

Dipartimento di Fisica e Astronomia
Corso di Laurea magistrale in Astrofisica e Cosmologia

Ricerca di stelle Lithium-rich
nell'ammasso globulare NGC 6397

Tesi di Laurea Magistrale

Presentata da:
Ilaria Petralia

Relatore:
Chiar.mo Prof.
Alessio Mucciarelli

Appello IV
Anno Accademico 2019-2020

*Non so nulla con certezza,
ma la vista delle stelle mi fa sognare.*

Vincent Van Gogh

Indice

Introduzione	1
1 Stelle Li-rich	3
1.1 Abbondanza di Litio in stelle di piccola massa	3
1.2 Le stelle Li-rich	8
1.3 Meccanismi di formazione delle stelle Li-rich	10
2 Strumento e Dataset	12
2.1 MUSE	12
2.2 NGC 6397	14
2.3 Dataset	15
3 Analisi dei dati	20
3.1 Velocità Radiale	20
3.2 Identificazione delle candidate lithium-rich	25
4 Risultati	29
4.1 Stelle Li-rich in NGC 6397	29
4.2 Abbondanza di Litio nelle stelle Li-rich	38
4.3 Completezza	41
5 Conclusioni	44
Bibliografia	46

Introduzione

Le stelle Li-rich sono una classe rarissima di stelle, caratterizzate da un'abbondanza di Litio molto più elevata rispetto a quella misurata nelle stelle nella medesima fase evolutiva. Esse sono sempre state scoperte in maniera casuale nell'ambito di campagne spettroscopiche sia in stelle di ammassi globulari che in stelle di campo. L'origine di questa sovrabbondanza di Litio è ancora sconosciuta e sono stati proposti diversi meccanismi, sia di produzione interna di nuovo Litio che di trasferimento di materiale ricco di Litio da altre stelle o sistemi. La maggiore limitazione nella loro ricerca è che candidate Li-rich non possono essere pre-selezionate in base ad altre proprietà. Infatti, queste stelle non mostrano alcuna caratteristica fotometrica particolare rispetto alle stelle con abbondanze normali di Litio, se non la presenza di un'intensa riga di Litio a 6707.8 \AA . Attualmente si conoscono solamente 15 stelle Li-rich in tutti gli ammassi globulari investigati fino ad oggi.

Questo lavoro di tesi si pone come obiettivo di investigare un nuovo approccio nella ricerca di queste stelle rare, basandosi su spettroscopia a campo integrale (IFU). In particolare, questo lavoro si concentra sulla ricerca di stelle Li-rich nell'ammasso globulare NGC 6397, uno degli ammassi più vicini e più studiati della nostra Galassia. Per svolgere questa ricerca sono stati analizzati 14271 spettri di stelle, acquisiti tramite lo spettrografo a campo integrale MUSE montato sul telescopio VLT dell'ESO. Si tratta di uno strumento innovativo in quanto permette di sfruttare la tecnologia degli IFU. MUSE quindi consente di ricavare simultaneamente informazioni fotometriche e spettroscopiche, e quindi di fornire una ampia statistica di sorgenti in campi stellari. Tuttavia si tratta di uno strumento a bassa risoluzione spettrale. Per questo motivo, questo lavoro di tesi è un progetto pilota, il cui intento è quello di capire se lo strumento è adeguato a ricercare stelle Li-rich negli ammassi globulari che poi potranno essere studiate in dettaglio con spettroscopia ad alta risoluzione.

Dato il grande numero di spettri MUSE a disposizione, è stato necessario sviluppare una procedura in grado di riconoscere automaticamente, nel caso fosse presente, la riga di Litio. Quindi dopo aver corretto tutti gli spettri per la loro velocità radiale, sono state identificate due regioni (quella del continuo e quella della riga) utilizzate per definire un diagnostico che sia sensibile alla presenza della riga di Litio.

Questo lavoro di tesi è strutturato come segue:

- Nel Capitolo 1 viene descritto in maniera teorica l'andamento dell'abbondanza di Litio per le stelle di piccola massa e il caso particolare delle stelle Li-rich con i possibili meccanismi di formazione.

- Nel Capitolo 2 vengono presentate le caratteristiche dello spettrografo MUSE, il target dell'osservazione ovvero l'ammasso globulare NGC 6397 e infine il dataset spettroscopico a disposizione.
- Nel Capitolo 3 viene descritta l'analisi dei dati, ovvero la correzione per la velocità radiale e la definizione della procedura in grado di identificare candidate stelle Li-rich.
- Nel Capitolo 4 vengono descritti i risultati ottenuti, l'identificazione di alcune nuove stelle Li-rich e la derivazione della loro abbondanza di Litio.
- Infine nel Capitolo 5 vengono riassunti i risultati ottenuti da questo lavoro di tesi e vengono discussi gli sviluppi futuri.

Capitolo 1

Stelle Li-rich

1.1 Abbondanza di Litio in stelle di piccola massa

Il Litio è un elemento chimico fondamentale in astrofisica perchè lega la cosmologia e i primi minuti di vita del nostro Universo con aspetti importanti della fisica e dell'evoluzione stellare. Infatti, durante la nucleosintesi primordiale successiva al Big Bang, vengono formati Idrogeno (H), Elio (He) e Litio (in particolare, il suo isotopo ${}^7\text{Li}$). L'abbondanza di Litio prodotta durante la nucleosintesi primordiale è stata stimata dal rapporto barioni su fotoni misurato dai satelliti WMAP (Spergel et al. 2007; Hinshaw et al. 2013) e Planck (Planck collaboration 2013), insieme al modello standard di nucleosintesi primordiale. Il valore stimato è $A(\text{Li}) = 2.72 \pm 0.06$ dex (Cyburt et al. 2008), dove $A(\text{Li})$ esprime la concentrazione del numero di atomi di Litio rispetto a quelli di Idrogeno, nella notazione standard ($A(\text{Li}) = \log(\text{Li}/\text{H}) + 12$).

Le stelle non sono in grado di arricchire il mezzo interstellare di nuovo Litio. Infatti, il Litio, sia quello già esistente che quello che viene prodotto durante la catena p-p di bruciamento di H, viene immediatamente distrutto da catture protoniche. Tale processo avviene a temperature relativamente basse, di circa $2.5 \cdot 10^6$ K. Le reazioni che coinvolgono il Litio negli interni stellari (sua produzione e successiva distruzione) sono le seguenti:



Spite & Spite (1982) mostrano per la prima volta che stelle di Popolazione II (quindi tra le stelle più vecchie dell'alone Galattico) con $T_{eff} > 5700$ K (quindi ancora in Sequenza Principale, MS) hanno la stessa abbondanza superficiale di Litio indipendentemente dalla metallicità e dalla temperatura. Questo andamento costante ($A(\text{Li}) \sim 2.2$ dex)

è detto Spite Plateau ed è stato confermato in tutte le osservazioni successive di stelle di MS con $[\text{Fe}/\text{H}] < -1.0$ dex (Bonifacio & Molaro 1997, Charbonnel & Primas 2005, Asplund et al. 2006). In Figura 1.1 viene mostrato l'andamento di $A(\text{Li})$ in un funzione di T_{eff} e $[\text{Fe}/\text{H}]$ per un campione di stelle di campo di MS.

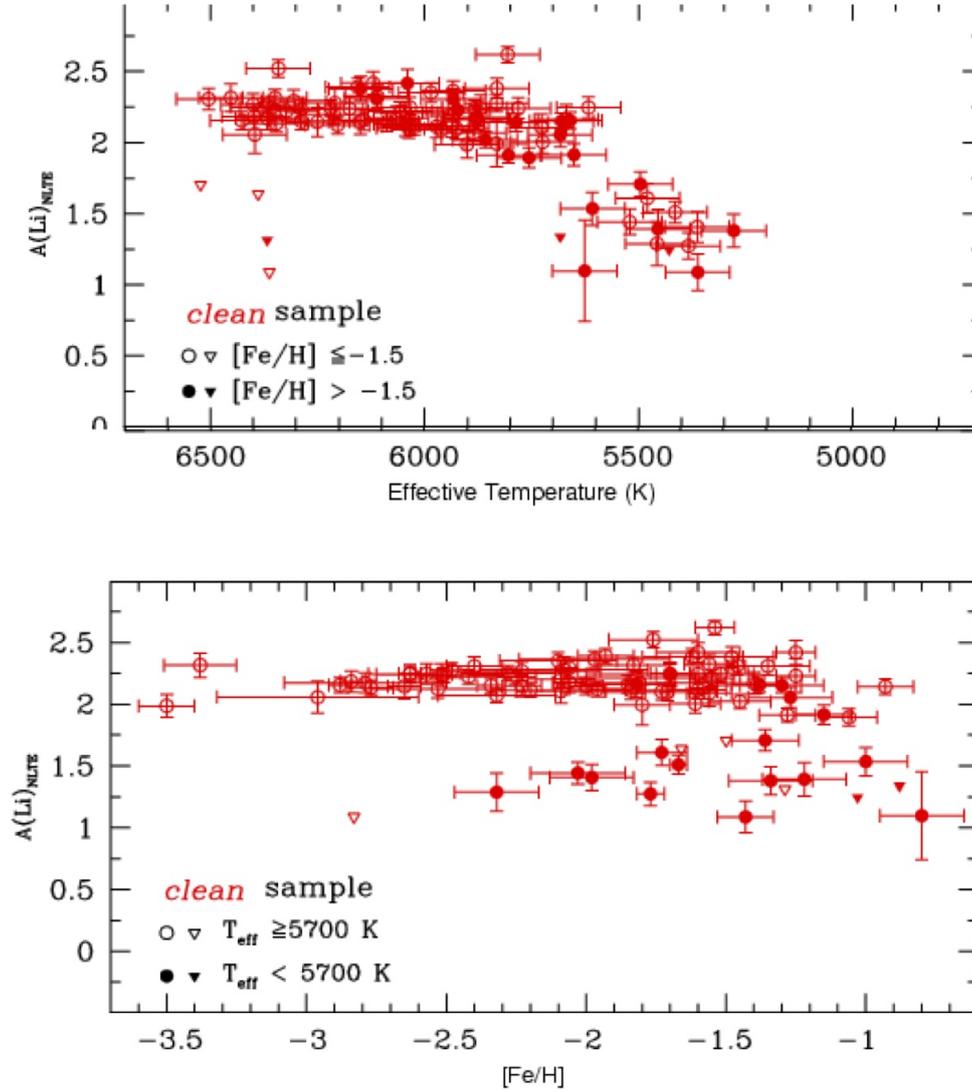


Figura 1.1: In alto: Andamento di $A(\text{Li})$ in funzione di T_{eff} per un campione di stelle di MS dell'alone Galattico. In basso: Andamento di $A(\text{Li})$ in funzione di $[\text{Fe}/\text{H}]$ (Immagini prese da Charbonnel & Primas 2005).

Tale abbondanza costante è stata solitamente interpretata come evidenza del Litio prodotto dal Big Bang (Spite & Spite et al. 1982) che sarebbe quindi conservato nelle fotosfere delle stelle non evolute. Tale valore di abbondanza è $A(\text{Li})$ ed è un fattore 3 - 4 più basso del valore stimato dalla nucleosintesi primordiale. Questa discrepanza è ancora senza spiegazione ed è comunemente chiamata "problema del Litio".

È importante notare come l'abbondanza superficiale di Litio in stelle di piccola massa ($0.7 - 0.9 M_{\odot}$) cambi con l'evoluzione temporale della stella. In Figura 1.2 viene mostrata la variazione dell'abbondanza superficiale del Litio per stelle di piccola massa

in funzione della gravità superficiale. La gravità può essere usata come tracciante della luminosità della stella. Infatti la gravità dipende dalla luminosità (L), oltre che dalla massa e dalla temperatura. Considerando poi il logaritmo di queste quantità, si deduce che $\log(g)$ è proporzionale a $-\log(L)$, pertanto $\log(L)$ grande implica $\log(g)$ piccolo e viceversa. Dunque, le stelle più luminose sono quelle che hanno $\log(g)$ più piccolo. Da questo ragionamento si deduce che studiare la variazione di Litio in funzione della gravità è esattamente analogo a studiarla in funzione della luminosità.

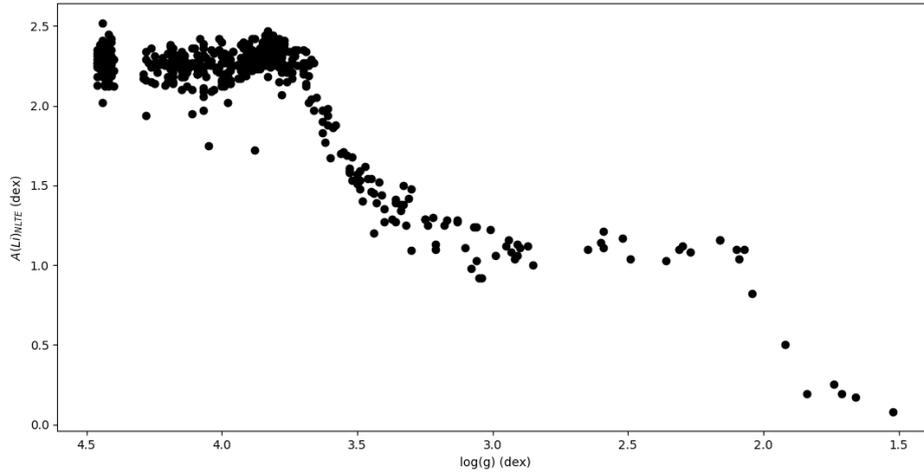


Figura 1.2: Andamento di $A(Li)_{NLTE}$ in funzione di $\log(g)$ per stelle membre dell'ammasso globulare NGC 6397 (Lind et al. 2009).

L'abbondanza superficiale di Litio nelle stelle di piccola massa, come quelle che popolano gli ammassi globulari (GCs), mostra un andamento molto chiaro a seconda della fase evolutiva osservata. In particolare si evidenziano quattro regimi:

- stelle di MS: $A(Li)$ rimane costante al valore dello Spite Plateau, ovvero $A(Li) \simeq 2.2$ dex.
- stelle di SGB: $A(Li)$ diminuisce drasticamente quando la stella supera il punto di turn-off (TO), raggiungendo valori $A(Li) \sim 1.1$ dex. Questo calo è dovuto ai processi di mixing che si attivano durante la fase di SGB.
- stelle di RGB più deboli del livello di luminosità dell'RGB Bump: queste stelle mostrano un'abbondanza costante di Litio (RGB Plateau), attorno al valore $A(Li) \sim 1.0 - 1.1$ dex.
- stelle di RGB più brillanti del livello di luminosità dell'RGB Bump: $A(Li)$ subisce un ulteriore calo fino a diventare non misurabile nelle stelle di RGB più brillanti e fredde.

La Figura 1.3 mostra l'andamento di $A(Li)$ in funzione della magnitudine assoluta in banda V delle stelle di NGC 6397 (le stelle della Figura 1.2) con affiancato il diagramma colore - magnitudine (CMD) con segnata la posizione delle stelle mostrate nel pannello di sinistra. Questa figura permette di associare facilmente le abbondanze di Litio alle diverse fasi evolutive a seconda del valore della gravità o luminosità. Quindi a seconda del valore della gravità superficiale, si considera una diversa fase evolutiva.

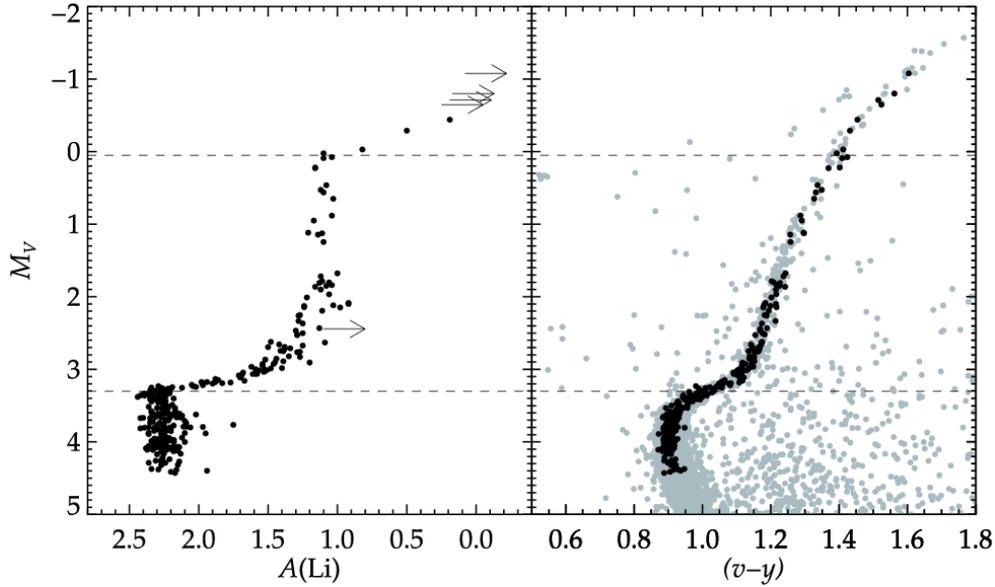


Figura 1.3: A sinistra: Grafico con la magnitudine in banda V assoluta (in ordinata) in funzione delle abbondanze NLTE di Litio (in ascissa). Le frecce indicano i limiti superiori di $A(\text{Li})$. A destra: Diagramma colore-magnitudine di NGC 6397. Le due linee tratteggiate orizzontali segnano le posizioni della rapida diminuzione dell'abbondanza di Litio causate dal primo dredge-up e dal RGB Bump rispettivamente (Lind et al. 2009).

L'andamento misurato di $A(\text{Li})$ nelle stelle degli ammassi globulari in varie fasi evolutive può essere spiegato alla luce dell'evoluzione delle stelle di piccola massa. Infatti, la teoria dell'evoluzione stellare consente di predire l'andamento temporale dell'abbondanza superficiale di Litio.

L'andamento teorico ipotizza la variazione dell'elemento chimico in funzione dello stadio evolutivo, ovvero della fase evolutiva delle stelle. Questa relazione implica quindi che l'abbondanza assoluta superficiale del Litio sia in funzione della luminosità.

L'evoluzione dell'abbondanza superficiale di Litio che si osserva nelle stelle di Popolazione II riflette l'evoluzione della convezione superficiale in queste stelle, combinata con la bassa temperatura di bruciamento del Litio. Infatti:

- Il Litio brucia a temperature di circa 2 milioni di gradi Kelvin ($2.5 \cdot 10^6$ K). Questo significa che lo strato dove il Litio viene bruciato si trova sotto l'atmosfera ma in una regione ancora lontana dal nucleo dove avvengono le reazioni termonucleari. Questo fa sì che la regione povera di Litio possa essere facilmente raggiunta dalla convezione.
- Quando la stella termina la fase di MS, la convezione inizia la penetrazione nella struttura stellare, incontrando quasi subito del materiale privo di Litio, perché questo elemento brucia a temperature piuttosto basse e quindi è stato precedentemente bruciato. Questo materiale viene portato in superficie dalla convezione, combinandosi con il materiale che presenta l'abbondanza iniziale di Litio della stella. Di conseguenza, il Litio presente nell'atmosfera, che ha l'abbondanza tipica dello Spite Plateau ovvero di 2.1 - 2.2 dex, viene diluito. Diluendo il Litio con il materiale portato dalla convezione, quindi si assiste alla riduzione dell'abbondanza superficiale.

Tale calo si arresta appena la convezione ha raggiunto la massima profondità di

penetrazione. A quel punto l'abbondanza rimane invariata perchè il Litio non viene più diluito. Questo spiega la presenza del secondo plateau.

Sostanzialmente, i primi tre andamenti, ovvero lo Spite Plateau, il calo durante la fase di SGB e l'RGB Plateau, si possono spiegare con i modelli di evoluzione stellare standard. Infatti, i modelli canonici prevedono che il primo dredge-up provochi il primo calo nell'andamento dell'abbondanza assoluta, a causa dell'avvio della convezione, la quale porta in superficie il materiale. Quando questo processo raggiunge la massima profondità dell'involuppo convettivo, il Litio non viene più diluito e il suo valore rimane costante, formando così il secondo plateau nell'andamento.

Si è scoperto osservativamente (Gratton et al. 2000) che molti elementi, tra cui il Litio, diminuiscono di abbondanza quando oltrepassano il Bump del RGB. Questo ha portato a teorizzare quelli che vengono chiamati i meccanismi di extra-mixing o mixing non canonici. Il secondo calo si pensa sia legato a meccanismi di questo genere, in quanto non è previsto dai modelli standard dell'evoluzione stellare. Dunque, per spiegare le abbondanze di Litio nelle stelle di RGB post-Bump si devono introdurre dei modelli non canonici, che includono meccanismi di convezione aggiuntivi. Essendo meccanismi legati alla convezione, il processo è analogo a quello previsto dai modelli standard per il primo dredge-up. Infatti, il calo nell'andamento indica che in qualche modo con il Bump la convezione ha portato in superficie dell'altro materiale privo di Litio, diluendo ancora di più quello presente. Quindi si assiste ad una ulteriore diminuzione dell'abbondanza di Litio. In conclusione, l'andamento di $A(\text{Li})$ con la fase evolutiva che si osserva nelle stelle di piccola massa è completamente spiegato dall'evoluzione stellare, in base alla capacità della convezione di raggiungere regioni povere di Litio.

1.2 Le stelle Li-rich

Lo studio dell'abbondanza di Litio nelle stelle di piccola massa ha portato alla scoperta di una situazione più complessa rispetto a quella descritta nella Sezione 1.1. L'andamento dell'abbondanza superficiale di Litio osservata nelle stelle di piccola massa e descritto precedentemente, è perfettamente spiegato in base all'effetto della convezione nei diversi stati evolutivi. D'altra parte alcune stelle contraddicono questo andamento, mostrando valori di $A(\text{Li})$ significativamente più alti di quelli misurati in stelle dello stesso stato evolutivo. Tali stelle sono dette stelle Li-rich. Esse sono state osservate sia negli ammassi stellari che nel campo della nostra Galassia (Charbonnel & Balachandran 2000, Monaco et al. 2011, Ruchti et al. 2011) ed in tutte le fasi evolutive (Sanna et al. 2020). Inoltre tali stelle sono state osservate anche in alcune galassie sferoidali nane del Gruppo Locale (Kirby et al. 2012). Si tratta quindi di stelle la cui esistenza non è limitata a determinati ambienti e a specifiche fasi evolutive.

Gli ammassi globulari possono essere un ambiente particolarmente favorevole per studiare queste stelle. Infatti le stelle di un ammasso globulare si sono formate in un unico burst di formazione, quindi hanno tutte la stessa età e metallicità. Inoltre sono tutte stelle alla stessa distanza dall'osservatore, quindi è facile determinare a quale fase evolutiva possano appartenere le stelle.

La Figura 1.4 mostra l'andamento di $A(\text{Li})$ in funzione di $\log(g)$ per le stelle dell'ammasso globulare NGC 6397 (che quindi mostrano l'andamento normale di $A(\text{Li})$ discusso in Sezione 1.1) insieme alle 15 stelle Li-rich scoperte finora in ammassi globulari.

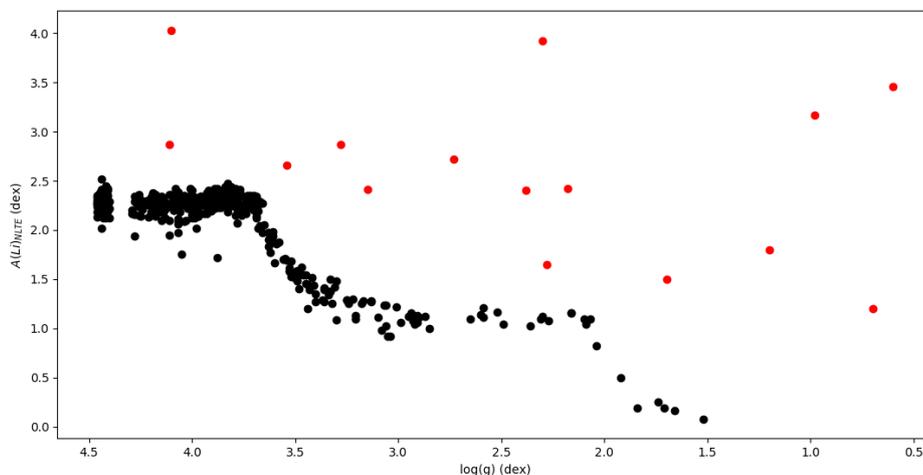


Figura 1.4: Andamento di $A(\text{Li})$ in funzione del logaritmo della gravità superficiale per le stelle dell'ammasso globulare NGC6397 (punti neri). In rosso sono mostrate le 15 stelle Li-rich finora conosciute.

Come si può vedere, la maggior parte delle stelle Li-rich (punti rossi) mostrano tipicamente un'abbondanza di Litio maggiore di 0.5 – 1.5 dex rispetto alle stelle nella stessa fase evolutiva. Di conseguenza, le stelle Li-rich contraddicono l'andamento osservato nella maggior parte delle stelle e non possono essere spiegate alla luce dell'evoluzione stellare canonica.

Le stelle Li-rich sono estremamente rare negli ammassi globulari. Finora sono state trovate in totale, in maniera del tutto casuale, 15 stelle Li-rich nei GCs, in diverse fasi evolutive. Di queste, due sono stelle di MS e si trovano in NGC6397 e M4 (rispettivamente Koch et al. 2011; Monaco et al. 2012), due sono stelle di AGB e sono nell'ammasso globulare M68 (Kirby et al. 2016), una è di post-AGB ed è nell'ammasso M5 (Carney et al. 1998), e infine dieci sono stelle lungo diverse regioni di RGB o SGB e sono state rilevate negli ammassi M3, NGC 362, NGC1261, M30 e Omega Centauri (Kraft et al. 1999; Smith et al. 1999; Ruchti et al. 2011; D'Orazi et al. 2015b; Kirby et al. 2016; Sanna et al. 2020; Gruyters et al. 2016; Mucciarelli et al. 2019).

Una di queste stelle è stata scoperta nell'ammasso globulare NGC 6397 (Koch et al. 2011; Pasquini et al. 2014). Si tratta di una stella di Sequenza Principale, localizzata in prossimità del turn-off. La sua abbondanza superficiale di Litio è 4.21 ± 0.06 dex. Tale abbondanza è più alta di un fattore 100 rispetto al canonico valore dello Spite plateau. Sono stati discussi diversi meccanismi di formazione, come ad esempio una possibile contaminazione da parte di una compagna binaria, ma nessuno di questi scenari può spiegare in modo inequivocabile una tale sovrabbondanza. Stelle con valori di $A(\text{Li})$ così grande sono estremamente rare. Questa stella si trova nella regione più esterna dell'ammasso, e per tale motivo non fa parte del campione da analizzare in questo lavoro di tesi. Tuttavia, la sua presenza è di buon auspicio per la scoperta di ulteriori stelle Li-rich in questo ammasso globulare.

È importante notare che le stelle Li-rich non hanno caratteristiche fotometriche particolari che permettano di pre-selezionare possibili candidate con un eccesso di $A(\text{Li})$. Questo fatto, combinato con la rarità di queste stelle, spiega perchè le stelle Li-rich identificate finora siano sempre state scoperte "per caso". L'unica maniera per effettuare una ricerca accurata di queste stelle è quindi basata sull'elevata statistica di spettri a disposizione.

1.3 Meccanismi di formazione delle stelle Li-rich

Per spiegare una sovrabbondanza di Litio in stelle di bassa metallicità, come quelle degli ammassi globulari e dell'alone Galattico, è necessario avere un meccanismo in grado di produrre nuovo Litio. L'unico finora conosciuto è il meccanismo di Cameron-Fowler (Cameron & Fowler 1971) che si basa sulle due reazioni:



La prima reazione diventa efficiente a temperature di circa $2 \cdot 10^7$ K, molto maggiori della temperatura di bruciamento del Litio. Quindi, quando il ${}^7\text{Be}$ forma ${}^7\text{Li}$ questo viene immediatamente distrutto da reazioni di cattura protonica (discusse in Sezione 1.1). Nel meccanismo di Cameron-Fowler questo problema viene ovviato se occorre qualche processo in grado di trasportare efficientemente il ${}^7\text{Be}$ appena formato verso strati stellari più freddi, in modo che la successiva produzione di ${}^7\text{Li}$ avvenga senza che questo venga immediatamente bruciato. Si tratta quindi di un meccanismo che può avvenire in maniera efficiente solo in determinate condizioni.

Gli scenari proposti per spiegare le stelle Li-rich (tutti basati sul meccanismo di Cameron-Fowler) sono principalmente tre:

- Engulfment di sistemi sub-stellari come pianeti o nane brune (Siess & Livio 1999). In questo scenario, stelle in fase di gigante, quando il raggio stellare è maggiore, inglobano corpi di piccola massa, come pianeti rocciosi, pianeti gioviani o nane brune. Questi corpi possono avere un maggiore quantitativo di Litio, facendo aumentare l'abbondanza superficiale della stella, oppure possono aumentarne il momento angolare. Tale extra-rotazione stellare può indurre episodi di mixing in grado di attivare il meccanismo di Cameron-Fowler (Denissenkov & Hwerig 2004). Diversi studi (Gonzalez 1997; Fischer & Valenti 2005; Casey et al. 2016) mostrano che questo scenario è improbabile per stelle metal-poor, perchè la presenza di pianeti è favorita per stelle con metallicità $[\text{Fe}/\text{H}] > -0.5$ dex, quindi non è uno scenario favorevole per spiegare le stelle Li-rich osservate negli ammassi globulari.
- Auto-arricchimento: l'abbondanza di Litio che osserviamo è prodotta nella stella stessa attraverso il meccanismo di Cameron-Fowler e portato in superficie con diversi processi a seconda del tipo di stella.
 - Fase di RGB: extra mixing durante la fase di RGB Bump (a volte chiamato cool bottom processing; Boothroyd et al. 1995; Boothroyd & Sackmann 1999; Palacios et al. 2001) quando, grazie al primo dredge-up, il materiale ricco di ${}^3\text{He}$ viene trasportato vicino alla regione più calda della shell che brucia H.
 - Fase di AGB: la produzione di nuovo Litio durante l'AGB, l'early-AGB o AGB thermal pulses phases, a seconda della massa della stella (Ventura & D'Antona 2011; Charbonnel & Balachandran 2000).

- Trasferimento di massa da diversi tipi di compagni binari: il Litio osservato non è prodotto nella stella ma dalla compagna di quest'ultima che quindi appartiene ad un sistema binario. Il Litio è quindi prodotto nella stella compagna e portato sulla superficie della stella attraverso un processo di trasferimento di massa. La produzione di Litio nella stella compagna può avvenire attraverso i meccanismi discussi sopra. Tipicamente la candidata più plausibile è una stella che ha attraversato la sua fase di AGB dove durante la fase di hot bottom burning è favorita la produzione di Litio tramite Cameron-Fowler.

Capitolo 2

Strumento e Dataset

2.1 MUSE

Lo strumento utilizzato per l'acquisizione degli spettri è lo spettrografo a campo integrato MUSE. MUSE, acronimo di Multi Unit Spectroscopic Explorer, è uno strumento di seconda generazione installato sul fuoco Nasmyth dell'UT4 presso il Very Large Telescope (VLT) dell'European Southern Observatory (ESO). Tale strumento utilizza la tecnologia degli Integral Field Unit (IFU) che permette di ottenere simultaneamente informazioni fotometriche e spettroscopiche. Le immagini ottenute sono infatti dei cubi i cui assi registrano le informazioni spaziali (RA, DEC) e spettrali (λ). La Figura 2.1 mostra un esempio schematico della struttura di un cubo MUSE, con la presenza simultanea di informazioni spaziali e spettrali.

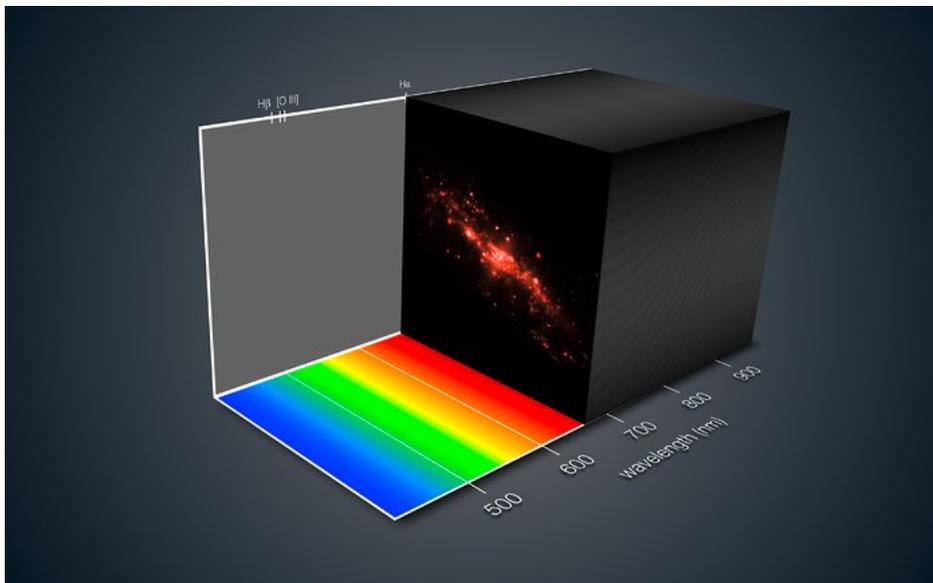


Figura 2.1: Datacube ottenuto con lo strumento MUSE sul Very Large Telescope dell'ESO (Credit: ESO/MUSE consortium/R. Bacon/L. Calçada).

Le caratteristiche principali di questo strumento nella modalità Wide-Field Mode (WFM) utilizzata in questo lavoro di tesi, sono riassunte nella tabella 2.1.

Nome	Multi Unit Spectroscopic Explorer
Sito	Paranal
Telescopio	Very Large Telescope, UT4
Fuoco	Nasmyth
Tipo	Spettrografo a campo integrale, Imager
Lunghezze d'onda coperte	465 – 930 nm
Risoluzione spaziale	Seeing limited, con 0.2-arcsecond pixels
Risoluzione spettrale	1770 (480 nm) – 3590 (930 nm)

Tabella 2.1: Tabella con le caratteristiche principali di MUSE.

La spettroscopia IFU permette di ottenere uno spettro per ogni pixel del cubo, fornendo quindi informazioni spettrali su tutta l'area campionata nel campo di vista. Uno dei vantaggi principali degli spettrografi IFU è quindi di fornire una ampia statistica di sorgenti in campi stellari.

Il grande vantaggio statistico di uno strumento come MUSE è controbilanciato dalla sua bassa risoluzione spettrale, tipicamente tra 2000 e 3500 a seconda della lunghezza d'onda. L'alta risoluzione ha bisogno di tempi di esposizione più lunghi e non consente di ottenere così tanti spettri in un'unica osservazione.

Di conseguenza, MUSE è l'unico strumento in grado di fare alta statistica per un campo stellare denso, come ad esempio gli ammassi globulari. Nessun altro strumento è capace di fare questo tipo di studi. Dunque, questo tipo di ricerca può beneficiare dell'utilizzo di MUSE, il quale diventa un efficiente mezzo per il raggiungimento dell'obiettivo, ovvero la ricerca di stelle Li-rich negli GCs.

2.2 NGC 6397

L'ammasso globulare studiato in questo lavoro è NGC 6397, uno dei più vicini e più studiati ammassi globulari della nostra Galassia. La sua distanza dal Sole è infatti di 2.3 kpc, il che lo rende il secondo ammasso globulare più vicino al Sole dopo M4 (Harris 2010). Ha una massa $M \sim 9 \cdot 10^4 M_\odot$ (Baumgardt 2017) ed una magnitudine assoluta in banda V di $M_V = -6.64$ (Harris 2010). Ha una età di 13.9 ± 1.1 Gyr (Gratton et al. 2003). La sua composizione chimica è stata ampiamente studiata utilizzando spettroscopia ad alta risoluzione (Carretta et al. 2009, Lind et al. 2011, Mucciarelli & Bonifacio 2020) dimostrando che si tratta di un ammasso metal-poor, con $[\text{Fe}/\text{H}] \sim -2.0$ dex e caratterizzato da valori sovra-solari di $[\alpha/\text{Fe}]$, tipici delle stelle dell'alone Galattico.

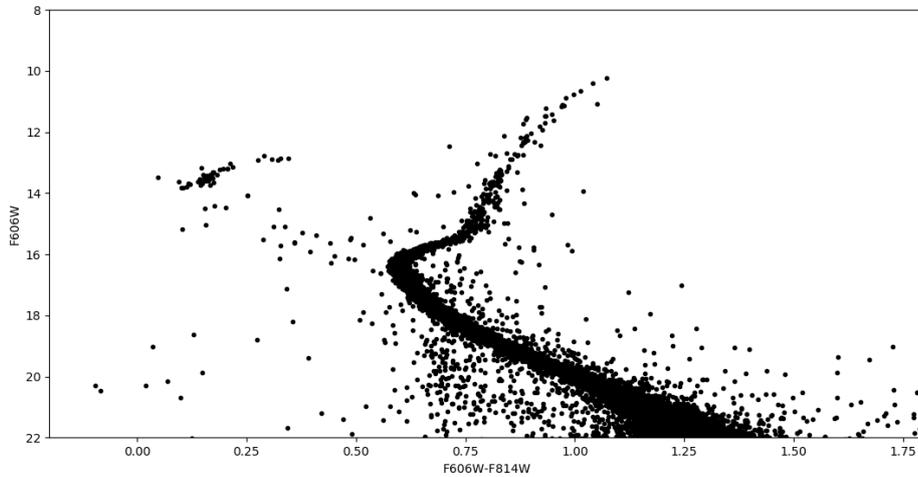


Figura 2.2: Diagramma colore-magnitudine realizzato con tutte le stelle di NGC 6397 presenti nel catalogo Anderson et al. 2008, ottenuto da dati HST nei filtri F606W e F814W.

NGC 6397 è un ottimo candidato per valutare se MUSE è uno strumento adeguato per la ricerca delle stelle Li-rich. Essendo un ammasso globulare tra i più vicini, il suo turn-off è relativamente brillante ($F606W \sim 16$), come si può vedere in Figura 2.2. MUSE è quindi in grado di osservare stelle di MS con tempi di esposizione ragionevoli, acquisendo un numero enorme di stelle di questo ammasso e permettendo di ottenere un'elevata statistica, fondamentale per cercare in maniera efficiente stelle Li-rich. Grazie alla vicinanza di NGC 6397, la cinematica è stata studiata in dettaglio, riportando un valore di velocità radiale sistemica, ovvero la velocità radiale media dell'ammasso, pari a $+17.8$ km/s con una dispersione di 5.0 km/s (Kamann et al. 2018).

2.3 Dataset

Il dataset è costituito da 14271 spettri relativi alle stelle presenti nelle zone centrali dell'ammasso globulare NGC 6397. Le osservazioni sono state prese durante il GTO (Guaranteed Time Observations) dello strumento MUSE, tramite la modalità WFM (Wide Field Muse).

Per acquisire questi dati sono stati eseguiti 29 puntamenti (Figura 2.3) durante il periodo 26 Luglio 2014 e il 1 Agosto 2014. Per alcuni di questi puntamenti sono state eseguite ripetute osservazioni durante la notte successiva, di conseguenza alcune stelle hanno più esposizioni. Ogni puntamento è stato osservato con uno schema di dithering e ruotando il derotatore di 90 gradi tra le esposizioni. Questo è stato fatto per garantire che la luce di ciascuna stella venga dispersa da più spettrografi, in modo tale da migliorare il flatfielding e quindi produrre una qualità dell'immagine omogenea su tutto il campo visivo.

I tempi di esposizione individuale sono stati sempre brevi, tipicamente un minuto, per evitare di saturare le stelle più luminose. In totale, sono state ottenute 127 esposizioni con un tempo di integrazione totale di 95 minuti.

Il seeing durante le osservazioni è stato variabile, ma sempre inferiore a $\sim 1''$. Infatti, le osservazioni della regione centrale dell'ammasso sono state eseguite con eccellenti condizioni di seeing, pari a $\sim 0.6''$.

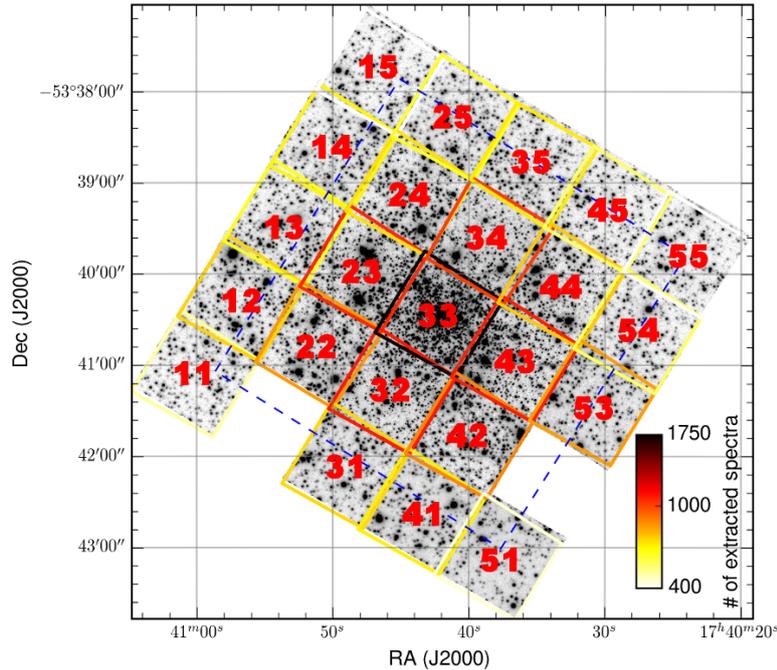


Figura 2.3: Questa immagine presa in banda V mostra la distribuzione spaziale delle osservazioni MUSE di NGC 6397. Sono sovrapposti i singoli puntamenti, i quali sono stati osservati più volte ad angoli di posizione diversi e con piccoli offset. La codifica a colori indica il numero di spettri stellari che sono stati estratti da ciascuno puntamento, che va da 1700 nella regione centrale a circa 400 nei campi esterni (Immagine presa da Husser et al. 2019).

Gli spettri di questo dataset sono stati estratti con il codice Pampelmuse, un programma in grado di estrarre efficientemente gli spettri da cubi IFU, applicando una proce-

dura analoga al PSF-fitting fotometrico al fine di ridurre l'effetto di contaminazione tra stelle vicine. La procedura di estrazione è descritta in Kamann et al. 2013. Questi spettri sono stati resi disponibili e pubblici sul sito <http://muse-vlt.eu/science/globular-cluster-ngc-6397/>. Gli spettri sono anche calibrati in lunghezza d'onda, ma non sono normalizzati e non sono stati corretti per la velocità radiale della stella osservata.

Gli spettri ricoprono un range spettrale che va da 4800 Å a 9300 Å, con una risoluzione che varia da 1700 a 4650 Å fino a 3500 a 9500 Å. Gli spettri hanno quindi una risoluzione spettrale di 2500 in prossimità della riga di Litio a 6707.8 Å. La maggioranza del campione è costituito da stelle di Sequenza Principale (stelle di MS), mentre gli oggetti rimanenti sono stelle che appartengono al ramo delle Giganti (stelle di RGB) o stelle del ramo orizzontale (stelle di HB).

Il rapporto segnale-rumore (SNR) degli spettri varia a seconda della luminosità delle stelle. In Figura 2.4 viene mostrata la distribuzione dei valori di SNR del campione.

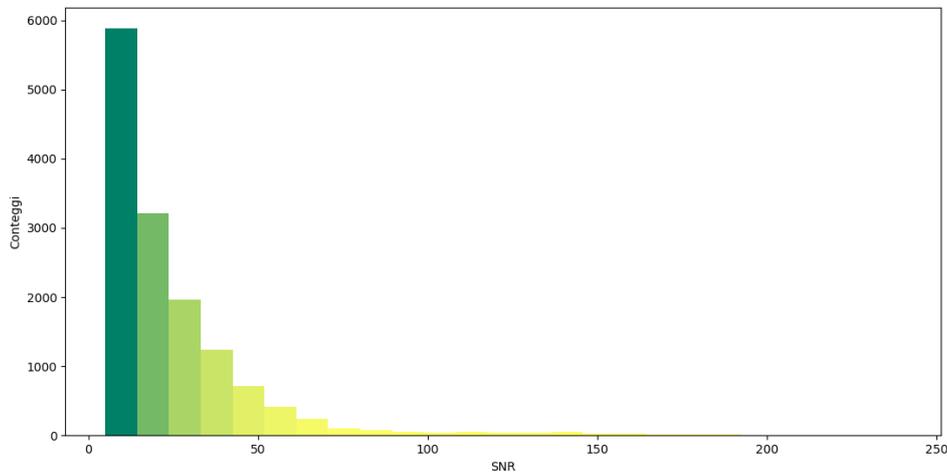


Figura 2.4: Distribuzione dei valori di SNR degli spettri del campione.

Come si può notare dall'istogramma la maggioranza degli spettri ha SNR tra 10 e 30, corrispondente alle stelle di MS. Una piccola frazione ha valori che arrivano fino a 50 e infine solo poche stelle hanno valori di SNR che arrivano a 150 - 200. In Figura 2.5 vengono mostrati, come esempi, tre spettri del campione con diverso SNR. In tutti gli spettri sono facilmente identificabili le principali features di questo intervallo spettrale: H_α e H_β , Na D, e le righe del tripletto del calcio. Inoltre sono visibili due ampie bande di assorbimento dovute all'atmosfera terrestre, a 6800 - 6900 Å e 7500 - 7700 Å.

Gli spettri estratti sono forniti assieme ad alcune flag che identificano la qualità dell'estrazione spettrale ed eventuale problemi. Infatti nel campione oltre ad esserci spettri di buona qualità (flag 0), ci sono anche spettri stellari con basso SNR (minore di 10), spettri che includono contributi da più stelle e spettri con il centroide della stelle fuori dal campo di vista dello strumento. Gli spettri con gli ultimi due tipi di flag sono stati ugualmente considerati nell'analisi, in quanto potrebbero mostrare ugualmente una riga di Litio, e quindi essere delle possibili stelle Li-rich. Gli unici spettri che non verranno considerati sono quelli con flusso medio minore di zero.

Per tutte le stelle del campione, l'header riporta anche la magnitudine nel filtro F606W del sistema HST/ACS-WFC. Tali magnitudini derivano per la maggior parte delle stelle

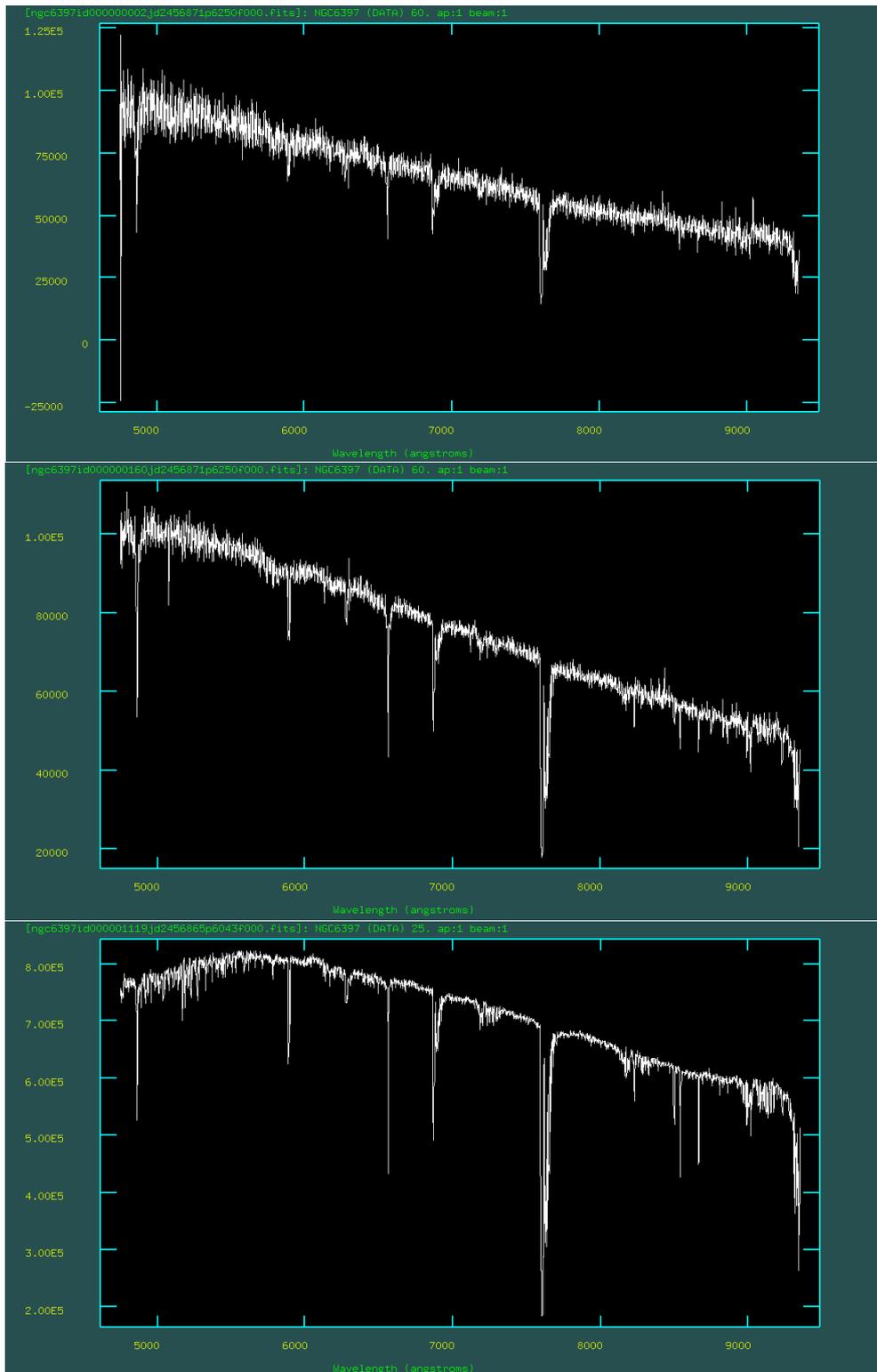


Figura 2.5: In alto: Spettro con SNR 21. In mezzo: Spettro con SNR 50. In basso: Spettro con SNR 141.

dal catalogo. In Figura 2.6 viene mostrata la distribuzione delle magnitudini delle stelle del campione.

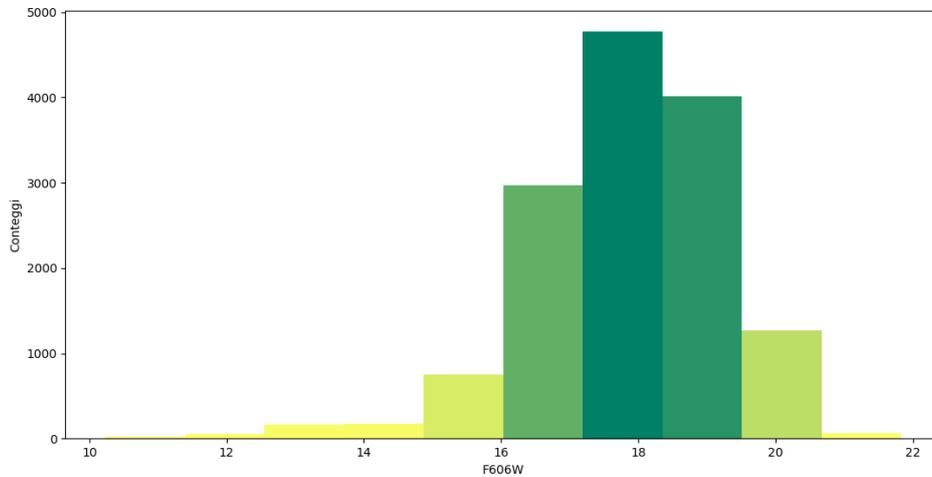


Figura 2.6: Distribuzione dei valori di F606W delle stelle del campione.

Alcune stelle del campione, sono già state osservate e precedentemente inserite nel catalogo di Anderson. Di queste stelle è possibile conoscere anche la magnitudine acquisita tramite il filtro F814W del sistema fotometrico HST/ACS-WFC. Per queste stelle, quindi si conoscono sia la magnitudine acquisita con il filtro F606W sia la magnitudine acquisita con il filtro F814W. Con queste informazioni fotometriche è possibile costruire il diagramma colore-magnitudine (CMD) (Figura 2.7).

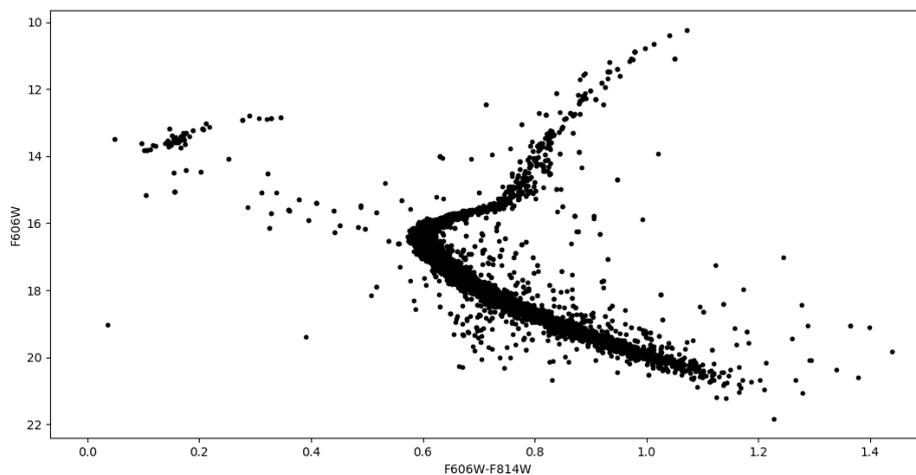


Figura 2.7: Diagramma colore-magnitudine considerando solo le stelle osservate con MUSE e appartenenti al catalogo di Anderson et al. 2008.

Nonostante in Figura 2.7 non siano presenti tutte le stelle, ma solo quelle che sono state osservate e appartengono al catalogo di Anderson, questo diagramma dà una prima idea di come sono distribuite le stelle osservate dell'ammasso. Come si può notare dal diagramma, il valore del turn-off è intorno alla magnitudine

$F606W = 16$. Di conseguenza le stelle che hanno $F606W \geq 16$, sono stelle più deboli e quindi sono stelle nane; mentre le stelle che hanno $F606W < 16$, sono stelle più brillanti e quindi evolute (giganti o di ramo orizzontale). Questa distinzione sarà utile quando si andrà a calcolare la velocità radiale, per la quale verranno usati due diversi template a seconda del tipo di stella considerata.

Un altro modo per suddividere le stelle è il valore dell'indice di colore $F606W-F814W$. Le stelle che hanno l'indice di colore più piccolo di 0.5, sono quelle più calde del turn-off, ad esempio stelle di HB e Blue Straggler Stars. Queste stelle sono troppo calde per mostrare righe di Litio in assorbimento visibili, quindi sono state escluse dall'analisi. Al contrario, le stelle $F606W-F814W$ maggiore di 0.5, sono quelle di MS e RGB, e quindi importanti perchè potrebbero essere possibili candidate di stelle Li-rich.

Incrociando le informazioni relative alle magnitudini e ai rapporti segnale-rumore, è possibile ottenere la distribuzione dei valori di SNR in funzione di $F606W$. Questo grafico consente di vedere come sono distribuiti i valori del SNR in funzione della magnitudine e quindi della fase evolutiva. Per questo motivo, è utile affiancare il diagramma colore-magnitudine a questa distribuzione (Figura 2.8).

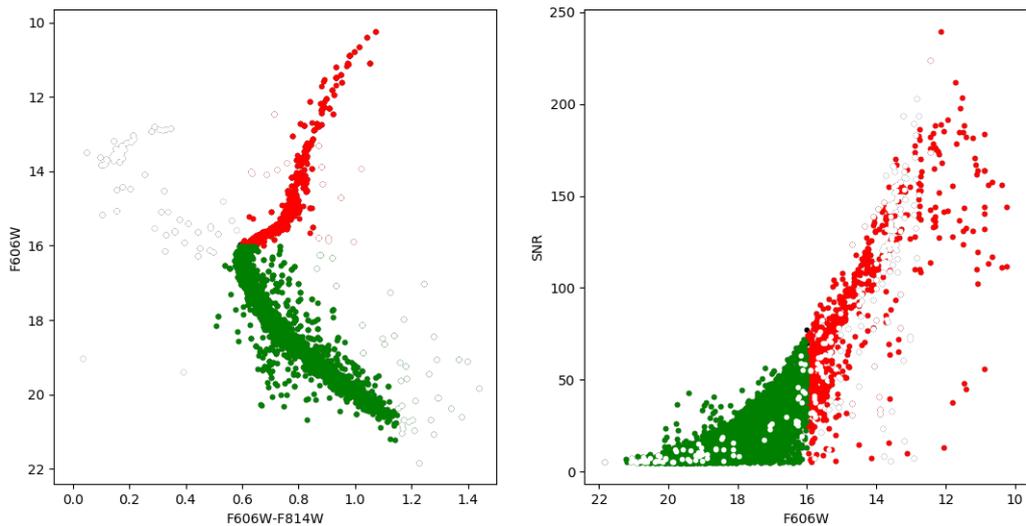


Figura 2.8: A sinistra: Diagramma colore-magnitudine realizzato con le stelle osservate e appartenenti al catalogo di Anderson et al. 2008. A destra: Distribuzione dei valori di SNR in funzione della $F606W$ delle stelle del campione. Nei diagrammi, le stelle vengono suddivise in stelle di MS (punti verdi) e in stelle di SGB e RGB (punti rossi) a seconda di $F606W$, e quindi della fase evolutiva.

Capitolo 3

Analisi dei dati

In questo capitolo vengono descritti i passaggi per creare una procedura in grado di trovare le stelle Li-rich all'interno dell'ammasso globulare NGC 6397. Il primo passaggio riguarda la misura della velocità radiale per tutte le stelle osservate. Tali misure sono necessarie per poter riportare ogni spettro alle lunghezze d'onda di laboratorio e identificare la riga di Litio a 6707.8 \AA . Successivamente, per tali spettri corretti per la velocità radiale è stata definita una quantità che permetta di individuare l'eventuale presenza di tale riga.

3.1 Velocità Radiale

Il primo obiettivo consiste nel misurare la velocità radiale di tutte le stelle osservate. Questo passaggio è fondamentale, in quanto la velocità radiale comporta uno spostamento in lunghezza d'onda delle righe osservate, che risulteranno spostate rispetto alla posizione di laboratorio. È quindi necessario correggere tutti gli spettri per la corrispondente velocità radiale della stella osservata in modo da poter correttamente riconoscere la presenza di eventuali righe di Litio.

Per calcolare la velocità radiale si applica la tecnica di cross-correlazione tra uno spettro template e lo spettro osservato (Tonry & Davis 1979). Questa è una tecnica che permette di calcolare la probabilità di correlazione tra lo spettro template e lo spettro osservato applicando uno shift di un pixel a quest'ultimo ogni volta. Così si costruisce la funzione di cross-correlazione (CCF), ovvero la probabilità di correlazione in funzione dello shift applicato. Lo shift (quindi la velocità) corrispondente al picco della CCF è quindi il valore più probabile. Per ottenere buone stime della velocità, è necessario avere un template adeguato, in modo tale che il valore del picco di CCF sia alto. Il template, quindi per svolgere adeguatamente questa operazione, deve avere alto SNR, deve avere la stessa risoluzione spettrale dello spettro osservato e infine deve avere lo stesso tipo spettrale della stella osservata.

Per calcolare la CCF si usa la task FXCOR di IRAF, un software in grado di ridurre e analizzare i dati scientifici. FXCOR fornisce per ogni stella la velocità radiale in base ad un fit Gaussiano del picco principale della CCF.

La cross-correlazione tra i template e gli spettri osservati viene eseguita nella regione del tripletto del calcio, ovvero tra 8400 \AA e 8700 \AA . Viene considerata questa finestra spettrale perchè le righe del calcio permettono di ottenere velocità radiali precise anche

per spettri a basso SNR, in quanto sono righe molto intense e quindi facili da identificare anche con strumenti a bassa risoluzione spettrale. Pertanto, sia per i due template sia per gli spettri stellari è stato usato solo questo intervallo di lunghezze d'onda.

Le righe del tripletto del calcio rimangono estremamente intense e dominanti rispetto ad altre righe metalliche sia nelle stelle di MS che di RGB. Le stelle di MS hanno righe con ali più intense a causa della maggiore gravità. È stato quindi deciso di utilizzare due soli spettri template.

Per suddividere le stelle in questi due gruppi, è stata considerata la loro magnitudine F606W. Tutte quelle con magnitudine F606W compresa tra 10 e 16, sono stelle di Post-MS (principalmente sono stelle di RGB), mentre tutte quelle con magnitudine F606W compresa tra 16 e 20, sono le stelle di MS. Ad ognuno di questi gruppi viene poi associato un adeguato template per eseguire la cross-correlazione. Per le stelle di RGB viene utilizzato come template uno spettro sintetico calcolato con i parametri stellari tipici di una stella di RGB di NGC 6397, quindi $T_{eff} = 4500$ K, $\log(g) = 2$, $[M/H] = -2.0$ e $[\alpha/Fe] = +0.4$. Invece per le stelle di MS viene utilizzato come template uno spettro sintetico con parametri $T_{eff} = 6000$ K, $\log(g) = 4$, $[M/H] = -2.0$ e $[\alpha/Fe] = +0.4$. Questi spettri sintetici sono stati calcolati col programma di spettro-sintesi SYNTHE (Kurucz 2005) sotto l'assunzione di equilibrio termodinamico locale (LTE) e geometria a strati piani e paralleli.

Per ogni stella viene calcolato col codice ATLAS9 (Kurucz 2005) un modello di atmosfera che descrive la variazione delle proprietà termodinamiche (come temperatura e pressione) in funzione della profondità ottica nell'atmosfera. Tale modello dipende dalla temperatura effettiva, dalla gravità superficiale e dalla composizione chimica della stella. In base a questo modello di atmosfera e considerando tutte le transizioni atomiche e molecolari conosciute, viene calcolato lo spettro sintetico.

Questo spettro è inizialmente calcolato ad alta risoluzione (600,000) e poi riportato alla risoluzione strumentale dello spettro osservato attraverso una convoluzione con un profilo gaussiano.

Tuttavia, per alcuni spettri, in particolare quelli con basso SNR, il fit della CCF può non convergere ad una soluzione. Questo problema può essere ovviato cambiando il valore del background del fit Gaussiano che viene eseguito attorno al picco della CCF. Per questo motivo abbiamo utilizzato una procedura automatica che per ogni stella ripeteva la cross-correlazione assumendo valori diversi di background, con uno step di 0.1, in modo da trovare il valore di background che permetta di eseguire correttamente il fit. Così facendo tutti i risultati ottenuti hanno picchi di cross-correlazione sopra 0.30, dati affidabili e indici di una misura precisa di velocità radiale.

Nonostante la procedura per determinare il miglior valore di background, per alcune stelle FXCOR non riesce a trovare una soluzione. Questi spettri per cui la velocità radiale non viene misurata sono stati controllati visivamente. Si tratta sempre di stelle con SNR inferiore a 10 - 15. Poichè si tratta di spettri di qualità non adeguata per poter identificare la riga di Litio, queste stelle sono state escluse dal campione finale senza cercare di recuperare la loro velocità radiale.

Infine è stato svolto un semplice test per verificare che l'assunzione di usare solo due spettri template, rappresentativi di stelle nane e giganti, non introduca errori nelle velocità radiali. Per eseguire il test, sono state selezionate 10 stelle con magnitudine

F606W compresa tra 16 e 17, ovvero stelle di MS vicino al turn-off, e con flag ottimo, quindi con uno spettro di una buona qualità. Selezionate le 10 stelle, si esegue l'operazione di CCF tra questi oggetti e due diversi tipi di template. L'obiettivo è quello di confrontare i valori che si ottengono utilizzando entrambi i template su tutte le stelle. Pertanto, a seconda della differenza tra i due risultati ottenuti per ogni stella, si valuta se sia sufficiente usare uno solo dei due template per il calcolo delle velocità per l'intero campione.

I risultati vengono mostrati in Figura 3.1, dove sull'asse delle ordinate viene riportata la differenza tra la velocità radiale calcolata con il template caldo e la velocità radiale calcolata con il template freddo. Dato che la maggior parte delle stelle del campione sono stelle di MS, il template più adeguato è quello caldo. Per questo motivo, la differenza tra le velocità radiali sull'asse delle y è in funzione delle velocità radiali calcolate con il template caldo, le quali definiscono l'asse delle ascisse. Nel grafico viene anche riportato il valore medio della differenza tra le due velocità, ovvero -2.1 km/s.

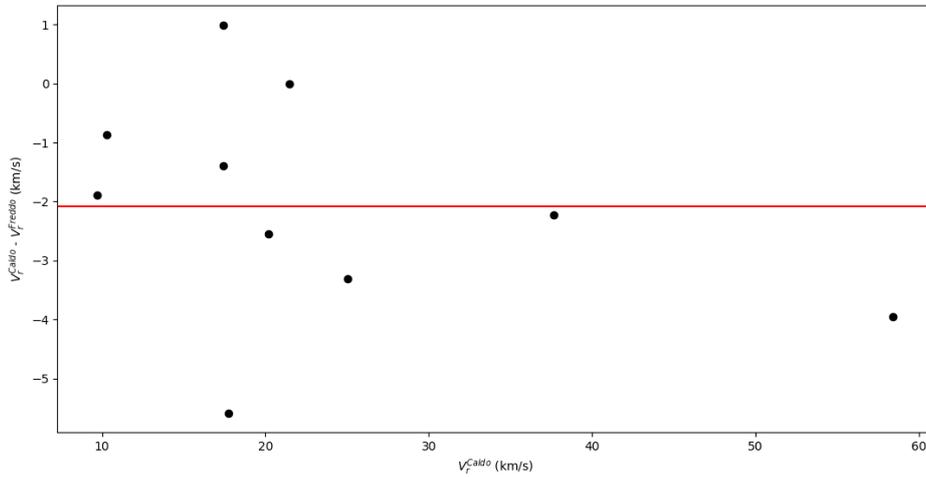


Figura 3.1: Differenza tra le velocità radiali ottenute con i due template in funzione della velocità radiale ottenuta con il template caldo per le 10 stelle di prova. La linea rossa indica il valore medio della differenza tra le velocità radiali calcolate con i due template

Come si può vedere dalla Figura 3.1, le velocità radiali calcolate per le medesime stelle differiscono mediamente di circa 2 km/s. Considerando la risoluzione di MUSE, si può dire che questa differenza sia trascurabile. Infatti, possiamo confrontare tale differenza con la velocità associata allo spostamento di un pixel. Considerando la risoluzione di MUSE, alla lunghezza d'onda del tripletto del calcio, in base all'effetto Doppler, ovvero

$$w_2 = w \left(1 + \frac{v}{c} \right) \quad (3.1)$$

dove w_2 è la nuova lunghezza d'onda, w è la lunghezza d'onda originale, v è la velocità e c è la velocità della luce, ovvero $c = 3 \cdot 10^5$ km/s, otteniamo una velocità di ~ 44 km/s. La procedura di cross-correlazione permette di raggiungere precisioni dell'ordine di un decimo di pixel, quindi le tipiche incertezze ottenute con MUSE sono dell'ordine di 4 - 5 km/s. Possiamo quindi considerare la differenza tra le velocità ottenute coi due template trascurabile. In conclusione, i risultati ottenuti dal test non mostrano differenze significative. Di conseguenza, sarebbe stato possibile calcolare la velocità radiale

di tutte le stelle del campione tramite la CCF con il template caldo, ovvero il sintetico con caratteristiche fisiche simili alla maggior parte delle stelle. Pertanto il calcolo della velocità radiale usando entrambi i template implica un'analisi più rigorosa e dettagliata.

In Figura 3.2, viene mostrata la distribuzione delle velocità radiali ricavate. L'istogramma mostra un picco ben definito e simmetrico attorno a ~ 25 km/s con la presenza di alcune stelle con velocità radiale molto discrepante. Le stelle con velocità minori di -30 km/s e maggiori di 100 km/s sono sicuramente stelle di campo. La presenza di una piccola frazione di stelle non membre dell'ammasso è in qualche modo aspettata perchè le osservazioni sono eseguite in una regione interna dell'ammasso, quindi con poca contaminazione da stelle di campo. Per identificare le stelle membre dell'ammasso è stata applicata una procedura di 3σ -rejection. La distribuzione di velocità radiale che ne deriva ha una velocità media +24.9 km/s ed una dispersione di 13.2 km/s.

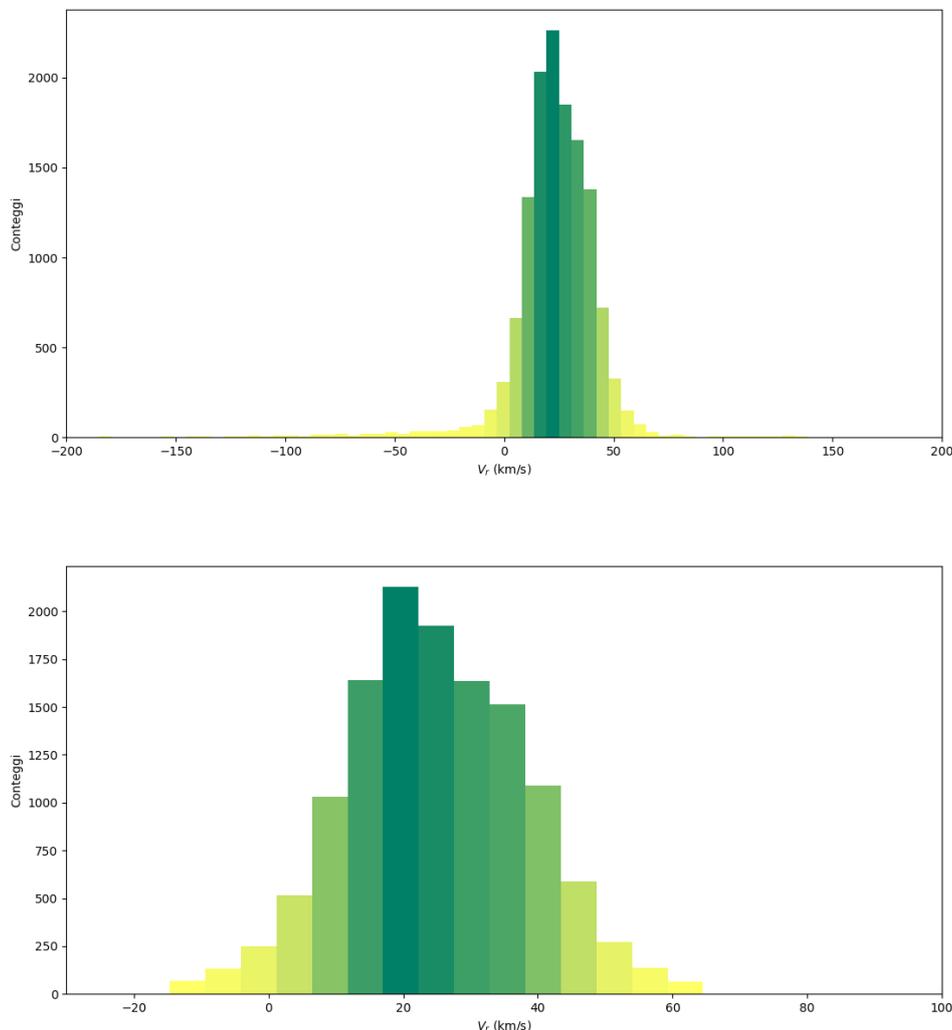


Figura 3.2: In Alto: Istogramma con velocità radiali del campione di stelle. In basso: Istogramma con le velocità radiali delle stelle considerate membre dell'ammasso globulare NGC 6397.

Applicando i risultati ottenuti ai vari spettri, si corregge lo spostamento in lunghezza d'onda causato dalla velocità radiale. Grazie a questo passaggio le righe spettrali ven-

gono riportate alle lunghezze d'onda di laboratorio. Questa correzione è fondamentale applicarla prima di sottoporre gli spettri alla procedura descritta successivamente per identificare la riga di Litio. Infatti, se gli spettri non fossero corretti, anche se la riga di Litio fosse evidente, la procedura non sarebbe in grado di identificarla perchè la riga sarebbe spostata rispetto alla sua posizione di laboratorio. Di conseguenza, bisogna assicurarsi che la correzione avvenga correttamente, ponendo particolare attenzione al segno della velocità radiale. Corretti gli spettri, si formula poi la procedura di identificazione della riga di Litio a 6707.8 \AA .

3.2 Identificazione delle candidate lithium-rich

Dopo aver misurato la velocità radiale di tutte le stelle e aver corretto gli spettri, l'obiettivo è quello di trovare una procedura in grado di rilevare la presenza della riga di Litio a 6707.8 Å.

L'obiettivo è quello di definire due regioni spettrali, una attorno alla riga di Litio ed una in una regione di continuo (quindi senza righe). Il rapporto R tra il numero di conteggi mediano della finestra di riga normalizzato a quello della finestra di continuo, può essere usato per identificare la presenza di una possibile riga. Se il rapporto tra la mediana dei conteggi della finestra della riga e la mediana dei conteggi relativa alla regione del continuo dà un valore attorno a 1, entro gli errori, significa che i conteggi dello spettro attorno alla posizione della riga sono comparabili con quelli della finestra di continuo, indicando che la riga non è presente nello spettro (o almeno non identificabile dato il SNR e la risoluzione spettrale). Se, invece, il rapporto dà un valore sufficientemente più piccolo di 1, allora in questo caso i conteggi delle due regioni differiscono e questo può essere un indizio della presenza della riga di Litio. Per definire la procedura sono stati svolti i seguenti test:

- Definizione delle finestre di riga e di continuo in base a griglie di spettri sintetici calcolati al variare dei parametri stellari e dell'abbondanza di Litio.
- È stato verificato se utilizzare nelle due finestre il valore medio o mediano e se applicare una rejection a $n\text{-}\sigma$ di eventuali pixel discrepanti.
- La procedura è stata verificata con spettri MUSE simulati.

Per definire la procedura e successivamente testarne la validità, è utile utilizzare spettri sintetici calcolati in modo da variare a piacere l'abbondanza di Litio e quindi l'intensità della riga. Lavorare con questi tipi di spettri ha due vantaggi: il primo è appunto la presenza della riga, la quale dovrà essere identificata; il secondo è che questi spettri non hanno rumore, e quindi il valore dei conteggi nelle due finestre può essere calcolato senza porsi il problema di eventuali pixel discrepanti a causa del rumore. Definita la procedura su questi sintetici, si applica poi agli spettri osservati. I sintetici utilizzati per questa analisi sono spettri relativi a tre stelle in diversa fase evolutiva, ovvero una stella di MS, una stella alla base dell'RGB e una stella sopra il Bump dell'RGB. La prima stella ha $T_{eff} = 6216$ K, $\log(g) = 4.47$ e $[M/H] = -2$, la seconda ha $T_{eff} = 5474$ K, $\log(g) = 3.36$, $[M/H] = -2$, e infine l'ultima stella ha $T_{eff} = 4500$ K, $\log(g) = 1.50$, $[M/H] = -2$. Questi parametri sono stati ricavati da un'isocrona teorica adeguata per NGC 6397, calcolata con età di 12.5 Gyr e $[Fe/H] = -2$ tramite il sito http://stellar.dartmouth.edu/models/isolf_new.html. (Dotter et al. 2008). Per tutti i tipi di stelle viene mostrata l'abbondanza di Litio prevista dall'evoluzione stellare, e le diverse abbondanze di Litio a seconda della fase evolutiva della stella (Figura 3.3).

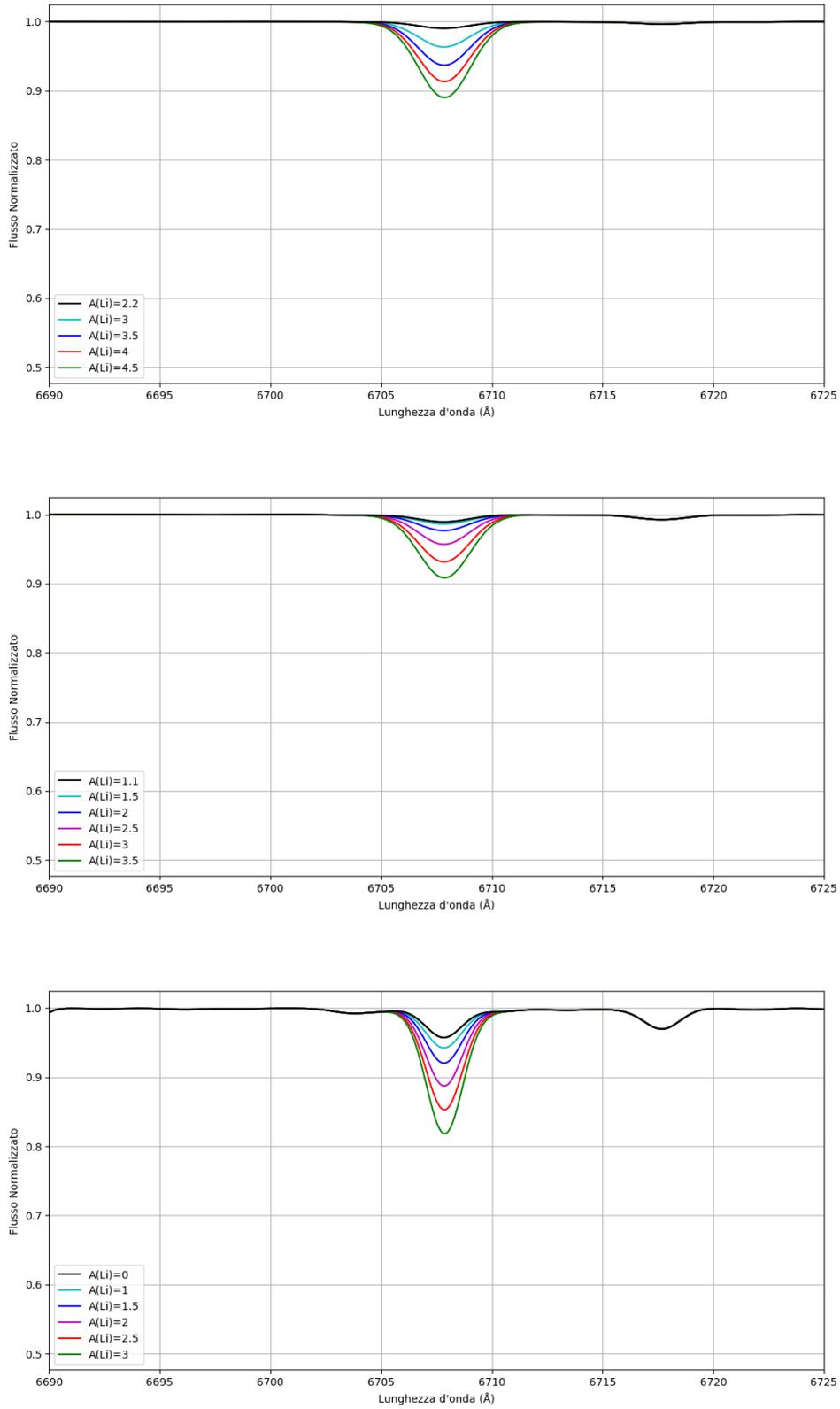


Figura 3.3: Griglia di spettri sintetici con diverse abbondanze di Litio per una stella di MS (pannello in alto), di RGB pre-Bump (pannello centrale) e di RGB post-Bump (pannello in basso). In tutti e tre i casi l'abbondanza di partenza di Litio è quella osservata nelle stelle di quello stato evolutivo.

In primo luogo, bisogna definire due finestre spettrali, una per la riga del Litio e una per la regione del continuo. Definire queste regioni è fondamentale in quanto la procedura deve stabilire se all'interno dell'intervallo considerato è presente oppure no la riga. La finestra della riga è stata definita in base ai sintetici, considerando la posizione della riga, ovvero $\lambda_0 = 6707.8 \text{ \AA}$, e la larghezza della riga, quest'ultima definita dalla risoluzione di MUSE, che alla lunghezza d'onda considerata è 2500. La scelta è stata inoltre dettata dalla decisione di includere tre pixel, in modo da campionare il core della riga, ovvero la regione più sensibile alla variazione di abbondanza, ed escludere i pixel delle ali che risentono marginalmente dell'abbondanza ma possono risentire maggiormente del rumore. Dunque, la regione spettrale della riga è compresa tra $\lambda_0 - (1.5 \cdot 1.25)$ e $\lambda_0 + (1.5 \cdot 1.25)$, dove 1.25 è la dimensione di un pixel espressa in \AA di MUSE. Per la regione del continuo invece si considera una finestra spettrale compresa tra 6680 \AA e 6700 \AA . Le ragioni per cui è stato utilizzato questo intervallo di lunghezze d'onda è dato dalla necessità di usare una finestra che sia abbastanza grande da includere una decina di pixel, e quindi di ottenere un valore affidabile dei conteggi mediani, e dalla necessità di utilizzare una finestra che non includa righe di assorbimento al variare dei parametri stellari delle stelle. Le regioni adottate per campionare riga e continuo sono mostrate in Figura 3.4.

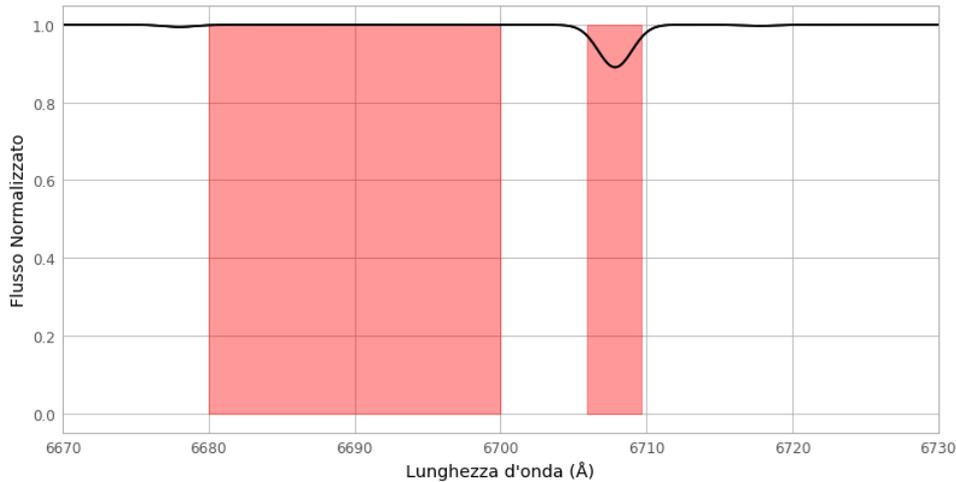


Figura 3.4: Spettro sintetico per una stella Li-rich di MS con $A(\text{Li})=4.5$ (linea nera) in confronto alla posizione delle finestre di continuo e di riga (in rosso).

La procedura è stata infine verificata utilizzando spettri MUSE "simulati". Questi spettri sono stati ottenuti ricampionando gli spettri sintetici alla dimensione del pixel di MUSE, e aggiungendo rumore Poissoniano ad ogni pixel in modo da simulare il valore di SNR desiderato.

Definite le regioni, bisogna fare ulteriori considerazioni. La presenza di un pixel con un valore discrepante dei conteggi può alterare la misura della mediana del flusso incidente. Per evitare che un solo pixel discrepante, in particolare nella finestra di continuo, possa alterare il valore finale, viene applicata una procedura di σ -rejection. Il problema riguarda soprattutto la regione del continuo, e quindi per questa regione oltre a calcolare la media e la mediana, si calcola anche la deviazione standard (σ), la quale ha un ruolo chiave nella condizione da imporre per l'eliminazione dei valori

discordanti. Per il pixel i -esimo, i valori corrispondenti C_i sono utilizzati se vale la condizione:

$$\bar{C} - n\sigma < C_i < \bar{C} + n\sigma \quad (3.2)$$

dove \bar{C} è il valore medio dei conteggi all'interno della finestra di continuo, σ è la deviazione standard, n è un numero a libera scelta, tipicamente compreso tra 2 e 3. In questo caso è stato adoperato $n=3$. La regione della riga è una finestra molto stretta (3 pixel), in quanto si cerca di campionare solo il core. Pertanto su questa regione non viene applicata la σ -rejection. Al contrario, questa operazione si applica alla regione del continuo, perchè è una finestra spettrale che comprende più pixel e il valore dei suoi conteggi può subire fluttuazioni. Dunque per questa regione, prima si escludono tutti i valori discrepanti e poi si misura la mediana dei conteggi restanti.

Le modifiche fatte alla procedura vengono prima testate sugli spettri sintetici. Quando la procedura funziona correttamente per il dataset di sintetici con rumore, ovvero fornisce valori di R consistenti con l'abbondanza di Litio con cui sono stati calcolati i sintetici, allora può essere applicata agli spettri reali. Per questo motivo, le simulazioni e gli studi descritti sono molto importanti.

Capitolo 4

Risultati

4.1 Stelle Li-rich in NGC 6397

Applicando la procedura descritta nella Sezione 3.2 agli spettri osservati, si calcola per ogni stella il rapporto R tra la mediana dei conteggi nella finestra della riga e la mediana dei conteggi nella finestra del continuo. Il rapporto è stato calcolato per le stelle con indice di colore $F606W-F814W > 0.5$ (vedi Sezione 2.3) in modo da escludere le stelle di ramo orizzontale che a causa della loro elevata temperatura non possono mostrare la riga di Litio nemmeno in caso di elevate abbondanze $A(\text{Li})$. Ciononostante sono state considerate tutte le stelle a dispetto del flag di qualità spettrale (vedi Sezione 2.3) e della membership perchè l'obiettivo è quello di identificare stelle Li-rich anche se non fossero membre dell'ammasso o anche nel caso di spettro contaminato da stelle vicine. La Figura 4.1 mostra il valore di R in funzione del SNR per tutti gli spettri misurati. Come si può vedere, l'andamento dei rapporti è simmetrico ed è centrato intorno a 1. La distribuzione dei valori di R mostra una dispersione maggiore diminuendo il SNR ma sempre centrata su 1. Questo è l'andamento aspettato nel caso di stelle con abbondanze normali di Litio, dove la riga del Litio non è mai visibile a causa della bassa risoluzione dello strumento.

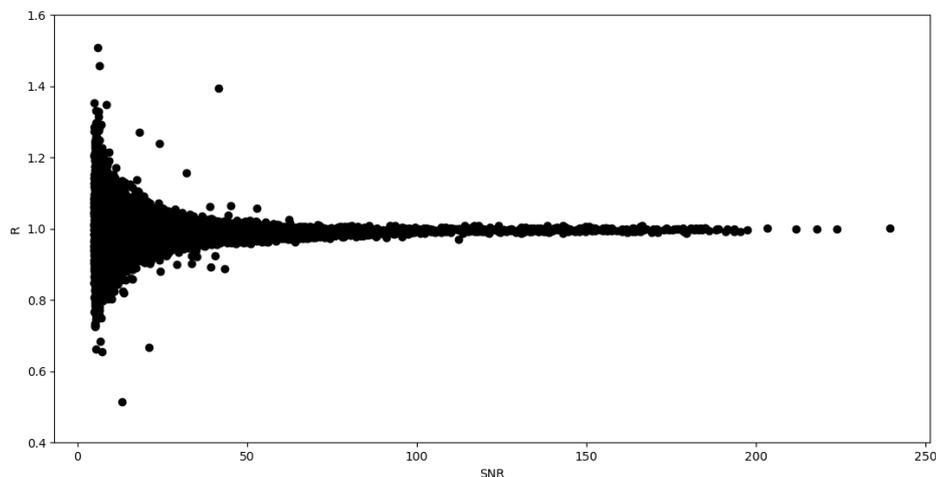


Figura 4.1: Andamento del rapporto R in funzione del SNR delle stelle.

L'obiettivo è quello di identificare candidate stelle Li-rich, le quali avranno un valore di R inferiore rispetto a quelli misurati in spettri di simile SNR. In una stella Li-rich, tale valore di R sarà tanto più discordante dai valori misurati in spettri di simile qualità, tanto più sarà intensa la riga di Litio.

Per selezionare le stelle Li-rich bisogna innanzitutto eliminare le stelle con SNR minore di 20, le quali a causa della scarsa qualità spettrale non permettono di visualizzare la riga del Litio, nemmeno in caso di elevata abbondanza di Litio. È da notare che le stelle con SNR minore di 20 del nostro campione sono stelle di MS.

Il campione rimanente è stato diviso in intervalli di SNR, in modo da considerare stelle di SNR paragonabile. Questi intervalli devono essere definiti in modo tale da includere un numero statisticamente significativo di stelle, ma non troppo estesi in SNR, in modo da includere solo stelle con simile qualità spettrale, quindi con simile dispersione dei valori di R. Sono stati definiti quindi 9 intervalli, riportati in Tabella 4.1. Per ognuno di questi si calcola il valore medio e la dispersione dei valori di R delle stelle incluse nell'intervallo.

Intervallo di SNR	\bar{R}	σ	N° candidate stelle Li-rich	Stelle Li-rich finali
20 - 30	0.991	0.024	10	5
30 - 40	0.991	0.016	6	4
40 - 50	0.991	0.013	2	2
50 - 65	0.990	0.010	1	0
65 - 80	0.991	0.008	0	0
80 - 100	0.993	0.007	0	0
100 - 125	0.997	0.004	1	1
125 - 150	0.997	0.004	0	0
150 - 200	0.997	0.004	0	0

Tabella 4.1: Intervalli di SNR adottati per la ricerca di candidate Li-rich. Per ogni intervallo sono riportati il valore medio di R, la corrispondente dispersione, il numero di candidate Li-rich selezionate e quelle finali dopo aver ispezionato visivamente gli spettri.

Per garantire risultati affidabili è stata eseguita una procedura iterativa di 3σ -rejection. Dato un certo intervallo di SNR, dopo aver calcolato il valore medio e la dispersione dei rapporti inclusi nell'intervallo, vengono considerati solo le stelle che hanno R compreso tra $\bar{R} \pm 3\sigma$. Con queste stelle, si ricalcola il valore medio e la dispersione. L'obiettivo di queste operazioni è quello di definire un insieme di valori di R rappresentativi di stelle normali (in termini di abbondanza di Litio) con un dato SNR. Infatti, assumendo che la distribuzione dei rapporti in un certo intervallo di SNR sia Gaussiana, dato che la dispersione è simmetrica rispetto al valore medio, ci si aspetta che tutti i valori siano compresi entro $\bar{R} \pm 3\sigma$. Questo perchè entro $\pm 3\sigma$ dal valore medio, la probabilità che il rapporto appartenga alla distribuzione è del 99.9 %. Di conseguenza, se il rapporto ha un valore al di fuori di $\bar{R} \pm 3\sigma$, questo ha una probabilità molto bassa di appartenere

alla distribuzione.

Le candidate stelle Li-rich sono quelle stelle con il rapporto che soddisfa la seguente condizione:

$$R < \bar{R} - 3\sigma \quad (4.1)$$

dove \bar{R} è il valore medio dei rapporti inclusi in un certo intervallo di SNR e σ è la corrispondente dispersione.

Le stelle con rapporti minori di $\bar{R} - 3\sigma$, che quindi mostrano un valore anomalo di R rispetto alle stelle con la stessa qualità spettrale, potrebbero essere stelle Li-rich. La Figura 4.2 mostra l'andamento di R in funzione del SNR con evidenziati in verde gli intervalli di SNR e il corrispondente intervallo di $\pm 3\sigma$ rispetto al valore medio \bar{R} . Applicando il criterio di selezione descritto sopra, 20 spettri risultano avere un valore di R significativamente più basso rispetto ai valori misurati in spettri di simile SNR (cerchi rossi).

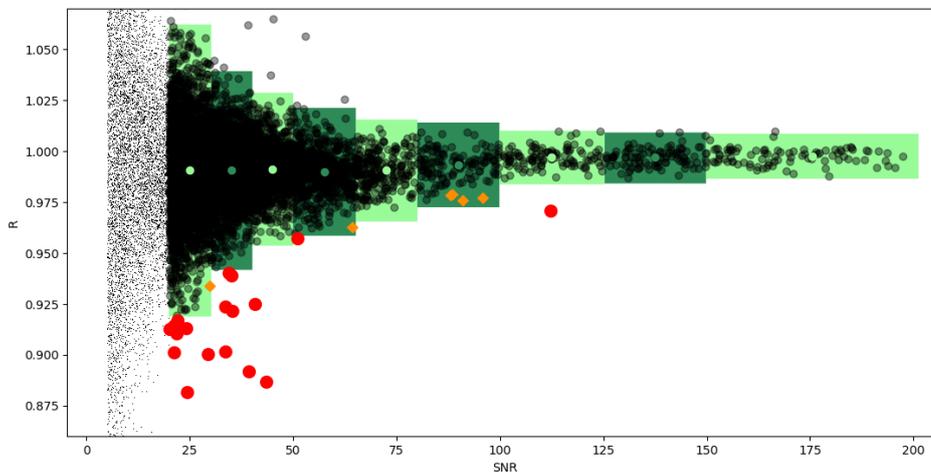


Figura 4.2: Dettaglio del grafico del rapporto R in funzione del SNR. Le box verdi rappresentano le regioni corrispondenti a $\pm 3\sigma$ dal valore medio di R, le quale circoscrivono l'andamento normale dell'abbondanza di Litio. I punti rossi rappresentano le possibili candidate stelle Li-rich selezionate dopo l'operazione di σ -rejection. I rombi arancioni sono quelle stelle che non sono state selezionate dalla procedura, ma che sono state ugualmente controllate perchè si trovano ai limiti delle box verdi.

Le stelle con R basso, selezionate dopo l'operazione di σ -rejection, non sono necessariamente stelle Li-rich. Infatti, il rapporto basso, oltre ad indicare la presenza di un eventuale riga di Litio, può indicare anche un difetto nello spettro, ad esempio la presenza di uno spike, di un raggio cosmico, di un pixel con conteggi discrepanti e non escluso dal calcolo. Per questo motivo, è necessario fare un controllo visivo di tutti gli spettri selezionati. Oltre a queste stelle, sono state anche controllate, come ulteriore verifica, tutte quelle stelle considerate normali ai bordi tra due intervalli contigui oppure vicini al limite di $\bar{R} - 3\sigma$. Infatti, scegliendo un diverso valore di limite o intervalli di SNR, queste stelle sarebbero potute essere possibili candidate Li-rich (rombi arancioni in Figura 4.2).

In base alla procedura appena descritta sono stati selezionati 20 spettri. In seguito all'ispezione visiva dei singoli spettri, 8 spettri sono stati esclusi perchè chiaramente non mostravano la riga di Litio, ma il basso valore di R era causato da difetti nello

spettro. I 12 spettri rimanenti corrispondono a 10 stelle, in quanto 2 di queste sono state osservate 2 volte. In conclusione, 10 stelle (9 di MS con SNR tra 20 e 50 ed una di RGB con SNR ~ 110) mostrano chiaramente la presenza della riga di Litio a 6707.8 Å e possono essere considerate stelle Li-rich (Figura 4.3). In base alla velocità radiale, tutte queste stelle sono membre dell'ammasso NGC 6397.

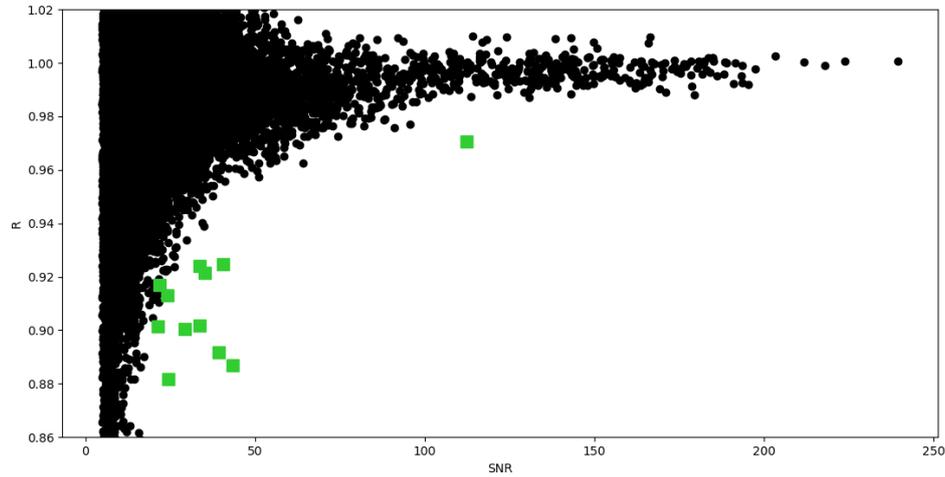


Figura 4.3: Dettaglio di Figura 4.2. In verde vengono mostrate le stelle Li-rich finali.

Gli spettri di queste 10 stelle sono tutti spettri con flag di qualità 0, cioè corrispondente a stelle senza possibili problemi di contaminazione, tranne uno che contiene contributi da più di una stella. Gli spettri delle stelle Li-rich attorno alla riga di Litio sono mostrati di seguito (Figura 4.4, Figura 4.5 e Figura 4.6).

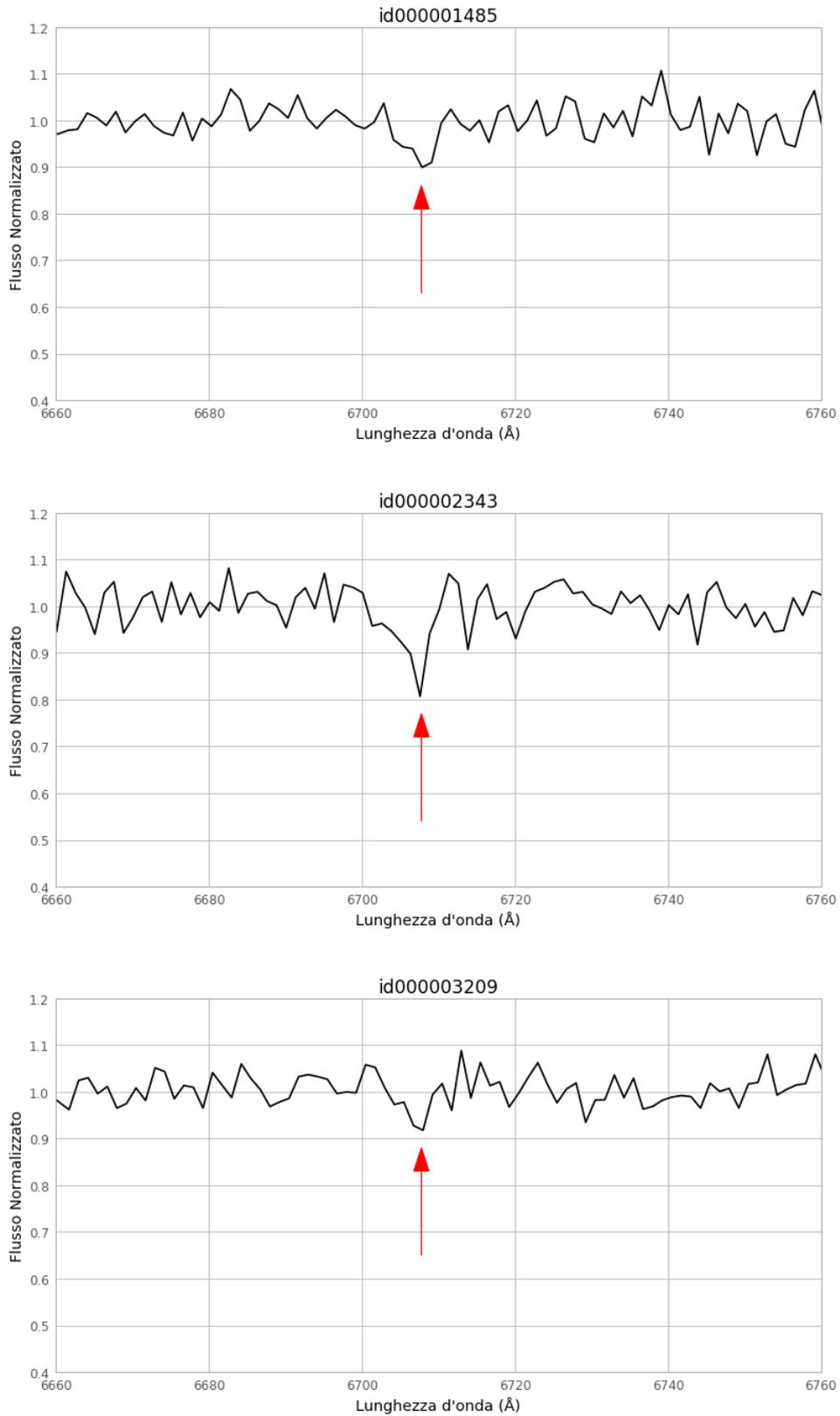


Figura 4.4: Porzione di spettro intorno alla riga di Litio per le stelle 1485, 2343 e 3209. La freccia rossa indica la posizione della riga a 6707.8 Å.

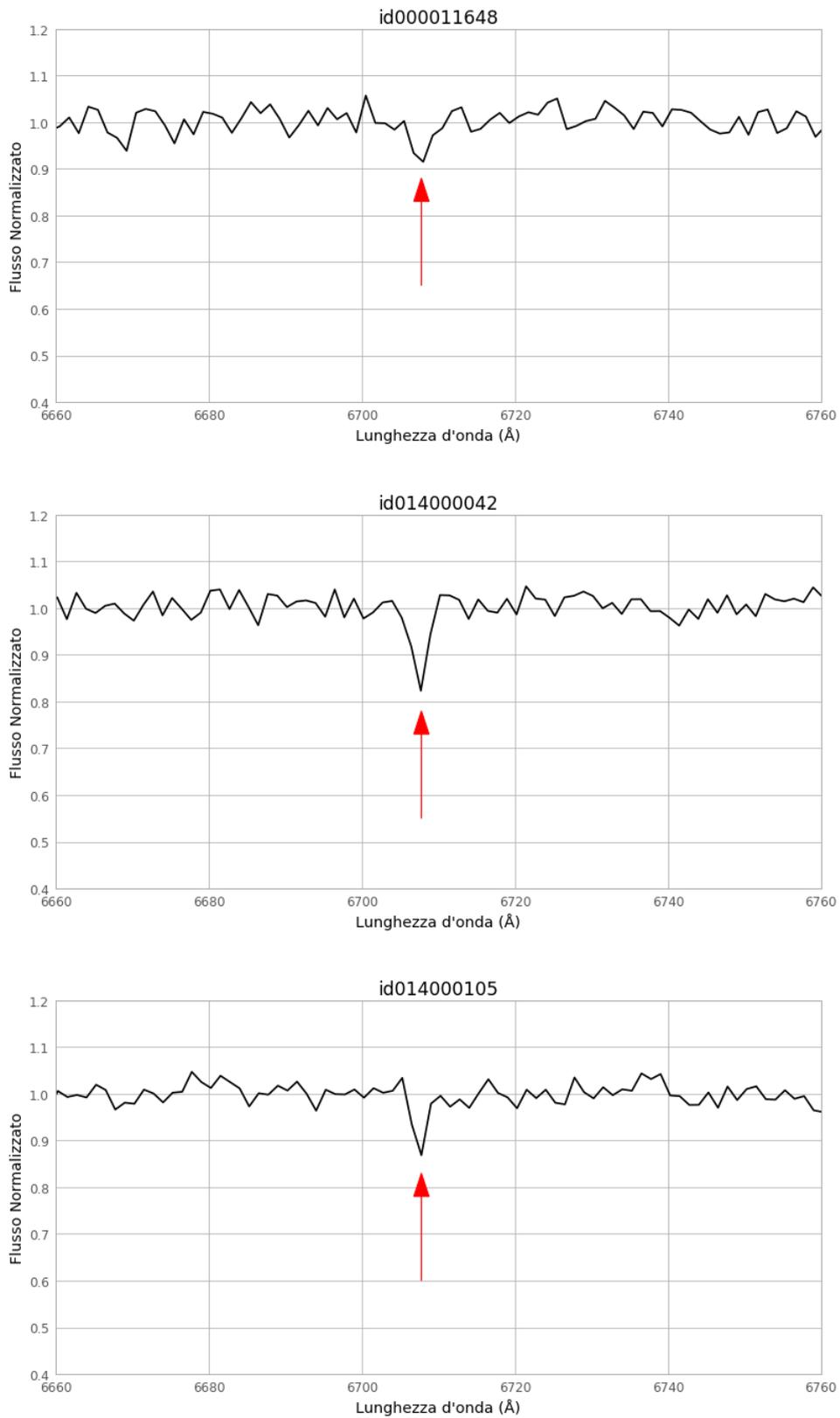


Figura 4.5: Come per la figura precedente, viene mostrata la porzione di spettro intorno alla riga di Litio per le stelle 11648, 14000042 e 14000105. La freccia rossa indica la posizione della riga a 6707.8 Å.

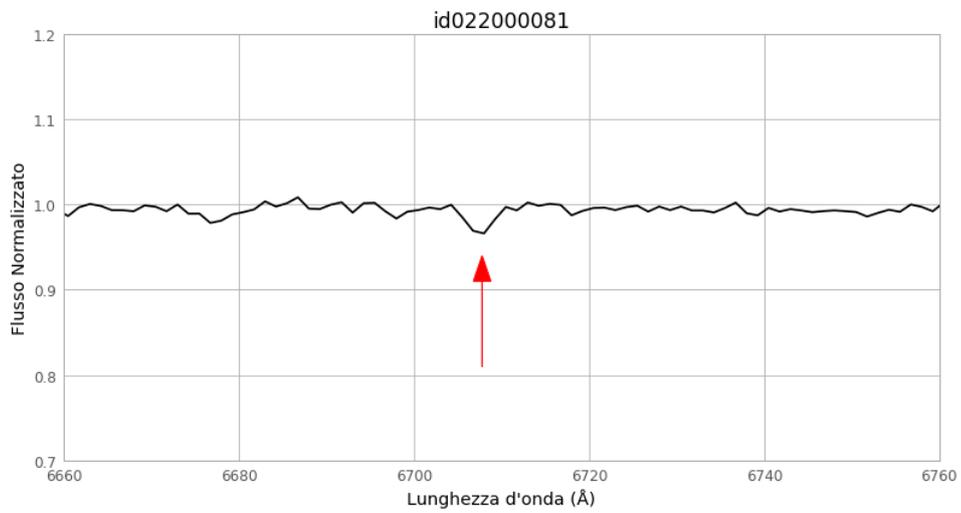
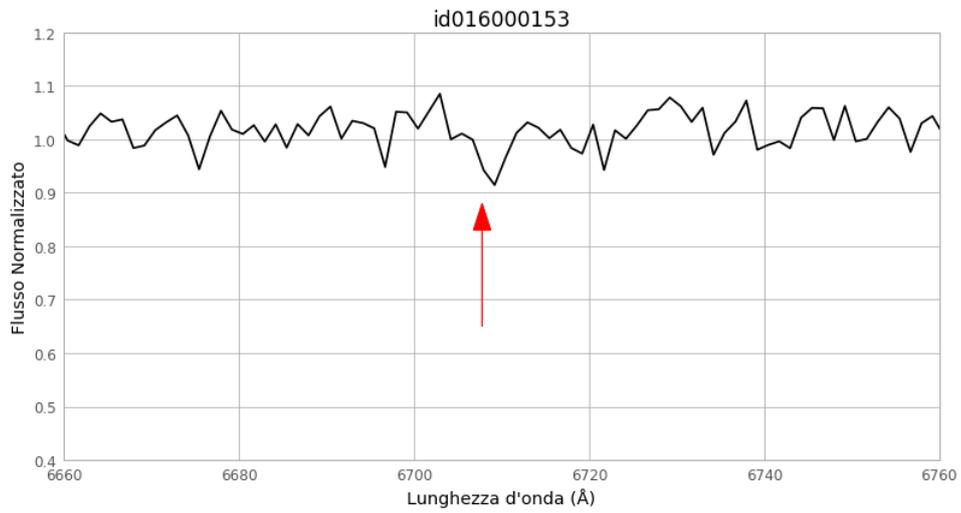


Figura 4.6: Come per le figure precedenti, viene mostrata la porzione di spettro intorno alla riga di Litio per le stelle 16000153, 22000081. La freccia rossa indica la posizione della riga a 6707.8 Å.

Due di queste stelle sono state osservate in più puntamenti e la presenza della riga in tutte le loro esposizioni rappresenta un'ulteriore conferma che la stella sia una Li-rich (Figura 4.7 e Figura 4.8).

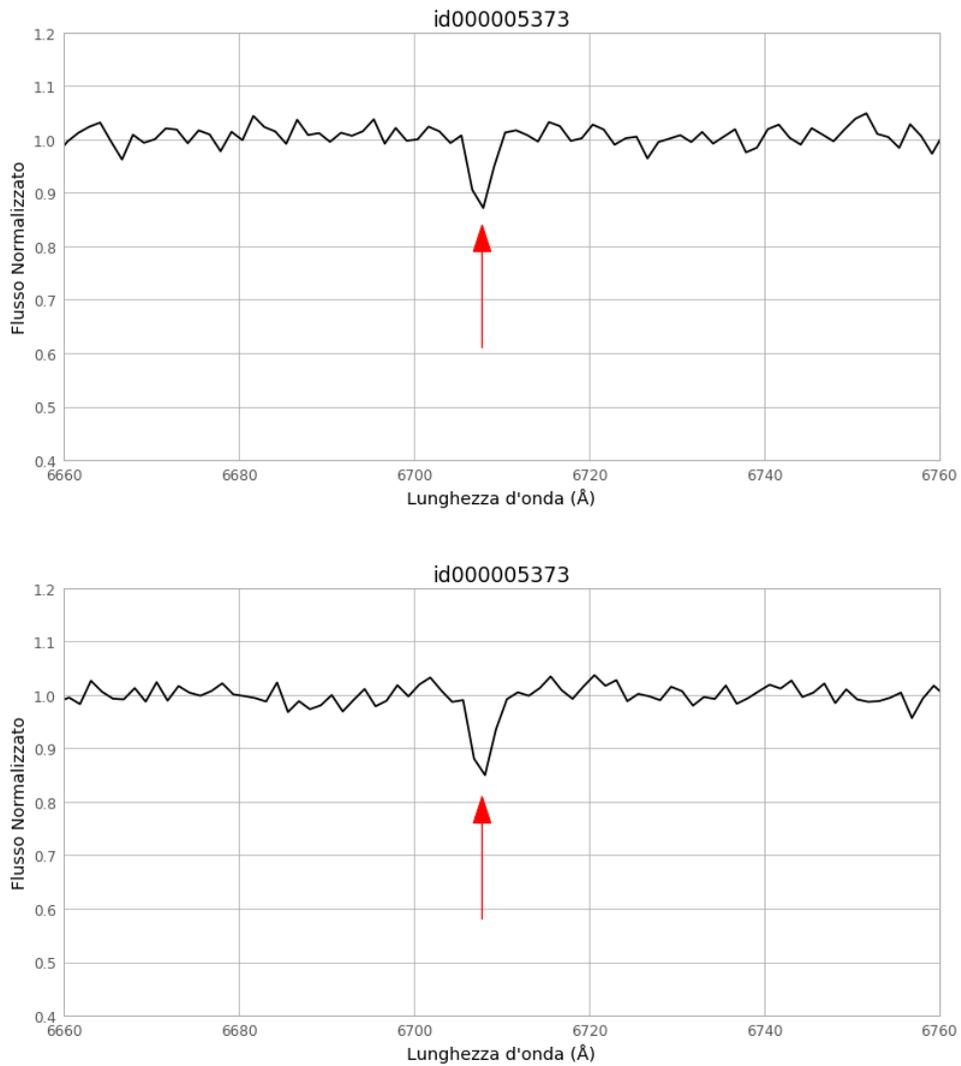


Figura 4.7: In figura vengono mostrati i due spettri indipendenti della stella 5373. Come per le figure precedenti viene mostrata la porzione di spettro intorno alla riga di Litio. La freccia rossa indica la posizione della riga a 6707.8 Å.

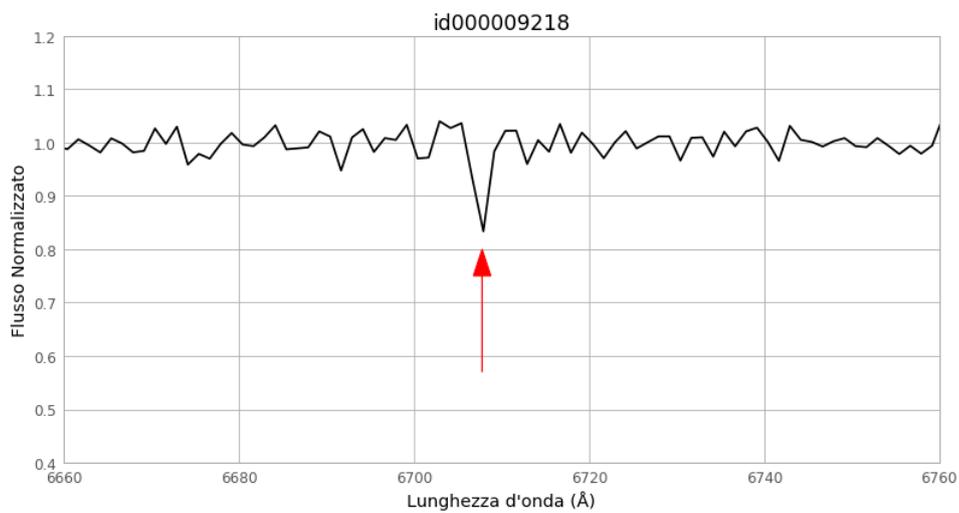
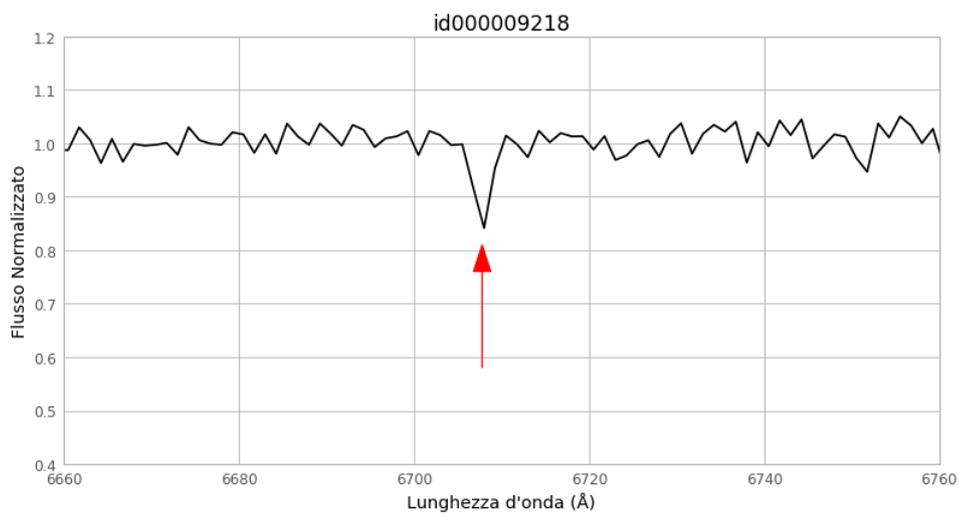


Figura 4.8: In figura vengono mostrati i due spettri indipendenti della stella 9218. Come per le figure precedenti viene mostrata la porzione di spettro intorno alla riga di Litio. La freccia rossa indica la posizione della riga a 6707.8 Å.

4.2 Abbondanza di Litio nelle stelle Li-rich

L'abbondanza di Litio delle stelle Li-rich selezionate è stata determinata confrontando gli spettri osservati attorno alla riga di Litio a 6707.8 \AA con appropriati spettri sintetici. Questi spettri sintetici sono stati calcolati col codice SYNTHE (Kurucz 2005) descritto più in dettaglio nella Sezione 3.1.

Per tutte le stelle è stata adottata una metallicità $[\text{Fe}/\text{H}] = -2.0 \text{ dex}$ e $[\alpha/\text{Fe}] = +0.4 \text{ dex}$ (Carretta et al. 2010, Husser et al. 2019). Temperatura e gravità sono stati calcolati utilizzando l'isocrona descritta nella Sezione 3.2. Infatti, per ogni stella la posizione della stella nel CMD viene proiettata sull'isocrona in modo da associare ad ogni target i valori corrispondenti di temperatura e gravità. È importante comunque notare che l'unico parametro veramente importante nella determinazione dell'abbondanza di Litio è la temperatura, poichè la riga di Litio è sensibile solo a questo parametro.

Per ogni stella viene calcolata una griglia di spettri sintetici assumendo una diversa abbondanza di Litio. L'abbondanza finale è calcolata attraverso una minimizzazione del χ^2 tra lo spettro osservato ed una griglia di spettri sintetici calcolati con diverse abbondanze di Litio eseguita col programma SALVADOR (A. Mucciarelli, in prep.). La Figura 4.9 mostra un esempio dell'output grafico del programma SALVADOR che permette di valutare visivamente la qualità della soluzione.

Le abbondanze di Litio delle 10 stelle Li-rich calcolate sotto la condizione di LTE, tuttavia sono affette da effetti di deviazione dall'equilibrio termodinamico locale che dipendono dai parametri stellari e dall'abbondanza di Litio della stella considerata. È quindi necessario correggerle utilizzando appropriate griglie di correzione che forniscono la differenza tra abbondanza LTE e non-LTE al variare dei parametri stellari (Lind et al. 2009). I parametri stellari e le abbondanze ottenute in condizioni di LTE e NLTE per le 10 stelle Li-rich sono riportati nella Tabella 4.2.

L'errore sulle abbondanze di Litio è stato calcolato considerando due sorgenti di errore. Il primo è l'errore dovuto alla temperatura (gli altri parametri stellari non influiscono su $A(\text{Li})$). Il secondo è l'errore nella procedura di fit tra osservato e sintetici ed è fortemente dipendente dal SNR dello spettro.

Per determinare l'errore legato alla temperatura si ricalcola l'abbondanza delle 10 stelle, assumendo una temperatura più alta di 100 K rispetto a quella reale. La variazione di abbondanza ottenuta tra questa analisi e quella con la temperatura reale, costituisce l'errore sulla abbondanza dovuto alla temperatura.

Per calcolare l'errore legato al SNR, invece si simulano 200 spettri con la stessa procedura già discussa nella Sezione 3.2 per simulare spettri MUSE con il SNR tipico e $A(\text{Li})$ finale e si ricalcola l'abbondanza per ognuno di questi spettri. Questa infatti cambia a causa della qualità dello spettro, soprattutto se il SNR ha un valore basso. Calcolando la deviazione standard della distribuzione di abbondanze di Litio ottenuta dagli spettri simulati si determina l'errore relativo a SNR. L'errore totale in $A(\text{Li})$ è dato dalla somma in quadratura dei due errori.

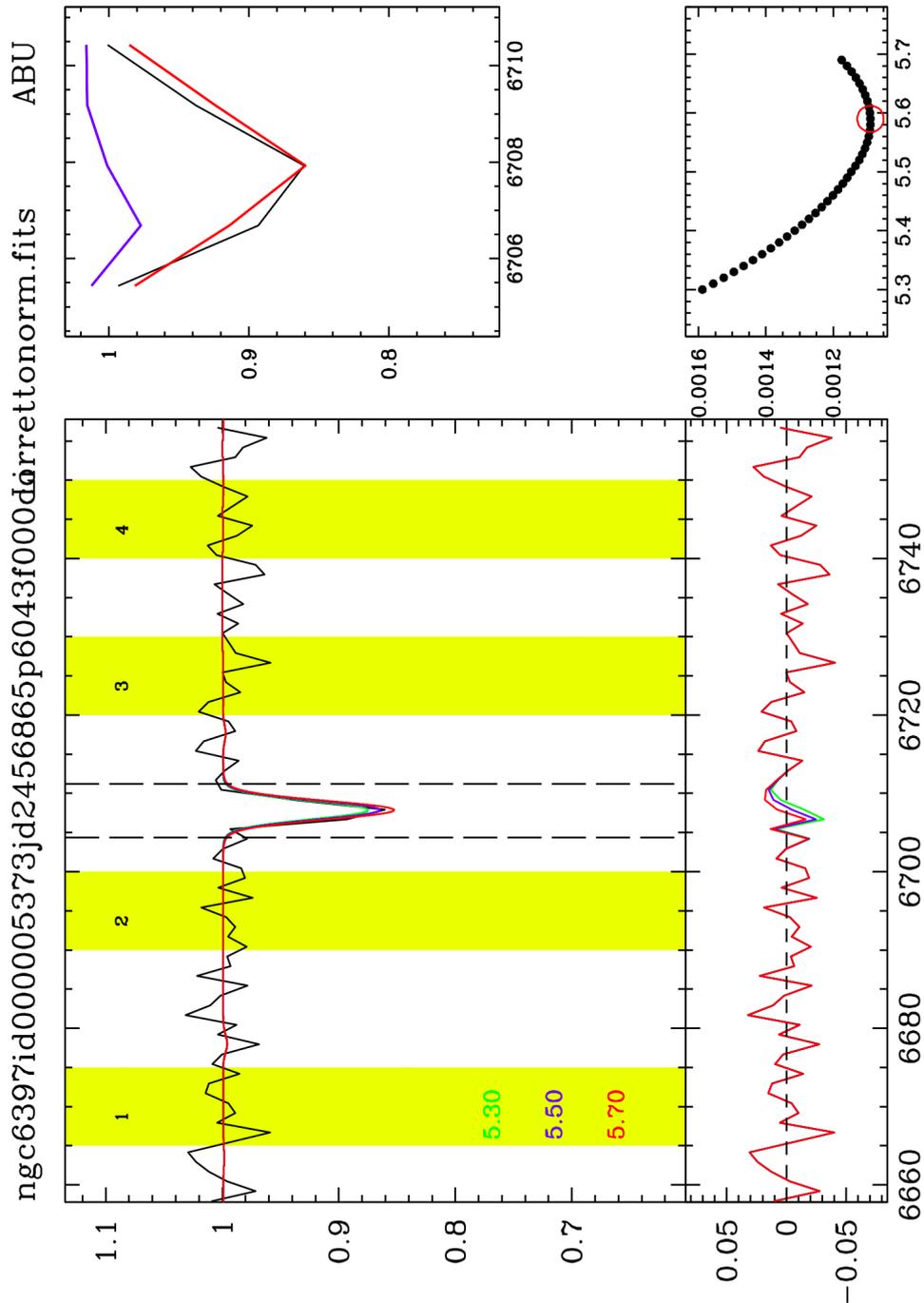


Figura 4.9: In figura viene mostrato un esempio dell'output grafico relativo al calcolo dell'abbondanza di Litio. Nel pannello grande a sinistra viene mostrato lo spettro con 3 sintetici e le 4 regioni di continuo (indicate in giallo) usate dal programma. Nel pannello in basso a sinistra vengono invece mostrati i residui. A destra in alto viene mostrato il best fit in rosso, il residuo in blu e la riga in nero. Infine in basso a destra viene mostrato l'andamento del χ^2 in funzione dell'abbondanza $A(\text{Li})$. Il cerchio rosso indica l'abbondanza corrispondente al minimo di χ^2 .

Identificativo	RA	Dec	T_{eff}	$\log(g)$	$A(Li)_{LTE}$	$A(Li)_{NLTE}$
	[Gradi]	[Gradi]	[K]	[dex]	[dex]	[dex]
1485	265.1844177	-53.6892014	6186	4.5	4.81	4.10 ± 0.54
2343	265.1616821	-53.6971207	6497	4.3	6.23	4.55 ± 0.29
3209	265.2357321	-53.6810185	5756	4.6	3.97	3.46 ± 0.69
11648	265.1546326	-53.6714478	6442	4.4	4.75	3.94 ± 0.52
14000042	265.2161886	-53.7054806	6216	4.5	5.45	4.94 ± 0.24
14000105	265.2177072	-53.7055678	6399	4.4	4.82	4.00 ± 0.39
16000153	265.1594130	-53.6426002	6245	4.5	4.67	3.94 ± 0.57
22000081	265.2309711	-53.6696117	5415	3.2	2.28	2.22 ± 0.23
5373	265.1801211	-53.6834440	6580	4.2	5.59	4.49 ± 0.34
	265.1801147	-53.6834450	6580	4.2	5.91	4.49 ± 0.23
9218	265.1969529	-53.6698415	6571	4.2	5.76	4.49 ± 0.37
	265.1969604	-53.6698418	6571	4.2	5.49	4.49 ± 0.39

Tabella 4.2: Caratteristiche delle 10 stelle Li-rich identificate in NGC6397: coordinate RA e Dec, temperatura, logaritmo della gravità superficiale, $A(Li)_{LTE}$ e $A(Li)_{NLTE}$.

4.3 Completezza

La bassa risoluzione spettrale di MUSE non permette di identificare tutte le eventuali stelle Li-rich presenti. Infatti, ci si aspetta che per un certo stato evolutivo, stelle Li-rich sotto una certa abbondanza di Litio non siano visibili, a causa della combinazione di bassa risoluzione spettrale e SNR.

È stato svolto uno studio per comprendere la completezza dei nostri risultati in termini di abbondanze di Litio. Questa analisi riguarda esclusivamente gli spettri di questo dataset, in quanto i risultati dipendono fortemente dalla qualità spettrale, quindi dal SNR del dataset in questione e non possono essere necessariamente estesi ad altri set di osservazioni MUSE.

Il test svolto è finalizzato a stimare la probabilità di identificare nel nostro dataset una stella Li-rich con un dato valore di $A(\text{Li})$. Questo dipende dall'intensità della riga (quindi da $A(\text{Li})$ ma anche dalla temperatura, quindi dallo stato evolutivo) e dal SNR dello spettro usato (quindi dalla strategia osservativa usata per ottenere il dataset di spettri). Sono stati selezionati i parametri stellari di stelle in 4 stati evolutivi, MS, TO, RGB pre-Bump e RGB post-Bump. Ad ognuno di queste stelle è stato attribuito il SNR tipico osservato negli spettri MUSE di queste fasi evolutive. In particolare, per le stelle di MS è stato adottato un valore di SNR pari a 30, per le stelle di TO è stato considerato un valore di SNR pari a 60, per le stelle di RGB pre-Bump è stato adottato un SNR pari a 160 e infine per le stelle di RGB post-Bump è stato considerato un valore di SNR pari a 400.

Questi valori di SNR non sono quelli mostrati nell'header degli spettri (come per i paragrafi precedenti), perchè il valore riportato rappresenta una stima media del SNR di tutto lo spettro. Per questa simulazione invece, è opportuno considerare il valore del SNR in prossimità della riga di Litio, che può essere diverso da quello riportato nell'header. Per ricavare questa quantità si considera la finestra di continuo definita nella Sezione 3.2, e si calcola la media e la deviazione standard dei conteggi. Facendo poi il rapporto tra queste due quantità si ottiene il SNR relativo alla regione di spettro in prossimità della riga di Litio.

Per ogni fase evolutiva sono state investigate alcune abbondanze di Litio, partendo dai valori misurati nelle 10 stelle Li-rich (dove la riga è chiaramente visibile) vedi Tabella 4.2. In particolare, per le stelle di MS sono stati considerati i casi con $A(\text{Li})$ pari a 3.5, 4, 4.5 e 5. Per le stelle di TO invece si è considerato i casi con $A(\text{Li})$ pari a 3, 3.5 e 4. Per le stelle di RGB pre-Bump sono stati considerati i casi con $A(\text{Li})$ pari a 1.5, 2 e 2.3. Infine per le stelle di RGB post-Bump si è considerato i casi con $A(\text{Li})$ pari a 1, 1.5.

Stabiliti i valori rappresentativi di SNR e di $A(\text{Li})$ per ogni tipologia di stella, si procede con la simulazione. Per ogni fase evolutiva e per ogni valore di $A(\text{Li})$, viene calcolato uno spettro sintetico con la stessa procedura descritta in Sezione 4.2. Ogni spettro sintetico è stato ricampionato allo stesso pixel-size degli spettri MUSE e successivamente è stato aggiunto rumore Poissoniano per simulare un dato valore di SNR. Quindi per ogni stato evolutivo (quindi SNR) e valore di $A(\text{Li})$, sono stati creati 200 spettri simulati "con rumore". Questi spettri sono quindi "copie" degli spettri MUSE, in termini di qualità spettrale e risoluzione, ma con valore di $A(\text{Li})$ conosciuti a priori. A questi spettri si applica la procedura descritta nella Sezione 3.2, ottenendo il rapporto R tra i conteggi mediani delle due finestre.

I valori di R ottenuti devono essere confrontati con il sintetico di riferimento, ovvero uno spettro sintetico relativo ad una stella con abbondanza di Litio normale nella stessa fase evolutiva, e quindi con uguale SNR. Anche per lo spettro di riferimento vengono calcolati 200 spettri e applicando la procedura si ottengono oltre che i rapporti anche il loro valor medio \bar{R}_{sim} e la deviazione standard σ_{sim} .

Per calcolare la percentuale di stelle Li-rich rilevabili, bisogna considerare solo le stelle il cui rapporto soddisfa la seguente condizione:

$$R < \bar{R}_{sim} - (3\sigma_{sim}) \quad (4.2)$$

Si ottiene la percentuale di spettri simulati in cui il valore di R è discrepante da quelli misurati in spettri con $A(\text{Li})$ normale, come fatto per identificare le Li-rich tra gli spettri reali. Le percentuali di stelle Li-rich riconoscibili per ogni tipologia di stella a seconda del SNR e dell'abbondanza di Litio sono riportate in Figura 4.10 e 4.11.

In particolare la Figura 4.10 mostra la probabilità di identificare una stella Li-rich in funzione dell'abbondanza assunta di Litio, nei 4 casi considerati e mostrati con diversi colori: rosso per le stelle di RGB post-Bump, arancione per le stelle di RGB pre-Bump, verde per le stelle di TO e indaco per le stelle di MS. Si nota che la probabilità del 50% di identificare una Li-rich corrisponde a valori diversi di $A(\text{Li})$ a seconda dello stato evolutivo, ed in particolare per le stelle di RGB post-Bump la probabilità corrisponde ad $A(\text{Li})_{LTE} \sim 1.41$; per le stelle di RGB pre-Bump, la probabilità corrisponde ad $A(\text{Li})_{LTE} \sim 2.24$; per stelle di TO, la probabilità corrisponde ad $A(\text{Li})_{LTE} \sim 3.65$ e infine per le stelle di MS, la probabilità corrisponde ad $A(\text{Li})_{LTE} \sim 4.64$.

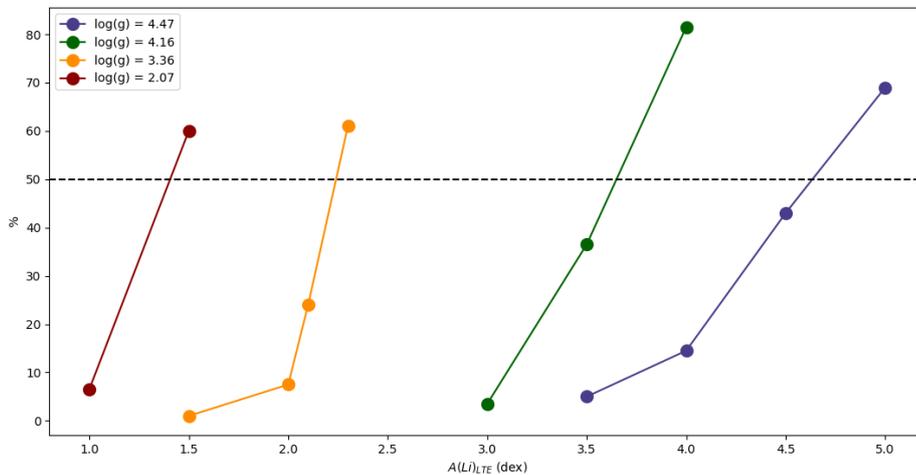


Figura 4.10: Percentuali di stelle Li-rich riconoscibili in funzione di $A(\text{Li})_{LTE}$ per 4 diverse fasi evolutive, identificate da colori diversi. La riga orizzontale tratteggiata identifica il 50% di probabilità di identificare una stella Li-rich.

La Figura 4.11 invece mostra l'andamento di $A(\text{Li})_{NLTE}$ delle stelle dell'ammasso globulare NGC 6397 (in nero), le stelle Li-rich conosciute in tutti gli ammassi globulari (in rosso) e le stelle Li-rich individuate in questo lavoro di tesi (in verde). La linea tratteggiata indica la curva dove si ha il 50% di probabilità di identificare una Li-rich considerando il SNR degli spettri MUSE corrispondente a quella fase evolutiva. Per

valori di $A(\text{Li})$ inferiori, a fissata $\log(g)$, la probabilità di identificare una Li-rich è inferiore al 50%.

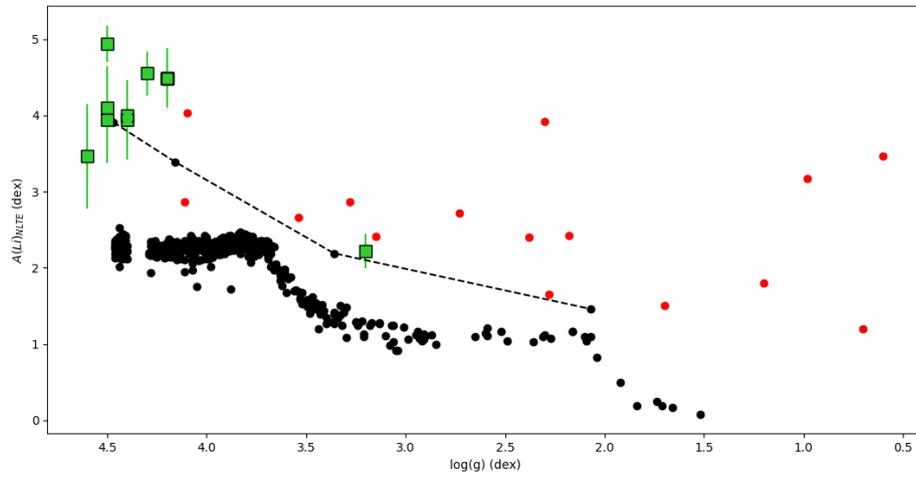


Figura 4.11: Andamento di $A(\text{Li})$ in funzione del logaritmo della gravità superficiale per le stelle del ammasso globulare NGC6397 (punti neri). In rosso sono mostrate le 15 stelle Li-rich finora conosciute. In verde sono mostrate le 10 stelle Li-rich trovate in questo lavoro di tesi. La linea tratteggiata indica la probabilità del 50% di identificare stelle Li-rich considerando il SNR degli spettri MUSE.

Capitolo 5

Conclusioni

In questo lavoro di tesi sono stati analizzati gli spettri di 14271 stelle dell'ammasso globulare NGC 6397, acquisiti con lo spettrografo a campo integrale MUSE montato sul VLT dell'ESO. L'obiettivo di questo progetto pilota è quello di individuare stelle Li-rich nell'ammasso e di testare l'efficienza dello strumento nello svolgere questo tipo di ricerca. Poichè si tratta di oggetti estremamente rari (se ne conoscono finora solo 15 in tutti gli ammassi globulari) e che non possono essere preselezionati fotometricamente, uno strumento come MUSE, anche se a bassa risoluzione spettrale, fornisce una statistica insuperabile rispetto a qualunque altro spettrografo multi-oggetto.

È stata sviluppata una procedura basata sulla definizione di un parametro R definito come il rapporto tra i valori dello spettro nella regione dove ci si aspetta la riga di Litio a 6707.8 \AA e in una regione di continuo. Con questa metodologia sono state individuate 10 nuove stelle Li-rich. Si tratta di un numero straordinariamente grande, in quanto aumenta la statistica di stelle Li-rich conosciute di circa il 67 %. Di queste stelle, 9 sono stelle di MS con $A(Li)_{NLTE}$ compresa tra 3.46 dex e 4.94 dex ed una è una stella di RGB con $A(Li) = 2.22$ dex. In Figura 5.1, viene mostrata la distribuzione delle stelle Li-rich conosciute fino ad oggi in funzione della gravità con l'aggiunta delle stelle Li-rich trovate in questo lavoro di tesi.

I risultati ottenuti dimostrano che MUSE è uno strumento in grado di rivoluzionare la ricerca di queste stelle rare. Nonostante la bassa risoluzione permetta di misurare l'abbondanza di Litio ma non di misurare altre quantità importanti per caratterizzare queste stelle (ad esempio la velocità di rotazione o altre abbondanze chimiche), identificare facilmente nuove Li-rich è fondamentale per eseguire nuove osservazioni ad alta risoluzione spettrale dedicate a questi oggetti.

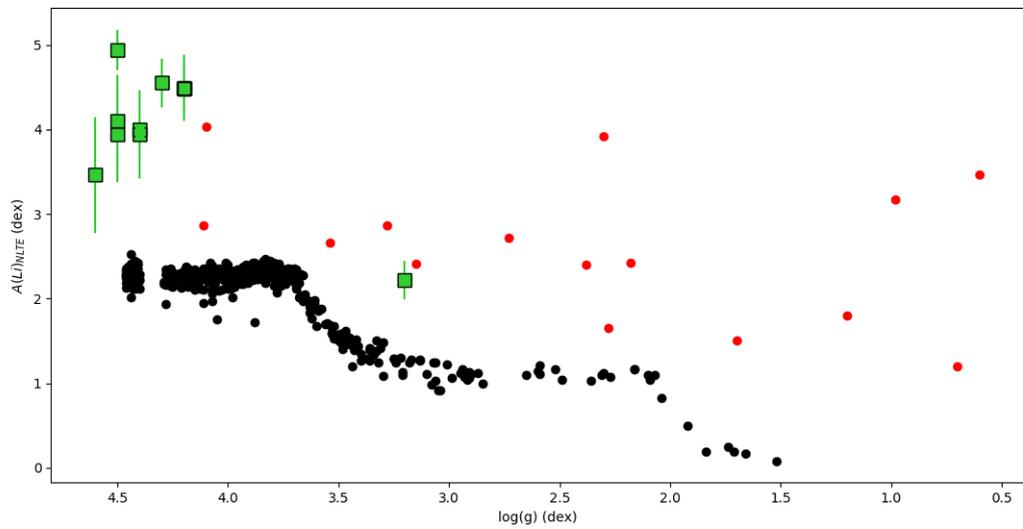


Figura 5.1: Andamento di $A(\text{Li})$ in funzione del logaritmo della gravità superficiale per le stelle di ammasso del globulare NGC6397 (punti neri). In rosso sono mostrate le 15 stelle Li-rich finora conosciute. In verde sono mostrate le 10 stelle Li-rich trovate in questo lavoro di tesi.

Bibliografia

- [1] *The Gaia-ESO Survey: an extremely Li-rich giant in globular cluster NGC1261*, N. Sanna, E. Franciosini, E. Pancino, A. Mucciarelli, M. Tsantaki, C. Charbonnel, R. Smiljanic, X. Fu, A. Bragaglia, N. Lagarde, G. Tautvaišienė, L. Magrini, S. Randich, T. Bensby, A. J. Korn, A. Bayo, M. Bergemann, G. Carraro, and L. Morbidelli (2020)
- [2] *The discovery of a Li/Na-rich giant star in Omega Centauri: formed from the pure ejecta of super-AGB stars?*, A. Mucciarelli, L. Monaco, P. Bonifacio, M. Salaris, X. Fu, S. Villanova (2018)
- [3] *Discovery of a super-Li-rich turnoff star in the metal-poor globular cluster NGC 6397*, A. Koch, K. Lind, R. M. Rich (2011)
- [4] *Lithium-rich giants in globular clusters*, E. N. Kirby, P. Guhathakurta, A. J. Zhang, J. Hong, M. Guo, R. Guo, J. G. Cohen, K. Cunha (2016)
- [5] *On the serendipitous discovery of a Li-rich giant in the globular cluster NGC 362*, V. D’Orazi, R. G. Gratton, G. C. Angelou, A. Bragaglia, E. Carretta, J. C. Lattanzio, S. Lucatello, Y. Momany, A. Sollima (2015)
- [6] *The Gaia-ESO Survey: revisiting the Li-rich giant problem*, A. R. Casey, G. Ruchti, T. Masseron, S. Randich, G. Gilmore, K. Lind, G. M. Kennedy, S. E. Koposov, A. Hourihane, E. Franciosini, J. R. Lewis, L. Magrini, L. Morbidelli, G. G. Sacco, C. C. Worley, S. Feltzing, R. D. Jeffries, A. Vallenari, T. Bensby, A. Bragaglia, E. Flaccomio, P. Francois, A. J. Korn, A. Lanzafame, E. Pancino, A. Recio-Blanco, R. Smiljanic, G. Carraro, M. T. Costado, F. Damiani, P. Donati, A. Frasca, P. Jofré, C. Lardo, P. de Laverny, L. Monaco, L. Prisinzano, L. Sbordone, S. G. Sousa, G. Tautvaišienė, S. Zaggia, T. Zwitter, E. Delgado Mena, Y. Chorniy, S. L. Martell, V. Silva Aguirre, A. Miglio, C. Chiappini, J. Montalbán, T. Morel and M. Valentini (2016)
- [7] *MUSE crowded field 3D spectroscopy of over 12 000 stars in the globular cluster NGC 6397-II. Probing the internal dynamics and the presence of a central black hole*, S. Kamann, T.-O. Husser, J. Brinchmann, E. Emsellem, P. M. Weilbacher, L. Wisotzki, M. Wendt, D. Krajnović, M. M. Roth, R. Bacon, and S. Dreizler (2018)
- [8] *MUSE crowded field 3D spectroscopy of over 12000 stars in the globular cluster NGC 6397*, T. Husser, S. Kamann, S. Dreizler, M. Wendt, N. Wulff, R. Bacon, L. Wisotzki, J. Brinchmann, P. M. Weilbacher, M. M. Roth, A. Monreal-Ibero (2019)

- [9] *An update on the big bang nucleosynthesis prediction for ${}^7\text{Li}$: the problem worsens*, R. H. Cyburt, B. D. Fields, K. A. Olive (2008)
- [10] *Abundance of lithium in unevolved stars and old disk stars : Interpretation and consequences*, F. Spite, M. Spite (1982)
- [11] *The primordial lithium abundance*, P. Bonifacio, P. Molaro (1997)
- [12] *The lithium content of the Galactic Halo stars*, C. Charbonnel, F. Primas (2005)
- [13] *Lithium Isotopic Abundances in Metal-poor Halo Stars*, M. Asplund, D. L. Lambert, P. E. Nissen, F. Primas, V. V. Smith (2006)
- [14] *Mixing along the red giant branch in metal-poor field stars*, R. G. Gratton, C. Sneden, E. Carretta, A. Bragaglia (2000)
- [15] *The Nature of the lithium rich giants. Mixing episodes on the RGB and early-AGB*, C. Charbonnel, S. C. Balachandran (2000)
- [16] *Lithium-rich giants in the Galactic thick disk*, L. Monaco, S. Villanova, C. Moni Bidin, G. Carraro, D. Geisler, P. Bonifacio, O. A. Gonzalez, M. Zoccali, L. Jilkova (2011)
- [17] *Metal-Poor Lithium-Rich Giants in the Radial Velocity Experiment Survey*, G. R. Ruchti, J. P. Fulbright, R. F. G. Wyse, G. F. Gilmore, E. K. Grebel, O. Bienayme, J. Bland-Hawthorn, K. C. Freeman, B. K. Gibson, U. Munari, J. F. Navarro, Q. A. Parker, W. Reid, G. M. Seabroke, A. Siebert, A. Siviero, M. Steinmetz, F. G. Watson, M. Williams, T. Zwitter (2011)
- [18] *Discovery of Super-Li Rich Red Giants in Dwarf Spheroidal Galaxies*, E. Kirby, X.g Fu, P. Guhathakurta, L. Deng (2012)
- [19] *Lithium and sodium in the globular cluster M4. Detection of a Li-rich dwarf star: preservation or pollution?*, L. Monaco, S. Villanova, P. Bonifacio, E. Caffau, D. Geisler, G. Marconi, Y. Momany, H.-G. Ludwig (2012)
- [20] *Lithium and r-Process Abundances in the Population II Cepheid M5 V42*, B. W. Carney, A. M. Fry, G. Gonzalez (1998)
- [21] *An Extremely Lithium-Rich Bright Red Giant in the Globular Cluster M3*, R. P. Kraft, R. C. Peterson, P. Guhathakurta, C. Sneden, J. P. Fulbright, G. E. Langer (1999)
- [22] *Lithium in a Cool Red Giant Member of the Globular Cluster NGC 362*, V. V. Smith, M. D. Shetrone, M. J. Keane (1999)
- [23] *Atomic diffusion and mixing in old stars VI: The lithium content of M30*, P. Gruyters, K. Lind, O. Richard, F. Grundahl, M. Asplund, L. Casagrande, C. Charbonnel, A. Milone, F. Primas, A. J. Korn (2016)
- [24] *The Be-test in the Li-rich star #1657 of NGC 6397: evidence for Li-flash in RGB stars?*, L. Pasquini, A. Koch, R. Smiljanic, P. Bonifacio, A. Modigliani (2014)

- [25] *Lithium and the s-PROCESS in Red-Giant Stars*, A. G. W. Cameron, W. A. Fowler (1971)
- [26] *The accretion of brown dwarfs and planets by giant stars - II. Solar-mass stars on the red giant branch*, L. Siess, M. Livio (1999)
- [27] *Enhanced Extra Mixing in Low-Mass Red Giants: Lithium Production and Thermal Stability*, P. A. Denissenkov, F. Herwig (2004)
- [28] *Hot bottom burning in asymptotic giant branch stars and its effect on oxygen isotopic abundances*, A. I. Boothroyd, I.-J. Sackmann, G. J. Wasserburg (1995)
- [29] *Creation of ${}^7\text{Li}$ and destruction of ${}^3\text{He}$, ${}^9\text{Be}$, ${}^{10}\text{B}$ and ${}^{11}\text{B}$ in low-mass red giants, due to deep circulation*, I.-J. Sackmann, A. I. Boothroyd (1999)
- [30] *The Lithium Flash - Thermal instabilities generated by lithium burning in RGB star*, A. Palacios, C. Charbonnel, M. Forestini (2001)
- [31] *Hot bottom burning in the envelope of super asymptotic giant branch stars*, P. Ventura, F. D'Antona (2011)
- [32] *Distances and ages of NGC 6397, NGC 6752 and 47 Tuc*, R. Gratton, A. Bragaglia, E. Carretta, G. Clementini, S. Desidera, F. Grundahl, S. Lucatello (2003)
- [33] *Na-O anticorrelation and HB*, E. Carretta, A. Bragaglia, R. Gratton, S. Lucatello (2009)
- [34] *Tracing the evolution of NGC 6397 through the chemical composition of its stellar populations*, K. Lind, C. Charbonnel, T. Decressin, F. Primas, F. Grundahl, M. Asplund (2011)
- [35] *Signatures of intrinsic Li depletion and Li-Na anti-correlation in the metal-poor globular cluster NGC 6397*, K. Lind, F. Primas, C. Charbonnel, F. Grundahl, M. Asplund (2009)
- [36] *Facing the problems on the determination of stellar temperatures and gravities: Galactic globular clusters*, A. Mucciarelli, P. Bonifacio (2020)
- [37] *A survey of galaxy redshifts. I. Data reduction techniques*, J. Tonry, M. Davis (1979)
- [38] *Properties of stellar generations in globular clusters and relations with global parameters*, E. Carretta, A. Bragaglia, R.G. Gratton, A. Recio-Blanco, S. Lucatello, V. D'Orazi, S. Cassisi
- [39] *The cosmological lithium problem outside the Galaxy: the Sagittarius globular cluster M54*, A. Mucciarelli, M. Salaris, P. Bonifacio, L. Monaco, S. Villanova (2014)

- [40] *Three-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Implications for Cosmology*, D. N. Spergel, R. Bean, O. Doré, M. R.olta, C. L. Bennett, J. Dunkley, G. Hinshaw, N. Jarosik, E. Komatsu, L. Page, H. V. Peiris, L. Verde, M. Halpern, R. S. Hill, A. Kogut, M. Limon, S. S. Meyer, N. Odegard, G. S. Tucker, J. L. Weiland, E. Wollack, E. L. Wright (2007)
- [41] *Nine-year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) observations: cosmological parameter results*, G. Hinshaw, D. Larson, E. Komatsu, D. N. Spergel, C. L. Bennett, J. Dunkley, M. R.olta, M. Halpern, R. S. Hill, N. Odegard, L. Page, K. M. Smith, J. L. Weiland, B. Gold, N. Jarosik, A. Kogut, M. Limon, S. S. Meyer, G. S. Tucker, E. Wollack, E. L. Wright (2013)
- [42] *Physical, numerical, and computational limits for Kurucz codes*, R. L. Kurucz (2005)
- [43] *The Dartmouth Stellar Evolution Database*, A. Dotter, B. Chaboyer, D. Jevremovic, V. Kostov, E. Baron, J. W. Ferguson (2008)
- [44] *The Acs Survey of Globular Clusters. V. Generating a Comprehensive Star Catalog for each Cluster*, J. Anderson, A. Sarajedini, L. R. Bedin, I. R. King, G. Piotto, I. N. Reid, M. Siegel, S. R. Majewski, N. E. Q. Paust, A. Aparicio, A. P. Milone, B. Chaboyer, A. Rosenberg (2008)
- [45] <https://www.eso.org/sci/facilities/paranal/instruments/muse/overview.html>
- [46] <http://muse-vlt.eu/science/globular-cluster-ngc-6397/>
- [47] <http://stellar.dartmouth.edu/models/isolfnew.html>
- [48] <https://www.eso.org/public/images/eso1407a/>