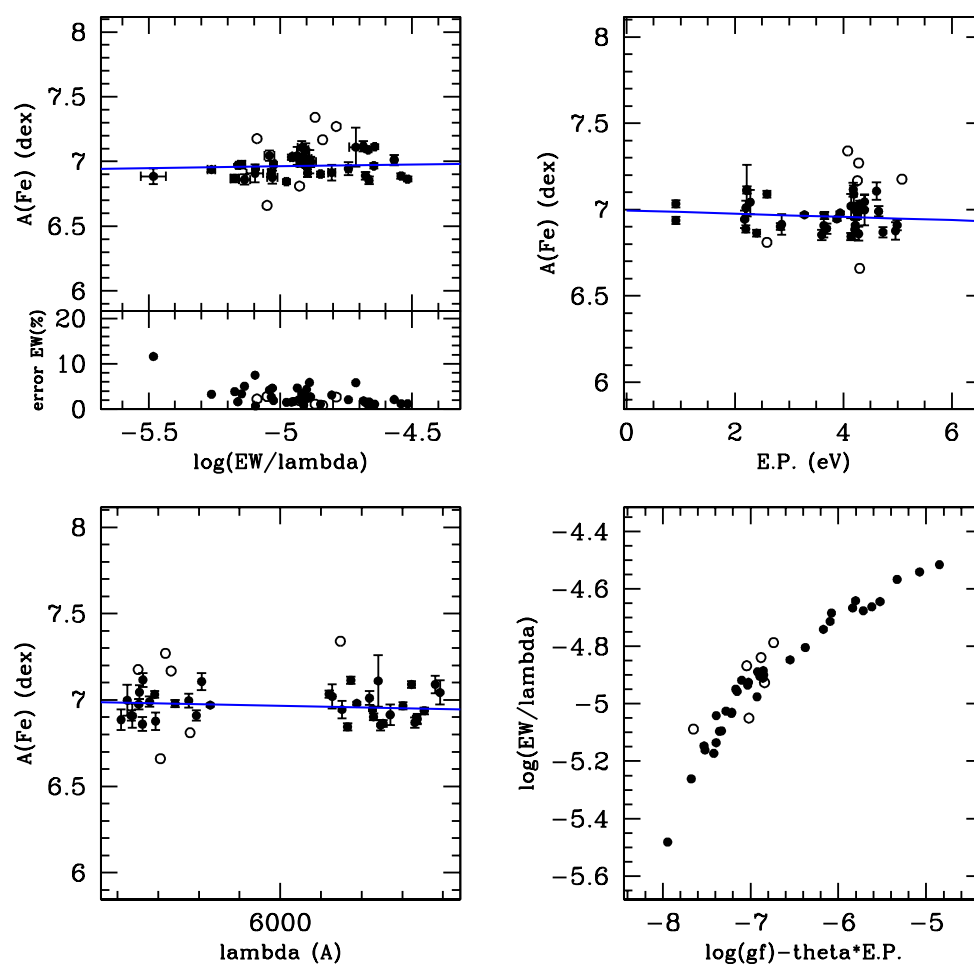


Figura 4.6: Output grafico di GALA per l'analisi di Arturo. I pannelli mostrano l'andamento delle abbondanze di Ferro in funzione della EW ridotta, del potenziale di eccitazione e della lunghezza d'onda, mentre l'ultimo pannello mostra la corrispondente curva di crescita. I cerchi neri indicano righe che sono state usate nell'analisi, mentre quelli vuoti righe che sono state scartate.

Capitolo 5

Distribuzione di Velocità Radiale nella LMC

Il principale obiettivo dell'analisi cinematica del campione di stelle di campo della LMC è l'identificazione di possibili sottostrutture cinematicamente distinte, in particolare la presenza di un disco in rotazione e di un alone stellare cinematicamente caldo.

5.1 Risultati

La velocità radiale, è stata calcolata come spiegato nel capitolo 4.4, mediante l'utilizzo di DAOSPEC. Tutte le misure di RV fornite sono corrette per la velocità eliocentrica.

In tabella 5.1 sono riportati i valori di correzioni eliocentriche di ogni campo. Il valore indicato è una media tra quelli calcolati per ogni esposizione (in base alla data d'osservazione), ma essendo osservazioni fatte nell'arco di una, o al più due notti consecutive, la variazione massima ottenuta è di 0.3 km/s per uno stesso campo, da ritenere trascurabile. Solo per i campi F4_N1978 e F5_N2173 sono stati riportati due valori diversi di correzione eliocentrica, poichè le osservazioni sono state eseguite con più di un anno di distanza.

Si deve evidenziare che, mentre le stelle nane della Galassia sono facilmente identificabili e scartabili dalla semplice visualizzazione dello spettro (che mostra righe con ali estese), le stelle giganti della MW osservate possono essere riconosciute solo sulla base della loro RV.

Sapendo che le stelle della MW in direzione della LMC hanno RV tipicamente attorno a 0 km/s (Robin et al., 2003), si è valutato per ciascun campo quali stelle possono essere ritenute Galattiche guardando la distribuzione delle velocità ottenuta e considerando che l'intervallo di RV coperto dalle stelle della LMC varia tra

campo	$V_{eliocentrica}$ (km/s)
F1_N1466	-4.2
F2_N1754	-3.6
F3_N1898	-2.5
F4_N1978	-0.7/-1.0
F5_N2173	-3.0/+2.8
F6_N2210	+0.7

Tabella 5.1: Media delle velocità eliocentriche per i diversi campi analizzati, espressa in km/s . Per i campi F4_N1978 e F5_N2173 sono stati dati due valori diversi, rispettivamente relativi a HR11 e HR13, in quanto le osservazioni nei 2 gratings sono state fatte in anni diversi.

+200 km/s e +400 km/s (Kim et al., 1998; Cole et al., 2005; Carrera et al., 2008, 2011). Le stelle con RV che si distaccano molto dalla distribuzione gaussiana attesa per le stelle di campo sono state ritenute Galattiche e scartate dalla successiva analisi. L'intervallo di velocità assunto per il rigetto dei target cambia da campo a campo dato che le distribuzioni sono centrate su valori differenti.

Il valore finale adottato per la RV di ogni target è la media tra le due RV misurate dagli spettri osservati con i due gratings.

Per i campi F4_N1978 e F5_N2173 nei quali non tutte le stelle sono state osservate con entrambi i gratings, o in presenza di evidenti problemi in uno dei due spettri, viene utilizzato l'unico valore di RV a disposizione.

Inoltre nel campo F5_N2173 sono state individuate 4 stelle binarie (3836, 3855, 3888 e 3893). Ciò è stato possibile perché le osservazioni nei due gratings sono state effettuate con più di un anno di differenza, e questo ha permesso di notare variazioni di velocità di $\sim 10 km/s$, non giustificabili in base agli errori tipici di misura.

Si è scelto di scartare queste stelle dall'analisi delle velocità radiali, mentre sono state considerate nel capitolo successivo per l'analisi della metallicità essendo stelle della LMC.

Occorre fare presente che nel campo F1_N1466, la stella 90524 è stata analizzata manualmente per ricavare il valore di RV, in quanto lo spettro è molto rumoroso e DAOSPEC non riusciva a convergere ad una soluzione accettabile. Questo si è potuto fare in quanto si è riusciti ad identificare la riga a 6162 Å del calcio, osservata spostata a 6165.62 Å, corrispondente ad una velocità di +168 km/s .

Forniamo per ogni campo analizzato, i valori medi e mediani di RV misurati, con la dispersione ed il valore massimo e minimo trovato, riportati in tabella 5.2 (la seconda riga presente per i campi NCG1466, F4_N1978 e F6_N2210 è riferi-

ta ai valori calcolati senza gli outliers, come spiegato meglio in seguito), mentre la distribuzione dei valori di RV è rappresentata con istogrammi in figura 5.1 (i valori riferiti ad ogni singola stella si trovano in appendice B). Come si può osservare l'istogramma relativo al campo F1_N1466 è poco significativo a causa del basso numero di stelle presenti nel campione, ma è stato inserito ugualmente per completezza e per permettere un confronto visivo con gli altri campi.

campo	N_{star}	RV_{media}	$RV_{mediana}$	σ_{RV}	RV_{min}	RV_{max}
F1_N1466	7	+226.8	+204.0	75.8	+168.0	+394.6
	6	+199.0	+204.0	19.8	+168.0	+219.6
F2_N1754	91	+251.0	+250.6	23.6	+201.7	+321.9
F3_N1898	89	+254.2	+253.1	25.4	+193.6	+317.4
F4_N1978	69	+282.2	+283.2	27.5	+188.8	+336.9
	68	+283.6	+285.2	25.2	+235.7	+336.9
F5_N2173	44	+251.5	+256.0	24.5	+199.4	+295.3
F6_N2210	72	+274.8	+275.9	20.6	+238.0	+342.9
	71	+273.8	+275.6	19.0	+238.0	+317.6

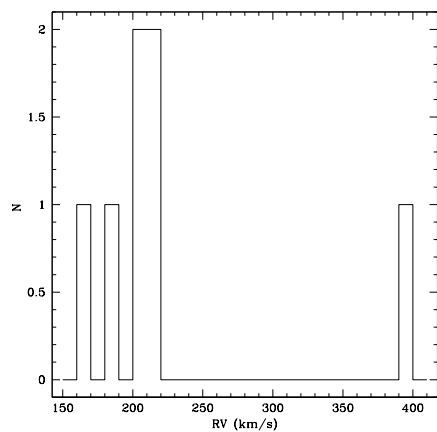
Tabella 5.2: Risultati riguardanti la distribuzione di RV dei campi analizzati. Tutti i valori sono espressi in km/s . La seconda riga presente per i campi NCG1466, F4_N1978 e F6_N2210 è riferita ai valori calcolati senza gli outliers.

Essendo il campo F3_N1898 molto vicino alla posizione del centro della LMC riportata in letteratura (Kim et al., 1998; van der Marel & Cioni, 2001; van der Marel et al., 2002), si può assumere che la sua velocità media corrisponda alla velocità di allontanamento della LMC da noi, ossia un valore intorno a $+250 km/s$. Questo valore è in accordo con le stime dei campi di letteratura della Barra (Cole et al., 2005; Van der Swaelmen et al., 2013; Song et al., 2017).

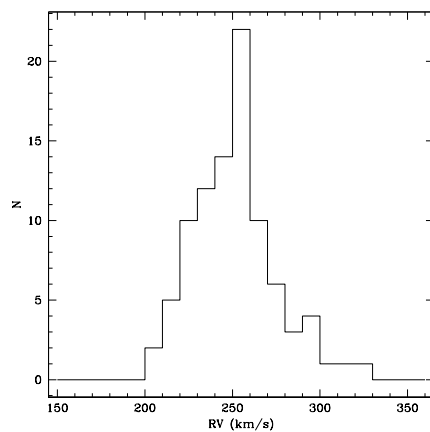
I campi F2_N1754 e F5_N2173 (posizionati rispettivamente ad una distanza di $\sim 3.6^\circ$ a sud-ovest e $\sim 4.5^\circ$ a sud dal centro) hanno velocità che si possono considerare confrontabili con quelle osservate per il campo centrale, mentre il campo F1_N1466 (ad una distanza di $\sim 10^\circ$ in direzione sud-ovest) mostra un valore del picco della distribuzione di circa $25 km/s$ inferiore ai campi centrali. Infine, i campi F6_N2210 e F4_N1978 (collocati rispettivamente a $\sim 4.6^\circ$ a est e $\sim 3.3^\circ$ a nord dal centro) hanno velocità con un picco maggiore di circa la stessa quantità.

Si può però notare dagli istogrammi in figura 5.1, che sono presenti alcuni outliers che non sono stati scartati riportando velocità molto maggiori di quelle attese per stelle appartenenti alla MW.

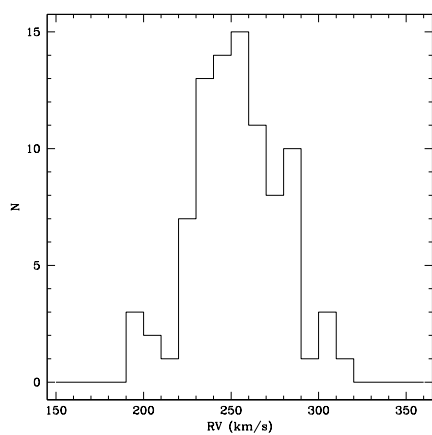
In particolare, si tratta della stella 90557 nel campo F1_N1466 con $RV = +394.6 km/s$, della stella 11801 nel campo F4_N1978 con $RV = +188.8 km/s$ e del-



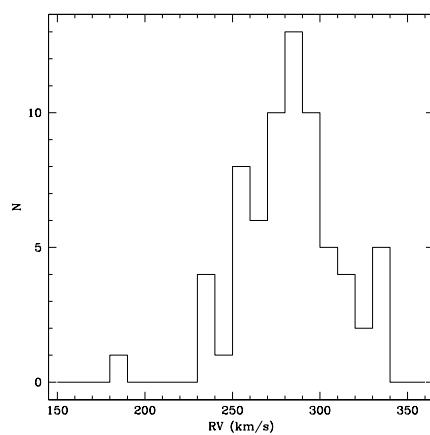
F1_N1466



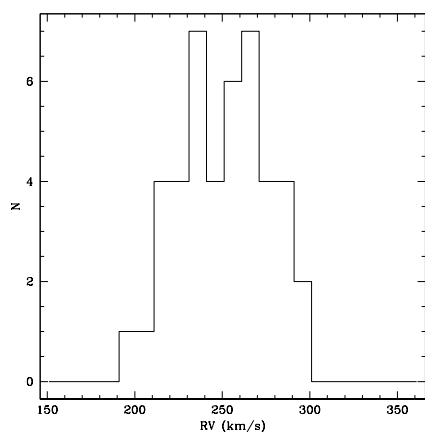
F2_N1754



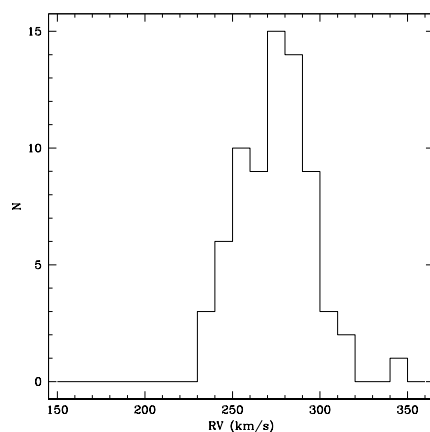
F3_N1898



F4_N1978



F5_N2173



F6_N2210

Figura 5.1: Distribuzione delle velocità radiali dei campi analizzati.

la stella 90928 nel campo F6_N2210 con $RV = +342.9 \text{ km/s}$. Anche in base al valore di metallicità misurato per queste stelle, non ci sono motivi per ritenerle Galattiche anziché appartenenti alla LMC, quindi non vengono escluse dal campione.

Le dispersioni di velocità sono abbastanza simili in tutti i campi, intorno ai 25 km/s , con la sola eccezione di F1_N1466, che riporta un valore molto maggiore ($\sim 75 \text{ km/s}$) a causa della stella 90557 con velocità $+394.6 \text{ km/s}$ e per la bassa statistica. Escludendo tale stella, il valore di dispersione di velocità si riduce a $19,8 \text{ km/s}$.

Per rimuovere eventuali outliers, la dispersione di RV è stata ricalcolata rigettando iterativamente i valori oltre 3 sigma dalla media. Solo per i campi F4_N1978 e F6_N2210 la procedura ha scartato due stelle, senza cambiare sensibilmente le dispersioni calcolate dal campione intero (vedi tabella 5.2).

5.2 Cinematica della LMC

L'analisi cinematica delle stelle di LMC presentata in questo studio porta a due risultati principali.

(1) La velocità media dei campi varia a seconda della posizione nella galassia. In particolare, si nota come le distribuzioni di RV nelle regioni nord-est (i campi F4_N1978 e F6_N2210) abbiano una RV media maggiore dei campi più vicini alla Barra e del campo a sud-est F5_N2173, mentre il campo più esterno e in direzione della SMC, nonostante il basso numero di stelle osservate, mostra RV tendenzialmente più basse (anche se la stella con RV più elevata di tutto il campione è stata osservata proprio in questo campo).

Inoltre, notiamo una particolarità nel campo F3_N1898 nella distribuzione delle RV, che sembra mostrare due picchi secondari nella distribuzione di RV a valori di circa $+200 \text{ km/s}$ e $+300 \text{ km/s}$. Per capire se questa distribuzione è in qualche modo correlata alla posizione spaziale delle stelle analizzate, si è realizzato il grafico in figura 5.2, nella quale sono state colorate in modo diverso le stelle nei 3 diversi range di RV individuati. Come si può ben notare, la statistica è molto scarsa, ma non si evidenzia alcuna correlazione spaziale con la velocità.

Nella figura 5.3 sono rappresentati, nelle posizioni dove sono collocati i campi osservati in questo studio, gli istogrammi con le distribuzioni di velocità trovate. Sono stati indicati con una linea rossa i valori mediani delle distribuzioni del campo in questione, mentre con la linea blu si è rappresentato il valore mediano del campo centrale (F3_N1898), per evidenziare la variazione del picco della distribuzione rispetto al centro della LMC.

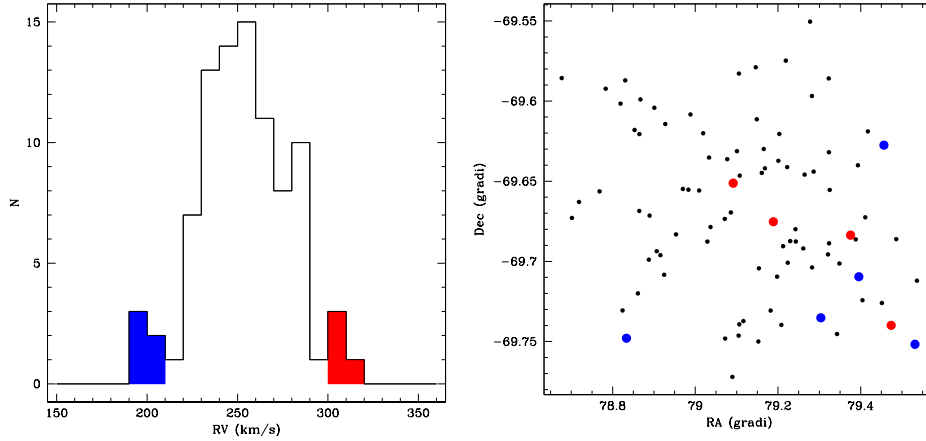


Figura 5.2: A sinistra l'istogramma delle RV del campo F3_N1898 con evidenziate in blu e rosso le stelle tra $190 < RV < 210 \text{ km/s}$ e $300 < RV < 320 \text{ km/s}$. La posizione di queste stelle è mostrata nella mappa a destra.

La variazione osservata del picco di RV con la posizione nella LMC è consistente con un effetto di rotazione. Tale effetto è stato già osservato per le componenti più giovani della LMC, attraverso lo studio delle RV dell'HI (Kim et al., 1998) e delle Carbon-stars (Kunkel et al., 1997).

In quest'ultimo studio vengono analizzate 759 Carbon-stars della LMC, mediante le quali viene costruita la curva di rotazione della galassia che spazia da 3 kpc a 12 kpc, con un massimo di RV a 4 kpc, per poi iniziare a declinare fino a 6.5 kpc, suggerendo che il 90% della massa della LMC è contenuta entro questo raggio. A raggi maggiori la RV presenta una risalita, attribuita alle interazioni mareali con la SMC e la MW.

Altri lavori ad alta risoluzione che forniscono le RV di stelle della LMC sono quelli di Pompéia et al. (2008) e di Lapenna et al. (2012). Nel primo, analizzando spettroscopicamente 59 stelle giganti interne al disco, collocate a ~ 1.2 kpc dal centro, è stata ricavata una RV di circa $+241 \text{ km/s}$ con dispersione di 28 km/s . Nello studio di Lapenna et al. (2012), nel quale sono state analizzate 89 stelle della LMC collocate nell'intorno dell'ammasso NGC1786 di coordinate $RA = 74.782563^\circ$ e $Dec = -67.755223^\circ$, appartenente al disco galattico, è stata trovata una distribuzione piccata intorno ad un valore medio di $+265 \text{ km/s}$, coerente con la distribuzione di velocità misurata nei campi adiacenti a questo nel nostro lavoro, con un valore di dispersione pari a (25.7 km/s) .

La survey a bassa risoluzione di Carrera et al. (2008, 2011) fornisce un'indicazione

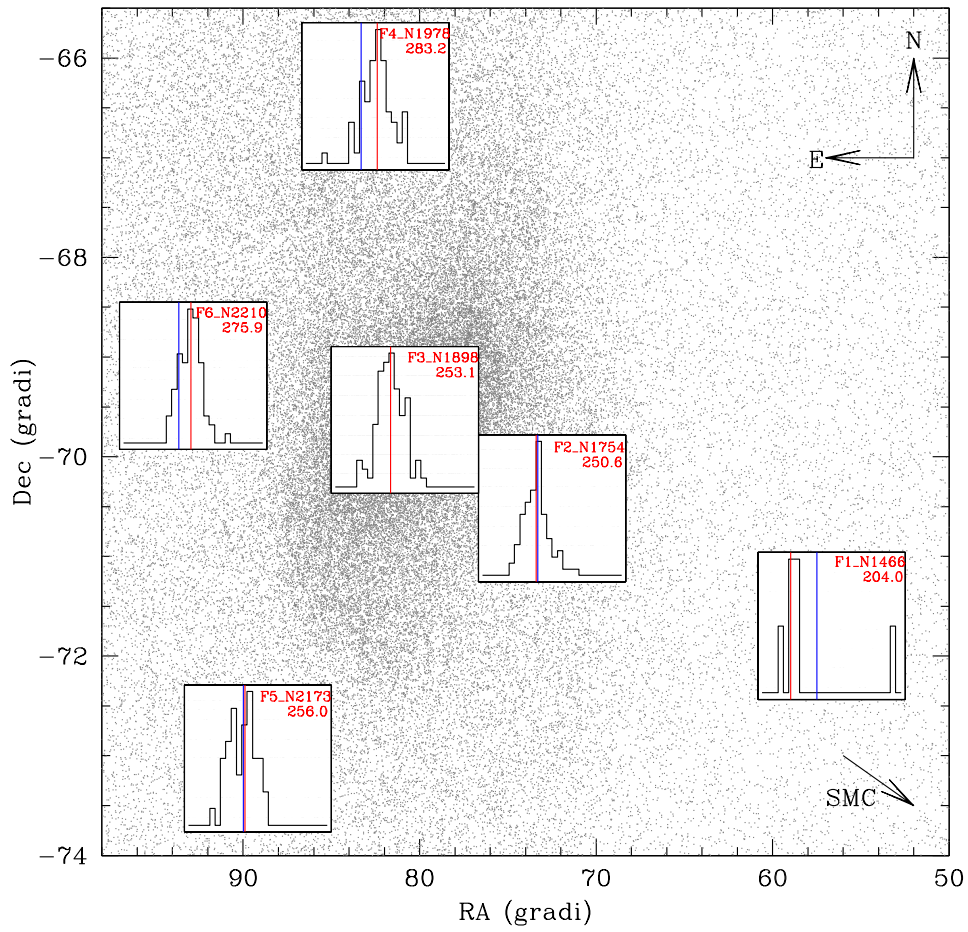


Figura 5.3: Mappa delle stelle giganti della LMC dalla survey 2MASS con sovrapposte le distribuzioni di velocità dei campi analizzati in questa tesi. In rosso è segnato il valore mediano della distribuzione, espresso in km/s , mentre la linea blu rappresenta il valore mediano del campo centrale F3_N1898.

della variazione di RV nel disco interno, ma riguarda solo stelle posizionate tra la Barra e la regione nord della LMC.

Il risultato fornito in questa tesi è quindi la prima evidenza di rotazione dalle popolazioni stellari di età vecchia/intermedia basata su spettri ad alta risoluzione e ottenuta campionando diverse regioni della galassia. La rotazione quindi delle popolazioni vecchie/intermedie è coerente con quella delle popolazioni più giovani.

Trovare una corretta interpretazione della rotazione è complicato anche dal fatto che la galassia non è vista face-on: vari studi indicano infatti che è inclinata con un angolo compreso tra 31° e 36° (dove 0° è face-on), con la linea dei nodi, ossia l'intersezione tra il piano galattico con il piano del cielo, posta tra 120° e 150° , misurati in senso antiorario rispetto al nord (van der Marel et al., 2002; Olsen & Salyk, 2002; Nikolaev et al., 2004). Un campione più ampio di stelle, distribuito su tutte le regioni della LMC, è quindi necessario per caratterizzare meglio la rotazione del disco della galassia.

(2) In figura 5.4 si mostra l'andamento della dispersione di velocità in funzione del raggio deproiettato. I quadrati rossi indicano i dati di questo lavoro con le rispettive barre d'errore, calcolate come $\sigma/\sqrt{2N}$, con σ che indica la dispersione di velocità e N numero di stelle analizzate in quel campo. Con i quadrati si sono indicati i lavori ad alta risoluzione, quali Pompéia et al. (2008) in blu, Lapenna et al. (2012) in blu chiaro e Song et al. (2017) in verde, mentre con i simboli vuoti i risultati da osservazioni a bassa risoluzione, ossia i cerchi rappresentano il lavoro di Carrera et al. (2011), che comprende anche i dati di Cole et al. (2005) rianalizzati con la stessa procedura, e i triangoli il lavoro sulle Carbon Star di Kunkel et al. (1997).

Dei 5 campi interni, 4 mostrano un valore di dispersione di velocità costante (~ 25 km/s) mentre solo il campo F6_N2210 presenta una dispersione inferiore (~ 19 km/s).

Il campo F1_N1466 è stato escluso da questa figura poiché la bassa statistica e la presenza di una stella con RV estremamente discrepante dalle altre (ma compatibile con la distribuzione di RV della LMC) rischiano di fornire un valore di dispersione di velocità non affidabile.

I valori di dispersione di velocità dei 4 campi centrali sono compatibili con quelli trovati da altri lavori basati su spettri ad alta risoluzione, suggerendo che fino a circa $\sim 5^\circ$ di distanza dal centro della LMC la dispersione di velocità rimane costante attorno ad un valore di ~ 25 km/s (Pompéia et al., 2008; Lapenna et al., 2012; Song et al., 2017).

Il valore inferiore misurato nel campo F6_N2210 potrebbe indicare una decrescita della dispersione di velocità nel disco esterno della LMC, ma per poter confermare

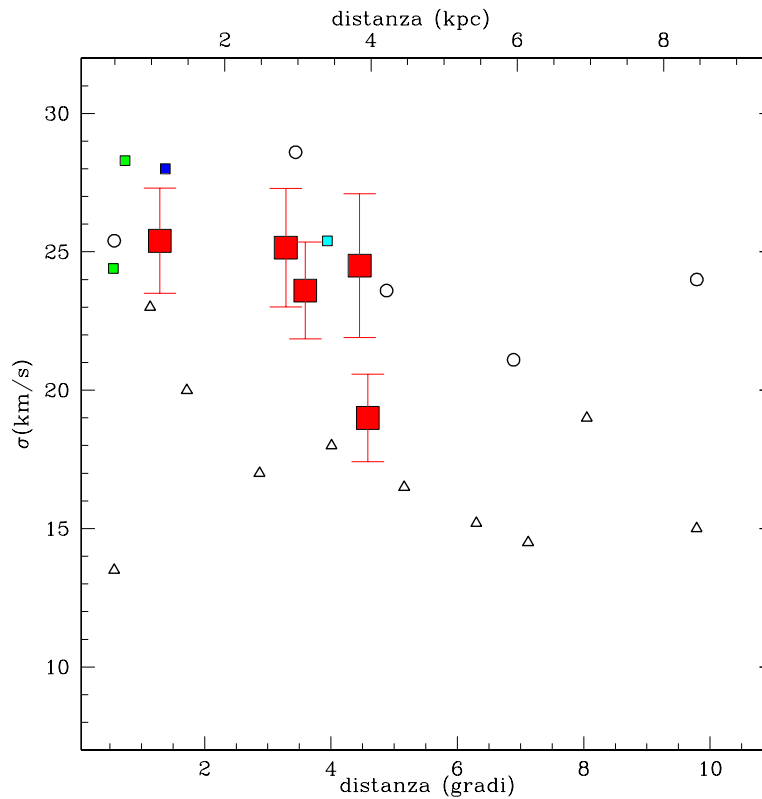


Figura 5.4: Dispersione di velocità in funzione della distanza dal centro della LMC, espressa sia in gradi che in kpc. I quadrati pieni indicano i risultati ricavati da osservazioni ad alta risoluzione mentre i simboli vuoti corrispondono a quelli di studi a bassa risoluzione. In rosso i dati di questo lavoro, in blu quelli di [Pompéia et al. \(2008\)](#), in blu chiaro quelli di [Lapenna et al. \(2012\)](#), in verde quelli di [Song et al. \(2017\)](#), i cerchi vuoti quelli di [Carrera et al. \(2011\)](#) e i triangoli vuoti quelli di [Kunkel et al. \(1997\)](#).

questa ipotesi è necessaria l'osservazione di ulteriori campi a distanze maggiori di 5° dal centro.

È importante notare che precedenti lavori sulla cinematica di LMC hanno suggerito una decrescita della dispersione di velocità a distanze maggiori dal centro della galassia rispetto a quelle campionate in questo studio.

Il campione di Carbon-stars analizzato da [Kunkel et al. \(1997\)](#), rappresentato in figura 5.4 attraverso triangoli vuoti, mostra una chiara decrescita da $\sim 23 \text{ km/s}$ nelle regioni più interne fino a $\sim 14 \text{ km/s}$ a distanze maggiori di 6 kpc.

Sempre in figura 5.4, i cerchi vuoti relativi allo studio sulle RGB di [Carrera et al. \(2011\)](#), suggeriscono una decrescita della dispersione di velocità con la distanza per raggi compresi tra 2 e 6 kpc, anche se il campo più esterno di stelle giganti

da loro analizzato presenta un valore maggiore, interpretato come un ispessimento del disco esterno dovuto alle interazioni con la MW. In realtà i valori risultano abbastanza compatibili tra loro entro le incertezze e questa interpretazione potrebbe non essere corretta.

L'andamento della dispersione di velocità tracciato dalle Carbon-stars risulta quindi differente da quello ottenuto dalle RGB, sia per il diverso trend con la distanza, sia per i valori più bassi trovati per le Carbon-stars.

Un altro studio cinematico basato sull'analisi di Carbon-stars è quello svolto da [van der Marel et al. \(2002\)](#) che dall'analisi delle RV di 1041 stelle conclude che la LMC è caratterizzata da una cinematica da disco, con un valore del rapporto tra velocità di rotazione e dispersione di velocità centrale $V/\sigma = 2.9 \pm 0.9$, che suggerisce l'esistenza di un disco leggermente più spesso rispetto a quello della MW ($V/\sigma \sim 3.9$), allargato ([Alves & Nelson, 2000](#)) e deformato ([Olsen & Salyk, 2002](#); [Nikolaev et al., 2004](#)) a causa dalle forti interazioni mareali di cui risente.

Capitolo 6

Distribuzione di metallicità della LMC

6.1 Risultati

L'abbondanza di Ferro viene generalmente usata come tracciante della metallicità globale, grazie al grande numero di righe misurabili anche a bassa metallicità e in un ampio intervallo di parametri atmosferici, a differenza degli elementi più abbondanti (quali C N O ed elementi α) che invece sono molto più difficili da determinare.

Le abbondanze di Ferro calcolate da GALA sono espresse come numero di atomi di Ferro rispetto al numero di atomi di Idrogeno, ovvero $A(Fe) = \log(N_{Fe}/N_H) + 12$. È consuetudine esprimere le abbondanze riferendole al valore solare, secondo la seguente notazione:

$$\left[\frac{Fe}{H} \right] = A(Fe)_* - A(Fe)_\odot$$

dove il valore di $A(Fe)_\odot = 7.5$ è quello fornito da [Grevesse & Sauval \(1998\)](#).

In tabella 6.1 sono riportati, per ogni campo studiato, i valori caratteristici delle loro distribuzioni di metallicità, quali il numero di stelle misurate, l'abbondanza media e mediana di Ferro, la dispersione dell'intero campione e i valori minimi e massimi. Se si fosse interessati ai risultati specifici per ogni singola stella si possono consultare le tabelle in appendice B, nella quale sono raccolti anche i valori dei parametri atmosferici derivati dalla fotometria, necessari per la misura della metallicità.

In figura 6.1 si mostrano le distribuzioni di metallicità di ogni campo.

I 5 campi più interni (escludendo quindi il campo F1_N1466 che risente della bassa statistica del campione) mostrano alcune caratteristiche comuni:

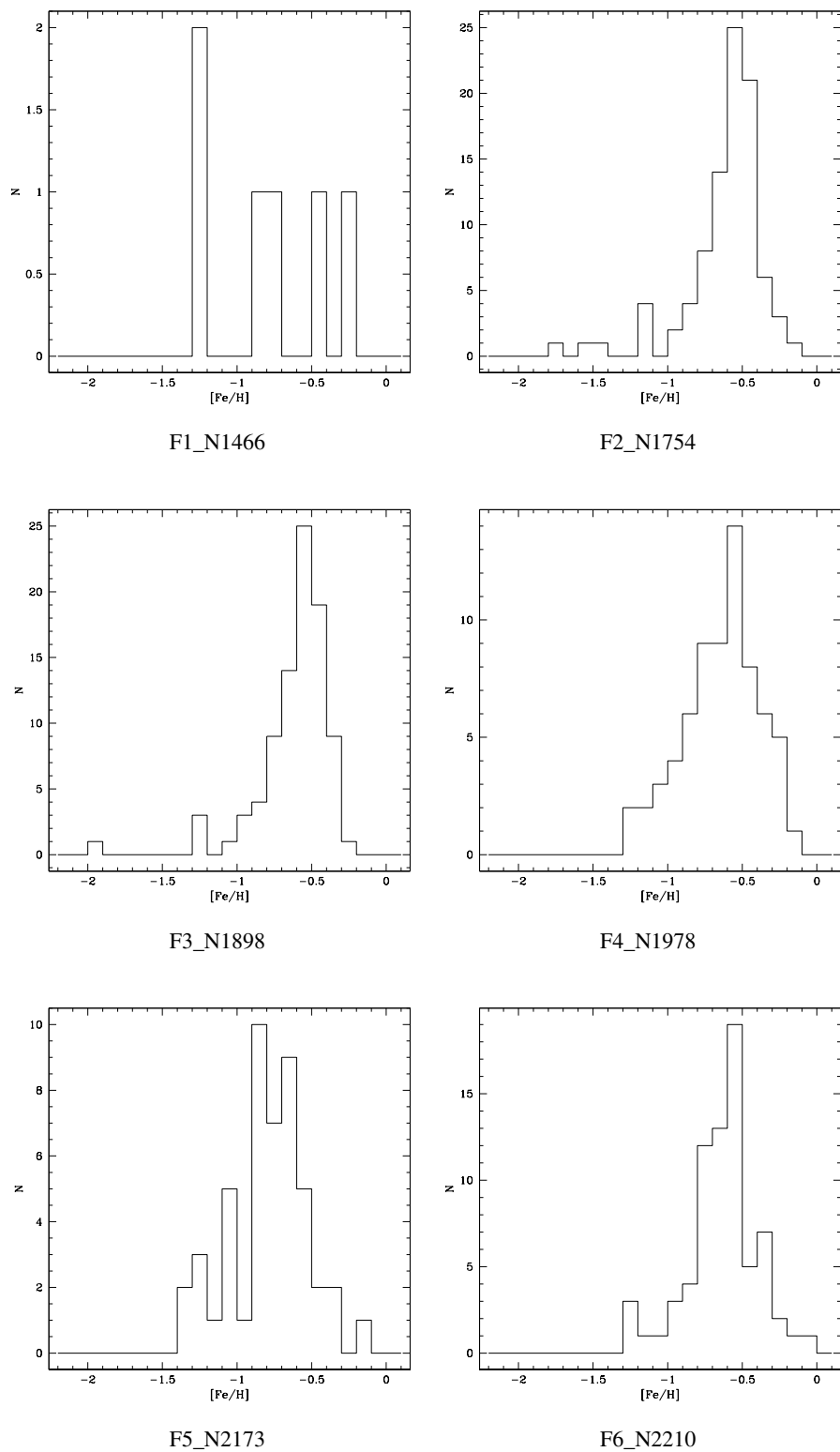


Figura 6.1: Distribuzione delle abbondanze di Ferro nei campi analizzati.

campo	N_{star}	$[Fe/H]_{media}$	$[Fe/H]_{mediana}$	$\sigma_{[Fe/H]}$	$[Fe/H]_{min}$	$[Fe/H]_{max}$
F1_N1466	6	-0.78	-0.76	0.40	-1.24	-0.25
F2_N1754	91	-0.63	-0.55	0.26	-1.72	-0.20
F3_N1898	89	-0.61	-0.54	0.24	-1.94	-0.10
F4_N1978	69	-0.65	-0.61	0.26	-1.29	-0.20
F5_N2173	48	-0.80	-0.79	0.25	-1.39	-0.19
F6_N2210	72	-0.64	-0.62	0.23	-1.29	-0.10

Tabella 6.1: Risultati dell'abbondanza di Ferro nei campi analizzati. Tutti i valori sono scalati al valore solare.

- la presenza di una componente dominante con un chiaro picco attorno a $[Fe/H] \sim -0.5$ dex (ma che può leggermente variare da campo a campo);
- una componente a più bassa metallicità che si presenta come una coda più o meno evidente che può raggiungere metallicità fino a $[Fe/H] \sim -2$ dex;
- l'assenza di stelle a metallicità solare o sovra-solare;
- l'assenza di stelle con metallicità inferiore a $[Fe/H] \sim -2$ dex.

Il basso numero di stelle di LMC osservate nel campo esterno F1_N1466 non permette di fare considerazioni definitive sulla sua distribuzione di metallicità. È possibile comunque fare alcune considerazioni per capire se la distribuzione osservata sia compatibile con le distribuzioni osservate negli altri campi.

Assumendo una distribuzione di metallicità simile a quella degli altri campi (data quindi dalla somma di due gaussiane con picco a $[Fe/H] = -0.5$ e $[Fe/H] = -1.0$), sono stati estratti 10000 campioni random ognuno di dimensione 6 (corrispondente al numero di stelle osservate nel campo F1_N1466) e per ogni campione è stato calcolato il valore medio della metallicità. La probabilità che un campione di 6 stelle estratto da una distribuzione analoga a quelle osservate negli altri campi possa dare un valore medio paragonabile a quello misurato in F1_N1466 è meno del 3%.

È quindi improbabile che la distribuzione delle stelle del campo F1_N1466 possa essere estratta da una distribuzione di metallicità simile a quella degli altri campi della Barra. Questo suggerisce un valore della metallicità media inferiore a quello misurato nei campi della Barra, anche se la bassa statistica limita la nostra capacità di descrivere appropriatamente la distribuzione di metallicità del disco esterno.

I valori del picco principale delle distribuzioni di metallicità risultano abbastanza simili nei campi interni, oscillando tra -0.7 e -0.5 dex, con l'eccezione di F5_N2173 che presenta un valore di ~ -0.8 dex. La figura 6.2 mostra l'andamento

dei valori mediani della distribuzione di metallicità, che coincide con il valore del picco principale della distribuzione (eccetto che per F1_N1466), in funzione della distanza deproiettata dal centro di LMC. Risulta evidente un calo della metallicità del picco principale all'aumentare della distanza dal centro della LMC.

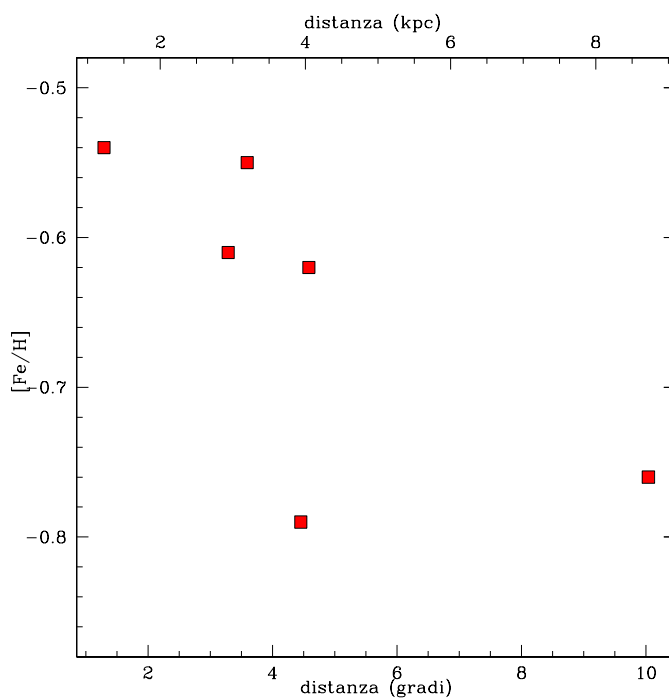


Figura 6.2: Andamento del valore mediano della distribuzione di metallicità di ogni campo in funzione della distanza deproiettata dal centro della LMC.

Le distribuzioni di metallicità sono state inoltre analizzate statisticamente per studiarne la bimodalità (già suggerita da altri lavori quali [Carrera et al., 2008, 2011](#)) attraverso l'algoritmo Gaussian Mixture Modeling (GMM) descritto da [Muratov & Gnedin \(2010\)](#).

Per i campi F2_N1754, F3_N1898 e F6_N2210 la probabilità che le distribuzioni siano compatibili con una distribuzione unimodale è inferiore a 0.1%, mentre per i campi F4_N1978 e F5_N2173 la probabilità è più alta, 22% e 47% rispettivamente, a causa delle poche stelle con metallicità inferiore a -1.0 dex presenti nei campioni.

In tutti i campi la *kurtosis*, che indica l'asimmetria della distribuzione, conferma che le distribuzioni sono asimmetriche verso le basse metallicità, anche quando una chiara bimodalità non è evidente.

In quasi tutti i casi la distribuzione di metallicità può essere ben descritta da una componente a -0.5 dex con dispersione dell'ordine di $0.13 \div 0.15$ dex, e da

una seconda gaussiana con valore del picco vicino a -1.0 dex, ma dispersione significativamente più elevata (tra 0.2 e 0.35 dex).

Le distribuzioni di metallicità dei 5 campi più interni con sovrapposte la somma delle due componenti gaussiane determinate col GMM sono mostrate in figura 6.3.

La distribuzione complessiva di metallicità trovata in questo lavoro è presentata in figura 6.4, dove è ben evidente il basso numero di stelle metal-poor trovate.

Anche in questo caso, è stata studiata la bimodalità della distribuzione complessiva di metallicità sovrapponendole la somma delle due componenti gaussiane determinate col GMM, piccate su un valore di abbondanza in Ferro vicino a -0.5 dex e -1.0 dex.

6.2 Confronto con la letteratura

6.2.1 Osservazioni ad alta risoluzione

Per confrontare i risultati ottenuti in questo lavoro di tesi con quelli di altri studi basati su spettri ad alta risoluzione è stato considerato quello di [Pompéia et al. \(2008\)](#), nel quale vengono studiate 59 stelle giganti situate nel disco a ~ 1.2 kpc ($\sim 1.4^\circ$) dal centro della LMC.

Il lavoro è stato ampliato successivamente da [Van der Swaelmen et al. \(2013\)](#), che confronta in maniera omogenea le abbondanze di [Pompéia et al. \(2008\)](#) con nuove abbondanze di 106 stelle della Barra.

La componente dominante delle due distribuzioni di metallicità risulta essere $[Fe/H] \sim -0.66$ ($\sigma \sim 0.18$ dex) per la Barra, e $[Fe/H] \sim -0.55$ ($\sigma \sim 0.20$ dex) per il campo localizzato nel disco.

Questa differenza sistematica tra le due distribuzioni sembra suggerire una metallicità inferiore nelle regioni interne della LMC, in contrasto con i risultati da spettri a bassa risoluzione ([Carrera et al., 2008, 2011](#)) e con i risultati di questo lavoro, che invece riscontrano una stabilità della metallicità nelle regioni interne della LMC ed un calo verso il bordo del disco interno.

Continuando con il confronto, i risultati trovati in questo lavoro di tesi sono in accordo con quelli di [Lapenna et al. \(2012\)](#), nel quale si sono analizzate 89 stelle della LMC collocate nel campo circostante l'ammasso NGC1786 di coordinate $RA = 74.782563^\circ$ e $Dec = -67.755223^\circ$ e appartenente al disco galattico. Vengono osservate due popolazioni distinte, la principale piccata intorno al valore $[Fe/H] \sim -0.49$ dex e la secondaria centrata su $[Fe/H] \sim -1.07$ dex, in accordo con l'abbondanza di Ferro dei campi più metallici individuati in questo studio, che oltretutto si collocano nelle zone circostanti ad NGC1786. Le due popolazioni comprendono rispettivamente l'84% e il 16% delle stelle.

Un risultato analogo è stato trovato da [Song et al. \(2017\)](#), che analizza spettri ad

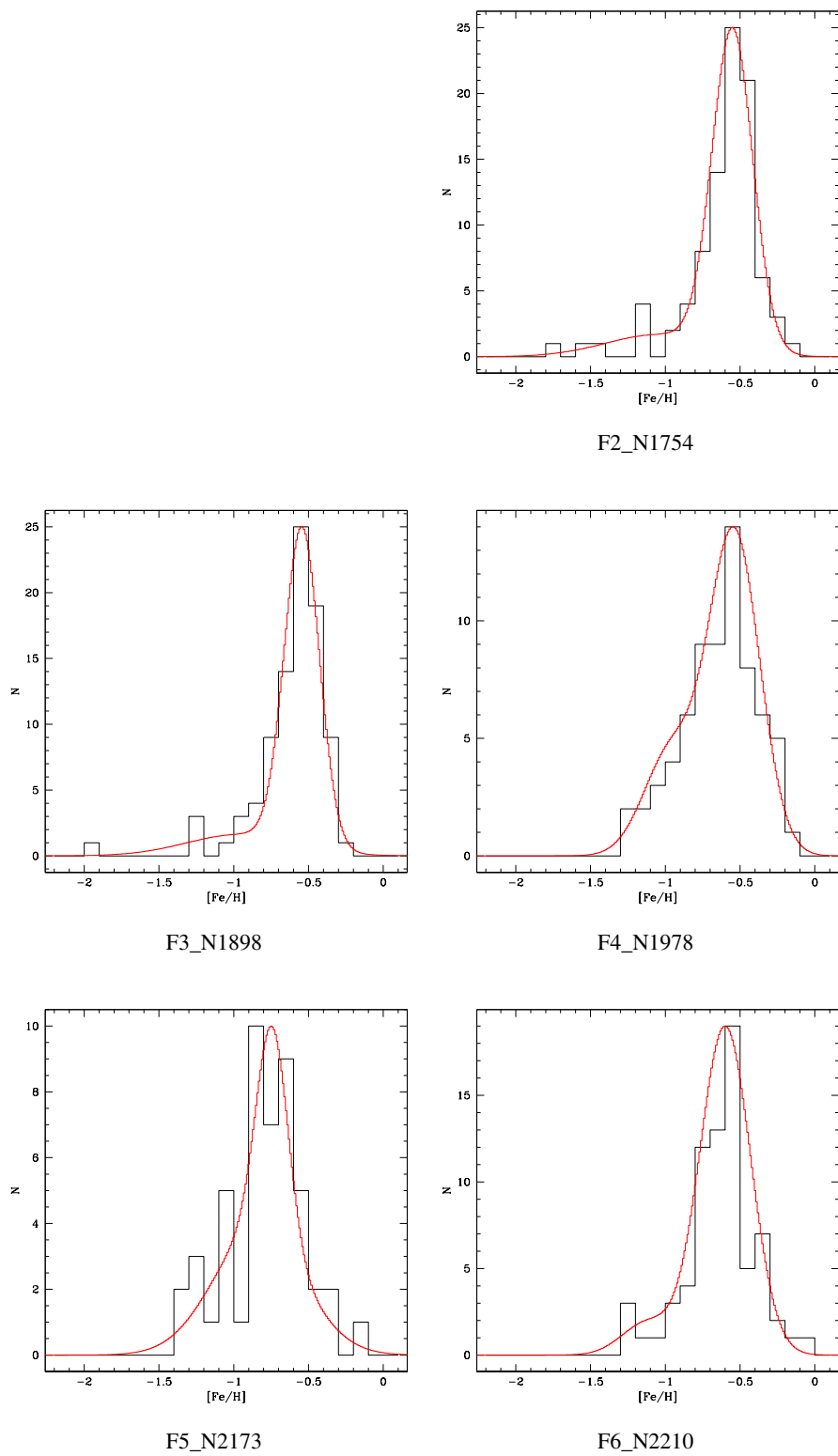


Figura 6.3: Distribuzione delle abbondanze di Ferro nei campi analizzati, con sovrapposta la somma delle due componenti gaussiane determinate col GMM.

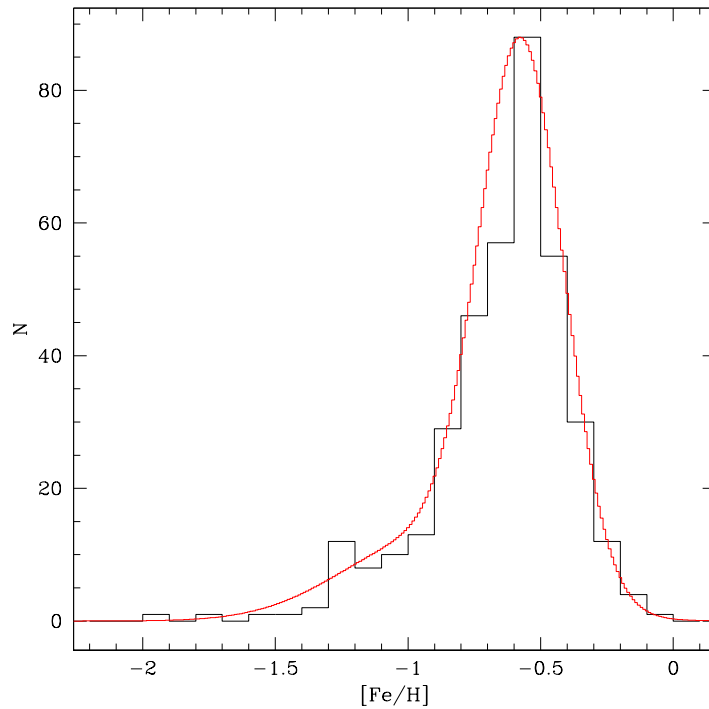


Figura 6.4: Distribuzione complessiva delle abbondanze di Ferro di tutte le stelle analizzate, con sovrapposta la somma delle due componenti gaussiane determinate col GMM.

alta risoluzione di 308 stelle giganti, collocate in due campi vicini al centro fotometrico della Barra della LMC (le stelle di uno dei due campi sono state selezionate da uno studio precedente a bassa risoluzione di [Cole et al. \(2005\)](#)). In entrambi i campi si osserva la presenza di due popolazioni separate in metallicità, piccate a $[Fe/H] = -0.76$ dex e $[Fe/H] = -1.20$ dex con dispersioni rispettivamente pari a $\sigma = 0.28$ e $\sigma = 0.41$, nelle stesse percentuali date da [Lapenna et al. \(2012\)](#). È da notare che la dispersione del picco principale misurata in questo lavoro di tesi è significativamente inferiore (di circa un fattore 2) rispetto a quella trovata da [Song et al. \(2017\)](#). L'assenza di stelle in comune tra i due campioni non permette di comprendere se tale differenza sia reale o dovuta ad una maggiore incertezza nelle misure di [Song et al. \(2017\)](#).

6.2.2 Osservazioni a bassa risoluzione

Studi sistematici della metallicità della popolazione di campo della LMC sono quello di [Cole et al. \(2005\)](#) e [Carrera et al. \(2008\)](#) che analizzano spettri a bassa

risoluzione di stelle giganti, determinando la metallicità mediante relazioni empiriche utilizzando il tripletto del CaII, opportunamente calibrate su ammassi globulari di metallicità nota. Nel primo lavoro vengono studiate 373 stelle collocate intorno al centro della Barra, e si osserva la presenza di 2 popolazioni distinte, dove quella dominante (che racchiude l'89% delle stelle) è centrata intorno ad $[Fe/H] \sim -0.37$ e l'altra a $[Fe/H] \sim -1.08$. Le differenze rispetto al nostro studio, nel quale la metallicità è stata misurata direttamente dalle righe del Ferro, possono essere attribuite al diverso metodo utilizzato, in quanto il tripletto del CaII è un indicatore indiretto di metallicità. Infatti [Van der Swaelmen et al. \(2013\)](#) nel loro studio sull'abbondanza chimica della popolazione della Barra della LMC, confrontano il valore di $[Fe/H]$ che si ricava dal tripletto del CaII con quello ottenuto dall'analisi di spettri ad alta risoluzione (HR), e notano che le abbondanze sono confrontabili fino a circa $[Fe/H] \sim -0.5$. Per metallicità più elevate trovano che $[Fe/H]_{CaT} \geq [Fe/H]_{HR}$, spiegando questa differenza con il fatto che nelle stelle a più alta metallicità il posizionamento del continuo nella regione del tripletto del calcio può risultare difficoltosa e portare ad una sovrastima dell'abbondanza.

Nel lavoro di [Carrera et al. \(2008\)](#) invece, vengono prese in esame stelle giganti appartenenti a 4 campi, collocati a distanza crescente verso nord a 3° , 5° , 6° e 8° dal centro. Le conclusioni a cui sono giunti è che entro 6° dal centro della LMC l'abbondanza di Ferro resta pressoché costante a -0.5 , poi inizia a calare, arrivando ad un valore di -0.8 nel campo più esterno. I risultati sono confrontabili con quelli ricavati nel nostro studio, nel quale si è analizzato il campo F4_N1978 che pur essendo a circa 4° dal centro verso nord, mantiene il valore di abbondanza tipico della popolazione metal-rich.

Lo stesso lavoro è stato poi implementato studiando altri campi in [Carrera et al. \(2011\)](#) dove, dopo aver ricavato l'età delle popolazioni stellati mediante lo studio di CMD e aver trovato la relazione età-metallicità per la LMC, concludono che l'età della popolazione più vecchia è pressoché coeva in tutti i campi dato che la popolazione secondaria resta piccata circa sulla stessa abbondanza di Ferro, mentre l'età della componente giovane aumenta verso l'esterno, in quanto diventa sempre meno metallica. Questo è coerente con quanto trovato in questo lavoro di tesi, e viene giustificato con uno scenario outside-in per la formazione del disco ([Meschin et al., 2014](#)).

Questo tipo di scenario è stato previsto da [Stinson et al. \(2009\)](#) e poi osservato da [Hidalgo et al. \(2011\)](#) per le galassie di piccola massa, di cui la LMC fa parte, in contrapposizione con le galassie a spirale di grande massa, per le quali lo scenario ipotizzato è invece di tipo inside-out.

6.3 Discussione

I risultati ottenuti riguardo la metallicità delle stelle analizzate permettono di affrontare alcune questioni relative all'evoluzione chimica della LMC, in particolare:

1. studiarne la storia di arricchimento chimico alla luce delle informazioni in possesso sulla SFH;
2. identificare possibili gradienti di metallicità;
3. ricercare stelle con metallicità inferiore a $[Fe/H] \sim -2.0$ dex;
4. identificare possibili legami tra cinematica e metallicità nelle diverse popolazioni stellari della LMC.

6.3.1 Arricchimento chimico della LMC

Le caratteristiche delle distribuzioni di metallicità derivate per i 6 campi di LMC studiati in questo lavoro (figura 6.1) possono essere messe in relazione con la SFH della LMC derivata da diversi studi (Holtzman et al., 1999; Smecker-Hane et al., 2002; Harris & Zaritsky, 2009; Rubele et al., 2012). La storia di formazione stellare della LMC può essere schematizzata come segue:

- il primo burst di formazione, databile a 12-13 Gyr fa, è quello responsabile della formazione di una decina di ammassi globulari vecchi presenti nella LMC e delle stelle più vecchie e più metal-poor della galassia;
- successivamente a questo episodio di formazione, la LMC continua a produrre stelle ma ad un tasso poco efficiente;
- dopo questo periodo di quiescenza, un episodio significativo di formazione stellare, responsabile della generazione della maggior parte del contenuto stellare della LMC, avviene circa 4-5 Gyr fa, probabilmente a seguito della cattura mareale della SMC da parte della LMC (Bekki & Chiba, 2005). Questo intenso episodio di formazione stellare è confermato sia da simulazioni numeriche (Bekki & Chiba, 2005) sia dallo studio dei CMD di diverse zone della LMC (Harris & Zaritsky, 2009; Rubele et al., 2012);
- burst successivi (e di intensità inferiore) avvenuti a meno di 2 Gyr, 500 Myr, 100 Myr e 12 Myr fa sono responsabili delle popolazioni più giovani della LMC. Le età di questi burst sono analoghe a quelle stimate dalla SFH della SMC, segno dell'influenza reciproca delle due galassie (Harris & Zaritsky, 2009).

La componente metal-poor presente nelle distribuzioni di metallicità è collegabile al lungo periodo di bassa formazione stellare compreso tra il primo burst e i burst avvenuti circa 4-5 Gyr fa.

La bassa metallicità di queste stelle e la grande dispersione della loro distribuzione sono dovute al lento arricchimento chimico da parte di SNIa e SNII che ha permesso alle generazioni stellari successive di arricchirsi in Ferro. In linea di principio, tra queste stelle potrebbero essercene anche alcune nate nel primo burst di formazione. Infatti, la distribuzione di $[Fe/H]$ degli ammassi globulari vecchi di LMC copre un ampio intervallo di metallicità, tra -2.3 dex e -1.3 dex (Johnson et al., 2006b; Mucciarelli et al., 2010). Risulta però difficile attribuire con sicurezza queste stelle al primo burst o al periodo di quiescenza solo in base alla metallicità.

Inoltre, nei campi dove la bimodalità è più evidente, il picco principale mostra una dispersione piccola ($\sigma_{[Fe/H]} \sim 0.15$ dex), se comparata agli errori tipici sulle singole metallicità (< 0.1 dex). Questo suggerisce che tale episodio di formazione sia stato estremamente efficiente e veloce, non permettendo alle nuove stelle un successivo arricchimento in Ferro.

6.3.2 Gradiente di metallicità

L'analisi presentata in questo lavoro mostra che il picco della distribuzione di metallicità non è costante. In particolare 4 dei 6 campi analizzati (i 3 campi più interni al disco e F4_N1978, quello posto più a nord) hanno un valore di metallicità abbastanza simile, intorno a $[Fe/H] \sim -0.6$, mentre i restanti, posti nella parte sud/sud-est del disco, sembrano concordare con un valore di $[Fe/H] \sim -0.8$, anche se va precisato che F1_N1466 ha un valore di dispersione nettamente superiore agli altri e i risultati sono da considerare con incertezza maggiore.

I risultati appena descritti sono mostrati in figura 6.5 dove sono rappresentate le distribuzioni di metallicità dei 6 campi analizzati nelle posizioni che occupano all'interno della LMC. Il valore mediano di ogni distribuzione è segnato con una linea rossa, mentre le linee blu indicano il valore mediano del campo F3_N1898 localizzato in prossimità della Barra e preso come riferimento.

Questo andamento potrebbe indicare l'esistenza di un qualche gradiente di metallicità all'interno della LMC.

La componente dominante in tutte le distribuzioni di metallicità dei campi analizzati è associabile al burst di formazione stellare avvenuto circa 4-5 Gyr fa. La presenza di una differenza in metallicità per questa componente suggerisce un modello di formazione outside-in, nel quale le componenti centrali si formano successivamente a quelle più esterne, dove quindi l'arricchimento chimico è meno efficiente (Meschin et al., 2014).

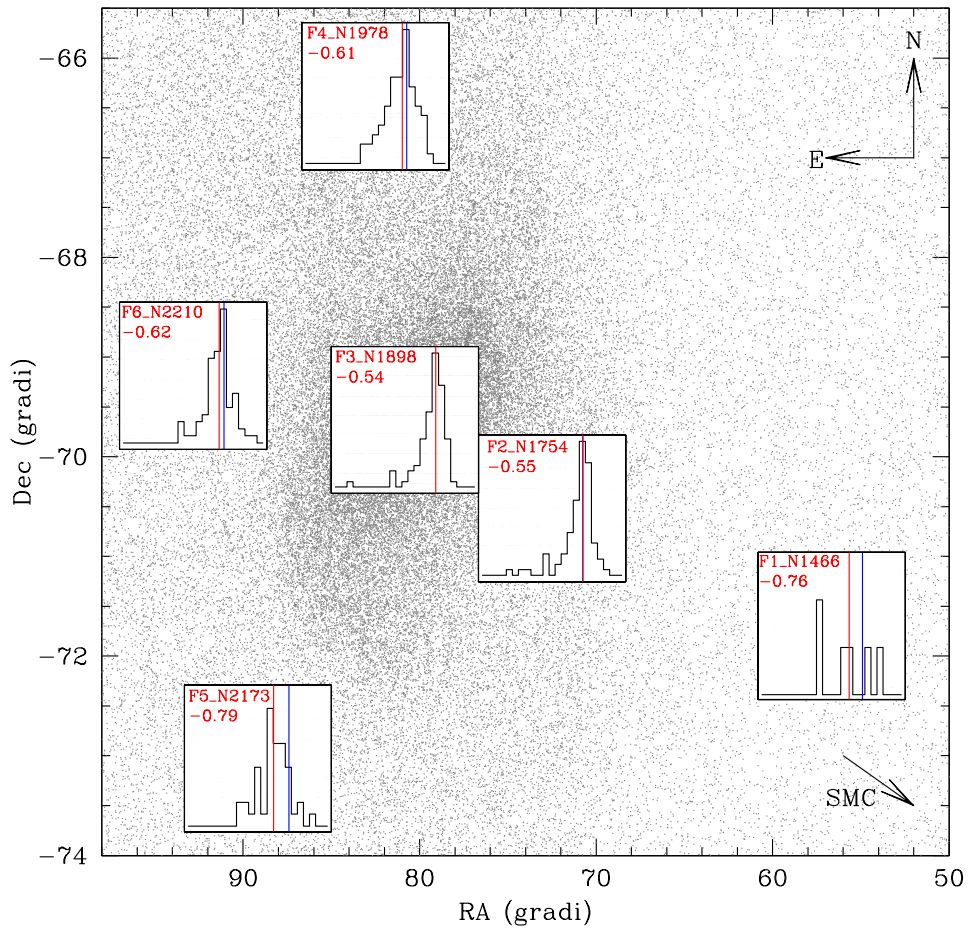


Figura 6.5: Mappa delle stelle giganti della LMC dalla survey 2MASS con sovrapposte le distribuzioni di metallicità dei campi analizzati in questo lavoro. In rosso è segnato il valore mediano della distribuzione di $[Fe/H]$, mentre la linea blu rappresenta il valore mediano del campo centrale F3_N1898.

Si nota, anche dai lavori degli altri autori sopracitati, una disparità tra le metallicità delle regioni a nord e a sud del centro della LMC: in particolare, a grandi distanze dal centro la regione nord resta più metallica rispetto alla parte a sud. Infatti, dal lavoro di [Carrera et al. \(2008\)](#) emerge come nella direzione nord, i campi hanno metallicità confrontabili con quelle centrali fino a circa 6° , mentre il campo F5_N2173 analizzato in questo lavoro, che si trova ad una distanza di $\sim 4^\circ$ dal centro e in direzioni sud, è piccato su un'abbondanza in Ferro di circa 0.2 dex inferiore al valore centrale.

6.3.3 Stelle metal-poor

Uno degli argomenti di ricerca più intriganti riguardo le popolazioni stellari delle Nubi è la ricerca di stelle metal-poor, con metallicità inferiore a $[Fe/H] \sim -2$ dex, sicuramente appartenenti al primo burst di formazione. Le stelle di campo della LMC con minore metallicità scoperte finora raggiungono $[Fe/H] \sim -2.1$ dex ([Van der Swaelmen et al., 2013](#); [Song et al., 2017](#)). Inoltre anche dallo studio degli ammassi globulari non sono state mai osservate stelle con metallicità minore di -2.3 dex. L'ammasso meno metallico osservato è HODGE 11 ([Johnson et al., 2006b](#)), che ha per l'appunto questo valore di metallicità.

Nel campione analizzato non sono state trovate stelle con $[Fe/H] < -2$ dex. Inoltre quelle con metallicità inferiore a $[Fe/H] < -1.5$ dex, riconducibili ai primi episodi di formazione stellare, rappresentano una percentuale inferiore al 1% del campione totale, e sono state osservate solamente nei 2 campi più centrali (F2_N1754 e F3_N1898). Questo potrebbe essere legato alla statistica dato che ci sono almeno una ventina di stelle di differenza tra questi due campi e gli altri.

La percentuale di stelle con $[Fe/H] < -1.5$ dex è in accordo con gli studi precedenti basati su spettri ad alta risoluzione ([Lapenna et al., 2012](#); [Van der Swaelmen et al., 2013](#); [Song et al., 2017](#)) che trovano una frazione analoga per questa componente stellare. Analogo accordo lo si trova anche per la percentuale di stelle del picco principale ($[Fe/H] > -1$ dex), che in questo lavoro corrisponde al 90%.

Come si può notare dalla figura 6.4, malgrado la bassa statistica non si osservano dei veri e propri gap nella distribuzione, a differenza di quello che trovato negli ammassi globulari, ma per le stelle di campo sembra che la formazione stellare sia stata lenta e continua.

Durante il periodo di quiescenza che intercorre tra i primi burst e i successivi burst avvenuti circa 4-5 Gyr fa, la galassia non era ancora in iterazione mareale con la SMC e la MW, quindi è potuta evolvere in isolamento.

6.3.4 Legame tra cinematica e metallicità

Popolazioni con diverse metallicità non mostrano una cinematica distinta. In figura 6.6 si presenta la velocità delle singole stelle (ognuna riscalata rispetto al valore di picco della propria distribuzione di RV in modo da sottrarre la componente rotazionale del disco) in funzione della metallicità.

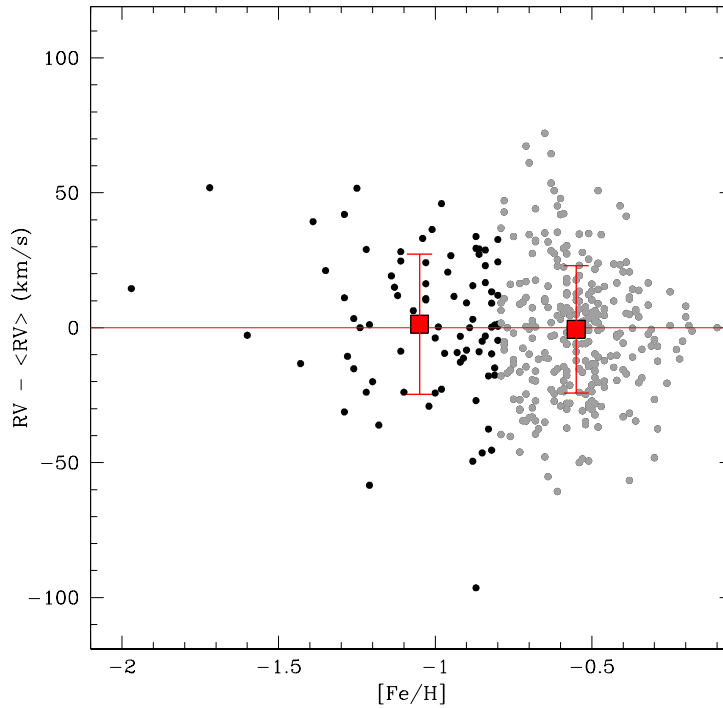


Figura 6.6: RV riscalate rispetto al picco della distribuzione osservata in ciascun campo in funzione della metallicità $[Fe/H]$, per le stelle analizzate in questa tesi. In nero sono state rappresentate le stelle metal-poor e in grigio quelle più metalliche. Il quadrato rosso indica il valore di velocità mediano per ciascun campione, mentre le due barre d'errore rappresentano la dispersione di velocità misurata.

Al fine di evidenziare una possibile differenza nella dispersione di velocità tra le stelle metal-poor e metal-rich il campione osservato è stato diviso in due sottocampioni adottando un taglio in metallicità a $[Fe/H] = -0.8$ dex, rappresentati con due colori diversi in figura 6.6. In ciascun sottocampione abbiamo rispettivamente 84 e 286 stelle (è stata scartata la stella 90557 appartenente a F1_N1466 con velocità $\sim +400$ km/s). Da questo lavoro emerge che la componente metal-rich e dominante mostra una dispersione di velocità comparabile entro gli errori con quella delle stelle metal-poor, rispettivamente pari a $\sigma_{RV} = 23.6 \pm 1.0$ km/s e

$\sigma_{RV} = 26.0 \pm 2.0 \text{ km/s}$. Questi valori sono stati rappresentati in figura 6.6 attraverso le due barre d'errore dei quadrati rossi, posizionati nel valore mediano della velocità nelle due sottopopolazioni.

A differenza del disco delle galassie, supportato dalla rotazione, le stelle di campo e gli ammassi globulari che appartengono all'alone sferoidale sono supportati da grandi dispersione di velocità (cioè sono "cinematicamente caldi").

L'alone è sempre molto difficile da osservare per la sua bassa luminosità, in quanto solo poche stelle ve ne fanno parte (solitamente l'1% della massa stellare è nell'alone).

Da alcuni lavori basati sullo studio di variabili a lungo periodo è emersa la possibile esistenza di un alone stellare vecchio e caldo, anche se non è ancora stata fornita la conferma definitiva (Hughes et al., 1991; Minniti et al., 2003). D'altra parte dallo studio di 200 stelle giganti appartenenti a 28 ammassi popolosi della LMC, attraverso la determinazione della RV con l'analisi spettrale dal tripletto del CaII, Grocholski et al. (2006) non ricavano nessuna indicazione di cinematica d'alone.

Nel lavoro di Carrera et al. (2011) emerge che la dispersione di velocità è maggiore per le stelle vecchie e metal-poor ($\sigma = 26.8 \pm 1.4 \text{ km/s}$) rispetto a quelle giovani e metalliche ($\sigma = 20.9 \pm 1.2 \text{ km/s}$). Malgrado questo, viene ribadito che non c'è alcuna evidenza della presenza dell'alone caldo di stelle, in quanto l'aumento non è abbastanza significativo.

Nel caso di un alone cinematicamente caldo di stelle vecchie e metal-poor dovremmo misurare una dispersione di velocità maggiore per le stelle nella coda a bassa metallicità, rispetto a quella misurata per le stelle che popolano il picco principale. A causa della scarsa statistica, in questo lavoro di tesi non è possibile escludere la presenza di un alone.

Capitolo 7

Conclusioni

7.1 Risultati

Questo lavoro presenta il più ampio campione spettroscopico ad alta risoluzione di stelle giganti rosse di LMC analizzato in maniera omogenea esistente finora.

In questo lavoro di tesi sono stati analizzati spettri ad alta risoluzione, acquisiti con lo spettrografo multi-oggetto FLAMES del Very Large Telescope, per circa 400 giganti rosse della LMC distribuite in 6 differenti regioni spaziali della galassia.

I principali risultati ottenuti in questo studio sono:

- Le RV delle stelle di LMC variano tra $+168$ e $+395$ km/s . Il picco delle distribuzioni dei singoli campi cambia a seconda della loro posizione nella LMC, in particolare i campi situati a nord-est (F4_N1978 e F6_N2210) hanno una RV maggiore dei campi più vicini alla Barra (F2_N1754 e F3_N1898) e del campo a sud-est (F5_N2173). Il campo nel quale si è osservata la RV media minore è quello più esterno (F1_N1466), anche se in questa regione sono state campionate solamente 7 stelle appartenenti alla LMC. Questo andamento è compatibile con un effetto di rotazione della galassia, mentre la presenza di rotazione sistemica era già stata suggerita da mappe di idrogeno neutro e da spettri a bassa risoluzione di stelle di RGB nella regione nord della LMC, l'evidenza trovata in questo lavoro di tesi è la prima basata su spettri ad alta risoluzione, ottenuta campionando sia la regione nord che la regione sud della galassia.
- Escludendo il campo F1_N1466 per la bassa statistica, il valore della dispersione di velocità misurata nei campi della LMC analizzati si mantiene costante attorno a ~ 25 km/s , con l'unica eccezione del campo F6_N2210 per il quale si è misurato un valore di ~ 19 km/s . I valori di dispersione di velocità misurati per i 4 campi più interni sono in accordo con quelli otte-

nuti in altri lavori basati su spettri ad alta risoluzione (Pompéia et al., 2008; Lapenna et al., 2012; Song et al., 2017) e sembrano suggerire che il valore resti costante fino a circa 5 kpc dal centro, in contrasto col risultato delle survey a bassa risoluzione che suggeriscono una decrescita della dispersione di velocità tra 2 e 6 kpc dal centro.

Il valore minore riscontrato in F6_N2210 potrebbe comunque indicare una decrescita per distanze maggior di 5 kpc dal centro.

- Le distribuzioni di metallicità dei 5 campi più interni mostrano una componente dominante ad alta metallicità ($[Fe/H] \sim -0.8/-0.6$) che rappresenta quasi il 90% della popolazione, ed una componente secondaria che si estende fino a $[Fe/H] \sim -2$. La componente principale è ragionevolmente collegata con il burst di formazione stellare avvenuto circa 4-5 Gyr fa, associato alla cattura mareale della SMC da parte della LMC. La piccola dispersione di metallicità di questa popolazione suggerisce che la formazione stellare sia stata estremamente efficiente. La componente metal-poor è invece associata al periodo di bassa formazione stellare compreso tra il primo burst di formazione e quello avvenuto 4-5 Gyr fa.
- È stata osservata una differenza tra i valori dei picchi della distribuzione di metallicità nei vari campi, che potrebbe indicare l'esistenza di un gradiente. In particolare per i 3 campi più interni (F2_N1754, F3_N1898, F6_N2210) e il campo più a nord (F4_N1978) è stata misurata un'abbondanza in Ferro intorno a $[Fe/H] \sim -0.6$, mentre i campi a sud della Barra (F1_N1466 e F5_N2173) mostrano il picco a $[Fe/H] \sim -0.8$ dex. Dato che questa componente è associabile al burst di formazione avvenuto circa 4-5 Gyr fa, la presenza di un gradiente suggerisce un modello di formazione outside-in, nel quale le componenti centrali si formano successivamente a quelle esterne (Meschin et al., 2014).
- Non sono state trovate stelle con metallicità inferiore a -2.0 dex. Quelle sicuramente riconducibili ai primi episodi di formazione, ossia quelle con $[Fe/H] < -1.5$ rappresentano meno dell'1% del campione di target analizzati e sono state osservate solamente in F2_N1754 e F3_N1898, i due campi più centrali. Queste percentuali, paragonabili a quelle già ottenute in studi precedenti, suggeriscono che la componente con $[Fe/H] < -2$, corrispondente alle prime stelle formatesi nella LMC, è estremamente esigua.
- Le stelle appartenenti al picco principale della distribuzione di metallicità presentano una dispersione di velocità ($\sigma_{RV} = 23.6 \pm 1.0$ km/s) paragona-

bile a quella misurata nelle stelle con più bassa metallicità ($\sigma_{RV} = 26.0 \pm 2.0 \text{ km/s}$). Questo suggerisce l'assenza di sottostrutture cinematicamente distinte nella LMC.

7.2 **Sviluppi futuri**

Il campione di spettri analizzati in questo elaborato rappresenta circa un terzo del campione totale di spettri FLAMES di stelle di LMC presenti in archivio e non ancora analizzati.

Il completamento dell'analisi chimica e cinematica di questo enorme dataset di spettri permetterà:

- di caratterizzare in maniera più precisa il pattern di rotazione della LMC campionando altre regioni della galassia;
- di confermare se la dispersione di velocità rimane effettivamente costante lungo il disco della LMC ed eventualmente decresce nelle regioni esterne;
- di comprendere il ruolo dei principali contributori (SNIa, SNII e stelle di AGB) all'arricchimento chimico della LMC, attraverso la misura diretta di elementi α , del picco del Ferro e di cattura neutronica (un tale lavoro è oggi disponibile per appena un centinaio di stelle).

L'analisi cinematica e chimica dell'intero dataset di spettri FLAMES oggi a disposizione ricoprirà un ruolo fondamentale anche alla luce delle future osservazioni delle stelle di LMC da parte di MOONS, uno spettrografo multioggetto del VLT che vedrà la prima luce nel 2020. MOONS permetterà di osservare simultaneamente 1000 oggetti per esposizione, anche se campionerà solamente la regione del tripletto del calcio (con $R \sim 10000$) e la banda H (con $R \sim 20000$). Il campione FLAMES sarà quindi un dataset di calibrazione fondamentale per MOONS, perché basato su spettri ottici ad alta risoluzione.

Appendice A

Dati fotometrici

Tabella A.1: Dati fotometrici dei target del campo F1_N1466 dai cataloghi 2MASS e SOFI. In tabella sono riportati solo i valori di magnitudini delle bande utilizzate per la determinazione dei parametri atmosferici. Nell'ultima colonna c'è un'indicazione sulla qualità dei dati fotometrici 2MASS: dati di ottima qualità vengono segnalati con la lettera A, quelli incerti vengono segnalati con la lettera U, mentre quelle indicati con B riportano dei valori di SNR minori, ossia di peggiore qualità. Anche i flag D ed E rappresenta un altro grado di inaccuratezza dell'informazione fotometrica. Le lettere sono relative alla banda J e K rispettivamente.

* stelle appartenenti all'ammasso globulare, precedentemente analizzate e non considerate in questo lavoro.

ID	J	σ_J	K	σ_K	RA (deg)	Dec (deg)	Flag 2MASS
15*	56.1950092	-71.6422227	14.413	0.008	13.589	0.008	0
36	56.1578524	-71.6385789	13.833	0.008	13.473	0.008	0
74	56.1319877	-71.6383204	14.990	0.009	14.126	0.008	0
212*	56.1230840	-71.6737005	14.115	0.006	13.378	0.006	0
233	56.0580668	-71.6898625	14.969	0.013	14.187	0.010	0
249*	56.1624891	-71.6677621	13.536	0.005	12.621	0.006	0
282	56.2570023	-71.6660737	12.444	0.010	11.941	0.012	0
323*	56.1449543	-71.6692279	15.161	0.009	14.492	0.008	0
90004	56.1208230	-71.8185880	14.289	0.029	13.996	0.066	AA
90009	56.2639550	-71.7458880	14.613	0.033	13.955	0.061	AA
90015	56.2779610	-71.6895140	14.744	0.028	14.292	0.090	AA
90016	56.1165100	-71.6050490	15.714	0.060	14.907	0.123	AB
90023	55.8562000	-71.6200640	15.117	0.045	14.621	0.104	AA
90038	55.9124870	-71.5527570	15.640	0.054	14.880	0.125	AB

90044	55.7640160	-71.5008090	15.446	0.043	14.624	0.099	AA
90057	56.4142370	-71.8192060	11.440	0.019	11.125	0.019	AA
90060	56.3020190	-71.5861970	14.829	0.035	13.974	0.064	AA
90063	55.6656180	-71.6277770	13.917	0.029	13.403	0.041	AA
90066	56.1067160	-71.5801240	14.260	0.023	13.858	0.051	AA
90068	56.1031480	-71.5120850	15.455	0.052	14.608	0.099	AA
90069	56.1609570	-71.7018050	14.373	0.025	13.520	0.039	AA
90076	56.4767310	-71.6141820	15.265	0.046	14.431	0.091	AA
90079	56.0193080	-71.5454640	13.682	0.035	13.181	0.039	AA
90084	56.5405130	-71.6346130	15.159	0.047	14.545	0.089	AA
90090	56.3299660	-71.5896450	15.029	0.032	14.134	0.066	AA
90113	55.6495660	-71.6324010	12.363	0.025	11.520	0.023	AA
90115	55.8722950	-71.5265270	15.782	0.060	14.823	0.114	AB
90117	56.0013190	-71.5311580	13.769	0.025	12.789	0.026	AA
90122	56.1802480	-71.5730820	14.731	0.037	13.922	0.052	AA
90130	55.8197230	-71.8067550	15.233	0.046	14.802	0.120	AB
90139	56.1302820	-71.5191500	13.896	0.025	13.363	0.037	AA
90166	56.2368920	-71.5075910	14.569	0.025	14.343	0.077	AA
90181	56.2857540	-71.5418010	14.917	0.037	14.293	0.086	AA
90182	55.5730600	-71.6865160	14.400	0.031	13.524	0.034	AA
90183	55.8596910	-71.6859360	14.648	0.025	14.063	0.061	AA
90192	55.9050110	-71.7585910	15.701	0.059	14.969	0.136	AB
90196	56.0691040	-71.7333370	15.081	0.037	14.448	0.092	AA
90200	56.1432570	-71.5417940	12.048	0.021	11.781	0.023	AA
90214	56.1049950	-71.4689870	11.011	0.023	10.620	0.026	AA
90216	56.5263700	-71.6915130	14.881	0.038	14.469	0.082	AA
90222	55.6383190	-71.7107930	15.005	0.037	14.213	0.070	AA
90230	56.4247280	-71.7752840	15.270	0.045	14.395	0.082	AA
90233	56.1090830	-71.4632800	13.425	0.025	12.953	0.033	AA
90238	56.4998060	-71.7079320	15.297	0.042	14.854	0.119	AB
90243	56.2924650	-71.5087430	11.421	0.019	11.036	0.021	AA
90251	56.1621430	-71.7254790	15.246	0.042	14.756	0.109	AB
90255	56.2426970	-71.6914290	15.220	0.037	14.403	0.095	AA
90257	56.4678130	-71.6796950	12.714	0.021	12.156	0.024	AA
90258	55.9279740	-71.6803210	15.189	0.032	14.458	0.092	AA
90259	56.6506700	-71.7065730	15.803	0.077	14.870	0.127	AB
90268	56.0626890	-71.7621310	15.093	0.032	14.192	0.070	AA
90270	56.6180140	-71.6991040	14.039	0.026	13.532	0.041	AA
90271	56.2126970	-71.7897420	12.366	0.025	11.931	0.024	AA
90273	56.2012910	-71.7438350	14.749	0.031	13.860	0.048	AA

90277	56.2092560	-71.7713700	15.383	0.050	14.686	0.107	AA
90285	56.6355420	-71.7654500	14.744	0.039	13.835	99.99	AU
90287	56.1601070	-71.5894240	15.852	0.067	14.911	0.121	AB
90290	56.6015480	-71.6155170	15.683	0.069	14.751	0.112	AB
90300	55.9265970	-71.7947010	15.476	0.052	14.597	0.117	AB
90303	56.4430450	-71.6187670	14.312	0.030	14.106	0.062	AA
90307	56.1938400	-71.8138730	14.328	0.031	13.552	0.050	AA
90310	56.5065260	-71.7219240	14.463	0.028	14.111	0.068	AA
90313	55.9116080	-71.7071530	14.859	0.032	14.438	0.084	AA
90321	56.4625540	-71.5827870	13.225	0.023	12.345	0.021	AA
90322	55.6934590	-71.5620730	14.138	0.026	13.325	0.034	AA
90326	56.2625370	-71.5150760	13.950	0.021	13.063	0.034	AA
90331	56.6098760	-71.6332860	13.363	0.021	12.964	0.026	AA
90332	56.3562410	-71.5388410	14.504	0.030	14.046	0.058	AA
90337	56.1996060	-71.7772900	15.523	0.047	14.553	0.095	AA
90338	56.4375630	-71.7116240	14.283	0.041	13.398	0.050	AA
90353	55.6981180	-71.6567080	14.908	0.030	14.116	0.064	AA
90355	56.4995130	-71.7490160	14.387	0.026	13.575	0.047	AA
90359	56.7180610	-71.7730260	15.545	0.053	14.659	0.120	AB
90371	55.6039370	-71.6561810	14.776	0.039	14.174	0.066	AA
90376	55.9226820	-71.5968630	14.513	0.026	14.117	0.074	AA
90384	56.3127630	-71.5151980	15.145	0.046	14.308	0.088	AA
90397	56.3641390	-71.7385030	12.194	0.019	11.771	0.019	AA
90430	55.9748720	-71.7982100	13.917	0.025	13.441	0.037	AA
90459	56.5761230	-71.7479860	15.327	0.039	14.654	0.102	AA
90461	56.2277990	-71.5462340	14.038	0.018	13.369	0.033	AA
90466	55.8854090	-71.6422420	14.915	0.035	14.079	0.060	AA
90479	55.9917730	-71.6815410	14.225	0.026	13.453	0.033	AA
90482	56.0244290	-71.8234180	15.626	0.051	14.747	0.110	AB
90484	56.0072460	-71.8075560	11.671	0.025	11.364	0.019	AA
90487	55.8646400	-71.8229520	15.376	0.059	14.730	0.109	AB
90490	56.3602700	-71.8261030	13.220	0.018	12.894	0.027	AA
90493	55.8553490	-71.5808560	13.921	0.026	13.565	0.033	AA
90494	56.3025700	-71.4956670	14.226	0.024	13.812	0.055	AA
90501	56.2881860	-71.8155290	14.958	0.036	14.149	0.067	AA
90506	55.9528120	-71.7988050	14.543	0.032	13.701	0.056	AA
90508	55.8993190	-71.5369950	14.902	0.032	14.646	0.101	AA
90524	55.7243940	-71.7567900	14.497	0.025	13.667	0.045	AA
90528	56.2249700	-71.7359090	12.430	0.023	11.946	0.024	AA
90541	56.1104070	-71.5064620	14.837	0.028	14.172	0.070	AA

90552	55.8036120	-71.5006100	12.451	0.019	12.113	0.023	AA
90553	56.0452630	-71.5572360	14.381	0.037	13.522	0.054	AA
90557	56.3930810	-71.5491490	15.295	0.045	14.722	0.113	AB
90559	56.0873730	-71.7800290	14.368	0.029	13.601	0.043	AA
90571	55.8093070	-71.7805400	15.251	0.047	14.448	0.092	AA
90582	56.5574090	-71.7845150	14.218	0.023	13.577	0.051	AA
90583	55.9173060	-71.7615430	11.871	0.019	11.083	0.017	AA
90592	56.3200130	-71.5219350	14.890	0.026	14.041	0.053	AA
90597	56.6149580	-71.5190430	14.282	0.030	13.728	0.047	AA
90609	55.9172920	-71.7532200	15.390	0.054	14.691	0.104	AA
90611	56.1560460	-71.7118680	14.545	0.031	14.038	0.052	AA
90619	56.2408030	-71.8227310	12.135	0.023	11.328	0.021	AA
90622	56.1168310	-71.8631900	14.848	0.028	14.049	0.059	AA
90624	56.2591250	-71.8605730	15.670	0.059	14.897	0.144	AB
90628	55.9076410	-71.5029530	15.071	0.032	14.381	0.081	AA
90629	56.1957430	-71.6103590	13.670	0.025	13.025	0.033	AA

Tabella A.2: Dati fotometrici dei target del campo F2_N1754 dai cataloghi 2MASS e SOFI. Per ulteriori informazioni leggere la didascalia della tabella [A.1](#).

ID	J	σ_J	K	σ_K	RA (deg)	Dec (deg)	Flag 2MASS
184	14.527	0.007	13.615	0.010	73.606716	-70.467977	0
356	14.251	0.007	13.377	0.007	73.558971	-70.422077	0
377	14.363	0.009	13.475	0.053	73.549539	-70.472259	0
411	14.099	0.006	13.144	0.008	73.539007	-70.415755	0
515	14.767	0.010	13.882	0.013	73.486856	-70.455609	0
775	14.377	0.007	13.427	0.007	73.522379	-70.422288	0
90026	14.884	0.049	13.931	0.064	73.383260	-70.628273	AA
90033	14.322	0.026	13.267	0.039	73.654765	-70.631248	AA
90091	14.638	0.040	13.833	0.064	73.438597	-70.605164	AA
90095	14.409	0.030	13.384	0.044	73.548588	-70.609886	AA
90191	13.656	0.028	12.539	0.029	73.071497	-70.529076	AA
90227	14.446	0.035	13.411	0.057	73.389816	-70.599731	AA
90323	14.667	0.035	13.792	0.049	73.450933	-70.389725	AA
90389	14.560	0.034	13.513	0.051	74.156167	-70.425156	AA
90393	14.758	0.042	13.813	0.059	73.047141	-70.530121	AA
90477	14.585	0.038	13.732	0.053	73.501423	-70.596420	AA
90532	13.845	0.026	12.813	0.034	73.341964	-70.371452	AA
90551	14.020	0.024	12.971	0.032	73.615523	-70.522469	AA

90574	14.557	0.032	13.658	0.053	73.360388	-70.613503	AA
90616	13.328	0.020	12.244	0.025	73.140386	-70.537003	AA
90844	14.515	0.034	13.515	0.045	73.705260	-70.352966	AA
90859	14.005	0.032	12.962	0.042	73.929990	-70.429565	AA
90883	14.394	0.035	13.413	0.042	74.117123	-70.415764	AA
90928	14.457	0.045	13.370	0.046	73.480036	-70.503372	AA
90998	13.846	0.026	12.950	0.038	74.048166	-70.417442	AA
91005	14.249	0.030	13.187	0.036	73.642910	-70.601601	AA
91020	14.204	0.035	13.300	0.045	73.229153	-70.514565	AA
91022	14.051	0.025	13.002	0.034	73.919261	-70.283264	AA
91158	14.930	0.050	13.878	0.060	73.676963	-70.473824	AA
91210	13.872	0.023	12.930	0.039	73.489850	-70.487701	AA
91227	14.776	0.038	13.833	0.059	73.864794	-70.266823	AA
91237	14.474	0.036	13.469	0.050	73.140221	-70.529419	AA
91247	14.600	0.039	13.778	0.053	73.500321	-70.370461	AA
91346	14.130	0.031	13.097	0.038	73.329425	-70.422462	AA
91397	14.248	0.030	13.342	0.034	73.693503	-70.311028	AA
91444	14.478	0.036	13.709	0.048	73.975891	-70.323807	AA
91535	13.400	0.017	12.201	0.025	73.561564	-70.354881	AA
91610	14.034	0.026	13.066	0.029	73.523292	-70.234009	AA
91671	14.702	0.039	13.554	0.042	74.021272	-70.555557	AA
91701	14.612	0.048	13.768	0.055	73.627156	-70.303139	AA
91773	14.333	0.031	13.531	0.039	73.499204	-70.335098	AA
91796	13.517	0.024	12.541	0.026	73.847185	-70.468018	AA
91819	13.711	0.030	12.742	0.029	73.609785	-70.322556	AA
91847	14.203	0.055	13.172	0.051	73.658093	-70.331657	AA
91852	14.415	0.031	13.427	0.043	73.825975	-70.610023	AA
91881	14.343	0.030	13.404	0.049	73.318502	-70.452988	AA
91905	13.995	0.032	13.022	0.034	73.016818	-70.504097	AA
91909	14.428	0.036	13.443	0.046	74.097127	-70.496323	AA
91947	14.307	0.036	13.283	0.037	73.921447	-70.364868	AA
91949	13.528	0.028	12.440	0.032	73.983230	-70.564697	AA
91987	13.372	0.018	12.386	0.028	73.056788	-70.334305	AA
91994	14.492	0.034	13.622	0.054	73.715764	-70.402359	AA
91999	14.400	0.036	13.392	0.045	73.679050	-70.536110	AA
92024	14.504	0.040	13.598	0.050	73.570270	-70.340660	AA
92026	13.705	0.025	12.670	0.034	74.126391	-70.464340	AA
92029	14.463	0.040	13.471	0.046	73.222446	-70.456902	AA
92034	14.565	0.038	13.614	0.044	73.298038	-70.308022	AA
92066	14.483	0.031	13.494	0.044	73.170191	-70.455910	AA

92068	14.914	0.044	13.959	0.063	74.148823	-70.393639	AA
92113	14.450	0.034	13.352	0.045	73.449440	-70.300125	AA
92129	14.805	0.043	13.772	0.059	73.565994	-70.371086	AA
92219	13.703	0.027	12.642	0.032	73.216080	-70.468811	AA
92274	14.617	0.039	13.763	0.046	73.162144	-70.483940	AA
92278	14.472	0.036	13.519	0.043	73.824973	-70.302124	AA
92323	14.601	0.042	13.563	0.053	73.565976	-70.230263	AA
92344	14.476	0.038	13.430	0.041	73.140949	-70.417740	AA
92349	14.106	0.025	13.051	0.029	74.039585	-70.455811	AA
92358	14.673	0.031	13.930	0.068	73.663856	-70.489136	AA
92359	14.431	0.049	13.588	0.057	73.592276	-70.557266	AA
92362	13.751	0.030	12.678	0.028	73.510572	-70.500092	AA
92381	14.385	0.031	13.423	0.043	73.101536	-70.492043	AA
92424	14.593	0.035	13.721	0.050	73.561059	-70.388252	AA
92453	14.431	0.031	13.342	0.048	74.092458	-70.536034	AA
92518	14.524	0.028	13.701	0.053	73.478833	-70.571335	AA
92525	14.673	0.034	13.662	0.051	73.336097	-70.334084	AA
92592	14.717	0.037	13.889	0.059	73.257191	-70.390663	AA
92612	14.021	0.033	13.146	0.043	73.869210	-70.297348	AA
92613	14.490	0.031	13.483	0.041	73.773771	-70.255554	AA
92624	14.336	0.035	13.244	0.042	73.237960	-70.345535	AA
92628	13.843	0.024	12.821	0.036	73.818638	-70.616829	AA
92647	13.997	0.032	12.882	99.99	73.186873	-70.354988	AU
92671	14.876	0.074	13.786	0.092	73.745977	-70.328522	AA
92674	14.436	0.035	13.618	0.052	72.952472	-70.428101	AA
92701	14.273	0.031	13.199	0.038	73.619768	-70.583244	AA
92708	14.321	0.033	13.295	0.038	73.741296	-70.414993	AA
92761	13.719	0.026	12.805	0.033	74.017728	-70.510124	AA
92769	14.603	0.045	13.638	0.052	73.897613	-70.296074	AA
92790	14.501	0.036	13.520	0.043	73.035986	-70.459526	AA
92812	14.722	0.034	13.720	0.049	73.502227	-70.304214	AA
92821	14.354	0.037	13.364	0.037	73.805211	-70.305908	AA
92852	14.838	0.063	13.931	0.065	73.701053	-70.253754	AA
92861	14.659	0.040	13.694	0.053	73.700241	-70.463211	AA
92876	14.159	0.022	13.165	0.036	73.325698	-70.503494	AA
92895	13.809	0.026	12.843	0.033	73.795428	-70.418480	AA
92905	14.891	0.042	13.935	0.063	73.763972	-70.593369	AA
92925	14.905	0.042	13.935	0.069	73.145620	-70.331688	AA
92948	14.666	0.033	13.759	0.048	73.756218	-70.307533	AA
92958	14.540	0.026	13.518	0.041	73.864416	-70.353828	AA

92960	14.623	0.047	13.568	0.043	73.898998	-70.356102	AA
92989	14.093	0.028	13.101	0.037	73.360742	-70.431252	AA
93004	13.781	0.025	12.693	0.033	73.904837	-70.401382	AA
93046	14.697	0.049	13.853	0.068	73.134581	-70.488846	AA
93144	14.600	0.036	13.666	0.053	73.350626	-70.308899	AA
93145	14.680	0.042	13.819	0.062	73.231179	-70.437164	AA
93155	14.462	0.042	13.583	0.046	73.113003	-70.475212	AA
93156	14.145	0.030	13.061	0.034	73.082073	-70.497643	AA
93201	14.643	0.034	13.742	0.050	73.889434	-70.311745	AA
93209	14.806	0.043	13.744	0.059	73.309352	-70.322128	AA
93214	13.870	0.023	12.893	0.033	73.645381	-70.372879	AA
93232	13.594	0.023	12.488	0.029	74.019474	-70.413452	AA
93233	14.247	0.033	13.300	0.041	73.786035	-70.350906	AA
93265	14.745	0.037	13.883	0.059	73.177030	-70.428574	AA

Tabella A.3: Dati fotometrici dei target del campo F3_N1898 dai cataloghi 2MASS e SOFI. Per ulteriori informazioni leggere la didascalia della tabella [A.1](#).

ID	J	σ_J	K	σ_K	RA (deg)	Dec (deg)	Flag 2MASS
137	14.422	0.007	13.423	0.008	79.2643931	-69.6458726	0
283	14.843	0.011	13.980	0.008	79.2430153	-69.6875991	0
289	13.893	0.008	12.960	0.008	79.2422515	-69.6799418	0
293*	14.304	0.006	13.404	0.005	79.2416712	-69.6425968	0
384	13.903	0.007	12.940	0.008	79.2294757	-69.6873740	0
489	14.864	0.011	13.997	0.011	79.2123859	-69.6905271	0
574	14.480	0.007	13.632	0.009	79.2031706	-69.6204989	0
592	14.724	0.009	13.911	0.008	79.2008881	-69.6372529	0
834	13.849	0.008	12.848	0.006	79.1683273	-69.6419506	0
835*	13.887	0.009	12.910	0.005	79.1683020	-69.6702715	0
858	14.931	0.009	13.996	0.009	79.1653689	-69.6298902	0
893	14.508	0.007	13.521	0.006	79.1608275	-69.6448096	0
902*	14.296	0.008	13.460	0.008	79.1600383	-69.6909847	0
1091	13.804	0.008	12.766	0.008	79.1333258	-69.6626826	0
1379	13.964	0.012	13.024	0.011	79.1007201	-69.6312488	0
1452	14.724	0.012	13.781	0.011	79.0915368	-69.6512351	0
1563	14.729	0.017	13.796	0.016	79.0772513	-69.6362733	0
2009	14.317	0.007	13.474	0.008	79.2222740	-69.6412280	0
2162	14.678	0.009	13.758	0.006	79.1887267	-69.6752758	0
2318	13.906	0.006	12.846	0.005	79.1615171	-69.6340419	0

2609	14.818	0.010	13.895	0.009	79.1074232	-69.6465272	0
2687	14.496	0.013	13.536	0.012	79.0936741	-69.6418154	0
2714	14.592	0.007	13.654	0.008	79.0860268	-69.6694723	0
2784	14.872	0.010	13.993	0.011	79.0712868	-69.6735199	0
3188	14.048	0.009	13.069	0.028	79.2861198	-69.6440036	0
3324	14.583	0.014	13.697	0.014	79.0936287	-69.6352679	0
90005	14.235	0.067	13.248	0.071	79.4738070	-69.7398990	AA
90155	14.270	0.032	13.255	0.043	79.5313910	-69.7517240	AA
90446	14.089	0.032	13.090	0.039	79.1162280	-69.7372510	AA
90668	13.995	0.034	13.010	0.038	78.9155360	-69.6961590	AA
90766	13.847	0.028	12.903	0.034	78.7186050	-69.6629410	AA
91029	14.392	0.035	13.366	0.043	78.8610850	-69.7199940	AA
91063	14.102	0.034	13.250	0.043	78.7683260	-69.6563570	AA
91098	14.396	0.031	13.355	0.037	78.9066570	-69.6936490	AA
91269	13.771	0.036	12.714	0.037	78.7789880	-69.7420430	AA
91462	13.976	0.031	12.837	0.032	78.8208410	-69.7608950	AA
91514	14.049	0.034	12.951	0.030	79.2652200	-69.7503280	AA
91775	14.162	0.032	13.127	0.032	78.8894470	-69.6714630	AA
91800	14.106	0.040	13.236	0.050	79.1978070	-69.7095640	AA
91807	13.858	0.034	12.814	0.038	79.2750720	-69.7604980	AA
91994	14.105	0.042	12.990	0.041	79.3112700	-69.7448430	AA
92048	13.904	0.030	12.826	0.032	78.9961690	-69.7464520	AA
92112	14.305	0.025	13.430	0.050	79.1821250	-69.7307050	AA
92359	14.478	0.039	13.488	0.048	79.0721590	-69.7481690	AA
92374	14.092	0.034	13.115	0.041	78.8875120	-69.6989520	AA
92380	14.255	0.039	13.196	0.037	79.1047280	-69.7463300	AA
92433	13.956	0.031	12.976	0.032	78.9245940	-69.7083660	AA
92606	14.197	0.025	13.257	0.038	78.8334310	-69.7479320	AA
92701	13.970	0.028	12.940	0.030	79.3036090	-69.7352070	AA
92727	13.743	99.99	12.822	0.049	79.0896750	-69.7720790	UA
92729	14.179	0.025	13.066	0.038	79.2081980	-69.7396470	AA
92744	14.027	0.036	12.898	0.029	78.8239270	-69.7306210	AA
92781	14.256	0.025	13.315	0.034	78.8644540	-69.6685560	AA
92802	14.394	0.035	13.416	0.039	78.7015010	-69.6729280	AA
92809	14.300	0.040	13.356	0.038	79.1537830	-69.7043460	AA
92982	14.363	0.049	13.261	0.045	79.3427840	-69.7453230	AA
93312	14.206	0.032	13.311	0.039	79.0292510	-69.6876680	AA
93578	14.063	0.045	13.123	0.055	79.1524790	-69.7500150	AA
93690	13.832	0.030	12.784	0.033	79.1064780	-69.7392810	AA
93985	14.449	0.042	13.492	0.044	78.9533800	-69.6831590	AA

94843	13.860	0.028	12.876	0.034	79.2611130	-69.6919250	AA
95171	14.169	0.044	13.220	0.058	79.3755820	-69.6836470	AA
95426	14.374	0.035	13.403	0.041	79.3250380	-69.6554570	AA
95458	14.517	0.054	13.431	99.99	79.0625030	-69.6304020	AU
95736	13.699	0.025	12.764	0.033	79.3880370	-69.6862950	AA
95892	13.881	0.031	12.813	0.033	78.8304920	-69.5871050	AA
95938	14.002	0.084	12.945	0.045	78.9179840	-69.5765080	AA
95957	13.971	0.042	12.896	0.034	79.1029910	-69.6092910	AA
96374	13.685	0.027	12.759	0.028	79.2823720	-69.7038040	AA
96392	13.903	0.044	12.713	0.044	79.4394080	-69.6967850	AA
96503	14.447	0.055	13.460	0.063	79.3235140	-69.6887130	AA
96506	13.800	0.032	12.877	0.034	79.2820880	-69.5968400	AA
96591	14.182	0.073	13.246	0.080	79.3231270	-69.6319270	AA
96759	13.968	0.017	12.970	0.032	79.3955370	-69.7095950	AA
96792	14.395	0.045	13.283	0.048	79.4110280	-69.6725230	AA
97241	14.303	0.030	13.321	0.037	79.4562090	-69.6275180	AA
97523	14.297	0.039	13.205	0.039	79.4173380	-69.6189500	AA
97562	14.205	0.038	13.235	0.041	78.8531190	-69.6180270	AA
97725	14.093	0.039	13.090	0.039	78.8784130	-69.6569370	AA
97727	13.814	0.029	12.933	0.029	78.9008150	-69.6041790	AA
97768	14.354	0.040	13.267	0.042	78.6768360	-69.5856700	AA
97876	13.908	0.031	12.901	0.030	79.3840850	-69.6505970	AA
97898	14.148	0.035	13.110	0.042	78.8190710	-69.6016240	AA
97944	14.237	0.039	13.300	0.055	78.8647760	-69.6205900	AA
97957	13.997	0.039	12.909	0.045	79.3548780	-69.6297150	AA
98128	14.353	0.084	13.331	0.094	79.2715810	-69.5615690	AA
98380	13.837	0.042	12.937	0.048	79.3933070	-69.6400450	AA
98653	14.444	0.038	13.456	0.049	79.3484910	-69.7013630	AA
98694	14.383	0.035	13.353	0.043	79.3226380	-69.5858690	AA
98764	14.114	0.042	13.116	0.044	79.4043380	-69.7242360	AA
99189	14.244	0.031	13.301	0.048	79.0368640	-69.6785960	AA
99264	14.055	0.036	13.102	0.036	79.2775340	-69.5504530	AA
99312	13.873	0.030	12.804	0.032	79.2189200	-69.5747830	AA
99482	14.254	0.039	13.235	0.041	79.0190440	-69.6200710	AA
99797	13.967	0.035	12.931	0.049	79.0093140	-69.6558070	AA
100029	14.116	0.032	13.027	0.042	78.9832790	-69.6553190	AA
100106	14.126	0.053	13.076	0.034	78.8671770	-69.5989690	AA
100262	14.227	0.025	13.220	0.070	78.9882910	-69.6083680	AA
100566	13.790	0.028	12.763	0.033	79.3187300	-69.7127840	AA
100915	14.174	0.043	13.160	0.048	78.9698450	-69.6548160	AA

100931	14.469	0.043	13.479	0.048	79.0332110	-69.6352230	AA
100994	14.063	0.031	13.118	0.039	79.1055330	-69.5828630	AA
101004	13.976	0.026	13.057	0.037	78.9273610	-69.6143570	AA
101322	14.177	0.049	13.254	0.058	79.2235870	-69.7008440	AA
101326	14.330	0.036	13.357	0.049	79.1487530	-69.6113740	AA
101327	13.795	0.032	12.751	0.039	79.1044370	-69.6149980	AA
101349	13.695	0.035	12.771	0.041	79.1461600	-69.5788960	AA
101611	14.098	0.021	13.208	0.034	78.7831770	-69.5923080	AA
101846	14.477	0.035	13.396	0.051	79.5618770	-69.6582490	AA
101992	14.065	0.030	12.982	0.049	79.3209300	-69.6956790	AA
102148	14.022	0.030	12.955	0.039	79.4859720	-69.6861570	AA
102178	14.287	0.034	13.290	0.046	79.4512760	-69.7259750	AA
103019	13.950	0.035	12.767	0.041	79.5361220	-69.7120740	AA

Tabella A.4: Dati fotometrici dei target del campo F4_N1978 dai cataloghi 2MASS e SOFI. Per ulteriori informazioni leggere la didascalia della tabella A.1. Dato che non tutti gli oggetti sono stati osservati in entrambi i gratings, è presente una colonna aggiuntiva che riporta un flag che indica se l'oggetto è stato osservato solo in HR11 (flag = 0), solo in HR13 (flag = 1) o con entrambi (flag = 2)

ID	J	σ_J	K	σ_K	RA (deg)	Dec (deg)	Flag 2MASS	Flag-HR
11585	82.070416	-66.128822	8.121	0.027	7.365	0.017	AA	0
11587	81.943503	-66.238586	9.115	0.021	8.259	0.017	AA	0
11589	81.942827	-66.292961	9.272	0.019	8.614	0.017	AA	2
11590	81.987264	-66.062836	9.776	0.019	9.271	0.021	AA	2
11595	82.005826	-66.342667	10.570	0.019	9.520	0.017	AA	0
11597	82.114016	-66.330994	10.694	0.019	10.382	0.019	AA	2
11607	82.295268	-66.183044	11.031	0.020	10.167	0.021	AA	2
11609	82.278776	-66.041054	11.096	0.023	10.623	0.019	AA	2
11610	81.948277	-66.096817	11.138	0.019	10.106	0.023	AA	0
11612	81.916121	-66.176910	11.232	0.019	10.309	0.017	AA	2
11615	82.027125	-66.305710	11.320	0.019	10.683	0.017	AA	2
11618	82.073984	-66.144203	11.419	0.019	10.691	0.019	AA	2
11619	82.380391	-66.138504	11.480	0.021	11.228	0.019	AA	2
11621	81.909604	-66.277710	11.558	0.018	10.602	0.017	AA	2
11626	81.897074	-66.086090	11.667	0.019	10.990	0.017	AA	2
11629	82.407112	-66.316238	11.705	0.025	11.084	0.019	AA	2
11632	81.852366	-66.179085	11.727	0.028	10.757	0.021	AA	2
11633	81.915738	-66.333069	11.778	0.019	11.388	0.021	AA	2

11638	81.814018	-66.327126	11.838	0.021	11.001	0.021	AA	2
11643	82.275476	-66.321075	11.880	0.023	10.431	0.021	AA	2
11647	82.092332	-66.064278	11.962	0.021	11.875	0.024	AA	2
11658	82.169830	-66.106171	12.097	0.021	11.910	0.023	AA	2
11666	82.379766	-66.251579	12.165	0.023	10.886	0.017	AA	2
11669	81.779351	-66.171371	12.232	0.019	11.968	0.023	AA	0
11673	82.075273	-66.303055	12.246	0.018	11.898	0.023	AA	2
11677	82.356740	-66.239784	12.318	0.025	11.816	0.024	AA	2
11696	82.471951	-66.121544	12.487	0.021	11.273	0.023	AA	2
11698	82.558092	-66.252434	12.521	0.026	11.255	0.017	AA	2
11700	81.991765	-66.053459	12.529	0.047	11.349	0.033	EE	2
11703	82.370748	-66.397392	12.564	0.026	12.227	0.028	AA	2
11705	82.491035	-66.173607	12.595	0.023	11.410	0.019	AA	2
11707	81.953638	-66.038010	12.606	0.023	12.456	0.028	AA	2
11708	81.806541	-66.273705	12.608	0.019	12.513	0.029	AA	2
11711	82.380647	-66.148071	12.631	0.023	11.463	0.019	AA	2
11716	81.968681	-66.166275	12.694	0.023	12.462	0.021	AA	1
11717	82.490890	-66.365883	12.696	0.025	12.152	0.019	AA	2
11720	81.863381	-66.082886	12.716	0.018	12.538	0.026	AA	2
11721	82.413751	-66.209625	12.719	0.025	12.316	0.021	AA	2
11723	81.922998	-66.196693	12.767	0.021	11.494	0.021	AA	0
11730	82.240672	-66.027283	12.884	0.019	11.786	0.026	AA	2
11754	82.018215	-66.399666	13.163	0.023	13.295	0.034	AA	2
11767	82.106885	-66.402802	13.290	0.021	13.234	0.034	AA	2
11771	82.326323	-66.161118	13.317	0.028	12.230	0.028	AA	2
11773	82.470831	-66.170021	13.322	0.021	12.225	0.024	AA	2
11775	82.319039	-66.382950	13.329	0.021	12.203	0.019	AA	2
11778	82.210965	-66.274788	13.336	0.019	12.243	0.021	AA	0
11783	82.392510	-66.322403	13.362	0.032	12.322	0.029	AA	0
11786	82.299073	-66.310669	13.368	0.026	12.291	0.028	AA	2
11787	82.005304	-66.290604	13.370	0.025	12.285	0.023	AA	0
11789	82.163562	-66.313553	13.390	0.021	12.280	0.024	AA	2
11795	81.990479	-66.022858	13.413	0.026	12.305	0.024	AA	2
11796	82.344639	-66.050148	13.414	0.025	13.352	0.038	AA	2
11801	82.340236	-66.296333	13.443	0.021	12.427	0.024	AA	1
11809	82.007358	-66.293427	13.462	0.026	12.406	0.029	AA	0
11815	82.151596	-66.013557	13.496	0.025	12.436	0.028	AA	2
11821	81.973303	-66.251846	13.515	0.054	12.549	0.045	EA	0
11830	82.327266	-66.244240	13.561	0.025	12.549	0.026	AA	2
11835	81.973319	-66.066566	13.578	0.019	12.512	0.026	AA	1

11837	81.736313	-66.232567	13.580	0.025	12.419	0.024	AA	1
11839	81.968241	-66.224808	13.592	0.023	12.517	0.026	AA	0
11842	81.978767	-66.160591	13.616	0.025	12.568	0.026	AA	2
11847	82.256415	-66.334488	13.638	0.028	12.528	0.017	AA	0
11851	82.195600	-66.316635	13.646	0.025	12.683	0.028	AA	0
11862	81.977396	-66.035988	13.679	0.019	12.511	0.024	AA	0
11875	82.373765	-66.279686	13.740	0.023	12.891	0.023	AA	0
11876	82.267131	-66.153122	13.743	0.026	12.743	0.017	AA	2
11878	82.174999	-66.192284	13.745	0.028	12.803	0.023	AA	2
11882	82.232083	-66.128677	13.750	0.026	12.670	0.028	AA	2
11888	82.242733	-66.124092	13.763	0.029	12.813	0.037	AA	2
11889	82.454991	-66.295441	13.764	0.026	12.754	0.030	AA	2
11890	82.397066	-66.235909	13.767	0.026	12.759	0.026	AA	2
11892	82.453568	-66.234863	13.769	0.032	12.880	0.035	AA	0
11894	81.994048	-66.252457	13.771	0.025	12.924	0.036	AA	2
11896	81.999590	-66.394058	13.778	0.026	12.744	0.030	AA	0
11911	82.520941	-66.332817	13.835	0.028	12.814	0.026	AA	2
11914	82.625107	-66.300018	13.849	0.031	12.847	0.032	AA	2
11920	82.062188	-66.052330	13.867	0.028	12.929	0.032	AA	2
11929	82.032906	-66.027496	13.889	0.025	12.960	0.035	AA	2
11935	82.252793	-66.135391	13.911	0.035	13.095	0.028	AA	2
11937	82.432747	-66.182716	13.924	0.025	12.992	0.028	AA	2
11939	81.886701	-66.122032	13.936	0.023	12.928	0.032	AA	2
11941	82.074069	-66.123238	13.941	0.031	12.905	0.028	AA	0
11946	82.205784	-66.072853	13.955	0.023	12.947	0.033	AA	2
11949	82.338949	-66.073364	13.960	0.028	12.911	0.032	AA	2
11954	82.593246	-66.250015	13.969	0.032	12.957	0.029	AA	2
11960	82.055938	-66.123207	14.013	0.025	12.976	0.026	AA	2
11965	82.566072	-66.245087	14.024	0.035	13.036	0.032	AA	2
11971	82.266117	-66.350052	14.046	0.031	13.137	0.038	AA	2
11973	82.616932	-66.280602	14.054	0.037	13.066	0.030	AA	2
11978	82.338745	-66.143204	14.062	0.029	13.048	0.033	AA	2
11981	82.281546	-66.131447	14.079	0.029	13.170	0.028	AA	2
11983	82.138794	-66.053017	14.088	0.019	13.088	0.033	AA	2
11985	82.178090	-66.105011	14.098	0.023	13.215	0.038	AA	2
11989	82.304340	-66.094765	14.104	0.032	13.183	0.040	AA	2
11994	81.886429	-66.059708	14.112	0.028	13.171	0.030	AA	2
12002	82.056578	-66.138611	14.137	0.035	13.261	0.042	AA	0
12007	82.254679	-66.011597	14.162	0.032	13.113	0.030	AA	2
12009	82.306271	-66.085213	14.170	0.031	13.177	0.028	AA	2

12010	82.137838	-66.029655	14.172	0.028	13.233	0.030	AA	2
12011	82.011232	-66.159134	14.174	0.028	13.268	0.032	AA	1
12016	82.345880	-66.248413	14.189	0.032	13.229	0.033	AA	0
12018	81.906866	-66.365829	14.194	0.026	13.307	0.036	AA	0
12025	82.273342	-66.021202	14.210	0.031	13.250	0.033	AA	2
12030	82.284522	-66.210930	14.232	0.040	13.449	0.046	AA	1
12034	81.782497	-66.098457	14.242	0.034	13.269	0.034	AA	2
12037	82.557469	-66.224777	14.245	0.032	13.341	0.045	AA	0
12043	82.371325	-66.250298	14.259	0.035	13.313	0.035	AA	2
12046	82.097246	-66.209442	14.269	0.031	13.342	0.033	AA	2
12051	81.970196	-66.371147	14.276	0.032	13.330	0.033	AA	2
12053	82.036081	-66.392609	14.281	0.028	13.277	0.037	AA	0
12056	82.276191	-66.246780	14.285	0.028	13.364	0.045	AA	0
12060	82.344207	-66.207985	14.302	0.033	13.410	0.040	AA	2
12062	82.573483	-66.318466	14.307	0.037	13.320	0.042	AA	2
12066	82.134308	-66.211823	14.312	0.023	13.438	0.030	AA	2
12074	82.207566	-66.013809	14.333	0.025	13.356	0.032	AA	2
12075	82.404291	-66.178116	14.336	0.036	13.493	0.048	AA	2
12078	82.084229	-66.218613	14.340	0.038	13.332	0.046	AA	0
12082	82.639593	-66.232162	14.349	0.035	13.333	0.039	AA	2
12095	81.861543	-66.160362	14.375	0.035	13.391	0.043	AA	1
12101	82.466331	-66.286896	14.386	0.033	13.483	0.059	AA	0
12110	82.094787	-66.397446	14.419	0.030	13.421	99.99	AU	2
12111	81.866083	-66.309052	14.419	0.031	13.436	0.042	AA	2
12122	82.061129	-66.156776	14.441	0.028	13.470	0.045	AA	0
12125	82.187387	-66.358200	14.447	0.047	13.489	0.045	AA	0
12138	82.112701	-66.076752	14.480	0.037	13.473	0.038	AA	2
12144	82.286353	-66.223671	14.491	0.036	13.489	0.035	AA	0
12160	82.092378	-66.266418	14.508	0.025	13.497	0.047	AA	0

Tabella A.5: Dati fotometrici dei target del campo F5_N2173 dai cataloghi 2MASS e SOFI. Per ulteriori informazioni leggere la didascalia della tabella A.1. È presente la colonna aggiuntiva riportante in quali grating sono stati osservati i target, come spiegato in A.4

ID	J	σ_J	K	σ_K	RA (deg)	Dec (deg)	Flag 2MASS	Flag-HR
1	89.501689	-72.982993	12.324	0.011	11.169	0.009	0	1
2	89.506204	-72.979925	12.411	0.015	11.267	0.012	0	1
11	89.475616	-73.001168	14.379	0.012	13.440	0.014	0	2

3807	89.452976	-72.942747	13.541	0.015	12.586	0.024	0	2
3941	89.390409	-72.996051	14.257	0.011	13.365	0.012	0	2
3879	89.468909	-72.938217	14.009	0.019	12.975	0.036	AA	2
4645	89.629979	-72.971207	16.011	0.229	12.861	99.99	DU	0
3886	89.332907	-72.945930	14.033	0.026	13.386	0.043	AA	0
3873	89.307109	-72.956833	13.969	0.026	13.054	0.036	AA	2
3912	89.343883	-72.930626	14.174	0.032	13.433	0.045	AA	0
3919	89.297984	-72.947441	14.208	0.026	13.243	0.037	AA	1
3765	89.259709	-72.962486	13.287	0.025	12.171	0.024	AA	2
3699	89.694729	-72.941406	12.050	0.019	11.333	0.021	AA	1
3880	89.576104	-72.909386	14.009	0.028	13.439	0.043	AA	0
3726	89.406668	-73.047279	12.652	0.026	12.213	0.024	AA	0
3723	89.309279	-72.927734	12.634	0.023	11.982	0.027	AA	0
3948	89.513362	-72.902542	14.376	0.024	13.312	0.037	AA	0
3838	89.228748	-72.993698	13.778	0.028	13.300	0.049	AA	0
3711	89.200884	-72.977104	12.330	0.019	11.820	0.026	AA	0
3888	89.787573	-72.941139	14.040	0.025	13.093	0.034	AA	2
3724	89.338520	-72.892715	12.638	0.023	12.173	0.026	AA	0
3738	89.642668	-72.892357	12.928	0.021	12.142	0.024	AA	0
3737	89.162190	-72.970978	12.920	0.025	11.819	0.021	AA	2
3871	89.240070	-72.911217	13.963	0.025	12.881	0.037	AA	1
3768	89.837348	-72.967232	13.334	0.023	12.867	0.030	AA	0
3745	89.764986	-73.045212	12.959	0.021	12.173	0.029	AA	0
3752	89.164096	-73.019379	13.073	0.021	12.751	0.026	AA	0
3797	89.140358	-72.961189	13.543	0.021	12.474	0.027	AA	1
3881	89.820459	-72.937408	14.018	0.023	12.955	0.029	AA	2
3926	89.128724	-72.965637	14.252	0.019	13.482	0.046	AA	1
3740	89.481025	-73.085953	12.935	0.021	11.741	0.023	AA	1
3720	89.111727	-72.989861	12.567	0.021	11.427	0.024	AA	2
3794	89.860437	-72.947823	13.533	0.021	13.070	0.030	AA	0
3907	89.106883	-72.966408	14.151	0.030	13.337	0.046	AA	0
3682	89.515854	-72.865135	11.378	0.019	10.998	0.021	AA	2
3945	89.756999	-73.062599	14.368	0.030	13.362	0.042	AA	1
3893	89.120878	-73.015747	14.060	0.031	13.079	0.037	AA	2
3757	89.091785	-72.983238	13.154	0.021	12.517	0.030	AA	0
3833	89.622542	-73.089249	13.766	0.023	13.299	0.038	AA	0
3714	89.100200	-73.007698	12.389	0.019	11.210	0.021	AA	1
3832	89.724925	-73.075684	13.766	0.028	13.495	0.045	AA	0
3779	89.098228	-72.941132	13.423	0.025	13.052	0.032	AA	0
3774	89.245659	-72.877518	13.383	0.019	12.328	0.030	AA	2

3782	89.107770	-72.922569	13.447	0.023	12.380	0.023	AA	2
3744	89.094382	-73.027496	12.952	0.021	12.473	0.023	AA	0
3802	89.687062	-73.092484	13.573	0.024	12.920	0.033	AA	0
3864	89.905295	-72.934929	13.931	0.026	13.461	0.034	AA	0
3836	89.815467	-73.066216	13.775	0.021	12.810	0.027	AA	2
3675	89.852589	-72.902435	10.857	0.021	10.084	0.018	AA	1
3830	89.488533	-73.109016	13.739	0.023	12.693	0.033	AA	2
3667	89.594964	-73.106201	9.401	0.021	8.698	0.019	AA	0
3849	89.909492	-73.032356	13.846	0.023	12.741	0.030	AA	1
3816	89.160555	-72.885269	13.653	0.023	12.625	0.024	AA	2
3695	89.829498	-72.883362	11.894	0.019	11.232	0.023	AA	2
3773	89.376675	-73.112007	13.379	0.037	13.078	0.055	AA	0
3931	89.107326	-73.060387	14.286	0.028	13.324	0.032	AA	1
3884	89.709331	-72.853920	14.024	0.026	13.105	0.042	AA	2
3887	89.140381	-73.078377	14.037	0.023	13.405	0.038	AA	0
3689	89.417853	-73.124779	11.571	0.021	10.976	0.023	AA	2
3804	89.779821	-72.856400	13.573	0.021	12.708	0.027	AA	0
3688	89.272755	-72.841660	11.528	0.021	10.934	0.021	AA	1
3684	89.787348	-72.853554	11.452	0.019	11.016	0.021	AA	1
3831	89.594072	-73.127602	13.754	0.033	12.713	0.030	AA	2
3788	88.968091	-72.965881	13.500	0.030	12.954	0.034	AA	0
3901	88.993470	-73.029747	14.106	0.030	13.069	0.036	AA	1
3733	89.829093	-72.858574	12.803	0.019	11.688	0.023	AA	2
3861	89.573697	-73.132011	13.896	0.021	12.890	0.039	AA	2
3810	89.673323	-72.831741	13.623	0.023	12.574	0.029	AA	0
3905	89.839091	-73.101273	14.140	0.026	13.145	0.039	AA	1
3866	89.590129	-72.819901	13.948	0.024	12.927	0.034	AA	1
3734	89.782943	-72.841866	12.808	0.023	12.079	0.029	AA	0
3721	89.726874	-72.832527	12.569	0.021	11.862	0.019	AA	0
3922	89.559108	-73.138809	14.233	0.030	13.189	0.041	AA	2
3846	89.659371	-72.823105	13.830	0.024	12.733	0.029	AA	1
3710	89.186114	-73.115166	12.300	0.025	10.478	0.017	AA	2
3697	89.024607	-73.068970	11.965	0.019	11.251	0.019	AA	2
3868	88.979118	-73.048111	13.952	0.028	12.924	0.034	AA	2
3878	89.960018	-72.877731	14.007	0.019	13.057	0.029	AA	2
3756	88.960714	-72.908073	13.122	0.025	12.505	0.027	AA	0
3798	89.186365	-72.831322	13.546	0.023	13.184	0.038	AA	0
3908	89.123245	-73.113091	14.152	0.034	13.123	0.034	AA	2
3735	90.005617	-72.892708	12.820	0.021	12.215	0.027	AA	0
3844	89.955377	-72.870438	13.824	0.021	12.786	0.030	AA	0

3848	90.073781	-72.937683	13.842	0.023	12.876	0.030	AA	2
3704	89.641670	-72.808243	12.183	0.021	11.821	0.024	AA	2
3925	89.381052	-73.153191	14.250	0.031	13.336	0.042	AA	1
3716	90.092808	-73.016441	12.464	0.021	11.281	0.021	AA	1
3808	88.879257	-73.005486	13.601	0.023	12.598	0.030	AA	2
3909	89.496788	-73.160469	14.155	0.028	13.132	0.037	AA	2
3959	89.971595	-72.861961	14.434	0.031	13.457	0.050	AA	0
3790	89.433262	-73.161560	13.502	0.026	13.089	0.034	AA	0
3860	89.567929	-73.163078	13.895	0.021	13.115	0.041	AA	0
3741	88.965883	-73.084175	12.936	0.021	12.505	0.029	AA	0
3728	88.949109	-72.881172	12.740	0.019	12.319	0.021	AA	0
3854	89.823391	-72.819099	13.878	0.024	12.955	0.032	AA	1
3712	89.852217	-72.824036	12.373	0.019	12.008	0.026	AA	0
3729	89.322743	-73.159683	12.763	0.019	12.305	0.027	AA	0
3719	89.260503	-73.154785	12.557	0.019	11.336	0.019	AA	2
3855	89.221096	-73.150673	13.878	0.019	12.724	0.030	AA	2
3944	90.112870	-73.034477	14.359	0.026	13.254	0.041	AA	2
3827	88.953510	-72.871696	13.729	0.023	12.756	0.027	AA	0
3674	90.142913	-72.989922	10.748	0.019	10.252	0.021	AA	1
3897	89.114820	-73.135368	14.080	0.023	13.223	0.036	AA	2
3939	89.661276	-72.793037	14.318	0.031	13.333	0.042	AA	1
3899	89.438194	-72.786049	14.087	0.024	13.265	0.041	AA	0
3923	90.145183	-72.940346	14.235	0.025	13.190	0.041	AA	2
3703	88.824019	-72.989845	12.119	0.021	11.779	0.021	AA	1
3676	89.854266	-73.143265	10.946	0.019	10.522	0.019	AA	1
3874	89.686154	-72.789879	13.973	0.037	12.916	0.042	AA	2
3691	88.946294	-73.095993	11.687	0.019	11.315	0.021	AA	1
3787	88.953357	-73.098991	13.488	0.021	12.436	0.030	AA	1
3962	89.443182	-73.177139	14.460	0.038	13.426	0.038	AA	1
3935	88.809989	-72.965942	14.297	0.024	13.241	0.037	AA	0
3904	89.453620	-73.180817	14.117	0.026	13.146	0.034	AA	1
3875	88.930132	-72.860085	13.996	0.019	13.092	0.032	AA	0
3771	89.069134	-72.817451	13.362	0.023	12.343	0.026	AA	0
3709	89.538433	-73.181213	12.284	0.021	11.845	0.021	AA	1
3876	90.123703	-72.894829	14.002	0.026	12.958	0.033	AA	1
3701	89.052916	-73.136902	12.100	0.021	11.510	0.017	AA	2
3749	89.571408	-72.774208	13.017	0.021	12.138	0.024	AA	0
3687	89.956044	-73.142632	11.500	0.021	11.194	0.021	AA	1
3770	89.099332	-72.797287	13.346	0.019	12.981	0.029	AA	0
3921	90.146558	-73.076500	14.230	0.030	13.315	0.047	AA	1

3859	88.751251	-72.992126	13.886	0.021	12.893	0.029	AA	0
3769	89.852635	-73.173149	13.339	0.030	12.246	0.026	AA	1

Tabella A.6: Dati fotometrici dei target del campo F6_N2210 dai cataloghi 2MASS e SOFI. Per ulteriori informazioni leggere la didascalia della tabella A.1.

ID	J	σ_J	K	σ_K	RA (deg)	Dec (deg)	Flag 2MASS
165	13.456	0.012	12.423	0.007	92.9305200	-69.1168440	0
186	14.630	0.013	13.720	0.009	92.9257170	-69.1002500	0
842	14.779	0.017	13.958	0.015	92.8447320	-69.1163020	0
1109	14.604	0.013	13.661	0.010	92.9184450	-69.0976870	0
90051	14.373	0.026	13.595	0.038	93.1607910	-69.1848300	AA
90059	12.928	0.019	11.815	0.017	93.4280280	-69.0601040	AA
90084	14.675	0.037	13.726	0.054	92.8602630	-69.0601200	AA
90099	14.715	0.039	13.816	0.057	93.2313550	-68.9794690	AA
90105	12.418	0.023	10.670	0.019	93.1354880	-68.9522320	AA
90159	14.364	0.026	13.684	0.047	93.2457910	-69.1636200	AA
90189	13.445	0.026	12.355	0.024	93.3029160	-69.1353450	AA
90202	12.865	0.021	11.775	0.021	93.1402180	-69.0522840	AA
90226	11.838	0.021	10.593	0.019	93.3630790	-69.0627520	AA
90231	13.634	0.023	12.636	0.021	93.3131130	-69.1525190	AA
90272	14.169	0.023	13.267	0.042	92.8791070	-69.0180440	AA
90295	13.856	0.030	12.966	0.030	93.4161940	-69.2036820	AA
90351	14.266	0.021	13.384	0.029	93.0303180	-69.1278150	AA
90364	14.674	0.028	13.905	0.059	92.9980610	-69.0545270	AA
90365	14.061	0.023	13.098	0.032	93.0270490	-69.0523380	AA
90419	14.629	0.031	13.765	0.041	93.1437190	-69.0453410	AA
90443	12.070	0.021	11.152	0.021	92.6439200	-68.9985580	AA
90489	13.605	0.030	12.590	0.032	93.3489150	-68.9985280	AA
90548	14.274	0.021	13.287	0.042	92.8044700	-68.9917980	AA
90576	14.071	0.028	13.075	0.038	92.8817360	-69.0418400	AA
90618	14.803	0.038	13.835	0.056	93.2767270	-69.2069850	AA
90643	14.751	0.037	13.887	0.053	93.2660370	-69.2286070	AA
90731	12.609	0.021	10.760	0.023	92.5280980	-68.9982530	AA
90737	14.077	0.024	13.184	0.034	92.8180710	-69.0023040	AA
90754	14.008	0.034	13.141	0.034	93.3147430	-69.2041170	AA
90761	13.976	0.021	13.080	0.026	93.1778320	-69.1864170	AA
90763	14.888	0.045	13.983	0.056	93.0481700	-69.0302050	AA
90764	11.839	0.021	10.653	0.019	93.1882850	-69.1577070	AA

90818	13.900	0.025	12.917	0.030	93.2120520	-69.1815490	AA
90828	13.854	0.026	12.833	0.029	93.0902940	-69.0395130	AA
90841	14.851	0.038	13.986	0.062	92.9876790	-68.9555280	AA
90865	14.149	0.025	13.164	0.026	93.0396580	-69.0155490	AA
90876	13.714	0.023	12.756	0.024	93.3552260	-69.0431900	AA
90878	12.792	0.023	11.626	0.024	93.2582970	-69.2214810	AA
90883	13.770	0.026	12.683	0.027	93.3083110	-69.1733020	AA
90923	14.243	0.023	13.389	0.041	93.3196180	-69.0443730	AA
90928	13.795	0.019	12.788	0.027	93.0842540	-68.9985350	AA
90934	14.778	0.038	13.899	0.044	93.3715270	-69.1863400	AA
90968	13.531	0.021	12.714	0.033	93.3581830	-69.0127330	AA
90974	14.374	0.031	13.434	0.042	93.4579860	-69.1611710	AA
90979	14.411	0.030	13.435	0.039	93.0347770	-69.1579900	AA
90982	14.247	0.026	13.368	0.033	92.8686370	-68.9594650	AA
90992	14.286	0.030	13.349	0.039	92.7405390	-68.9618840	AA
91026	14.501	0.037	13.634	0.050	93.0956890	-69.1359630	AA
91063	13.036	0.021	11.910	0.024	93.3730080	-69.1207580	AA
91089	14.416	0.039	13.498	0.046	93.0822770	-68.9700470	AA
91091	14.659	0.055	13.743	0.055	92.9523750	-69.0771100	AA
91102	13.528	0.023	12.500	0.029	93.2394770	-69.0154650	AA
91137	13.595	0.025	12.513	0.023	92.5643670	-69.0161060	AA
91143	14.135	0.035	13.182	0.037	93.1317430	-69.1432880	AA
91202	14.832	0.030	13.953	0.059	92.6916440	-69.0295260	AA
91227	12.182	0.023	10.908	0.019	92.3480970	-69.0897370	AA
91259	14.672	0.031	13.873	0.050	92.7158880	-69.1181260	AA
91294	14.120	0.023	13.144	0.033	92.5059150	-69.1771930	AA
91354	14.273	0.030	13.332	0.036	92.5291890	-69.1318510	AA
91355	14.317	0.023	13.417	0.043	92.8576730	-69.3000340	AA
91424	14.526	0.028	13.826	0.055	92.6369080	-69.1063920	AA
91501	13.920	0.031	12.927	0.032	92.4824370	-69.0174560	AA
91512	14.529	0.023	13.700	0.048	92.8509740	-69.2548750	AA
91533	14.419	0.031	13.342	0.040	92.6129850	-69.2492980	AA
91537	14.083	0.023	13.096	0.033	92.4655890	-69.0175090	AA
91543	14.755	0.034	13.990	0.062	92.5589050	-69.2336040	AA
91555	12.506	0.019	11.161	0.024	92.8474130	-69.2815780	AA
91573	14.328	0.023	13.477	0.036	92.8511390	-69.2199170	AA
91580	12.068	0.019	11.224	0.024	92.9460810	-69.2763060	AA
91587	14.312	0.028	13.554	0.047	92.6604640	-69.2212140	AA
91599	14.314	0.038	13.374	0.042	92.8316500	-69.1912230	AA
91603	13.986	0.030	13.024	0.032	92.9618080	-69.3056640	AA

91656	11.936	0.019	10.650	0.019	93.0062770	-69.2286220	AA
91675	13.698	0.026	12.662	0.026	92.8582930	-69.1626430	AA
91704	14.851	0.034	13.926	0.051	93.0560510	-69.2781070	AA
91716	14.573	0.051	13.788	0.065	92.3935980	-69.2196040	AA
91743	12.469	0.021	10.763	0.019	93.2997050	-69.2548830	AA
91757	14.534	0.031	13.501	0.042	92.3342710	-69.1444090	AA
91764	14.425	0.031	13.655	0.050	92.8614350	-69.2445370	AA
91768	14.426	0.026	13.588	0.041	92.9112220	-69.3242340	AA
91804	12.180	0.019	10.944	0.023	92.9427630	-69.2623600	AA
91831	13.663	0.019	12.743	0.030	92.5788920	-69.2118760	AA
91842	13.746	0.023	12.721	0.024	92.7526110	-69.3146740	AA
91876	14.039	0.021	13.296	0.036	92.9930160	-69.2123490	AA
91877	14.678	0.030	13.759	0.046	92.3705710	-69.2163700	AA
91886	12.711	0.019	11.611	0.019	92.4699140	-69.1874160	AA
91925	14.656	0.037	13.816	0.055	92.4578620	-69.0570220	AA
91929	14.731	0.038	13.862	0.055	92.6902020	-69.1271590	AA
91946	14.735	0.030	13.863	0.054	93.0123470	-69.1938550	AA
91980	14.071	0.025	13.069	0.033	93.0755790	-69.1877210	AA
91997	14.648	0.031	13.801	0.061	92.5737150	-69.0910800	AA
92021	14.249	0.031	13.301	0.043	93.0309360	-69.2506560	AA
92045	14.781	0.042	13.899	0.063	92.9053500	-69.2694240	AA
92077	13.803	0.024	12.802	0.033	92.8219810	-69.2771910	AA
92089	12.464	0.019	11.299	0.021	92.6176640	-69.1665190	AA
92142	14.125	0.026	13.228	0.032	92.6336740	-69.1730730	AA
92143	14.359	0.035	13.300	0.039	92.3964050	-69.0097730	AA
92155	14.107	0.030	13.114	0.037	92.7990490	-69.2557750	AA
92181	14.807	0.039	13.973	0.056	92.6732990	-69.2583620	AA
92193	14.203	0.021	13.282	0.032	92.4203320	-69.2301030	AA
92210	13.142	0.021	12.074	0.021	92.6818950	-69.2029110	AA
92212	14.545	0.037	13.561	0.053	93.0928820	-69.2276920	AA
92253	13.562	0.024	12.506	0.027	92.7030870	-69.0929640	AA
92269	14.744	0.028	13.953	0.060	92.5911640	-69.2372280	AA
92270	12.248	0.019	11.093	0.021	92.7567030	-69.3024830	AA

Appendice B

Risultati

Di seguito sono riportati, per ogni stella analizzata, i parametri atmosferici calcolati dalla fotometria e i valori di metallicità e di velocità radiale misurati dall'analisi spettrale, con i relativi errori.

L'errore sulla velocità radiale è stato calcolato come la dispersione tra la RV misurata dai due gratings diviso la radice di 2 nel caso in cui si abbiano a disposizione entrambe le misure. In caso contrario, l'errore associato è stato calcolato come l'errore statistico, ossia σ/\sqrt{N} , con N numero di righe utilizzate.

L'errore sulla metallicità deve tenere conto anche dell'errore che deriva da una sbagliata stima dei parametri atmosferici. GALA fornisce la variazione dell'abbondanza quando la temperatura varia di 100 K , la gravità di 0.1 e la microturbolenza di 0.1 km/s . Questi 3 errori variano con la metallicità della stella dato che i parametri possono essere più o meno influenti alle diverse metallicità, quindi sono stati calcolati per ogni singola stella.

I tre errori sui parametri vengono poi sommati in quadratura con l'errore di misura, calcolato sempre come l'errore statistico, ovvero σ/\sqrt{N} , con N numero di righe utilizzate.

Tabella B.1: Risultati per le stelle analizzate del campo F1_N1466

ID	T_{eff} (K)	$\log g$	ξ (km/s)	N_{righe}	[Fe/H]	$\sigma_{[Fe/H]}$	RV (km/s)	σ_{RV} (km/s)
90069	4280	0.90	1.62	29	-1.24	0.06	+202.9	0.8
90117	3988	0.57	1.70	33	-0.84	0.07	+219.6	0.1
90479	4489	0.90	1.62	30	-1.21	0.06	+204.0	1.1
90501	4391	1.17	1.56	27	-0.25	0.07	+216.2	0.1
50524	4338	0.97	1.61	1			+168	1
90557	5096	1.48	1.49	31	-0.76	0.07	+393.8	0.4
90597	5162	1.09	1.58	32	-0.42	0.08	+183.4	0.1

Tabella B.2: Risultati per le stelle analizzate del campo F2_N1754

ID	T_{eff} (K)	$\log g$	ξ (km/s)	N_{righe}	[Fe/H]	$\sigma_{[Fe/H]}$	RV (km/s)	σ_{RV} (km/s)
184	4140	0.92	1.62	32	-0.43	0.07	+260.5	0.2
356	4229	0.84	1.64	39	-0.50	0.07	+223.5	0.2
377	4196	0.87	1.63	31	-0.58	0.07	+244.6	0.1
411	4042	0.72	1.66	31	-1.11	0.05	+275.3	0.5
515	4203	1.03	1.59	33	-0.30	0.07	+246.2	0.3
775	4054	0.83	1.64	34	-0.55	0.07	+244.1	0.2
90026	4047	1.03	1.59	29	-0.35	0.09	+264.4	0.1
90033	3833	0.74	1.66	33	-0.49	0.08	+256.5	0.1
90095	3893	0.79	1.65	30	-0.50	0.07	+237.2	0.1
90227	3873	0.80	1.65	44	-0.87	0.07	+284.4	0.5
90323	4227	1.00	1.60	32	-0.46	0.07	+230.8	0.1
90389	3849	0.84	1.64	32	-0.55	0.07	+260.8	0.5
90393	4065	0.99	1.60	31	-0.37	0.07	+250.4	0.1
90477	4280	0.98	1.60	33	-0.69	0.07	+217.5	0.6
90551	3845	0.62	1.69	40	-0.82	0.07	+263.9	0.5
90574	4170	0.94	1.61	33	-0.42	0.07	+267.2	0.1
90844	3945	0.85	1.63	32	-0.68	0.07	+294.7	0.7
90859	3857	0.62	1.69	29	-0.72	0.06	+243.0	0.1
90883	3986	0.82	1.64	31	-0.49	0.07	+252.8	0.3
90928	3770	0.77	1.65	30	-0.80	0.06	+283.3	0.1
90998	4177	0.66	1.68	32	-0.59	0.07	+256.0	0.2
91005	3819	0.70	1.67	35	-0.58	0.07	+248.8	0.3
91020	4158	0.80	1.65	45	-0.78	0.07	+242.4	0.5
91158	3839	0.98	1.60	34	-0.62	0.07	+223.4	0.2

91210	4071	0.64	1.68	35	-0.75	0.06	+238.8	0.5
91227	4069	1.00	1.60	30	-0.71	0.06	+226.0	0.0
91237	3935	0.83	1.64	28	-0.49	0.07	+232.1	0.3
91247	4358	1.01	1.60	34	-0.49	0.07	+222.4	0.6
91346	3877	0.67	1.68	30	-0.65	0.06	+202.7	0.4
91397	4153	0.81	1.64	36	-0.52	0.07	+250.6	0.3
91610	4014	0.68	1.67	40	-1.12	0.06	+262.5	0.8
91671	3655	0.82	1.64	37	-0.32	0.08	+248.2	0.6
91701	4303	1.00	1.60	30	-0.42	0.07	+247.2	0.3
91796	3997	0.47	1.72	32	-0.48	0.07	+255.4	0.6
91819	4012	0.55	1.70	34	-1.20	0.05	+230.6	0.4
91852	3971	0.82	1.64	26	-0.70	0.07	+240.8	0.7
91881	4078	0.83	1.64	36	-0.54	0.07	+226.6	0.1
91905	4003	0.66	1.68	33	-0.52	0.07	+214.7	0.3
91909	3977	0.83	1.64	36	-0.47	0.07	+250.4	0.2
91947	3895	0.75	1.66	31	-0.78	0.06	+244.2	0.1
91987	3975	0.40	1.74	27	-0.58	0.07	+263.5	0.4
91994	4239	0.94	1.61	29	-0.49	0.07	+256.9	0.2
92024	4153	0.91	1.62	31	-0.48	0.07	+259.5	0.3
92029	3962	0.84	1.64	34	-0.50	0.07	+255.6	0.1
92034	4051	0.91	1.62	22	-0.50	0.07	+260.9	0.1
92066	3969	0.85	1.63	29	-0.70	0.07	+311.7	0.4
92068	4042	1.04	1.59	41	-0.65	0.07	+322.7	0.4
92113	3749	0.76	1.66	44	-1.43	0.17	+237.3	0.1
92129	3877	0.94	1.61	31	-0.62	0.07	+226.2	0.4
92278	4047	0.87	1.63	33	-0.68	0.06	+234.5	0.2
92323	3867	0.86	1.63	31	-0.54	0.07	+235.4	0.4
92344	3851	0.80	1.65	36	-0.53	0.07	+202.0	0.1
92349	3833	0.65	1.68	34	-0.86	0.06	+279.8	0.2
92358	4569	1.10	1.58	30	-0.25	0.07	+251.4	0.2
92359	4305	0.93	1.62	29	-0.32	0.07	+259.0	0.2
92381	4027	0.83	1.64	27	-0.59	0.07	+273.1	0.2
92424	4234	0.97	1.61	35	-0.58	0.07	+222.6	0.1
92453	3766	0.76	1.66	29	-0.29	0.08	+243.7	0.3
92518	4355	0.98	1.60	45	-0.87	0.07	+223.6	1.2
92525	3922	0.91	1.62	34	-0.47	0.07	+221.4	0.7
92592	4343	1.06	1.59	28	-0.58	0.07	+278.0	0.6
92613	3931	0.84	1.64	27	-0.63	0.07	+252.5	0.1
92624	3760	0.72	1.66	27	-0.53	0.07	+250.6	0.1
92628	3900	0.57	1.70	33	-0.60	0.06	+298.5	0.5

92647	3716	0.57	1.70	30	-0.51	0.08	+285.5	0.7
92671	3764	0.93	1.62	34	-0.53	0.07	+219.8	0.2
92674	4368	0.95	1.61	21	-1.60	0.16	+247.8	0.5
92701	3795	0.70	1.67	30	-0.58	0.07	+262.8	0.2
92708	3891	0.76	1.66	37	-0.78	0.07	+293.5	0.3
92761	4135	0.59	1.69	39	-1.11	0.06	+241.9	0.3
92769	4021	0.91	1.62	48	-1.00	0.06	+226.4	0.5
92790	3986	0.86	1.63	32	-0.67	0.06	+213.1	0.1
92812	3941	0.93	1.62	30	-0.51	0.07	+236.2	0.4
92821	3967	0.79	1.65	14	-0.20	0.08	+258.6	0.4
92852	4151	1.05	1.59	33	-0.54	0.07	+273.7	0.2
92861	4021	0.93	1.62	26	-0.79	0.07	+257.0	0.3
92876	3958	0.71	1.67	31	-0.92	0.07	+237.8	0.2
92905	4040	1.03	1.59	25	-0.48	0.07	+252.4	0.8
92925	4010	1.03	1.59	31	-0.48	0.07	+264.8	0.2
92948	4151	0.98	1.60	36	-0.48	0.07	+249.6	0.5
92958	3900	0.85	1.63	35	-0.69	0.06	+253.2	0.1
92960	3833	0.86	1.63	28	-0.68	0.07	+250.9	0.2
93046	4303	1.04	1.59	35	-0.39	0.07	+291.9	0.2
93144	4089	0.93	1.62	29	-0.52	0.07	+252.9	0.2
93145	4261	1.02	1.60	21	-1.72	0.17	+302.5	0.8
93156	3776	0.65	1.68	36	-0.54	0.07	+257.5	0.1
93201	4165	0.97	1.61	33	-0.52	0.07	+215.8	0.4
93209	3819	0.93	1.62	24	-0.40	0.07	+235.0	0.2
93214	3994	0.61	1.69	31	-0.62	0.07	+278.1	0.1
93233	4060	0.78	1.65	32	-0.50	0.07	+256.2	0.1
93265	4258	1.04	1.59	39	-0.55	0.07	+238.4	0.2

Tabella B.3: Risultati per le stelle analizzate del campo F3_N1898

ID	T_{eff} (K)	$\log g$	ξ (km/s)	N_{righe}	[Fe/H]	$\sigma_{[Fe/H]}$	RV (km/s)	σ_{RV} (km/s)
137	3928	0.82	1.64	25	-0.52	0.07	+247.2	0.1
283	4233	1.08	1.58	34	-0.44	0.07	+242.6	0.3
289	4071	0.65	1.68	29	-0.53	0.07	+281.0	0.3
384	4004	0.63	1.69	37	-0.64	0.07	+284.9	0.2
489	4223	1.09	1.58	29	-0.60	0.06	+256.3	0.1
574	4270	0.95	1.61	32	-0.37	0.07	+267.4	0.5
592	4357	1.07	1.58	41	-1.28	0.06	+242.5	0.2
834	3924	0.58	1.70	40	-0.97	0.07	+243.6	0.1

858	4066	1.06	1.59	34	-0.40	0.07	+247.4	0.3
893	3953	0.86	1.63	34	-0.31	0.07	+252.5	0.1
1379	4055	0.67	1.68	42	-0.83	0.06	+235.2	0.1
1452	4048	0.98	1.60	38	-0.48	0.07	+303.9	0.3
1563	4071	0.98	1.60	30	-0.49	0.07	+239.8	0.1
2009	4282	0.88	1.63	28	-0.31	0.07	+246.3	0.1
2162	4100	0.97	1.61	32	-0.62	0.06	+303.9	0.1
2609	4093	1.03	1.59	31	-0.59	0.07	+230.5	0.4
2714	4059	0.93	1.62	32	-0.49	0.07	+239.4	0.4
2784	4195	1.08	1.58	29	-0.30	0.07	+226.5	0.6
3188	3970	0.68	1.67	35	-0.52	0.07	+255.9	0.2
90005	3953	0.75	1.66	31	-0.63	0.07	+306.7	0.6
90155	3895	0.74	1.66	34	-0.54	0.07	+203.1	0.1
90446	3928	0.68	1.67	33	-0.71	0.07	+270.2	0.1
90668	3957	0.65	1.68	31	-0.51	0.07	+247.9	0.2
90766	4046	0.62	1.69	33	-0.50	0.07	+222.8	0.3
91029	3872	0.78	1.65	34	-0.55	0.07	+270.8	0.3
91063	4260	0.79	1.65	40	-1.03	0.06	+277.2	1.4
91098	3842	0.78	1.65	29	-0.75	0.07	+286.9	0.2
91775	3854	0.69	1.67	28	-0.51	0.07	+256.6	0.1
91800	4216	0.78	1.65	36	-0.49	0.07	+274.8	0.2
92112	4204	0.86	1.63	30	-0.51	0.07	+224.8	0.2
92359	3947	0.84	1.64	35	-0.52	0.07	+254.5	0.6
92374	3974	0.70	1.67	31	-0.94	0.07	+264.7	0.1
92380	3806	0.71	1.67	28	-0.54	0.07	+287.8	0.1
92433	3968	0.64	1.68	32	-0.53	0.07	+255.4	0.2
92606	4055	0.77	1.65	29	-0.73	0.06	+207.0	0.3
92701	3864	0.61	1.69	38	-1.21	0.05	+194.7	0.1
92727	4098	0.60	1.69	32	-0.63	0.07	+281.6	0.3
92729	3703	0.64	1.68	34	-0.75	0.07	+239.7	0.4
92744	3673	0.57	1.70	31	-0.63	0.07	+249.9	0.9
92781	4053	0.79	1.65	27	-0.42	0.07	+250.5	0.1
92802	3972	0.82	1.64	33	-0.54	0.07	+263.0	0.3
92809	4046	0.81	1.64	30	-0.51	0.07	+278.5	0.3
92982	3723	0.72	1.66	30	-0.37	0.07	+242.2	0.1
93312	4157	0.80	1.65	31	-0.38	0.07	+258.0	0.4
93578	4055	0.71	1.67	35	-0.49	0.07	+243.4	0.3
93690	3828	0.55	1.70	42	-0.80	0.06	+254.4	0.1
93985	4017	0.86	1.63	32	-0.49	0.07	+237.0	0.3
94843	3959	0.60	1.69	40	-0.86	0.07	+244.2	0.1

95171	4035	0.75	1.66	33	-0.63	0.07	+317.6	0.1
95426	3987	0.82	1.64	27	-0.48	0.07	+242.2	0.1
95736	4066	0.57	1.70	30	-0.49	0.07	+259.1	0.1
95892	3788	0.55	1.70	35	-0.49	0.07	+220.8	0.4
96374	4086	0.57	1.70	36	-0.60	0.06	+260.4	0.1
96503	3953	0.83	1.64	34	-0.41	0.07	+251.0	1.0
96506	4093	0.62	1.69	35	-0.51	0.07	+253.2	0.1
96591	4064	0.76	1.66	23	-1.97	0.17	+267.6	0.1
96759	3930	0.63	1.69	27	-0.64	0.06	+197.9	0.5
96792	3704	0.73	1.66	42	-0.59	0.07	+282.5	0.2
97241	3964	0.78	1.65	26	-0.61	0.07	+192.4	0.6
97523	3742	0.70	1.67	29	-0.47	0.07	+287.6	0.3
97562	3989	0.75	1.66	28	-0.46	0.07	+268.4	0.2
97727	4190	0.66	1.68	33	-0.51	0.07	+229.6	0.5
97768	3752	0.73	1.66	32	-0.39	0.07	+236.0	0.4
97898	3848	0.68	1.67	26	-0.36	0.07	+259.8	0.2
97944	4062	0.79	1.65	33	-0.58	0.07	+260.5	0.1
98380	4146	0.65	1.68	43	-0.96	0.06	+273.7	0.2
98653	3951	0.83	1.64	37	-0.64	0.07	+268.5	0.2
98694	3864	0.78	1.65	29	-0.81	0.07	+238.2	0.4
98764	3930	0.69	1.67	30	-0.51	0.07	+252.1	0.1
99189	4048	0.78	1.65	32	-0.50	0.07	+269.3	0.1
99264	4026	0.70	1.67	34	-0.53	0.07	+236.6	0.1
99312	3787	0.55	1.70	31	-0.60	0.07	+295.0	0.1
99482	3886	0.73	1.66	32	-0.60	0.07	+224.1	0.1
99797	3852	0.61	1.69	28	-0.71	0.07	+238.6	0.2
100029	3748	0.63	1.69	35	-0.50	0.07	+266.7	0.2
100106	3824	0.66	1.68	30	-0.48	0.08	+232.8	0.4
100262	3911	0.73	1.66	36	-0.88	0.07	+268.7	0.2
100915	3897	0.71	1.67	28	-0.76	0.07	+212.8	0.4
100931	3947	0.84	1.64	34	-0.69	0.07	+249.2	0.1
100994	4044	0.71	1.67	32	-0.53	0.07	+247.2	0.1
101004	4102	0.69	1.67	34	-0.41	0.07	+276.4	0.3
101322	4093	0.77	1.65	32	-0.77	0.07	+253.1	0.5
101326	3983	0.80	1.65	37	-0.61	0.07	+288.5	0.2
101349	4091	0.58	1.70	39	-1.22	0.07	+229.2	0.1
101611	4169	0.76	1.66	30	-0.68	0.07	+285.5	0.2
101992	3759	0.61	1.69	35	-0.65	0.07	+288.2	0.1
102148	3790	0.61	1.69	31	-0.61	0.07	+237.8	0.2
102178	3932	0.76	1.66	29	-0.73	0.07	+236.7	0.3

103019	3576	0.50	1.71	34	-0.39	0.07	+277.4	0.5
--------	------	------	------	----	-------	------	--------	-----

Tabella B.4: Risultati per le stelle analizzate del campo F4_N1978

ID	T_{eff} (K)	$\log g$	ξ (km/s)	N_{righe}	[Fe/H]	$\sigma_{[Fe/H]}$	RV (km/s)	σ_{RV} (km/s)
11783	3872	0.3	1.75	16	-0.65	0.09	+295.0	0.4
11795	3739	0.3	1.75	29	-0.59	0.07	+261.5	0.4
11801	3922	0.4	1.74	25	-0.87	0.07	+188.8	0.1
11809	3840	0.3	1.74	21	-1.18	0.06	+249.1	0.2
11821	4029	0.4	1.72	20	-0.76	0.08	+301.3	0.2
11830	3930	0.4	1.72	31	-0.61	0.06	+310.4	0.2
11835	3820	0.4	1.73	26	-1.10	0.07	+261.3	0.2
11839	3802	0.4	1.73	14	-0.88	0.07	+235.7	0.3
11847	3735	0.4	1.73	18	-0.64	0.08	+292.7	0.3
11851	4035	0.5	1.71	21	-1.00	0.07	+281.4	0.1
11862	3628	0.4	1.74	19	-0.82	0.06	+275.5	0.2
11875	4302	0.6	1.68	20	-0.29	0.07	+272.8	0.2
11876	3955	0.5	1.71	47	-0.86	0.06	+312.4	0.1
11882	3793	0.4	1.72	38	-0.71	0.07	+285.7	0.3
11888	4064	0.5	1.69	26	-0.75	0.06	+283.2	0.2
11889	3934	0.5	1.71	37	-0.75	0.07	+258.7	1.8
11890	3938	0.5	1.70	32	-0.79	0.06	+322.1	0.2
11892	4205	0.6	1.69	18	-1.25	0.06	+336.9	0.1
11894	4307	0.6	1.68	43	-1.29	0.06	+254.0	0.2
11896	3885	0.5	1.71	16	-0.36	0.09	+291.1	0.3
11911	3911	0.5	1.70	37	-0.62	0.06	+282.4	0.3
11914	3951	0.5	1.70	37	-0.50	0.07	+261.5	0.1
11920	4091	0.6	1.68	41	-1.04	0.05	+288.2	0.1
11929	4111	0.6	1.68	36	-0.52	0.07	+286.7	0.4
11937	4104	0.6	1.68	34	-0.55	0.07	+279.3	0.2
11939	3938	0.6	1.69	35	-0.65	0.07	+275.9	0.1
11941	3880	0.6	1.69	22	-0.85	0.07	+238.8	0.2
11946	3938	0.6	1.69	37	-0.68	0.06	+265.5	0.1
11949	3854	0.6	1.69	31	-0.57	0.07	+289.7	0.1
11954	3930	0.6	1.69	36	-0.38	0.07	+305.9	0.2
11960	3878	0.6	1.69	42	-0.78	0.06	+332.3	0.2
11965	3981	0.6	1.68	32	-0.35	0.07	+264.8	0.3
11971	4157	0.7	1.66	31	-0.61	0.06	+330.3	0.1
11973	3981	0.6	1.67	35	-0.59	0.07	+327.5	0.5

11978	3926	0.6	1.68	40	-0.54	0.07	+298.7	0.8
11981	4157	0.7	1.66	38	-0.57	0.07	+285.2	0.2
11983	3955	0.6	1.67	32	-0.30	0.07	+237.0	0.4
11985	4219	0.7	1.65	38	-0.72	0.06	+250.7	0.1
11994	4084	0.7	1.66	34	-0.36	0.07	+250.6	0.1
12007	3754	0.6	1.87	27	-0.26	0.09	+264.6	0.2
12009	3970	0.7	1.66	33	-0.52	0.07	+272.9	0.1
12010	4089	0.7	1.66	35	-0.69	0.07	+312.7	0.5
12011	4164	0.7	1.65	22	-0.91	0.07	+273.9	0.2
12016	4042	0.7	1.66	19	-0.46	0.07	+289.8	0.2
12018	4209	0.8	1.65	20	-0.78	0.07	+280.1	0.3
12025	4042	0.7	1.86	39	-1.13	0.07	+300.2	0.4
12030	4472	0.8	1.63	17	-0.71	0.07	+250.6	0.1
12034	4013	0.7	1.66	45	-0.95	0.07	+311.9	0.1
12037	4169	0.8	1.64	18	-0.40	0.08	+252.2	0.2
12043	4073	0.7	1.65	36	-0.49	0.07	+288.9	0.1
12046	4116	0.8	1.64	40	-0.90	0.06	+276.9	0.2
12051	4073	0.7	1.65	37	-0.61	0.07	+308.0	0.1
12053	3947	0.7	1.66	20	-1.03	0.06	+295.5	0.2
12056	4130	0.8	1.64	20	-0.52	0.07	+292.9	0.2
12062	3983	0.7	1.65	32	-0.41	0.07	+330.4	0.1
12066	4240	0.8	1.63	38	-0.46	0.07	+292.0	0.1
12074	4005	0.8	1.85	29	-0.43	0.07	+308.8	0.5
12075	4317	0.8	1.63	39	-0.58	0.07	+279.0	0.1
12078	3938	0.7	1.65	18	-0.46	0.07	+292.2	0.2
12082	3922	0.7	1.65	35	-0.20	0.07	+289.2	0.1
12095	3989	0.8	1.64	24	-0.98	0.07	+331.2	0.2
12101	4171	0.8	1.63	17	-0.46	0.07	+273.0	0.2
12110	3960	0.8	1.64	32	-0.51	0.07	+235.8	0.1
12111	3992	0.8	1.64	31	-0.57	0.07	+257.2	0.2
12122	4018	0.8	1.64	16	-0.22	0.08	+273.6	0.2
12125	4046	0.8	1.63	15	-0.57	0.07	+291.5	0.2
12138	3941	0.8	1.84	31	-0.21	0.07	+280.2	0.3
12144	3951	0.8	1.64	19	-0.39	0.07	+290.5	0.2
12160	3932	0.8	1.64	18	-0.51	0.08	+255.6	0.2

Tabella B.5: Risultati per le stelle analizzate del campo F5_N2173

ID	T_{eff} (K)	$\log g$	ξ (km/s)	N_{righe}	[Fe/H]	$\sigma_{[Fe/H]}$	RV (km/s)	σ_{RV} (km/s)
11	4057	0.84	1.64	38	-0.69	0.06	+236.7	0.1
3771	3886	0.38	1.74	17	-1.29	0.06	+267.1	0.3
3774	3814	0.36	1.75	38	-0.82	0.07	+265.1	0.1
3797	3787	0.42	1.73	13	-0.85	0.07	+251.0	0.5
3807	4022	0.49	1.72	44	-0.84	0.06	+279.0	0.1
3808	3919	0.48	1.72	29	-0.68	0.08	+216.6	0.4
3810	3826	0.46	1.72	21	-0.84	0.07	+284.8	0.3
3816	3868	0.49	1.72	28	-0.69	0.06	+226.3	0.4
3827	3983	0.56	1.70	16	-0.58	0.07	+238.3	0.3
3830	3832	0.51	1.71	33	-0.81	0.07	+238.4	0.6
3831	3842	0.52	1.71	41	-1.03	0.07	+272.3	0.4
3836	4000	0.58	1.70	34	-0.69	0.07		
3844	3848	0.55	1.70	17	-1.07	0.05	+262.3	0.3
3846	3733	0.51	1.71	23	-0.89	0.08	+256.0	0.2
3848	3998	0.61	1.69	41	-1.01	0.06	+292.4	0.7
3849	3718	0.51	1.71	15	-0.79	0.08	+265.2	0.2
3854	4093	0.65	1.68	17	-1.39	0.05	+295.3	0.3
3855	3628	0.49	1.72	31	-0.48	0.07		
3859	3940	0.61	1.69	15	-0.60	0.07	+232.6	0.4
3861	3913	0.60	1.69	30	-0.80	0.07	+268.0	0.1
3866	3882	0.61	1.69	14	-0.84	0.07	+252.9	0.2
3868	3868	0.61	1.69	28	-0.57	0.08	+234.7	0.7
3871	3761	0.57	1.70	17	-0.73	0.08	+225.5	0.3
3873	4111	0.69	1.67	39	-1.14	0.05	+275.2	0.6
3874	3810	0.60	1.69	37	-1.02	0.06	+226.9	0.3
3875	4136	0.71	1.67	13	-1.35	0.08	+277.2	0.7
3876	3836	0.62	1.69	17	-1.22	0.06	+285.0	0.3
3879	3856	0.63	1.69	25	-0.79	0.06	+216.4	0.7
3881	3798	0.61	1.69	30	-0.90	0.07	+265.2	0.9
3888	4039	0.70	1.67	30	-0.68	0.07		
3893	3966	0.68	1.67	32	-1.21	0.06		
3901	3850	0.66	1.68	12	-0.59	0.09	+241.6	0.3
3905	3936	0.71	1.67	16	-0.65	0.08	+221.0	0.3
3908	3866	0.69	1.67	28	-0.38	0.07	+199.4	0.4
3909	3878	0.69	1.67	28	-0.82	0.07	+256.2	0.9
3919	4000	0.75	1.66	13	-0.82	0.07	+210.6	0.2

3921	4111	0.80	1.65	10	-0.64	0.10	+244.6	0.6
3922	3836	0.71	1.67	31	-0.68	0.07	+287.9	0.1
3923	3834	0.71	1.67	28	-0.79	0.07	+257.7	0.1
3931	4007	0.79	1.65	16	-0.19	0.09	+256.8	0.2
3935	3812	0.73	1.66	11	-0.61	0.08	+260.4	0.4
3939	3957	0.78	1.65	15	-0.93	0.07	+246.8	0.4
3941	4164	0.83	1.64	30	-0.59	0.07	+236.3	0.3
3944	3718	0.72	1.66	36	-0.38	0.08	+224.3	0.3
3945	3913	0.79	1.65	11	-0.77	0.07	+239.2	0.2
3948	3796	0.75	1.66	19	-0.48	0.07	+219.2	0.2
3959	3974	0.84	1.64	14	-0.71	0.07	+267.2	0.2
4645	1781	0.14	1.80	6	-1.04	0.09	+289.1	1.2

Tabella B.6: Risultati per le stelle analizzate del campo F6_N2210

ID	T_{eff} (K)	$\log g$	ξ (km/s)	N_{righe}	$[Fe/H]$	$\sigma_{[Fe/H]}$	RV (km/s)	σ_{RV} (km/s)
186	4122	0.96	1.61	29	-0.58	0.07	+292.3	0.2
842	4336	1.09	1.58	32	-0.54	0.07	+273.9	0.3
1109	4048	0.93	1.62	27	-0.69	0.06	+276.3	0.3
90084	4035	0.95	1.61	36	-0.58	0.07	+293.8	0.1
90099	4147	1.00	1.60	31	-0.38	0.07	+286.2	0.1
90159	4723	1.02	1.60	27	-1.26	0.06	+260.4	0.7
90231	3929	0.50	1.71	44	-1.03	0.05	+286.4	0.4
90272	4141	0.78	1.65	30	-0.18	0.08	+274.4	0.1
90295	4168	0.67	1.68	35	-0.54	0.07	+294.9	0.3
90351	4187	0.84	1.64	28	-0.58	0.07	+245.4	0.3
90364	4471	1.08	1.58	33	-0.23	0.07	+267.5	0.3
90365	4004	0.70	1.67	35	-0.73	0.06	+248.9	0.3
90419	4230	0.99	1.60	33	-0.58	0.07	+288.4	0.1
90489	3894	0.48	1.72	31	-0.55	0.07	+266.7	0.1
90548	3953	0.76	1.66	32	-0.58	0.07	+306.0	0.3
90576	3934	0.68	1.67	30	-0.80	0.07	+300.0	0.3
90618	3993	0.99	1.60	31	-0.65	0.07	+264.6	0.1
90737	4161	0.75	1.66	32	-0.55	0.07	+280.5	0.4
90763	4134	1.07	1.58	30	-0.58	0.07	+238.4	0.2
90818	3961	0.62	1.69	35	-0.69	0.07	+283.0	0.3
90828	3882	0.57	1.70	42	-0.98	0.06	+252.8	0.5
90841	4228	1.08	1.58	30	-0.34	0.07	+257.0	0.5
90865	3957	0.72	1.66	31	-0.51	0.07	+287.9	0.3

90876	4015	0.56	1.70	34	-1.11	0.05	+303.8	0.6
90883	3751	0.49	1.72	32	-0.73	0.07	+292.0	0.1
90923	4254	0.85	1.63	36	-0.52	0.07	+281.3	0.3
90928	3911	0.56	1.70	36	-0.71	0.07	+342.9	0.7
90934	4194	1.04	1.59	31	-0.50	0.07	+254.4	0.5
90968	4346	0.59	1.69	28	-0.40	0.07	+296.3	0.5
90974	4054	0.84	1.64	33	-0.42	0.08	+265.4	0.5
90979	3976	0.83	1.64	41	-0.99	0.07	+275.9	0.5
90982	4194	0.83	1.64	36	-0.59	0.07	+271.1	0.6
90992	4061	0.80	1.65	29	-0.10	0.08	+275.6	0.2
91026	4223	0.94	1.61	39	-1.26	0.06	+279.0	0.4
91063	3678	0.17	1.79	38	-0.81	0.07	+276.6	0.2
91089	4104	0.87	1.63	29	-0.43	0.07	+260.9	0.9
91102	3868	0.44	1.73	41	-0.76	0.07	+259.9	0.2
91137	3761	0.43	1.73	34	-0.62	0.07	+259.2	0.3
91143	4026	0.73	1.66	30	-0.70	0.06	+275.1	0.3
91202	4194	1.06	1.59	34	-0.54	0.07	+260.2	0.2
91259	4392	1.06	1.59	36	-0.46	0.07	+253.6	0.4
91294	3976	0.71	1.67	30	-0.73	0.06	+284.3	0.2
91354	4052	0.80	1.65	29	-0.68	0.06	+241.1	0.1
91355	4145	0.84	1.64	30	-0.52	0.07	+250.9	0.3
91424	4664	1.07	1.58	31	-0.34	0.07	+267.6	0.1
91501	3940	0.62	1.69	29	-0.73	0.06	+245.4	0.1
91512	4316	0.98	1.60	39	-1.29	0.05	+317.6	0.7
91533	3771	0.76	1.66	21	-0.55	0.08	+288.1	0.6
91537	3953	0.69	1.67	32	-0.56	0.07	+274.8	0.1
91543	4482	1.12	1.57	36	-0.29	0.07	+238.1	0.4
91573	4262	0.88	1.63	46	-0.87	0.06	+305.0	0.2
91599	4054	0.81	1.64	34	-0.72	0.06	+285.1	0.5
91603	4006	0.67	1.68	39	-0.88	0.06	+278.7	0.4
91675	3851	0.50	1.71	36	-0.80	0.07	+276.1	0.1
91716	4429	1.03	1.59	22	-0.58	0.07	+259.5	1.0
91757	3857	0.84	1.64	29	-0.32	0.07	+292.2	0.2
91768	4294	0.93	1.62	32	-0.48	0.07	+299.5	1.0
91831	4099	0.57	1.70	41	-0.92	0.06	+272.4	0.3
91842	3874	0.53	1.71	31	-0.67	0.07	+263.9	0.1
91877	4102	0.97	1.61	30	-0.35	0.07	+279.6	0.1
91925	4289	1.02	1.60	32	-0.68	0.07	+248.5	0.1
91946	4211	1.03	1.59	36	-0.79	0.07	+257.7	0.1
91980	3921	0.67	1.68	35	-0.78	0.07	+286.4	0.3

91997	4272	1.01	1.60	30	-0.60	0.07	+283.5	0.2
92021	4037	0.78	1.65	32	-0.65	0.06	+286.3	0.5
92077	3923	0.57	1.70	32	-0.70	0.06	+242.2	0.4
92142	4152	0.77	1.65	28	-0.63	0.06	+252.7	0.3
92155	3940	0.69	1.67	26	-0.68	0.06	+293.2	0.3
92193	4097	0.78	1.65	44	-0.83	0.07	+238.0	0.7
92212	3959	0.88	1.63	36	-0.70	0.07	+310.1	0.2
92253	3812	0.43	1.73	41	-0.80	0.07	+271.0	0.4
92269	4413	1.09	1.58	34	-0.38	0.07	+287.0	0.4

Appendice C

Lista di righe

Tabella C.1: Lista di righe di Ferro, ottimizzata per un valore di $[Fe/H] \sim -0.5$.
Si riporta la lunghezza d'onda delle righe analizzate, con i relativi valori del potenziale d'eccitazione e del logaritmo della forza dell'oscillatore.

λ (\AA)	$\log(gf)$	$E.P$ (eV)
5607.664	-2.270	4.154
5608.974	-2.400	4.209
5624.022	-1.140	4.386
5633.946	-0.320	4.991
5636.696	-2.560	3.640
5650.689	-0.960	5.085
5652.318	-1.920	4.260
5653.867	-1.610	4.386
5659.575	-1.230	5.085
5661.345	-1.756	4.284
5662.516	-0.573	4.178
5679.023	-0.900	4.652
5693.640	-0.680	4.956
5696.090	-1.720	4.548
5691.497	-1.490	4.301
5705.465	-1.355	4.301
5717.833	-1.100	4.284
5731.762	-1.270	4.256
5741.848	-1.670	4.256
5775.081	-1.298	4.220
5778.453	-3.430	2.588

5793.915	-1.660	4.220
5806.725	-1.030	4.607
5827.877	-3.200	3.283
6120.249	-5.970	0.915
6127.907	-1.399	4.143
6139.644	-4.500	2.588
6147.834	-1.671	4.076
6151.618	-3.299	2.176
6165.360	-1.474	4.143
6173.340	-2.880	2.223
6187.989	-1.670	3.943
6213.430	-2.480	2.223
6219.281	-2.433	2.198
6226.734	-2.220	3.883
6229.228	-2.810	2.845
6240.646	-3.170	2.223
6246.319	-0.877	3.602
6252.555	-1.687	2.404
6270.225	-2.610	2.858
6290.543	-4.330	2.588
6301.502	-0.718	3.654
6322.686	-2.426	2.588
6330.849	-1.190	4.733
6335.330	-2.177	2.198
6336.824	-0.856	3.686
6353.836	-6.477	0.915
6380.743	-1.376	4.186
6392.538	-4.030	2.279

Tabella C.2: Lista di righe di Ferro, ottimizzata per un valore di $[Fe/H] \sim -1.1$. Si riporta la lunghezza d'onda delle righe analizzate, con i relativi valori del potenziale d'eccitazione e del logaritmo della forza dell'oscillatore.

λ (\AA)	$\log(gf)$	$E.P$ (eV)
5617.190	-2.880	3.251
5618.632	-1.276	4.209
5624.022	-1.140	4.386
5633.946	-0.320	4.991
5638.262	-0.840	4.220

5641.434	-1.150	4.256
5650.689	-0.960	5.085
5652.318	-1.920	4.260
5653.867	-1.610	4.386
5660.801	-2.830	3.640
5661.345	-1.756	4.284
5662.516	-0.573	4.178
5679.023	-0.900	4.652
5693.640	-0.680	4.956
5701.544	-2.216	2.559
5705.465	-1.355	4.301
5717.833	-1.100	4.284
5731.762	-1.270	4.256
5741.848	-1.670	4.256
5753.123	-0.688	4.260
5775.081	-1.298	4.220
5778.453	-3.430	2.588
5793.915	-1.660	4.220
5806.725	-1.030	4.607
5809.218	-1.790	3.883
5827.877	-3.200	3.283
6120.249	-5.970	0.915
6147.834	-1.671	4.076
6151.618	-3.299	2.176
6165.360	-1.474	4.143
6173.340	-2.880	2.223
6180.204	-2.650	2.727
6187.989	-1.670	3.943
6200.313	-2.437	2.608
6219.281	-2.433	2.198
6213.430	-2.480	2.223
6226.734	-2.220	3.883
6229.228	-2.810	2.845
6232.641	-1.223	3.654
6240.646	-3.170	2.223
6246.319	-0.877	3.602
6252.555	-1.687	2.404
6254.258	-2.426	2.279
6265.134	-2.550	2.176
6270.225	-2.610	2.858

6280.618	-4.390	0.859
6297.793	-2.740	2.223
6301.502	-0.718	3.654
6311.500	-3.141	2.832
6322.686	-2.426	2.588
6330.849	-1.190	4.733
6335.330	-2.177	2.198
6336.824	-0.856	3.686
6344.149	-2.923	2.433
6353.836	-6.477	0.915
6355.029	-2.291	2.845
6380.743	-1.376	4.186
6392.538	-4.030	2.279

Tabella C.3: Lista di righe di Ferro, ottimizzata per un valore di $[Fe/H] \sim -2.0$.
Si riporta la lunghezza d'onda delle righe analizzate, con i relativi valori del
potenziale d'eccitazione e del logaritmo della forza dell'oscillatore.

λ (\AA)	$\log(gf)$	$E.P$ (eV)
5615.297	-2.248	2.588
5615.644	0.050	3.332
5638.262	-0.840	4.220
5641.434	-1.150	4.256
5662.516	-0.573	4.178
5701.544	-2.216	2.559
5717.833	-1.100	4.284
5753.123	-0.688	4.260
5762.992	-0.470	4.209
5775.081	-1.298	4.220
5778.453	-3.430	2.588
5809.218	-1.790	3.883
5816.373	-0.601	4.548
6137.691	-1.403	2.588
6147.834	-1.671	4.076
6151.618	-3.299	2.176
6157.729	-1.220	4.076
6173.340	-2.880	2.223
6180.204	-2.650	2.727
6200.313	-2.437	2.608

6219.281	-2.433	2.198
6213.430	-2.480	2.223
6221.672	-6.417	0.859
6229.228	-2.810	2.845
6232.641	-1.223	3.654
6246.319	-0.877	3.602
6254.258	-2.426	2.279
6252.555	-1.687	2.404
6270.225	-2.610	2.858
6280.618	-4.390	0.859
6297.793	-2.740	2.223
6301.502	-0.718	3.654
6311.500	-3.141	2.832
6322.686	-2.426	2.588
6335.330	-2.177	2.198
6336.824	-0.856	3.686
6344.149	-2.923	2.433
6355.029	-2.291	2.845
6358.697	-4.468	0.859
6393.601	-1.580	2.433

Bibliografia

- Alves D. R., Nelson C. A., 2000, [ApJ](#), 542, 789
- Bekki K., Chiba M., 2005, [MNRAS](#), 356, 680
- Bekki K., Couch W. J., Beasley M. A., Forbes D. A., Chiba M., Da Costa G. S., 2004, [ApJL](#), 610, L93
- Besla G., 2015, preprint, ([arXiv:1511.03346](#))
- Besla G., Kallivayalil N., Hernquist L., van der Marel R. P., Cox T. J., Kereš D., 2010, [ApJL](#), 721, L97
- Brocato E., Castellani V., Ferraro F. R., Piersimoni A. M., Testa V., 1996, [MNRAS](#), 282, 614
- Brocato E., Castellani V., Di Carlo E., Raimondo G., Walker A. R., 2003, [ApJ](#), 125, 3111
- Buzzoni A., Patelli L., Bellazzini M., Pecci F. F., Oliva E., 2010, [MNRAS](#), 403, 1592
- Carpenter J. M., 2001, [ApJ](#), 121, 2851
- Carrera R., Gallart C., Hardy E., Aparicio A., Zinn R., 2008, [ApJ](#), 135, 836
- Carrera R., Gallart C., Aparicio A., Hardy E., 2011, [ApJ](#), 142, 61
- Cioni M.-R. L., 2009, [A & A](#), 506, 1137
- Cioni M.-R. L., Girardi L., Marigo P., Habing H. J., 2006, [A & A](#), 448, 77
- Cole A. A., Tolstoy E., Gallagher III J. S., Smecker-Hane T. A., 2005, [ApJ](#), 129, 1465
- Ferraro F. R., Origlia L., Testa V., Maraston C., 2004, [ApJ](#), 608, 772
- Gaia Collaboration et al., 2018, [A & A](#), 616, A1

- Gallart C., et al., 2003, *ApJ*, **125**, 742
- Geisler D., Bica E., Dottori H., Claria J. J., Piatti A. E., Santos Jr. J. F. C., 1997, *ApJ*, **114**, 1920
- González Hernández J. I., Bonifacio P., 2009, *A & A*, **497**, 497
- Grevesse N., Sauval A. J., 1998, *Science & Space Review*, **85**, 161
- Grocholski A. J., Cole A. A., Sarajedini A., Geisler D., Smith V. V., 2006, *ApJ*, **132**, 1630
- Hammer F., Yang Y. B., Flores H., Puech M., Fouquet S., 2015, *ApJ*, **813**, 110
- Harris J., Zaritsky D., 2009, *ApJ*, **138**, 1243
- Hidalgo S. L., et al., 2011, *ApJ*, **730**, 14
- Hill V., Andrievsky S., Spite M., 1995, *A & A*, **293**, 347
- Hill V., François P., Spite M., Primas F., Spite F., 2000, *A & A*, **364**, L19
- Holtzman J. A., et al., 1999, *ApJ*, **118**, 2262
- Hughes S. M. G., Wood P. R., Reid N., 1991, *ApJ*, **101**, 1304
- Jeon Y.-B., Nemeč J. M., Walker A. R., Kunder A. M., 2014, *ApJ*, **147**, 155
- Johnson J. A., Ivans I. I., Stetson P. B., 2006a, *ApJ*, **640**, 801
- Johnson J. A., Ivans I. I., Stetson P. B., 2006b, *ApJ*, **640**, 801
- Kim S., Staveley-Smith L., Dopita M. A., Freeman K. C., Sault R. J., Kesteven M. J., McConnell D., 1998, *ApJ*, **503**, 674
- Kirby E. N., Guhathakurta P., Bolte M., Sneden C., Geha M. C., 2009, *ApJ*, **705**, 328
- Kunkel W. E., Demers S., Irwin M. J., Albert L., 1997, *ApJL*, **488**, L129
- Kurucz R. L., 1993, *VizieR Online Data Catalog*, **6039**
- Kurucz R. L., 2005, *Memorie della Societa Astronomica Italiana Supplementi*, **8**, 14
- Lapenna E., Mucciarelli A., Origlia L., Ferraro F. R., 2012, *ApJ*, **761**, 33
- Mackey A. D., Payne M. J., Gilmore G. F., 2006, *MNRAS*, **369**, 921

- Mateluna R., Geisler D., Villanova S., Carraro G., Grocholski A., Sarajedini A., Cole A., Smith V., 2012, *A & A*, **548**, A82
- McCall M. L., 2004, *ApJ*, **128**, 2144
- Meschin I., Gallart C., Aparicio A., Hidalgo S. L., Monelli M., Stetson P. B., Carrera R., 2014, *MNRAS*, **438**, 1067
- Minniti D., Borissova J., Rejkuba M., Alves D. R., Cook K. H., Freeman K. C., 2003, *Science*, **301**, 1508
- Mucciarelli A., 2011, *A & A*, **528**, A44
- Mucciarelli A., 2013, preprint, ([arXiv:1311.1403](https://arxiv.org/abs/1311.1403))
- Mucciarelli A., Carretta E., Origlia L., Ferraro F. R., 2008, *ApJ*, **136**, 375
- Mucciarelli A., Origlia L., Ferraro F. R., Pancino E., 2009, *ApJL*, **695**, L134
- Mucciarelli A., Origlia L., Ferraro F. R., 2010, *ApJ*, **717**, 277
- Mucciarelli A., Pancino E., Lovisi L., Ferraro F. R., Lapenna E., 2013, *ApJ*, **766**, 78
- Muratov A. L., Gnedin O. Y., 2010, *ApJ*, **718**, 1266
- Nikolaev S., Drake A. J., Keller S. C., Cook K. H., Dalal N., Griest K., Welch D. L., Kanbur S. M., 2004, *ApJ*, **601**, 260
- Olsen K. A. G., Salyk C., 2002, *ApJ*, **124**, 2045
- Olsen K. A. G., Hodge P. W., Mateo M., Olszewski E. W., Schommer R. A., Suntzeff N. B., Walker A. R., 1998, *MNRAS*, **300**, 665
- Olsen K. A. G., Zaritsky D., Blum R. D., Boyer M. L., Gordon K. D., 2011, *ApJ*, **737**, 29
- Olszewski E. W., Schommer R. A., Suntzeff N. B., Harris H. C., 1991, *ApJ*, **101**, 515
- Pasquini L., et al., 2002, *The Messenger*, **110**, 1
- Persson S. E., Aaronson M., Cohen J. G., Frogel J. A., Matthews K., 1983, *ApJ*, **266**, 105
- Pompéia L., et al., 2008, *A & A*, **480**, 379

- Putman M. E., Staveley-Smith L., Freeman K. C., Gibson B. K., Barnes D. G., 2003, *ApJ*, **586**, 170
- Ramírez I., Allende Prieto C., 2011, *ApJ*, **743**, 135
- Robin A. C., Reylé C., Derrière S., Picaud S., 2003, *A & A*, **409**, 523
- Rubele S., et al., 2012, *A & A*, **537**, A106
- Skrutskie M. F., et al., 2006, *ApJ*, **131**, 1163
- Smecker-Hane T. A., Cole A. A., Gallagher III J. S., Stetson P. B., 2002, *ApJ*, **566**, 239
- Smith V. V., et al., 2002, *ApJ*, **124**, 3241
- Song Y.-Y., Mateo M., Walker M. G., Roederer I. U., 2017, *ApJ*, **153**, 261
- Staveley-Smith L., Kim S., Calabretta M. R., Haynes R. F., Kesteven M. J., 2003, *MNRAS*, **339**, 87
- Stetson P. B., Pancino E., 2008, *Publication of the Astronomical Society of the Pacific*, **120**, 1332
- Stinson G. S., Dalcanton J. J., Quinn T., Gogarten S. M., Kaufmann T., Wadsley J., 2009, *MNRAS*, **395**, 1455
- Van der Swaelmen M., Hill V., Primas F., Cole A. A., 2013, *A & A*, **560**, A44
- Walker A. R., 1992, *ApJ*, **104**, 1395
- de Vaucouleurs G., Freeman K. C., 1972, *Vistas in Astronomy*, **14**, 163
- de Vaucouleurs G., de Vaucouleurs A., Corwin Jr. H. G., Buta R. J., Paturel G., Fouqué P., 1991, Third Reference Catalogue of Bright Galaxies. Volume I: Explanations and references. Volume II: Data for galaxies between 0^h and 12^h . Volume III: Data for galaxies between 12^h and 24^h .
- van der Marel R. P., 2001, *ApJ*, **122**, 1827
- van der Marel R. P., Cioni M.-R. L., 2001, *ApJ*, **122**, 1807
- van der Marel R. P., Alves D. R., Hardy E., Suntzeff N. B., 2002, *ApJ*, **124**, 2639