

Alma Mater Studiorum · Università di Bologna

---

---

Scuola di Scienze  
Dipartimento di Fisica e Astronomia  
Corso di Laurea Magistrale in Astrofisica e Cosmologia

**GALAH SURVEY:  
CHEMICAL TAGGING  
DELLE STELLE DELLA MILKY WAY**

Tesi di laurea magistrale

Presentata da:  
Alessia Iaverdino

Relatore:  
Prof. Alessio Mucciarelli  
Correlatore:  
Dott. Carmela Lardo

---

---

Sessione V  
Anno Accademico 2021/2022



## Abstract

Il *chemical tagging* è un importante strumento per determinare l'origine di stelle ed ammassi globulari, in particolare quando lo studio dinamico non fornisce risposte certe. La Via Lattea è stata protagonista di numerosi eventi di merging nel corso della sua evoluzione, con conseguente accrescimento di stelle di campo ed ammassi globulari (GCs).

Attraverso lo studio delle orbite di questi oggetti è possibile determinare se sono stati formati in situ oppure accresciuti da sistemi esterni. Qualora le proprietà dinamiche non dovessero risultare sufficienti per stabilirne l'origine, si ricorre allo studio delle abbondanze degli elementi  $\alpha$  ed elementi di cattura neutronica per distinguere stelle nate in situ da quelle nate in ambienti esterni come galassie nane. A volte potrebbe essere necessaria un'analisi basata su diagnostici differenti: studi recenti (Minelli et al. 2021; Mucciarelli et al. 2021) hanno proposto l'utilizzo dei rapporti di abbondanza di alcuni elementi del picco del ferro, nel particolare Sc, V e Zn.

I rapporti di abbondanza  $[\text{Sc}/\text{Fe}]$ ,  $[\text{V}/\text{Fe}]$  e  $[\text{Zn}/\text{Fe}]$  sono estremamente sensibili al contributo delle stelle massive: in caso di galassie di piccola massa caratterizzate da uno star formation rate basso, tali abbondanze sono significativamente più basse rispetto al trend generale mostrato dalla nostra Galassia, rendendo possibile identificare stelle accresciute da stelle nate in situ.

In sintesi, il chemical tagging permette di individuare la possibile presenza di oggetti stellari accresciuti e originariamente provenienti da galassie esterne con una diversa storia di formazione stellare, caratterizzati quindi da abbondanze chimiche differenti rispetto a quelle di stelle nate all'interno della Via Lattea.

In questo elaborato verranno studiate le abbondanze di diversi elementi chimici per indagare l'origine di circa 600.000 stelle analizzate con la survey GALAH e lo spettrografo ottico HERMES. La survey di GALAH mette a disposizione per ciascuno dei target osservati i parametri stellari, velocità radiali e abbondanze chimiche. Studiando gli andamenti dei rapporti delle abbondanze di Mg, Ca, Si, Ti, Sc, V, Zn, Ni con il  $[\text{Fe}/\text{H}]$  si può individuare se sono presenti delle anomalie. Il risultato atteso dalla maggior parte delle stelle è un andamento delle abbondanze che segue il trend chimico della Via Lattea; il possibile riconoscimento di stelle con un pattern chimico che si discosta da quello generale permette di poter identificare eventuali gruppi di stelle figlie di una galassia esterna. Sulla base di ciò, attraverso l'uso dei cataloghi di GAIA si possono studiare le orbite delle stelle individuate con particolari abbondanze chimiche e infine poter confermare nuovamente la storia di formazione della Via Lattea, avvenuta attraverso episodi successivi di merging con galassie più piccole.

# Indice

<b>1</b>	<b>Introduzione</b>	<b>1</b>
1.1	Archeologia Galattica . . . . .	4
1.2	Origine degli elementi . . . . .	5
1.2.1	Nucleosintesi primordiale . . . . .	5
1.2.2	Nucleosintesi stellare . . . . .	6
<b>2</b>	<b>Survey GALAH</b>	<b>10</b>
2.1	Goal scientifici . . . . .	12
2.1.1	Timeline . . . . .	12
2.1.2	Storia di accrescimento . . . . .	12
2.1.3	Processi dinamici . . . . .	13
2.1.4	Processi di nucleosintesi . . . . .	13
2.2	Workflow . . . . .	14
2.2.1	Facilities . . . . .	15
2.2.2	Selezione dei target . . . . .	16
2.2.3	Osservazioni . . . . .	18
2.2.4	Riduzione dati . . . . .	20
2.2.5	Analisi dati . . . . .	20
<b>3</b>	<b>GALAH DR3</b>	<b>22</b>
3.1	Risultati . . . . .	23
3.1.1	Dissezione del disco stellare . . . . .	23
3.1.2	Alone accresciuto . . . . .	23
3.1.3	Litio . . . . .	26
<b>4</b>	<b>Trend delle abbondanze col ferro nei dati GALAH</b>	<b>27</b>
4.1	Criteri di selezione adottati nello studio delle abbondanze . . . . .	28
4.2	Trend delle abbondanze misurate con la temperatura effettiva . . . . .	39
4.3	Studio delle incertezze associate alle misure di abbondanza . . . . .	48
4.3.1	Selezione del sample finale per lo studio dei rapporti di abbondanza . . . . .	56
4.4	Problemi noti su abbondanze . . . . .	66
4.4.1	Stelle di Red Clump . . . . .	66
4.4.2	Possibili trend sistematici . . . . .	66
4.4.3	Binarie . . . . .	67
4.4.4	Problema [Zn/Fe] . . . . .	68
4.4.5	Problema [Sc/Fe] . . . . .	70

<b>5 Conclusioni</b>	<b>72</b>
<b>Bibliografia</b>	<b>74</b>

# Capitolo 1

## Introduzione

Il modello cosmologico  $\Lambda$ -CDM prevede che le galassie massive ad oggi osservate si sono formate tramite il merging di strutture più piccole (Helmi et al. 2018). La Via Lattea (MW) è l'esempio perfetto per descrivere questo meccanismo, dal momento che nel passato ha subito diversi eventi di merging, molti dei quali sono stati scoperti grazie alla missione Gaia. Nel corso dei processi di merging, la Via Lattea ha accresciuto sia stelle di campo che ammassi globulari (GCs). In particolare, circa il 50%-60% dei GCs sono stati accresciuti da diversi progenitori esterni, mentre il resto si è formato in situ. Fino ad ora, l'origine di questi sistemi è stata determinata tramite lo studio della loro dinamica combinato con le informazioni relative alla relazione età-metallicità. Tuttavia, le proprietà dinamiche di alcuni sistemi stellari non permettono una classificazione precisa.

In questo caso, si usa il chemical tagging: strumento che permette di determinare l'origine delle stelle sulla base del loro pattern chimico. È stato dimostrato sia dal punto di vista teorico (Matteucci & Brocato, 1990) che osservativo (Helmi et al. 2018), che lo studio delle abbondanze di elementi  $\alpha$  permette di distinguere stelle nate nella Via Lattea da quelle nate in galassie nane. Inoltre, è stato osservato che le stelle appartenenti a galassie nane sono più ricche di elementi formati tramite il processo di cattura neutronica lenta, rispetto a stelle di simile metallicità della MW.

Lo studio di Minelli et al. (2021) ha proposto l'uso dei rapporti di abbondanza degli elementi del picco del ferro, in particolare Sc, V e Zn, per individuare stelle extra-galattiche nel regime metal-rich ( $[\text{Fe}/\text{H}] > -1$ ). Dal confronto della composizione chimica tra la Grande Nube di Magellano (LMC), la Galassia Nana del Sagittario (Sgr) e la Via Lattea è stato trovato che la grande differenza tra le stelle di LMC/Sgr e MW si trova nei rapporti  $[\text{V}/\text{Fe}]$  e  $[\text{Zn}/\text{Fe}]$ . Questi rapporti di abbondanze non tipicamente studiati possono, dunque, essere usati per distinguere stelle formatesi in ambienti di bassa formazione stellare, come le galassie nane, nel regime metal-rich dove rapporti di abbondanze più comuni (elementi  $\alpha$  o elementi di cattura neutronica) sono meno sensibili in termini di strumenti per la determinazione dei luoghi d'origine stellari.

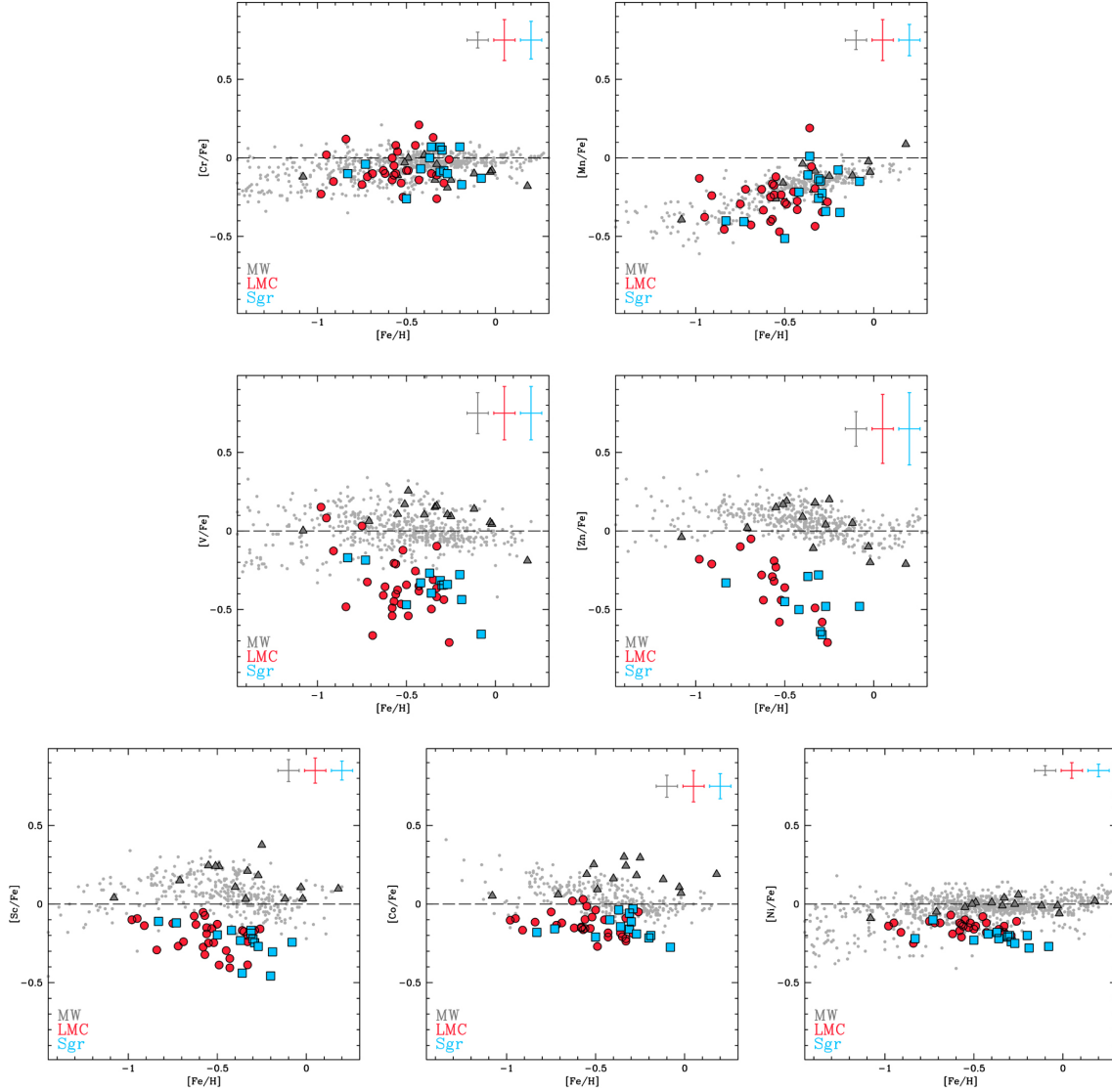


Figura 1.1: Andamenti dei rapporti degli elementi del picco del ferro  $[\text{Cr}/\text{Fe}]$ ,  $[\text{Mn}/\text{Fe}]$ ,  $[\text{V}/\text{Fe}]$ ,  $[\text{Zn}/\text{Fe}]$ ,  $[\text{Co}/\text{Fe}]$ ,  $[\text{Ni}/\text{Fe}]$ ,  $[\text{Sc}/\text{Fe}]$  in funzione di  $[\text{Fe}/\text{H}]$  da Minelli et al. (2021). Nei plot si possono osservare i dati relativi al campione di LMC (cerchi rossi), Sgr (quadrati blu-chiaro), e MW (triangoli grigi).

In Figura 1.1 è possibile osservare quanto affermato precedentemente. Le stelle di LMC e Sgr mostrano un pattern delle abbondanze degli elementi del picco del ferro simile. Rispetto alla MW ci sono differenze evidenti soprattutto per le abbondanze di Sc, V, Co, Ni e Zn, mostrando nel caso di  $[\text{Sc}/\text{Fe}]$  e  $[\text{Ni}/\text{Fe}]$  una decrescita evidente dei rapporti di abbondanza all'aumentare di  $[\text{Fe}/\text{H}]$ . Si osserva anche un trend decrescente per  $[\text{Zn}/\text{Fe}]$  nel campione LMC, mentre l'insufficiente numero di stelle di Sgr con una misura di Zn rende impossibile identificare un trend con  $[\text{Fe}/\text{H}]$ . La più grande differenza viene osservata per  $[\text{V}/\text{Fe}]$  e  $[\text{Zn}/\text{Fe}]$ , i quali valori nelle stelle di LMC/Sgr sono più bassi di 0.5–0.7 rispetto alle stelle della MW di stessa metallicità. Al contrario,  $[\text{Cr}/\text{Fe}]$  e  $[\text{Mn}/\text{Fe}]$  mostrano valori paragonabili tra le stelle di LMC/Sgr e della MW.

Una grande quantità di questi elementi citati vengono prodotti da stelle massicce, attraverso SNe II, HNe, e SNe di cattura elettronica. Le abbondanze misurate nelle

stelle di LMC e Sgr per la maggior parte degli elementi del picco del ferro sono compatibili con uno scenario in cui il contributo da parte delle stelle massive all'arricchimento chimico della galassia d'origine è meno importante rispetto alla MW. In particolare, le basse abbondanze di Zn suggeriscono un piccolo se non mancante contributo da parte di stelle con una massa  $M > 25 - 30M_{\odot}$ , poiché questo elemento è quasi totalmente prodotto da HNe, mentre la sua produzione attraverso SNe Ia è quasi trascurabile. Come detto in precedenza, V e Zn mostrano grandi differenze rispetto alle stelle della MW con simile  $[\text{Fe}/\text{H}]$ . Questi rapporti di abbondanza rappresentano uno dei metodi più efficienti per analizzare chimicamente LMC/Sgr e MW e possono essere usati per distinguere tra le stelle della MW con  $[\text{Fe}/\text{H}] > -1$  quelle formatesi in satelliti più piccoli come LMC/Sgr e che sono state di conseguenza accresciute dalla MW in seguito alla distruzione e accrescimento del sistema stesso.

## 1.1 Archeologia Galattica

La formazione ed evoluzione delle galassie rappresenta uno dei problemi più grandi dell'astrofisica moderna.

Il riciclo di materiale prodotto dalle stelle in generazioni stellari successive contribuisce gradualmente alla formazione di elementi pesanti nell'Universo. La composizione chimica di una stella riflette la materia da cui si è formata; per esempio, una stella formata nei primi stadi di vita della galassia avrà una piccola abbondanza di elementi pesanti. Stelle formate di recente avranno invece un contenuto di metalli maggiore. È quindi possibile usare le stelle come indicatori per l'evoluzione chimica della Via Lattea. In aggiunta, l'identificazione di stelle di stessa origine attraverso la loro firma chimica permette di capire la formazione e l'evoluzione delle galassie. Questa tecnica prende il nome di Archeologia Galattica. In sintesi, l'Archeologia Galattica ha l'obiettivo di indagare la storia di formazione ed evoluzione della Via Lattea e delle sue componenti.

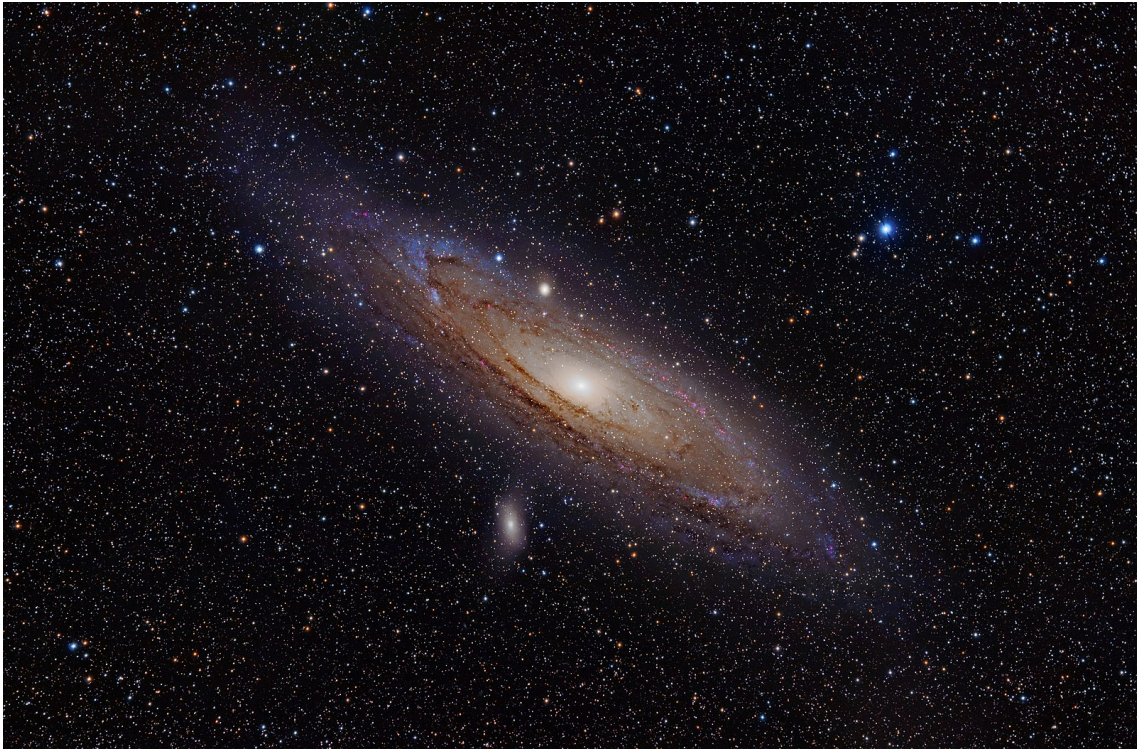


Figura 1.2: La Galassia di Andromeda. Non è possibile ottenere immagini della Via Lattea dall'interno, gli astronomi presumono che la nostra Galassia sia simile ad Andromeda. (Credit: Adam Evans • CC-BY 2.0)

La Via Lattea (MW) è solo una delle miliardi di galassie che si trovano nell'Universo e ognuna contiene più di 100 miliardi di stelle. La MW è una galassia spirale barrata (SBbc) con un diametro di circa 25 kpc e una massa totale stimata all'interno di 20 kpc di  $M(< 20kpc) = 1.91^{+0.18}_{-0.17} \cdot 10^{11} M_{\odot}$  (Posti and Helmi, 2019). La componente stellare è di circa  $5 \cdot 10^{10} M_{\odot}$ , per la materia oscura si stima  $M_{DM}(< 20kpc) = 1.37^{+0.18}_{-0.17} \cdot 10^{11} M_{\odot}$  e il numero di ammassi globulari (GCs) che contiene è di circa 150 (Harris, 1996). La nostra Galassia è caratterizzata da diverse componenti tra cui:

- il disco sottile che è il sito principale dove avviene la formazione stellare. Il tasso di formazione stellare attuale è stimato essere  $\sim 1.6M_{\odot}/yr$  (Licquia and Newman, 2015). Il disco è supportato rotazionalmente e la maggior parte delle stelle si muovono su orbite circolari;
- il disco spesso che rispetto al disco sottile, è costituito da stelle che hanno un livello significativamente più basso di metalli con il picco ad un valore attorno a  $[Fe/H] \sim -0.5$ ;
- il bulge è la componente centrale della Galassia. Presenta stelle prevalentemente vecchie ( $> 9Gyr$ ) con un range di metallicità  $-1 < [Fe/H] < +0.5$ . Al contrario del disco stellare, le stelle del bulge e dell'alone hanno orbite più irregolari;
- l'alone stellare è la componente più estesa e si stima avere una massa totale dell'ordine di  $1.3 \cdot 10^9 M_{\odot}$  (Mackereth and Bovy, 2020). Le stelle dell'alone sono generalmente molto vecchie e povere di metalli.

Come detto finora, le strutture Galattiche variano anche in termini di composizione chimica. Le stelle dell'alone sono costituite da pochi elementi pesanti, suggerendo dunque che siano state tra le prime stelle a formarsi all'interno della Galassia, prima che il riciclo stellare arricchisse in maniera significativa il mezzo circostante.

Ad oggi, non si conosce ancora con certezza il meccanismo che ha portato alla formazione ed evoluzione di queste strutture. L'uso della loro composizione chimica e cinematica permette di esaminare come queste componenti si siano sviluppate. Numerose altre galassie mostrano simili strutture; attraverso l'uso dell'Archeologia Galattica è possibile studiare l'evoluzione della Via Lattea ed applicare queste informazioni per comprendere in generale la formazione delle galassie.

## 1.2 Origine degli elementi

In seguito al Big Bang, la materia dell'Universo era composta da soli due elementi: idrogeno ed elio. Attualmente, c'è un range molto più ampio di elementi che vengono maggiormente prodotti attraverso i processi di evoluzione stellare. Il processo di formazione di nuovi elementi chimici prende il nome di nucleosintesi. Nei paragrafi successivi verranno descritte le basi della chimica dell'Universo e come questa è cambiata nel corso del tempo.

### 1.2.1 Nucleosintesi primordiale

Quando il Big Bang avvenne ( $\sim 14$  miliardi di anni fa), l'Universo era molto caldo e denso ma nel corso del tempo è andato incontro ad un processo di raffreddamento a causa della sua stessa espansione. All'incirca  $10^{-3}$  secondi dopo il Big Bang, protoni e neutroni hanno iniziato ad unirsi per formare i nuclei atomici, questo tipo di processo prende il nome di fusione nucleare. I processi di fusione nucleare dipendono dalla densità e dalla temperatura del gas. Nuclei atomici più complessi richiedono ambienti caldi e densi, dal momento che in tali condizioni le particelle hanno una probabilità più alta di collidere e unirsi.

Approssimativamente 5 minuti dopo il Big Bang, a causa dell'espansione che avveniva in tempi molto brevi, l'Universo non era più sufficientemente caldo e denso per poter continuare la fusione. In questo scenario, la materia dell'Universo era dunque originariamente costituita al 75% da nuclei di idrogeno e al 25% da nuclei di elio con tracce di altri elementi, come il deuterio (un atomo di idrogeno con un neutrone in più) e litio. L'intero processo che ha portato alla formazione dei primi elementi prende il nome di nucleosintesi primordiale, in inglese Big Bang Nucleosynthesis (BBN). La composizione chimica dell'Universo presenta ancora oggi ciò che è risultato dal BBN insieme anche ad una piccola frazione di elementi più complessi, a cui gli astronomi fanno riferimento con metalli o elementi pesanti, prodotti dalle stelle.

## 1.2.2 Nucleosintesi stellare

Nel tempo, i prodotti del BBN si sono gravitazionalmente uniti in aggregati di materia formando le prime stelle attraverso il collasso. Nel processo di collasso della materia, la temperatura e densità centrali aumentano fino a che la pressione centrale si bilancia con la gravità, in questo modo la stella raggiunge l'equilibrio idrostatico. Similmente al BBN, il core stellare denso e caldo contiene particelle energetiche, in gran parte atomi di idrogeno che attraverso la fusione nucleare formano elementi più complessi. Mediante questo processo viene rilasciata energia sotto forma di radiazione che supporta il core dalla gravità e, dopo un certo periodo di tempo, fuoriesce nello spazio passando attraverso l'atmosfera stellare.

La vita di una stella dipende sia dalla sua massa, che riflette la quantità di carburante a disposizione per la fusione nucleare, che dalla sua luminosità, ovvero il rate al quale brucia il carburante e rilascia energia come radiazione nell'ambiente circostante. In origine le prime stelle erano molto massicce, contenenti una grande quantità di carburante. Tuttavia, erano anche incredibilmente luminose e vivevano quindi solo qualche milione di anni.

In generale, quando le stelle terminano il loro carburante, rilasciano la loro materia stellare nel mezzo circostante, inclusi i complessi elementi prodotti nel corso della fusione nucleare all'interno del core stellare. La generazione successiva di stelle si forma dal gas arricchito dai prodotti della fusione nucleare delle prime stelle. Come la prima generazione, queste stelle inizialmente bruciano idrogeno nei loro core, producendo atomi di elio. Dopo un certo periodo di tempo, la stella ha processato maggior parte del core di idrogeno, per cui questo processo di fusione non produce più energia sufficiente per contrastare la gravità interna; il core stellare si contrae, la temperatura e la densità aumentano fino a che non raggiungono le condizioni necessarie per l'innesco della fusione dell'elio in carbonio. La fusione dell'idrogeno non si limita solo al core ma continua in regioni meno dense della stella, nello specifico in shell. La fusione nelle shell avviene ad un rate molto più rapido che nel core, producendo un'elevata quantità di energia. Come risultato, le shell si espandono verso l'esterno, poiché il supporto della pressione supera l'attrazione gravitazionale. Per stelle massive, questo tipo di processo evolutivo continua fino alla formazione di elementi sempre più pesanti: C, Ne, O, Si, Fe. Per gli elementi più leggeri del ferro la fusione nucleare rilascia energia, per gli elementi più pesanti invece la fusione richiede una sorgente di energia. Quando tutta la materia nel core stellare è stata processata in ferro, la stella non è più in grado di produrre energia e di supportare

se stessa dal collasso gravitazionale. Inizia così il collasso che porta all'esplosione di supernova e il rilascio di tutti gli elementi prodotti dalla stella nel mezzo circostante. Esistono processi di nucleosintesi aggiuntivi che avvengono nelle supernove e che, per cattura neutronica, producono elementi più pesanti del ferro, come Eu.

Stelle di piccola massa, ad esempio il Sole, hanno una vita più semplice di quelle di grande massa. Queste non sono in grado di raggiungere le temperature necessarie per la fusione dell'elio, finendo così la loro vita come nane bianche. Le stelle che riescono ad innescare la fusione dell'elio non vanno oltre alla formazione del carbonio nel core.

In sintesi, le prime stelle sono nate da nubi di idrogeno ed elio prodotte dal BBN, le quali attraverso vari processi di fusione nucleare hanno formato elementi più pesanti (i.e. C, Ne, O, Si, Fe). Al termine dei processi di fusione, è avvenuto il collasso dal momento che le stelle non sono più in grado di supportare se stesse. Con la loro morte il materiale processato internamente viene rilasciato nel mezzo circostante e la generazione di stelle successive si forma da questo materiale arricchito, evolve e con la loro morte seguono lo stesso ciclo vitale. Nel corso del tempo, la chimica dell'Universo è diventata incredibilmente complessa grazie al fenomeno di riciclo stellare. Dopo il BBN, approssimativamente il 99.9% di materia era idrogeno ed elio. Ora, dopo più di 10 miliardi di anni di riciclo, all'incirca il 2% di materia è fatta di elementi più complessi.

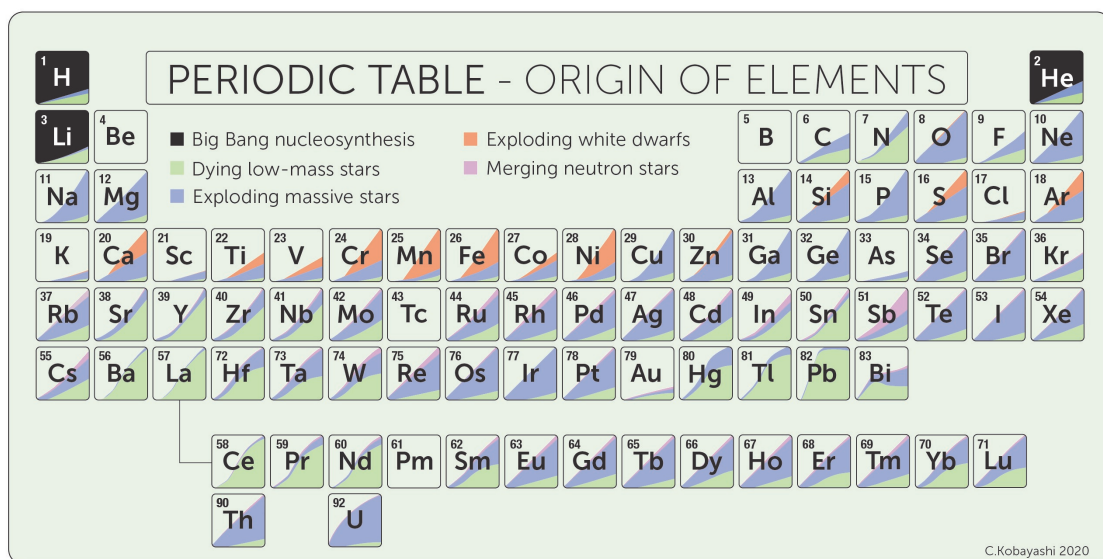


Figura 1.3: Tavola Periodica, mostra gli elementi chimici naturali fino all'uranio. Le ombre colorate indicano il tipo di origine stellare. (Content: Chiaki Kobayashi et al.; Artwork: Sahn Keily)

Studi condotti da Kobayashi et al. (2020) hanno permesso una conoscenza più approfondita sull'origine degli elementi. Il team di ricercatori ha infatti costruito modelli di evoluzione chimica galattica (GCE) per determinare il contributo di ciascuna sorgente di elementi stabili in funzione del tempo e dell'ambiente (i.e. massa e tipo di galassia), ottenendo come risultato la tavola periodica rappresentata in Figura 1.3. In ogni box è raffigurato il contributo di ogni tipo di sorgente che arricchisce chimicamente l'Universo ovvero BBN, stelle di AGB, supernove core-collapse

tra cui SNe II, hypernove (HNe), electron-capture supernove (ECSNe), SNe Ia e neutron star mergers (NSMs). Elementi con un numero di massa  $A \geq 12$  sono prodotti negli interni stellari, la BBN produce solo H e He insieme ad una piccola percentuale di Li. All'incirca metà degli elementi leggeri C, N, e F vengono invece prodotti da stelle di massa intermedia durante la loro fase di AGB. Gli elementi  $\alpha$  (O, Mg, Si, Ti, S, e Ca) sono per la maggior parte prodotti da stelle massicce prima di essere riemessi nel mezzo interstellare da supernove core-collapse (SNe di tipo II, Ib, e Ic). Solo una piccola frazione di elementi  $\alpha$  viene prodotta da SNe Ia, le quali producono invece una quantità significativa di Fe su tempi scala lunghi. Di conseguenza, i rapporti  $[\alpha/\text{Fe}]$  vengono usati per tracciare i tempi di formazione stellare in un determinato sistema. Nello specifico, la relazione che permette di definire il tipo di formazione stellare a cui una galassia è andata incontro e dunque, che permette di spiegare l'eventuale presenza di stelle accresciute sulla base dei rapporti di abbondanza, è la relazione  $[\alpha/\text{Fe}] - [\text{Fe}/\text{H}]$ . Questo rapporto viene spiegato come un arricchimento ritardato da parte delle SNe Ia, le quali hanno tempi scala più lunghi rispetto alle supernove core-collapse. Gli elementi  $\alpha$  possono essere divisi in base al loro meccanismo di formazione:

- gli elementi O e Mg vengono sintetizzati dal bruciamento di C e Ne, principalmente da stelle con massa  $M > 30 - 35M_{\odot}$  senza il contributo di SNe Ia;
- gli elementi Si, Ca e Ti sono sintetizzati dal bruciamento di O e Si da stelle con massa  $M \sim 15 - 25M_{\odot}$  e in piccola quantità da SNe Ia.

Gli elementi del picco del ferro sono gli elementi più pesanti che vengono prodotti attraverso reazioni termonucleari. Vengono formati in parte da stelle massive, con un contributo significativo da parte di HNe (associate a stelle con massa  $M > 25 - 30M_{\odot}$  e più energetiche rispetto alle normali SNe II) e una frazione non trascurabile attraverso SNe Ia. In sintesi, gli elementi del picco del ferro vengono prodotti in gran parte da stelle massive attraverso SNe II, HNe e ECSNe.

Gli elementi più pesanti del Fe vengono prodotti da stelle attraverso processi di cattura neutronica da parte dei nuclei di Fe e del picco del ferro con conseguenti decadimenti  $\beta$ . A seconda del rate di cattura dei neutroni relativo ai tempi scala del decadimento, si distinguono processi slow (s) e rapidi (r). Gli elementi del processo s (Y, Ba, La) sono prodotti principalmente da stelle AGB di piccola massa ( $1-3 M_{\odot}$ ). Tra le possibili sorgenti per gli elementi prodotti attraverso processi r (come Eu) si distinguono stelle di massa  $\sim 8 - 10M_{\odot}$ , NSMs e supernove core-collapse.

La produzione di alcuni elementi come F, K, Sc, e V può essere incrementata anche grazie ai processi di cattura neutronica nelle supernove core-collapse. Supernove di tipo Ia, le quali sono l'esplosione di nane bianche di CO legate in sistemi binari (Kobayashi & Nomoto 2009, Kobayashi et al. 2020), contribuiscono alla formazione degli elementi del picco del ferro (Cr, Mn, Fe, Ni, Co, Cu, e Zn).

La formazione e le abbondanze dei diversi elementi chimici sono legati non solo ai tempi scala evolutivi, ma anche alla posizione all'interno della galassia. Se i tempi scala della formazione stellare nel bulge e nel disco spesso sono minori di quelli nei dintorni solari, il contributo da parte di stelle di AGB di massa intermedia, di piccola massa e SNe Ia inizia rispettivamente a  $[\text{Fe}/\text{H}] \sim -2.5, -1.5,$  e  $-1$  nei dintorni solari, mentre nei modelli di bulge e disco spesso inizia a valori di  $[\text{Fe}/\text{H}]$  maggiori.

In generale, ad una data metallicità, una veloce formazione stellare come quella che si ha nel bulge e nel disco spesso risulta in una bassa abbondanza degli elementi dei processi s relativa al ferro. Al contrario, una formazione stellare inefficiente come nell'alone equivale ad un elevato rapporto delle abbondanze degli elementi di cattura neutronica. Questo avviene perché i contributi da parte delle sorgenti, quali stelle di AGB, ECSNe e NSMs, sono minori in caso di rapida formazione stellare.

# Capitolo 2

## Survey GALAH

Lo studio di questa tesi si concentra sui dati raccolti ed analizzati della survey GALAH. Le osservazioni ebbero inizio il 7 Febbraio 2014, fino al 27 Settembre 2021 sono stati raccolti 841.941 spettri da 754.032 stelle. Di seguito verranno mostrati alcuni dettagli riguardanti le osservazioni condotte per la survey.

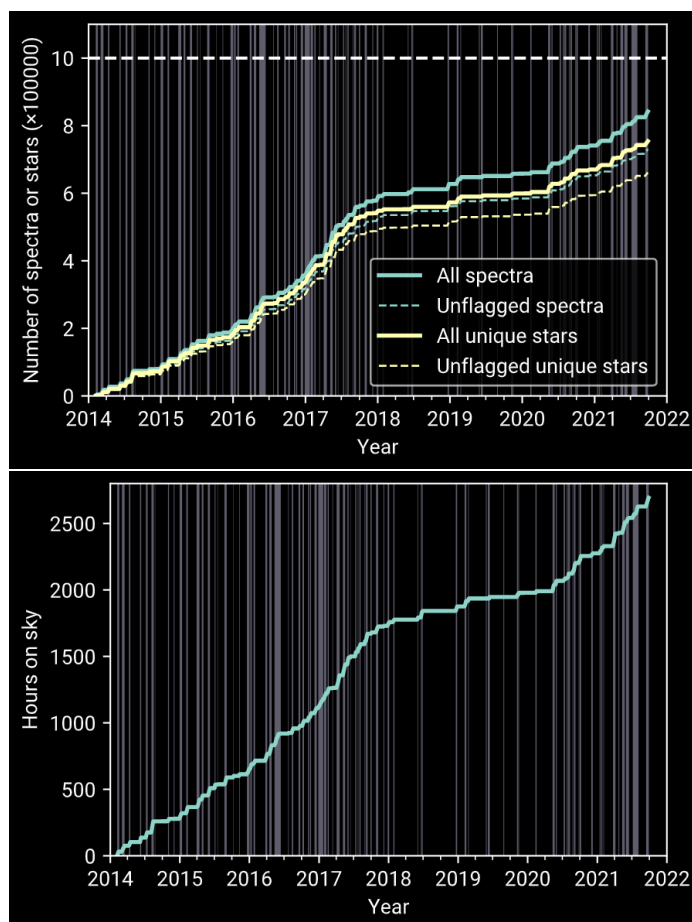


Figura 2.1: In alto, il plot raffigura la somma cumulativa nel tempo del numero di spettri e stelle ottenuti. Gli unflagged si riferiscono a quei target dove non sono stati trovati problemi con la riduzione. In basso, il plot raffigura la somma cumulativa del tempo totale di osservazione della survey GALAH. Le linee verticali grige indicano le notti di osservazione.

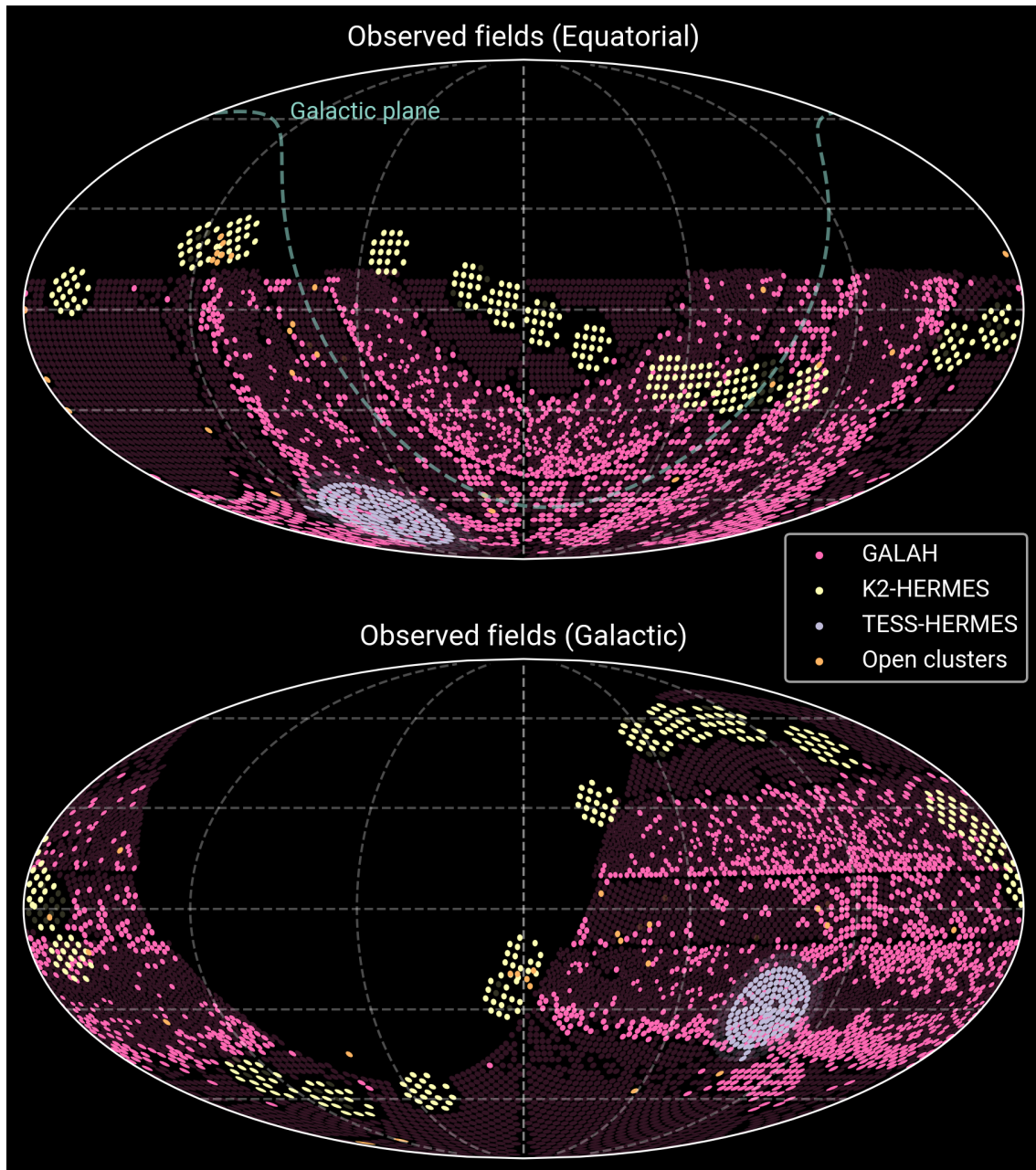


Figura 2.2: Posizione nel cielo di tutti i campi osservati che fanno parte della survey GALAH. Ognuno dei piccoli cerchi rappresenta un possibile campo, quelli evidenziati corrispondono ai campi osservati.

Lo stato attuale della Galassia è il risultato di vari e complessi processi fisici che hanno luogo simultaneamente nel corso della sua storia evolutiva. La situazione è ulteriormente complicata dal fatto che osservativamente non si ha diretto accesso agli eventi passati. Fortunatamente, le composizioni chimiche delle stelle sono modellate dagli eventi a partire dal Big Bang attraverso la combustione nucleare nelle successive generazioni di stelle fino ai giorni nostri. Poiché gli elementi vengono prodotti attraverso processi di nucleosintesi in diversi tipi di stelle con tempi di vita variabili, la combinazione di molte abbondanze stellari consente agli astronomi di etichettare le singole stelle al loro luogo di nascita e alle condizioni fisiche prevalenti al momento della formazione. L'età di una stella può essere stimata utilizzando le

informazioni negli spettri stellari e i dati cinematici consentono di ricavare informazioni su episodi passati di accrescimento. Tutte queste proprietà stellari vengono misurate e studiate con GALAH.

## 2.1 Goal scientifici

Gli obiettivi scientifici di GALAH sono:

- Ricostruire una *timeline* dell'evoluzione chimica e temporale della Galassia;
- Ricostruire la storia di accrescimento della Via Lattea;
- Processi dinamici;
- Processi di nucleosintesi;
- Chemical Tagging (discusso in precedenza).

### 2.1.1 Timeline

Le stelle possono cambiare il loro comportamento dinamico grazie a meccanismi come il riscaldamento e la migrazione radiale in seguito alla dispersione degli ammassi d'origine. Tuttavia, la composizione chimica di queste stelle riflette le condizioni dei loro luoghi di nascita e rimane sostanzialmente invariata. Quando vengono scoperti resti stellari di questi ammassi dispersi, è possibile lavorare con Gaia, K2 per stimare l'età precisa per il campione GALAH. Queste informazioni sull'età permettono di sviluppare un quadro generale della Via Lattea. Si possono quindi ricostruire questi ammassi stellari e collocarli in una sequenza evolutiva, cioè un albero genealogico, basata sulle loro firme chimiche. Questo consente di stimare una linea temporale dell'evoluzione chimica e dinamica della Galassia, inclusa la sua storia di accrescimento. Alcuni studi (Haywood et al. 2016) suggeriscono che vi sia stato un quenching della formazione stellare a circa 8-10 Gyr collegato all'origine del disco spesso, mentre altri suggeriscono una storia continua di formazione stellare. Numerosi studi recenti (Chiappini et al. 1997, Andrews et al. 2017, Schönrich & Binney 2009) suggeriscono che utilizzando modelli di evoluzione chimica è possibile fittare le tendenze di alcune abbondanze con l'età e recuperare la storia della formazione stellare.

### 2.1.2 Storia di accrescimento

GALAH concentra le sue osservazioni sul disco e bulge della MW, i quali contengono quasi tutta la massa stellare della Galassia. Queste componenti, oltre ad evolversi dinamicamente, possono essere influenzate dalla caduta interna di piccoli sistemi satelliti evoluti. Gaia ha rivelato che lo spazio delle velocità nelle vicinanze solari è ricco di sottostrutture, alcune di queste strutture sono probabilmente i detriti di vecchi ammassi stellari distrutti nel disco e che ora sono dispersi in estese regioni della Galassia. Altri potrebbero essere resti di satelliti cannibalizzati dalla Via Lattea. GALAH fornisce un campione sufficientemente ampio per risolvere queste sottostrutture in funzione dell'età, il che può rivelare l'origine di queste strutture

come la distruzione di grandi ammassi o complessi di formazione stellare, oppure perturbazioni esterne.

### 2.1.3 Processi dinamici

Il campione di GALAH può essere usato per esaminare processi dinamici che avvengono nel corso dell'evoluzione della Galassia. Senza il mixing radiale, i detriti dispersi da ammassi aperti si troverebbero su orbite circolari vicine e confinate in un anello attorno alla Galassia, riflettendo le loro proprietà dinamiche. Attraverso l'uso di GALAH si possono avere misure dirette sull'importanza del mixing radiale e di altri processi dinamici. Diversi processi di mixing radiale portano stelle metal-rich/-poor dalle regioni del disco ai dintorni solari. La distribuzione di metallicità delle stelle nei dintorni solari, dunque, può essere usata per definire limiti sul mixing radiale.

### 2.1.4 Processi di nucleosintesi

L'ampio e omogeneo campione stellare di GALAH può essere usato anche per distinguere i diversi processi di nucleosintesi che stanno dietro all'evoluzione chimica della Galassia. Per esempio, nei dintorni solari, esiste un'evidente dicotomia tra due sequenze nella relazione  $[\alpha/\text{Fe}]-[\text{Fe}/\text{H}]$ : una sequenza high- $[\alpha/\text{Fe}]$  e una low- $[\alpha/\text{Fe}]$ , a cui si fa riferimento come disco spesso e sottile. L'origine di queste due sequenze si è dimostrata estremamente difficile da spiegare e ha portato a complessi modelli di evoluzione chimica. Con i dati a disposizione attuali, ci sono solo alcune stelle di 8-9 Gyr, non sufficienti però per determinare l'origine delle due differenti popolazioni.

## 2.2 Workflow

Come vengono stimate le abbondanze degli elementi stellari a partire dalla luce stellare osservata? In questo paragrafo verrà visto nel dettaglio il lavoro svolto da GALAH che ha permesso di ottenere abbondanze chimiche e spettri degli oggetti osservati. L'obiettivo della survey di GALAH è l'osservazione di un milione di stelle. La MW contiene fino a 100 miliardi di stelle, per cui bisogna considerare diversi fattori per le osservazioni e stabilire che tipo di stelle possono essere le candidate migliori. I fattori di cui bisogna tenere conto sono:

- Quanta luce può essere catturata dal telescopio — nel caso delle osservazioni GALAH viene utilizzato il Telescopio Anglo-Australiano del diametro di 3.9 metri;
- Qual è qualità dei dati necessaria per misurare le abbondanze degli elementi stellari? Questo dipende da diversi dettagli tecnici;
- Quali sono i tipi di stelle di interesse maggiore e come possiamo fare la migliore selezione possibile prima di ricavare gli spettri?

Sulla base di queste domande, il team di GALAH ha deciso di selezionare stelle con una magnitudine  $9 < V_{JK} < 14$ . Le magnitudini sono quantità logaritmiche che indicano quanto sono brillanti gli oggetti stellari. Ad esempio, il Sole ha una magnitudine pari a  $-26.74$ , la luna di  $-12.90$ , la stella più luminosa Sirio ha un valore di magnitudine pari a  $-1.47$ , Vega ha  $0$ , la Galassia di Andromeda di  $+3.44$  e la seconda stella più vicino a noi Proxima Centauri ha una magnitudine di  $+11.05$ . Maggiori dettagli su come vengono selezionate le stelle della survey GALAH verranno descritti nei paragrafi 2.2.2 e 2.2.3.

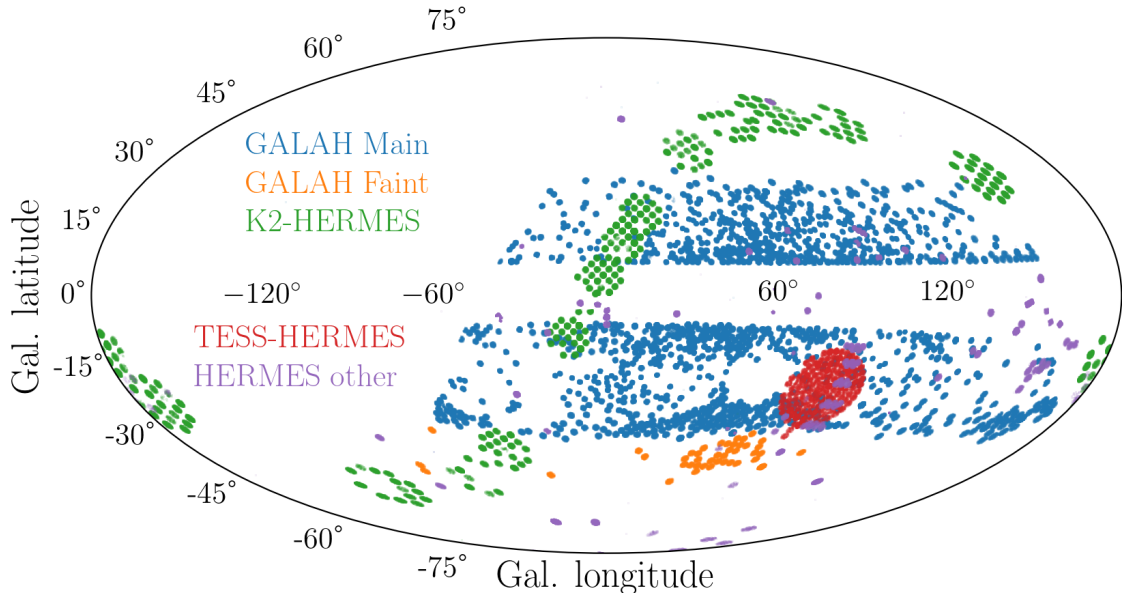


Figura 2.3: Questa immagine mostra la copertura spaziale delle stelle osservate con HERMES. Image credit: Buder et al. (2021).

## 2.2.1 Facilities

La survey GALAH usa principalmente il posizionatore di fibre 2dF (Two-degree Field) con lo spettrografo HERMES al Telescopio Anglo-Australiano. Il telescopio è caratterizzato da uno specchio di 3.9 metri di diametro ed è situato all'osservatorio Siding Spring nel Nuovo Galles del Sud in Australia.



Figura 2.4: Posizionatore di fibre 2dF installato sopra il Telescopio Anglo-Australiano.

GALAH rappresenta il primo precursore scientifico di HERMES (Sheinis et al. 2015), spettrometro multi-object ad alta risoluzione ( $R \sim 28.000$  in modalità standard o  $50.000$  in modalità alta risoluzione). HERMES ha bande spettrali che coprono approssimativamente una regione spettrale di circa  $100\text{nm}$  nell'intervallo di lunghezza d'onda compreso tra  $470$  e  $790\text{ nm}$ . Queste bande sono state selezionate per permettere la misura delle abbondanze di più elementi possibili prodotti dai processi di nucleosintesi. HERMES utilizza un posizionatore di fibre 2dF (Lewis et al. 2002). 2dF ha due *field plates*, ognuno dei quali ha  $392$  fibre e  $8$  fasci guida che possono essere distribuiti su un campo circolare con un diametro di due gradi. Uno dei plates può essere impostato dal posizionatore di fibre mentre l'altro viene utilizzato per l'osservazione. Le fibre coprono  $2.1$  secondi d'arco di cielo, con una precisione di posizionamento di  $0.3$  secondi d'arco e hanno una separazione minima di circa  $30$  secondi d'arco. HERMES utilizza uno specchio collimatore fuori asse, una serie di elementi dicroici e reticoli olografici per catturare le regioni di lunghezza d'onda in quattro CCD con otturatori indipendenti mostrate in Tabella 2.1.

Tabella 2.1: Lunghezze d’onda che vengono raccolte da HERMES.

Band	$\lambda_{min}(nm)$	$\lambda_{max}(nm)$
Blue	471.8	490.3
Green	564.9	587.3
Red	648.1	673.9
IR	759.0	789.0

## 2.2.2 Selezione dei target

La strumentazione descritta nel paragrafo precedente usata dalla survey GALAH introduce dei requisiti sulla strategia osservativa e sulla selezione dei target: con il posizionatore di fibre 2dF è possibile osservare circa 350 stelle per campo, il tempo di esposizione deve essere di un’ora per campo poiché questo è il tempo che impiega il robot 2dF per la riconfigurazione.

La selezione dei target nella survey GALAH può essere divisa in due fasi: la fase 1, in cui la survey si limita alle magnitudini e la fase 2, focalizzata sulle stelle al turn-off di main sequence per la stima dell’età.

### Fase 1 (fino al 2020)

Il catalogo di GALAH iniziale venne costruito combinando il catalogo 2MASS della fotometria nell’infrarosso con il catalogo dei moti propri UCAC4. Vennero incluse solo le stelle con dati 2MASS affidabili e rigettate stelle che presentavano un oggetto vicino sufficientemente luminoso, ovvero con un raggio di scarto dipendente dalla magnitudine  $V$  della stella luminosa, in modo tale che il possibile target considerato venga scartato se la stella luminosa è ad una distanza minore di  $(130 - [10 \times V])$  arcosecondi. I quattro principali progetti del catalogo GALAH DR3 sono GALAH-main, GALAH-faint, K2-HERMES, and TESS-HERMES. All’interno del catalogo di GALAH, la colonna relativa alle survey contiene le informazioni su quale survey ha osservato una determinata stella e sulla corrispondente funzione di selezione.

- Main GALAH survey: i potenziali target sono tutte le stelle con  $12 < V < 14$  nella regione di cielo in cui ci sono almeno 400 stelle nel campo di vista;
- GALAH-faint survey: questa survey aveva l’obiettivo di espandere le osservazioni a regioni di bassa densità stellare. Data la più bassa densità di stelle, la selezione era stata shiftata a  $12 < V < 14.3$  in modo da mantenere almeno 400 stelle nel campo di vista;
- K2-HERMES: Sia target luminosi ( $10 < V < 13$ ) che deboli ( $13 < V < 15$ ) hanno simili caratteristiche tra loro;
- TESS-HERMES: Stelle nel range  $10 < V < 13.1$ .

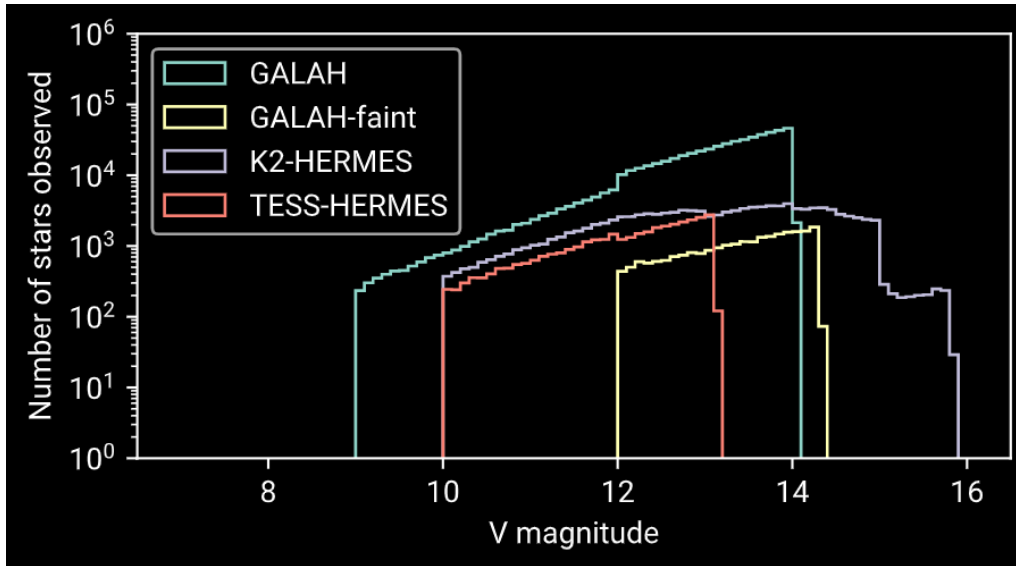


Figura 2.5: In figura si osserva la distribuzione delle magnitudini in funzione delle stelle osservate dalla survey GALAH insieme ai vari limiti di magnitudine da ciascuna delle survey viste.

## Fase 2 (dal 2020 ad oggi)

Nella fase 1, si è principalmente osservata una survey di magnitudine limitata con una funzione di selezione facilmente riproducibile e un'ampia applicabilità scientifica. Le informazioni sulla parallasse da parte di Gaia consentono di stimare l'età di stelle nane evolute, come ad esempio stelle al turn-off della sequenza principale e subgiganti (MSTO), con una precisione di circa il 10%. Le età sono un'importante aggiunta ai parametri stellari, oltre alle abbondanze e velocità radiali, e aggiungono una nuova dimensione a molti dei principali obiettivi scientifici. Nella Fase 2, le osservazioni saranno concentrate sulle stelle per le quali è possibile stimare l'età precisa. Ci sono tre importanti modifiche alla selezione dei target e alla strategia di osservazione nella Fase 2 di GALAH:

- Limiti su magnitudine assoluta: si selezionano ancora le stelle nell'intervallo di magnitudine apparente  $12 < V < 14$  ma, per concentrarsi sulle stelle MSTO per le quali si possono stimare le età in modo affidabile, viene data la priorità alle stelle con  $2 < M_G < 4$ , che costituiscono il 37% di tutte le stelle nell'intervallo  $12 < V < 14$ . Per completezza statistica e per supportare altri progetti scientifici che non richiedono età, viene assegnato il 10% delle fibre a stelle al di fuori dell'intervallo  $2 < M_G < 4$ . Per campi in cui si hanno meno di 350 stelle in questo intervallo di magnitudine assoluta, le fibre rimanenti vengono riempite seguendo la selezione basata sulla magnitudine apparente della Fase 1.
- Limiti latitudine galattica: in assenza di Gaia DR2 nella Fase 1, sono state selezionate stelle con latitudine galattica  $|b| > 10^\circ$ , per evitare linee di vista affollate con estinzione alta e incerta. La selezione ad alta latitudine ha restituito un set di dati con una frazione significativa di vecchie stelle, che copre un'ampia regione della Galassia. Questa selezione limita la capacità di studia-

re l'evoluzione chimica-dinamica e gli attuali trend radiali e verticali vicino al piano galattico. Nella Fase 2, con la disponibilità di Gaia DR2, le osservazioni a  $0^\circ < |b| < 10^\circ$  riempiono questa lacuna nel set di dati e le osservazioni a  $10^\circ < |b| < 30^\circ$  aumentano la copertura radiale. Questo permette un'espansione delle capacità scientifiche, permettendo di esplorare la struttura radiale del disco sottile e la sua interfaccia con il disco spesso. Ci sono circa 2.35 milioni di stelle MSTO con  $12 < V < 14$  e  $|b| < 30^\circ$ , e GALAH ne ha osservate 264.000 tra il 2020 e il 2022.

- Tempo di esposizione: nella Fase 1, sono state osservate stelle nell'intervallo  $12 < V < 14$  con un tempo di esposizione di 1 ora. Nella Fase 2 si osservano le stelle in  $12 < V < 13$  per 1 ora e le stelle in  $13 < V < 14$  per 2 ore. In questo modo, aumenterà il tempo medio di esposizione da 1 ora a 1.5 ore e aumenterà significativamente la precisione complessiva dei parametri e delle abbondanze stellari. È necessario un SNR di 72 per separare il disco sottile e spesso. Attualmente, solo il 42% delle stelle ha un SNR  $> 72$ . Con questo aumento del tempo di esposizione, il 65% delle stelle avrà un SNR  $> 72$ . Nella pagina successiva in Figura 2.6 verranno mostrate le distribuzioni del SNR per ciascun CCD del telescopio.

### 2.2.3 Osservazioni

Al telescopio viene selezionato un campo da osservare da un elenco di possibili campi identificati dal software *obsmanager* di GALAH. Questo identifica i campi che saranno a circa 45 minuti dal transito nel punto più alto del cielo al momento pianificato dell'osservazione. Le coordinate e i movimenti propri dei target in ciascuna configurazione vengono immessi nel software *configure* del Telescopio Anglo-Australiano, insieme a un set di 20 stelle candidate per la guida e 50 possibili posizioni nel cielo. Le stelle usate come guida sono prese dal catalogo dei target GALAH nello stesso campo visivo, con magnitudini nell'intervallo  $11 < V < 12$ . Il software *configure* trova una disposizione ottimale per i target scientifici, per le posizioni nel cielo e le 20 stelle di guida usando un algoritmo che genera un file che viene passato al posizionatore di fibre per impostare il campo.

La procedura di osservazione standard per i normali campi della survey GALAH prevede tre esposizioni di uguale durata (3 di 1200s nella Fase 1 di GALAH; 3 di 1800s nella Fase 2 di GALAH), che viene estesa a quattro esposizioni se il seeing è compreso tra 2 e 2.5 secondi d'arco, e fino a sei esposizioni se il seeing è compreso tra 2.5 e 3 secondi d'arco.

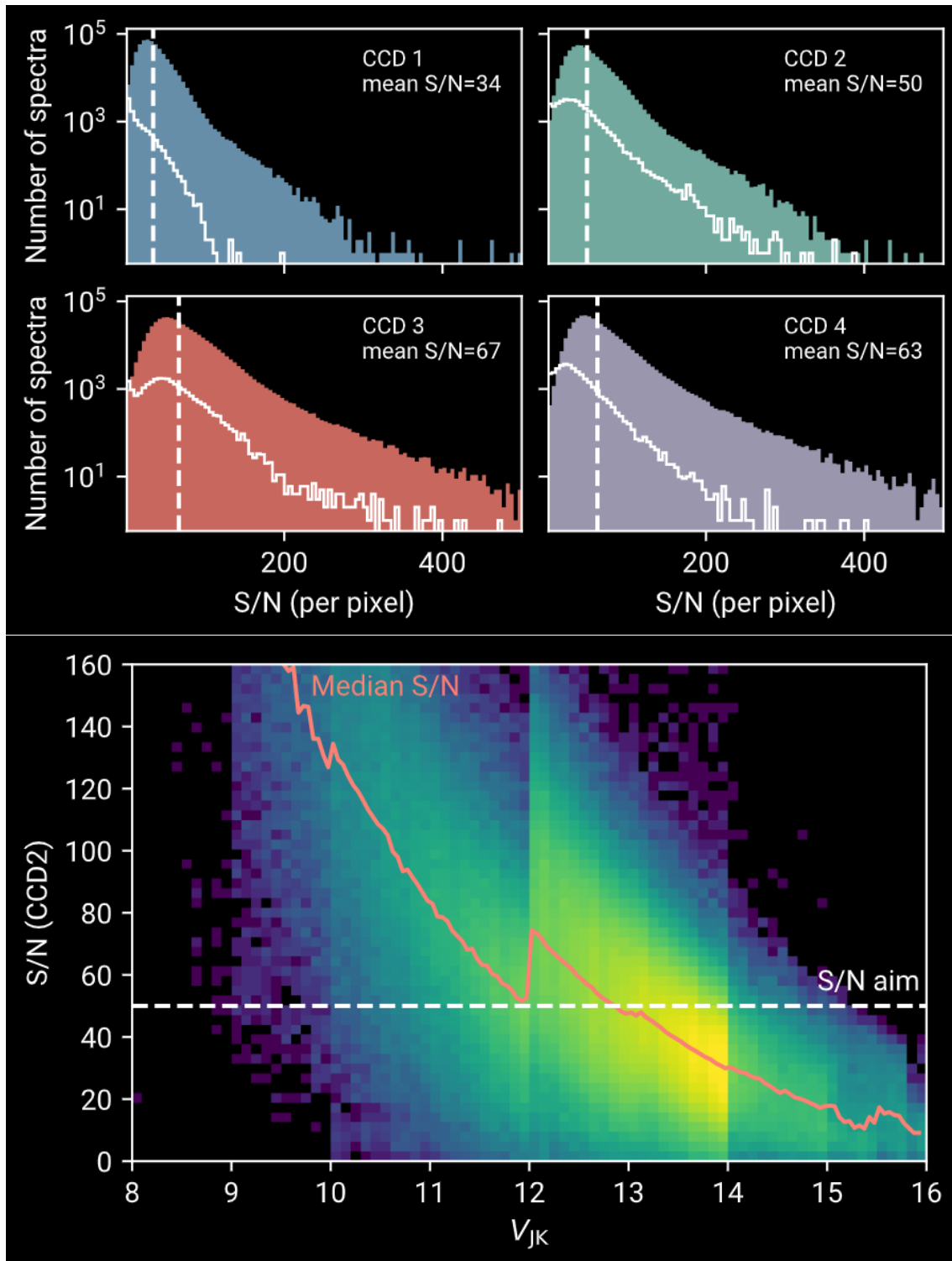


Figura 2.6: In alto, la distribuzione del rapporto segnale-rumore per ogni CCD. Per ciascun CCD, l'istogramma colorato è per riduzioni non flaggate, mentre l'istogramma bianco per riduzioni flaggate. In basso, la distribuzione del S/N medio per pixel per la banda verde (CCD 2) in funzione di  $V_{JK}$ . La linea tratteggiata bianca è S/N=50 scelto, la curva rossa è il S/N medio in funzione della magnitudine.

## 2.2.4 Riduzione dati

Di seguito vengono elencati i passaggi principali per la riduzione dati dello spettrografo multi-oggetto:

- Le immagini grezze vengono corrette per il livello di bias e flat field, i raggi cosmici vengono rimossi con l'algoritmo *LaCosmic* modificato (van Dokkum 2001). I segnali di luce diffusa vengono rimossi.
- Le soluzioni delle lunghezze d'onda per gli spettri estratti vengono trovati tramite il fit di osservazioni di lampade.
- Gli spettri del cielo sono modellati dalle 25 fibre del cielo incluse in ogni campo e sottratte.
- La riduzione continua attraverso la cross-correlation con gli spettri AMBRE (De Laverny et al. 2012) per fornire una prima stima dei parametri stellari ( $T_{eff}$ ,  $\log g$ ,  $[Fe/H]$  e velocità radiale) e per normalizzare gli spettri.

Vengono sempre svolti dei miglioramenti per quanto riguarda la riduzione dati. Tra GALAH DR2 e GALAH DR3 sono stati apportati importanti miglioramenti alla riduzione dei dati, il miglioramento principale è la soluzione della lunghezza d'onda, che ora è più stabile ai bordi dei CCD verdi e rossi. Questo è stato ottenuto monitorando la soluzione e fissando il polinomio che descrive la trasformazione da pixel a lunghezza d'onda, nel caso in cui vengano rilevate deviazioni da una soluzione tipica o media.

## 2.2.5 Analisi dati

I principali dati che vengono prodotti dalla survey GALAH sono i parametri stellari e le abbondanze degli elementi per le stelle che vengono osservate. Nel tempo, i metodi usati per ottenere questi dati sono cambiati e si sono evoluti. In particolare, è stato utilizzato il programma *The Cannon* per Data Release 1 e Data Release 2, per poi passare al programma Spectroscopy Made Easy per Data Release 3.

Innanzitutto, vengono stimati i parametri stellari e mantenuti fissi fittando solo un'abbondanza alla volta per le diverse righe nell'intervallo di lunghezze d'onda GALAH. Per la stima dei parametri stellari, viene eseguita una prima normalizzazione e un primo adattamento approssimativo dei parametri stellari con un'iterazione, seguiti da una normalizzazione finale e un adattamento dei parametri più fine con più iterazioni. Per l'analisi dell'abbondanza, si esegue solo una normalizzazione e si ottimizza iterativamente l'abbondanza sulla base dei dati delle righe/elementi che si stimano essere sufficientemente unblended dopo aver confrontato uno spettro di sintesi con tutte le linee e un altro con solo le righe dell'elemento di interesse.

Anche in questo caso, ci sono delle differenze tra i metodi di analisi per DR3 rispetto a DR2. Per prima cosa, si usano le informazioni astrometriche di Gaia DR2 per spezzare le degenerazioni spettroscopiche. Inoltre, GALAH DR3 utilizza il programma Spectroscopy Made Easy (SME) per tutti i parametri stellari e la determinazione delle abbondanze degli elementi. Per GALAH DR2 sono stati utilizzati approcci per migliorare sia la velocità che la precisione dell'analisi spettroscopica. Sebbene questi approcci abbiano avuto successo per la maggior parte delle stelle di GALAH

DR2, si sa che possono apprendere correlazioni non fisiche tra i dati di input e i parametri stellari di output, in questo modo si è scoperto che alcune stelle in DR2 caratterizzate da parametri limiti, come l'alta temperatura o la bassa metallicità, non hanno ricevuto misure ottimali dal processo.

Di seguito è riportato un confronto tra GALAH DR2 (pannelli superiori) e GALAH DR3 (pannelli inferiori). Lo sfondo azzurro chiaro rappresenta tutte le misure, mentre la mappa dei colori mostra il numero di misure non contrassegnate in ciascun punto. I parametri e le abbondanze stellari di GALAH DR2 sembrano più vincolati, ma è noto essere una conseguenza dell'approccio citato precedentemente, che tende a trovare soluzioni più vicine ai modelli di parametri/abbondanze medi.

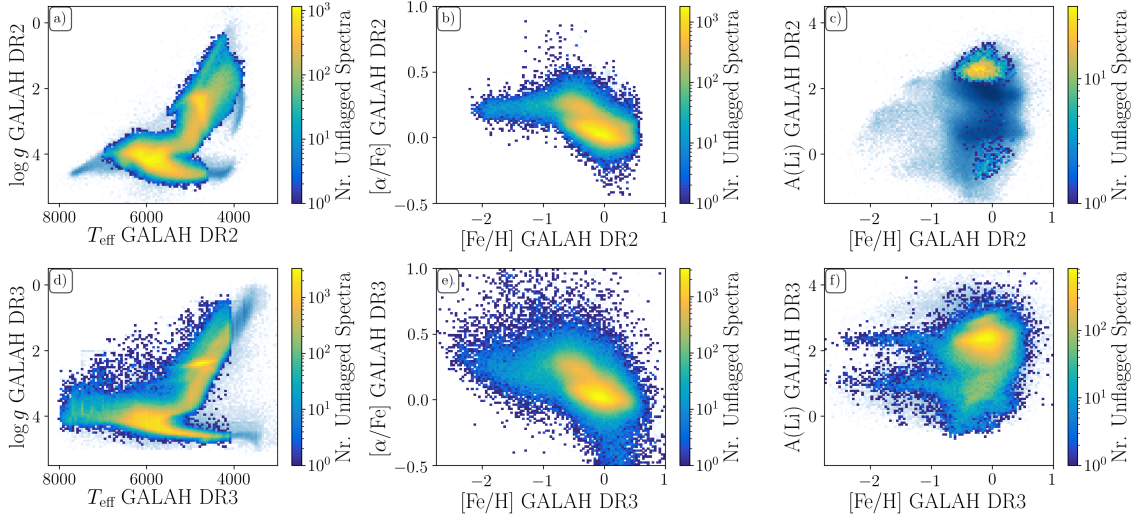


Figura 2.7: Confronto tra GALAH DR2 (pannelli superiori) e GALAH DR3 (pannelli inferiori). Pannelli di sinistra: diagramma di Kiel, cioè  $T_{eff} - \log g$ , per le stelle di DR2 (a) e DR3 (d). Pannelli centrali: diagrammi di Tinsley-Wallerstein che mostrano  $[\alpha/Fe]$  in funzione di  $[Fe/H]$ , per DR2 (b) e DR3 (e). Pannelli di destra: abbondanza assoluta di Li in funzione dell'abbondanza di ferro  $[Fe/H]$ , per DR2 (c) e DR3 (f). In questi pannelli vengono incluse tutte le stelle DR2 e DR3, non solo le stelle comuni a entrambe per evidenziare l'aumento delle osservazioni, l'accuratezza dei parametri stellari e la copertura delle abbondanze, ma anche il miglioramento della precisione degli spettri.

# Capitolo 3

## GALAH DR3

La terza pubblicazione dei dati della survey GALAH (GALAH DR3) risale al 6 Novembre 2020. GALAH DR3 contiene parametri stellari (temperatura effettiva, gravità superficiale, abbondanza del ferro, velocità di rotazione) e abbondanze degli elementi chimici ricavati da 678.423 spettri per 588.571 stelle che sono state osservate con lo spettrografo HERMES situato al Telescopio Anglo-Australiano tra Novembre 2013 e Febbraio 2019. DR3 è la prima pubblicazione dati di GALAH che include spettri unidimensionali già ridotti per le stelle. Esistono due principali cataloghi che contengono parametri stellari e abbondanze chimiche di 30 elementi per stella: Li, C, O, Na, Mg, Al, Si, K, Ca, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Rb, Sr, Y, Zr, Mo, Ru, Ba, La, Ce, Nd, Sm, e Eu.

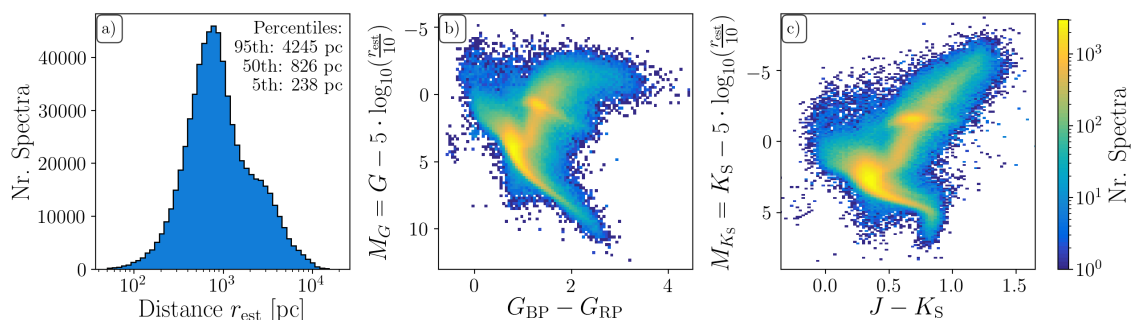


Figura 3.1: Quadro generale delle distanze e informazioni fotometriche corrispondenti agli spettri osservati che fanno parte di GALAH DR3. Il primo grafico (a) partendo da sinistra mostra le distanze delle stelle. A causa della selezione limitata in termini di magnitudine delle stelle, la maggior parte delle stelle non solo sono stelle nane ma sono anche vicine tra di loro, cioè entro 1kpc. Solo il 5.8% delle stelle si trovano oltre 4kpc. Il grafico (b) mostra il diagramma colore-magnitudine assoluta nelle bande passanti nella regione dell'ottico del sistema fotometrico di Gaia. Il grafico (c) mostra un diagramma analogo nelle bande passanti nella regione dell'infrarosso del sistema fotometrico di 2MASS.

I dati di GALAH DR3 fanno riferimento ad un contenuto stellare costituito al 65% da stelle nane e 34% stelle giganti, il rimanente 1% sono stelle non classificate. Sulla base delle stelle con una composizione chimica ed età affidabile, sono state trovate 62.5% di stelle giovani ( $< 8$  Gyr) low- $\alpha$  ( $[\alpha/Fe] \leq 0.2$ ) sull'intero campione, 8.8% di stelle giovani high- $\alpha$  ( $[\alpha/Fe] > 0.2$ ), 26.9% stelle vecchie ( $> 8$  Gyr) e 1.8% stelle con  $[Fe/H] < -1$ . Sulla base della loro cinematica, il 4% sono stelle di alone.

GALAH DR3 presenta dati raccolti da diversi programmi raggruppati in un unico catalogo. In particolare, include osservazioni da: GALAH Phase 1 (476.863 spettri), K2-HERMES (112.943 spettri), TESS-HERMES (34.263 spettri), e una serie di progetti relativi a GALAH che includono osservazioni del bulge e più di 75 ammassi stellari (54.354 spettri). A differenza di GALAH DR2, è stata migliorata l'analisi spettrale con informazioni fotometriche prese da Gaia DR2 e 2MASS per una stima più accurata delle gravità superficiali stellari. Inoltre, è stato utilizzato il programma Spectroscopy Made Easy (SME) per derivare i parametri stellari e misurare le abbondanze.

## 3.1 Risultati

La survey GALAH ha lavorato per più di un decennio per cercare di rivelare la ricca storia della nostra Galassia studiandone la posizione, i moti, età e la chimica delle stelle formatesi in diversi momenti e posizioni. Questo ha permesso di usare la survey e fare diverse scoperte, di seguito verranno esposte le più importanti.

### 3.1.1 Dissezione del disco stellare

Alcuni importanti studi includono la dissezione dettagliata del disco stellare in termini di età, velocità, e posizione con la chimica di GALAH (Quillen et al., 2018 e Buder et al., 2019). GALAH ha eseguito la prima analisi dettagliata delle abbondanze degli elementi della scoperta di Gaia della perturbazione della "spirale di fase" nel disco locale. Questo è un modello a spirale visto nello spazio delle fasi a causa dell'interazione di Sgr con la Galassia (Bland-Hawthorn et al. 2019).

GALAH ha trovato evidenze di diversi trend di abbondanze chimiche tra il disco sottile e spesso, anche per quanto riguarda la metallicità e l'età. Ad esempio, il disco sottile (popolazione low- $\alpha$ ) mostra un gradiente di metallicità verticale negativo  $d[M/H]/dz = -0.18 \pm 0.01 \text{ dex kpc}^{-1}$ . Il disco spesso (popolazione high- $\alpha$ ) è caratterizzato da un gradiente di metallicità verticale più debole  $d[M/H]/dz = -0.058 \pm 0.003 \text{ dex kpc}^{-1}$  (Duong et al. 2018).

In Hayden et al. (2020), è stato dimostrato che circa il 40% delle stelle nelle vicinanze solari ha una metallicità maggiore rispetto al mezzo interstellare (ISM) circostante e che la migrazione radiale è un importante processo nell'evoluzione delle Galassie a disco. Sharma et al. (2020a,b), hanno invece dedotto le relazioni fondamentali che governano le velocità di dispersione delle stelle in termini di età, momento angolare e metallicità. Bennett & Bovy (2019) hanno usato le velocità radiali di GALAH per misurare le oscillazioni di densità nel disco Galattico e le velocità delle stelle nei dintorni solari. Belokurov et al. (2020) hanno invece usato i dati di GALAH per mappare le proprietà delle componenti Galattiche principali, come il disco sottile, disco spesso e alone.

### 3.1.2 Alone accresciuto

La missione Gaia ha permesso di scoprire che una grande parte delle stelle nei dintorni solari sono detriti provenienti da uno o più eventi di accrescimento. Le velocità radiali e le abbondanze derivate da GALAH sono state di fondamentale importanza

nell'aiutare a comprendere la complicata struttura cinematica dell'alone. Per esempio, le misure di GALAH delle abbondanze degli elementi formati tramite i processi r mostrano che le stelle accresciute dalla Galassia nana Gaia-Enceladus hanno un rapporto  $[\text{Eu}/\text{Mg}]$  più alto rispetto alle stelle in situ (Matsuno et al. 2021).

In Buder et al. (2021) viene messa in evidenza l'esistenza di stelle di alone accresciute sulla base non solo delle differenze dinamiche ma anche chimiche. Viene inizialmente mostrato un plot  $[\alpha/\text{Fe}]$  in funzione di  $[\text{Fe}/\text{H}]$  colorato in base alle proprietà dinamiche (Figura 3.2). Qui si può vedere che le stelle del disco low- $\alpha$  sono tipicamente su orbite circolari con eccentricità ben al di sotto di 0.5, mentre stelle di disco high- $\alpha$  mostrano eccentricità maggiori con un valore medio attorno a 0.5. La particolarità di questa analisi sta nelle stelle con un basso  $[\text{Fe}/\text{H}]$ , che mostrano esclusivamente eccentricità al di sopra di 0.5, ovvero si nota che stelle con  $[\text{Fe}/\text{H}] < -1.0$  si muovono su orbite con eccentricità tipiche pari a  $e = 0.70^{+0.23}_{-0.39}$ . Questo risultato rappresenta l'evidenza che queste stelle, con una composizione chimica differente da quella del disco stellare/bulge e orbite molto diverse rispetto al disco, sono accresciute (Belokurov et al. 2018, Mackereth et al. 2019).

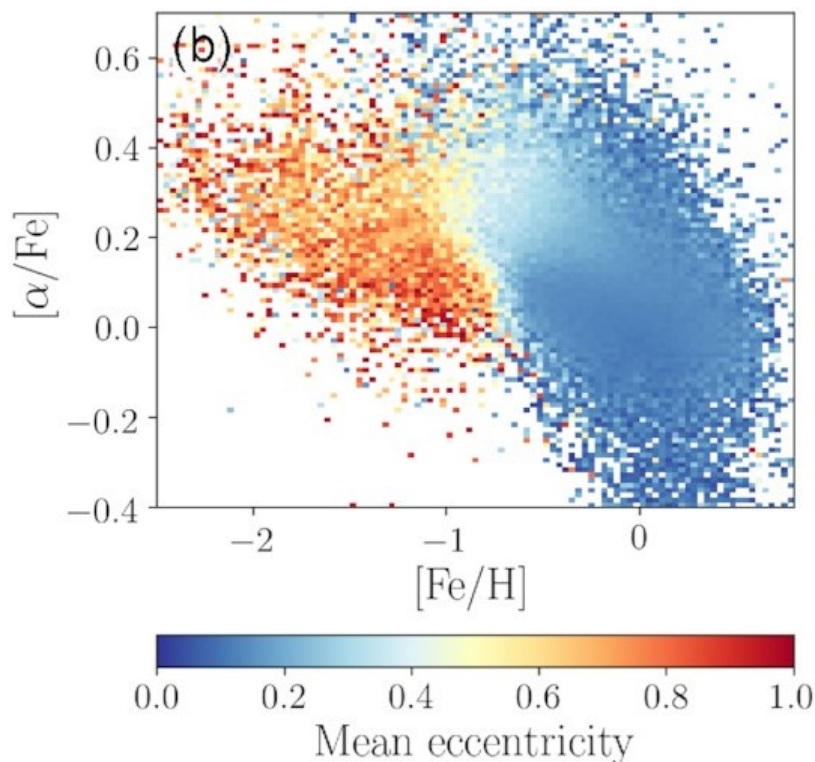


Figura 3.2: Il grafico mostra il diagramma Tinsley–Wallerstein,  $[\alpha/\text{Fe}]$  in funzione di  $[\text{Fe}/\text{H}]$  colorato in base all'eccentricità media per bin (Mackereth et al. 2019). Nella parte destra del plot sono raffigurate stelle di disco sia low- $\alpha$  che high- $\alpha$  con valori di eccentricità  $\leq 0.5$ . Nella parte sinistra invece, si possono osservare stelle di alone ( $[\text{Fe}/\text{H}] < -1.0$ ) accresciute con valori di eccentricità al di sopra di 0.5.

Il fatto che queste stelle non siano differenti solo per la loro dinamica, ma anche per la loro chimica può essere visto in Figura 3.3. Quando vengono valutati diversi canali di nucleosintesi attraverso elementi differenti, che sia Al o Na,  $\alpha$  come Mg, e Cu o Mn, le stelle di alone accresciute si possono notare come una distinta sovra-

densità a causa della loro diversa storia di arricchimento chimico a confronto della gran parte delle stelle di disco della MW.

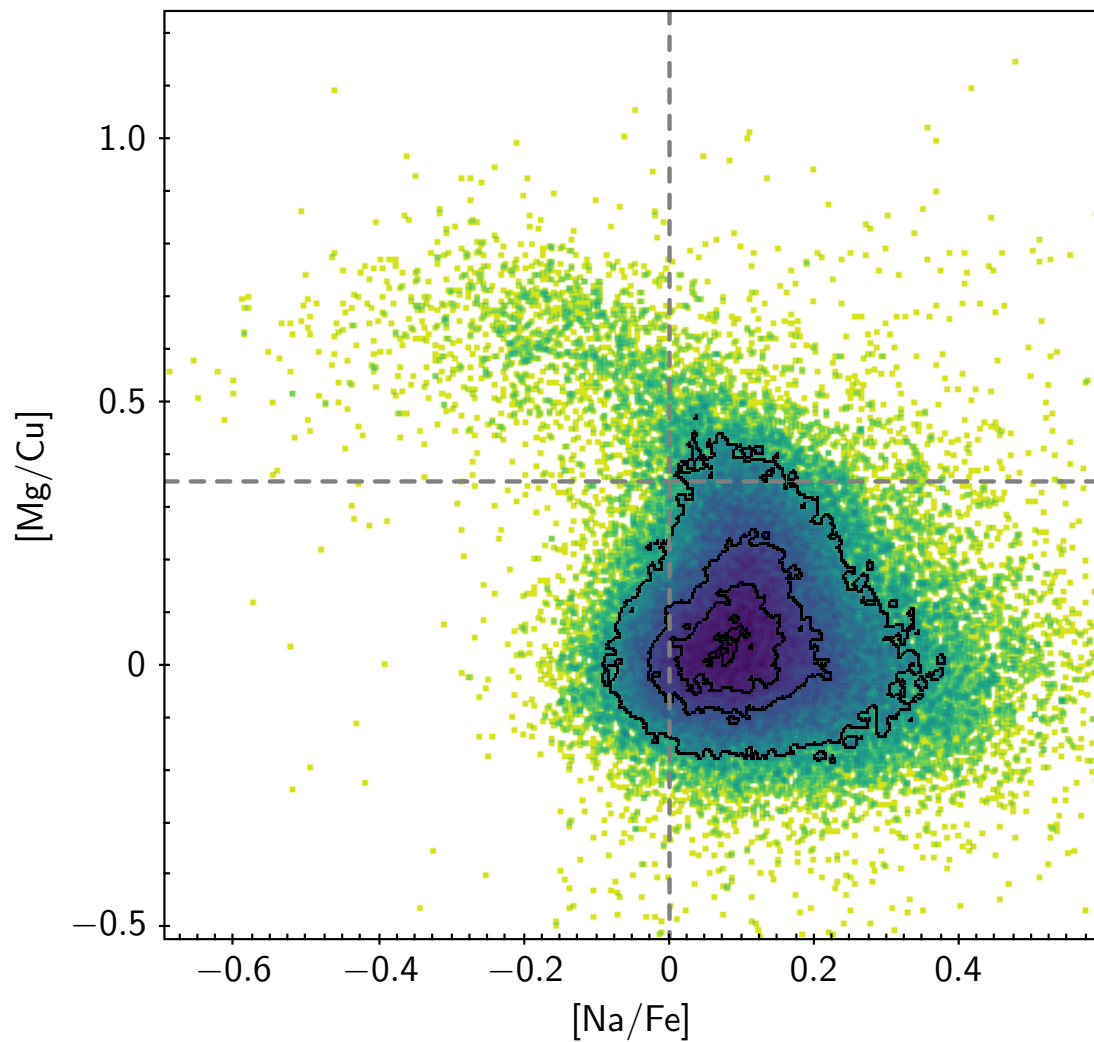


Figura 3.3: Nel grafico vengono mostrati gli elementi Na, Fe, Mg, e Cu tracciare diversi gruppi di nucleosintesi con la maggior parte delle stelle di GALAH attorno a  $(0,0)$ , dove il più delle stelle di disco è localizzata. Inoltre, si può notare una distinta sovradensità di stelle di alone accresciute nella quadrante sinistro in alto. Questa è una riproduzione della Figura 27 in Buder et al. (2021).

### 3.1.3 Litio

La capacità di misurare l'abbondanza di litio delle stelle è uno degli aspetti più importanti della survey GALAH. DR3 contiene abbondanze di litio affidabili per oltre 100.000 stelle in tutto lo spazio dei parametri. Molti ricercatori hanno usato GALAH per indagare problemi relativi al litio da lungo discussi: stelle nane con troppa poca abbondanza di litio e stelle giganti con troppo litio.

Il Plateau Spite è l'osservazione del fatto che stelle nane metal-poor d'alone hanno tutte la stessa abbondanza di litio indipendentemente dalla loro metallicità. Inizialmente si pensava rappresentasse l'abbondanza di litio primordiale tuttavia, i modelli del BBN predicono ora un'abbondanza primordiale di litio da 3 a 4 volte maggiore rispetto al valore del Plateau Spite. Questa discrepanza è conosciuta come il problema cosmologico del litio. Il team di GALAH (Gao et al. 2020) ha trovato che stelle più calde mostrano un'abbondanza di litio consistente con il valore primordiale. In particolare, dai dati GALAH hanno considerato stelle con una temperatura  $5900K \leq T_{eff} \leq 7000K$  e metallicità  $-3 \leq [Fe/H] \leq +0.5$ . Questo gruppo di stelle è stato separato in due sottogruppi: stelle calde e stelle fredde. A basse metallicità, le stelle fredde si dispongono sul Plateau Spite mostrando un'abbondanza di litio ridotta di 0.4 rispetto al valore primordiale dal BBN. D'altra parte, le stelle calde con metallicità  $[Fe/H]$  compresa tra  $-1.0$  e  $-0.5$  forma un plateau rialzato consistente con le predizione del modello BBN, dimostrazione del fatto che questo gruppo di stelle potrebbe aver di fatto conservato l'abbondanza di Li primordiale prodotta negli stadi iniziali dell'Universo.

Simpson et al. (2021) e Molaro (2020) hanno studiato le abbondanze di litio nel caso di stelle nane accresciute, trovando che mostravano lo stesso Plateau Spite delle stelle in situ. Questo dimostra dunque che il problema cosmologico del litio non è il risultato di un qualche effetto dovuto all'ambiente di formazione galattica.

## Capitolo 4

# Trend delle abbondanze col ferro nei dati GALAH

In questo elaborato verrà utilizzato e analizzato solo uno dei due cataloghi messi a disposizione da GALAH: *GALAH\_DR3\_main\_allstar\_v2*. Esso rappresenta il catalogo principale contenente i risultati di 588.571 stelle osservate da GALAH, K2-HERMES, TESS-HERMES ed altre survey che hanno usato lo spettrografo Hermes del Telescopio Anglo-Australiano tra Novembre 2013 e Febbraio 2019. Per tutte le stelle sono stati messi a disposizione parametri stellari, velocità radiali ed abbondanze chimiche.

L'obiettivo di questa tesi è quello di analizzare gli andamenti dei rapporti degli elementi chimici con il ferro in funzione di  $[\text{Fe}/\text{H}]$ . In particolare, ci si concentrerà sullo studio degli elementi del picco del ferro con il fine ultimo di individuare possibili stelle con abbondanze chimiche anomale rispetto all'andamento comune dell'insieme e dunque, poter identificare possibili stelle accresciute. Se verranno ottenuti tali risultati, si potranno studiare i dati cinematici delle stelle selezionate e confermare, attraverso moto retrogrado, se effettivamente si tratta di oggetti provenienti da Galassie esterne accresciute dalla Via Lattea.

Nella prima parte dell'elaborato si selezionano stelle del catalogo secondo alcuni criteri che andremo a discutere in seguito, in modo tale da andare ad eliminare stelle con misure incerte o che mostrano andamenti sistematici di gruppo anomali. In seguito alla selezione, il gruppo di stelle verrà suddiviso in due macro-gruppi di stelle in diversa fase evolutiva: stelle giganti e stelle nane. Il passo successivo consiste nel plottare i rapporti di abbondanza, verranno studiati principalmente elementi  $\alpha$  ed elemento del picco del ferro. Per ognuno di questi elementi verranno inoltre studiati anche i trend con la temperatura, in modo da poter evidenziare possibili bias nella procedura di analisi delle abbondanze. Sulla base di queste analisi, verrà effettuata una nuova selezione relativa agli errori. Infine, verrà effettuata nuovamente l'analisi sulle abbondanze degli elementi per trarre le ultime conclusioni.

## 4.1 Criteri di selezione adottati nello studio delle abbondanze

Partendo dall'intero campione di stelle del catalogo di GALAH DR3, viene eseguita la selezione mostrata in Figura 4.1.

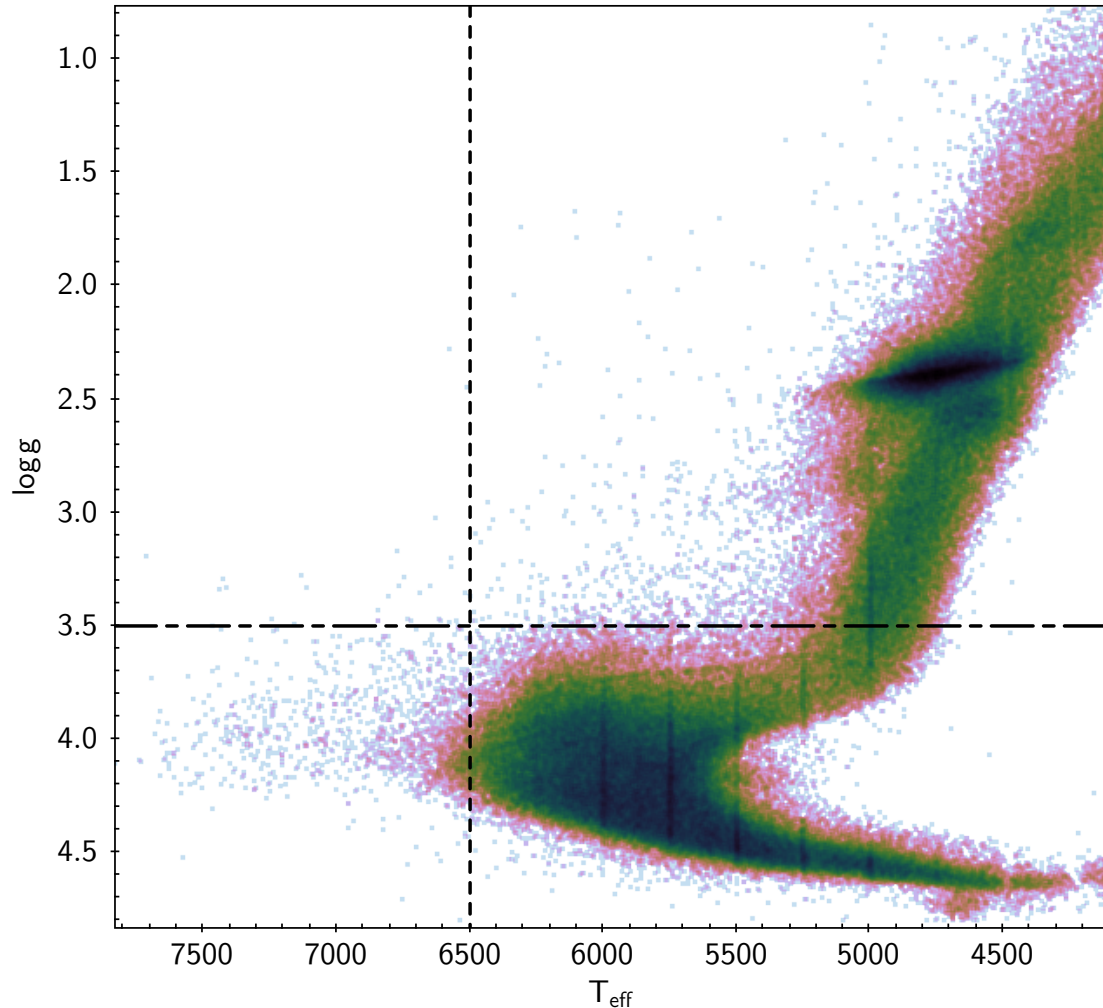


Figura 4.1: Diagramma HR dell'intero campione di stelle della survey GALAH. La linea tratteggiata indica il taglio in gravità utilizzato per separare tra stelle giganti ( $\log g < 3.5$ ) e nane ( $\log g > 3.5$ ). Stelle con temperatura effettiva  $T_{eff} > 6500K$  sono state escluse dal campione studiato.

Per prima cosa, le stelle vengono plottate in un diagramma Hertzsprung-Russell (HRD). In particolare, il campione totale viene suddiviso in due sottocampioni che tengono conto dello stadio evolutivo delle stelle considerando un taglio in gravità a  $\log g = 3.5$ . Stelle con gravità superficiale  $\log g < 3.5$  vengono qui classificate come stelle evolute (giganti) mentre stelle con  $\log g > 3.5$  sono classificate come nane. Inoltre, dal campione vengono eliminate tutte le stelle con temperatura effettiva superiore a 6500 K. Questo taglio viene fatto perché dall'analisi dei plot dei rapporti delle abbondanze degli elementi rispetto al ferro si osservava un gruppo di stelle con abbondanze molto basse, che si discostavano dall'andamento generale

del resto del campione. Selezionando questi gruppi si è osservato che si trattava di stelle a sinistra della main sequence (MS), cioè stelle con temperature al di sopra di  $T_{eff} = 6500K$  per le quali l’analisi spettroscopica automatica eseguita da GALAH risulta particolarmente problematica. Infatti, come discusso in Buder et al. (2019), le  $T_{eff}$  di stelle calde vengono sistematicamente sottostimate dalla pipeline GALAH a causa dell’utilizzo di atmosfere monodimensionali e sotto l’assunzione di equilibrio termodinamico locale a spettri di stelle le cui uniche feature spettrali per la stima dei parametri sono le righe di Balmer. Per questa ragione, nella discussione che segue, saranno considerate solo le stelle con  $T_{eff} < 6500K$ .

In aggiunta al taglio in temperatura effettiva, si sono utilizzati dei *quality flag* forniti dalla pipeline di GALAH come discusso in Buder et al. (2021), per selezionare solo stelle con stima dei parametri stellari (`flag_sp`) e misure di abbondanza di ferro (`flag_fe_h`) attendibili. Il `flag_sp` fa riferimento a diversi tipi di possibili sorgenti di errore nei valori di input dei parametri stellari (e.g., astrometria inaffidabile, segnale spettrale molto basso, problemi di riduzione, possibile binaria). Il `flag_fe_h` indica invece problemi relativi all’abbondanza di ferro misurata per le stelle del catalogo. Di default, GALAH raccomanda di usare e considerare solo parametri stellari ( $T_{eff}$ ,  $\log g$ ,  $[Fe/H]$ , velocità radiale) per stelle con `flag_sp = 0` e `flag_fe_h = 0`. Considerare e tenere nella trattazione valori di questi flag  $\neq 0$  corrisponde ad utilizzare dati e misure probabilmente inaffidabili e che porterebbero ad avere risultati non scientificamente corretti.

Per le informazioni relative alle abbondanze esistono flags simili. Per l’abbondanza generale degli elementi  $\alpha$  e le abbondanze di ciascun singolo elemento X si usa `flag_X_fe` per indicare problemi relativi alla determinazione di quella abbondanza chimica. Anche in questo caso GALAH si raccomanda di considerare per le stelle solo le abbondanze di un elemento X quando `flag_X_fe = 0`. Infine, viene consigliato di considerare solo stelle con un segnale-rumore (SNR) maggiore di 30 (`snr_c3_irc` > 30). Nell’analisi di questo elaborato verranno applicati tutti i flag suggeriti da GALAH, con la differenza che la selezione del campione di stelle verrà fatta considerando un SNR > 50.

In seguito alla selezione, basata sull’applicazione dei quality flag, la rimozione di stelle con  $T_{eff} > 6500K$  e la separazione tra stelle nane ( $\log g > 3.5$ ) e stelle giganti ( $\log g < 3.5$ ), vengono creati i plot delle abbondanze. In particolare, si possono osservare nelle pagine successive i plot dei rapporti di abbondanza degli elementi  $\alpha$  (Mg, Ca, Si, Ti) ed elementi iron-peak (Sc, V, Zn, Ni) rispetto al ferro. I grafici da Figura 4.2 a 4.10 mostrano gli andamenti dei rapporti di abbondanza degli elementi  $[X/Fe]$  in funzione della metallicità  $[Fe/H]$  per il campione di stelle giganti e nane, rispettivamente colorati con una scala di colori che fa riferimento alla densità dei punti e in cui è possibile osservare anche la presenza dei contorni per evidenziare il luogo medio dei punti stessi.

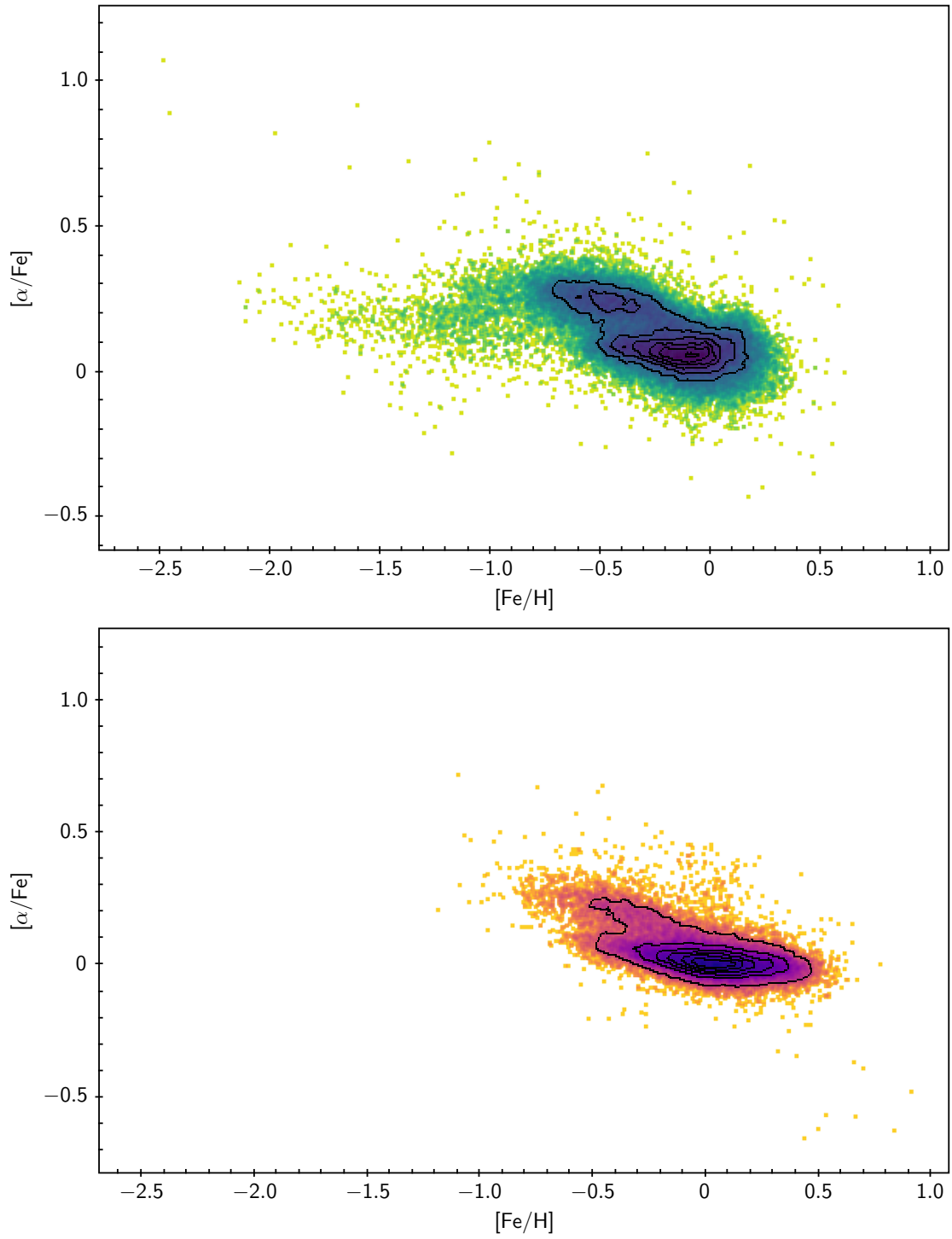


Figura 4.2: La figura mostra l'andamento degli elementi alfa  $[\alpha/\text{Fe}]$  in funzione della metallicità  $[\text{Fe}/\text{H}]$  per le stelle giganti (in alto) e nane (in basso).

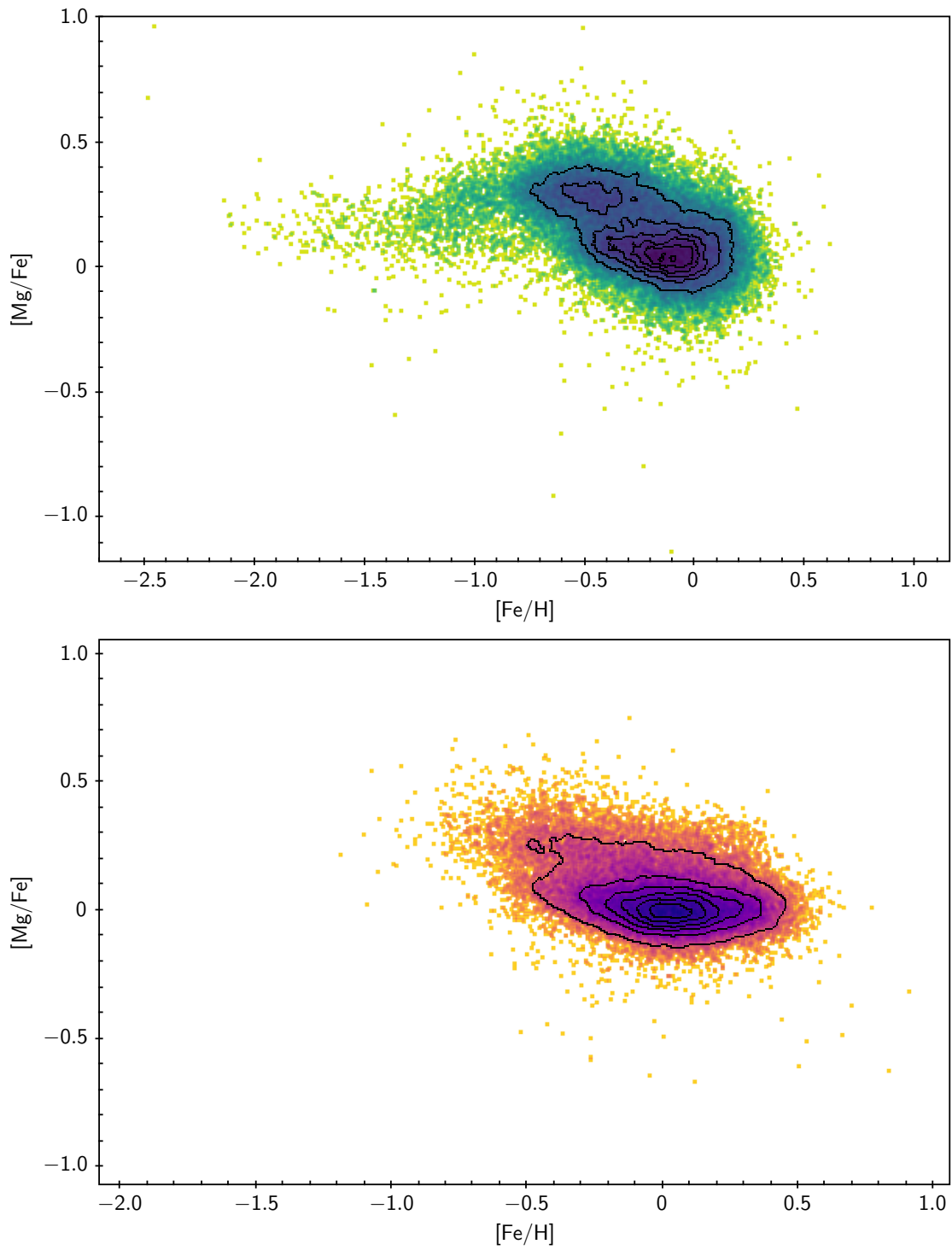


Figura 4.3: La figura mostra l'andamento del magnesio  $[Mg/Fe]$  in funzione della metallicità  $[Fe/H]$  per le stelle giganti (in alto) e nane (in basso).

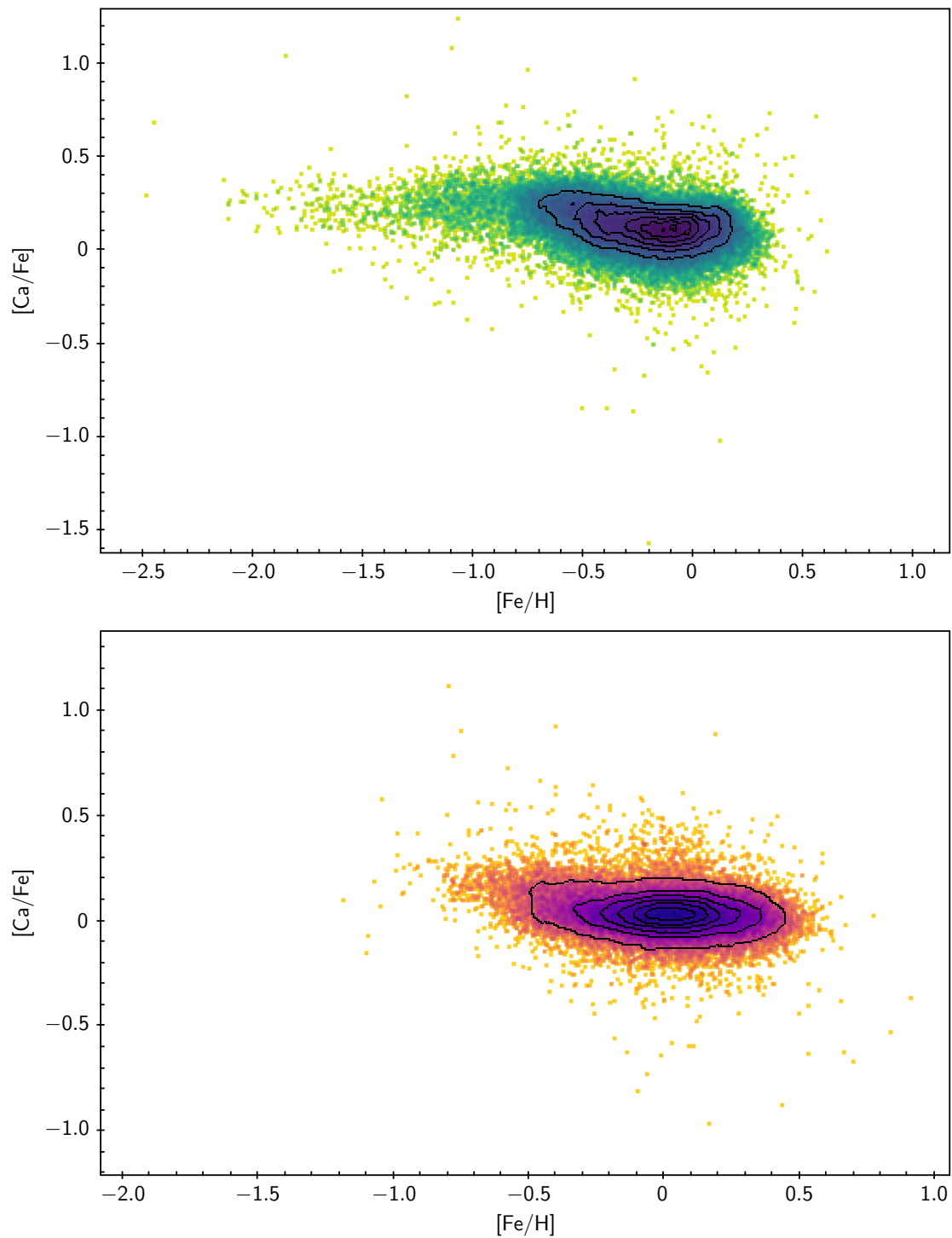


Figura 4.4: La figura mostra l'andamento del calcio  $[Ca/Fe]$  in funzione della metallicità  $[Fe/H]$  per le stelle giganti (in alto) e nane (in basso).

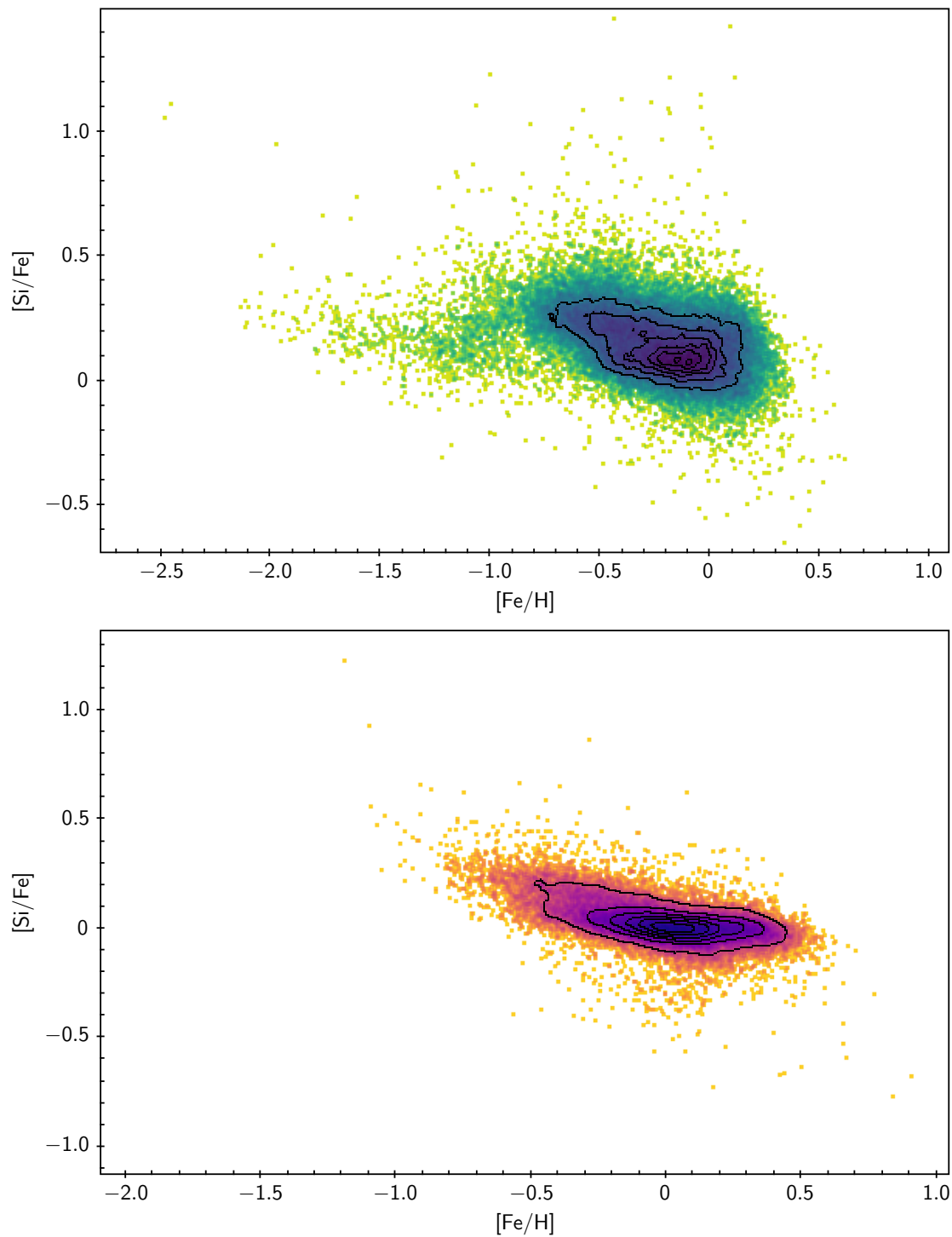


Figura 4.5: La figura mostra l'andamento del silicio  $[Si/Fe]$  in funzione della metallicità  $[Fe/H]$  per le stelle giganti (in alto) e nane (in basso).

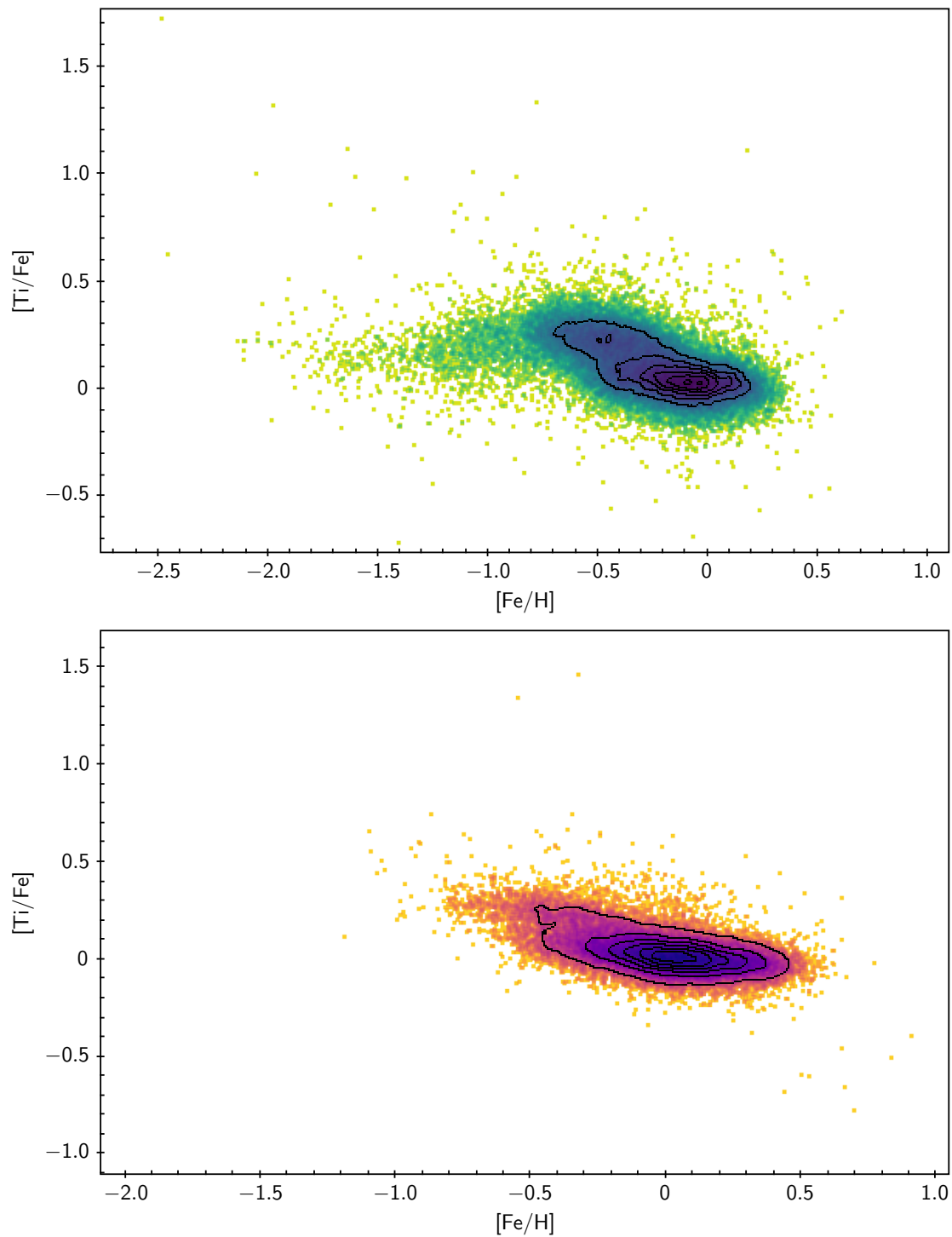


Figura 4.6: La figura mostra l'andamento del titanio  $[Ti/Fe]$  in funzione della metallicità  $[Fe/H]$  per le stelle giganti (in alto) e nane (in basso).

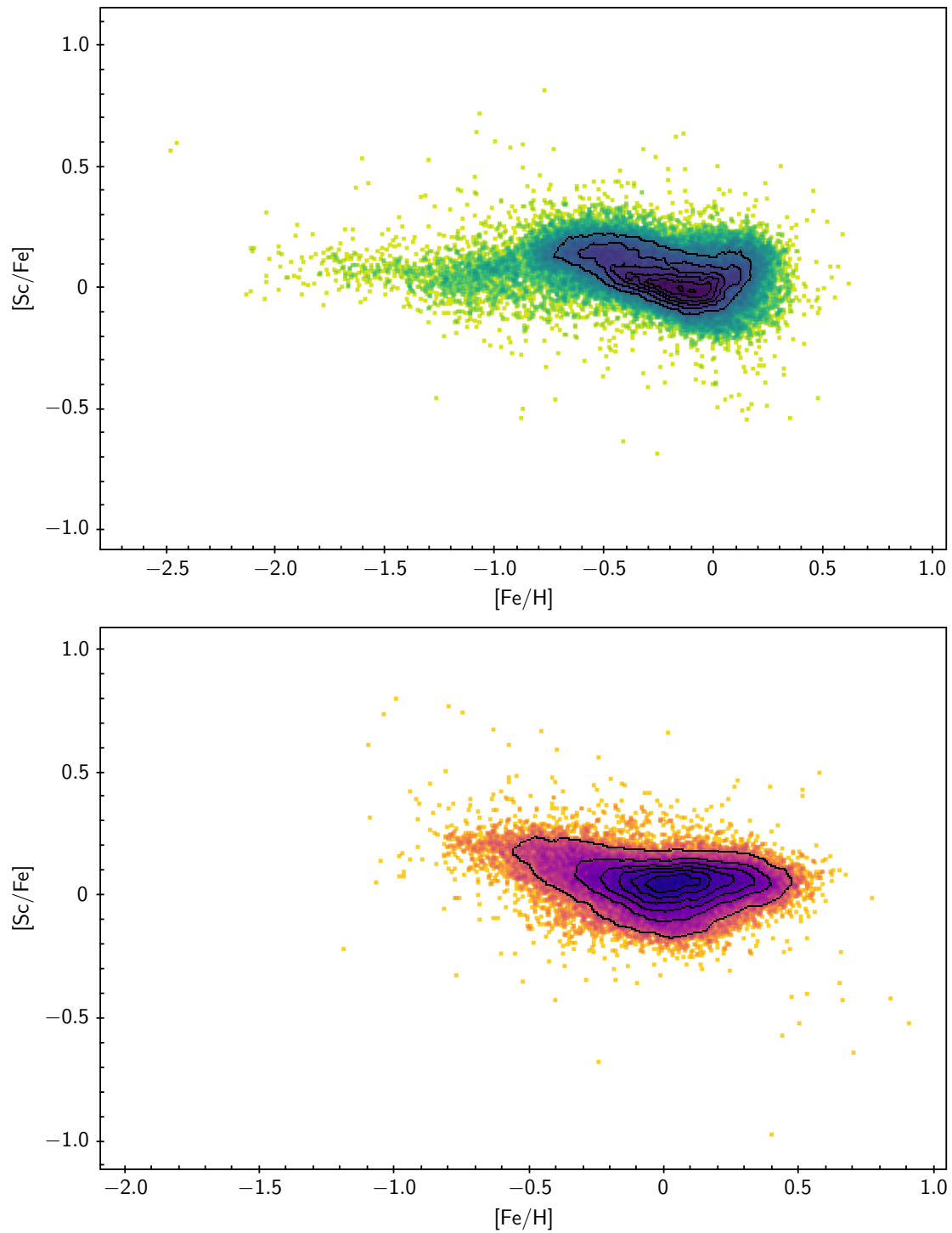


Figura 4.7: La figura mostra l'andamento dell'elemento del picco del ferro scandio  $[Sc/Fe]$  in funzione della metallicità  $[Fe/H]$  per le stelle giganti (in alto) e nane (in basso).

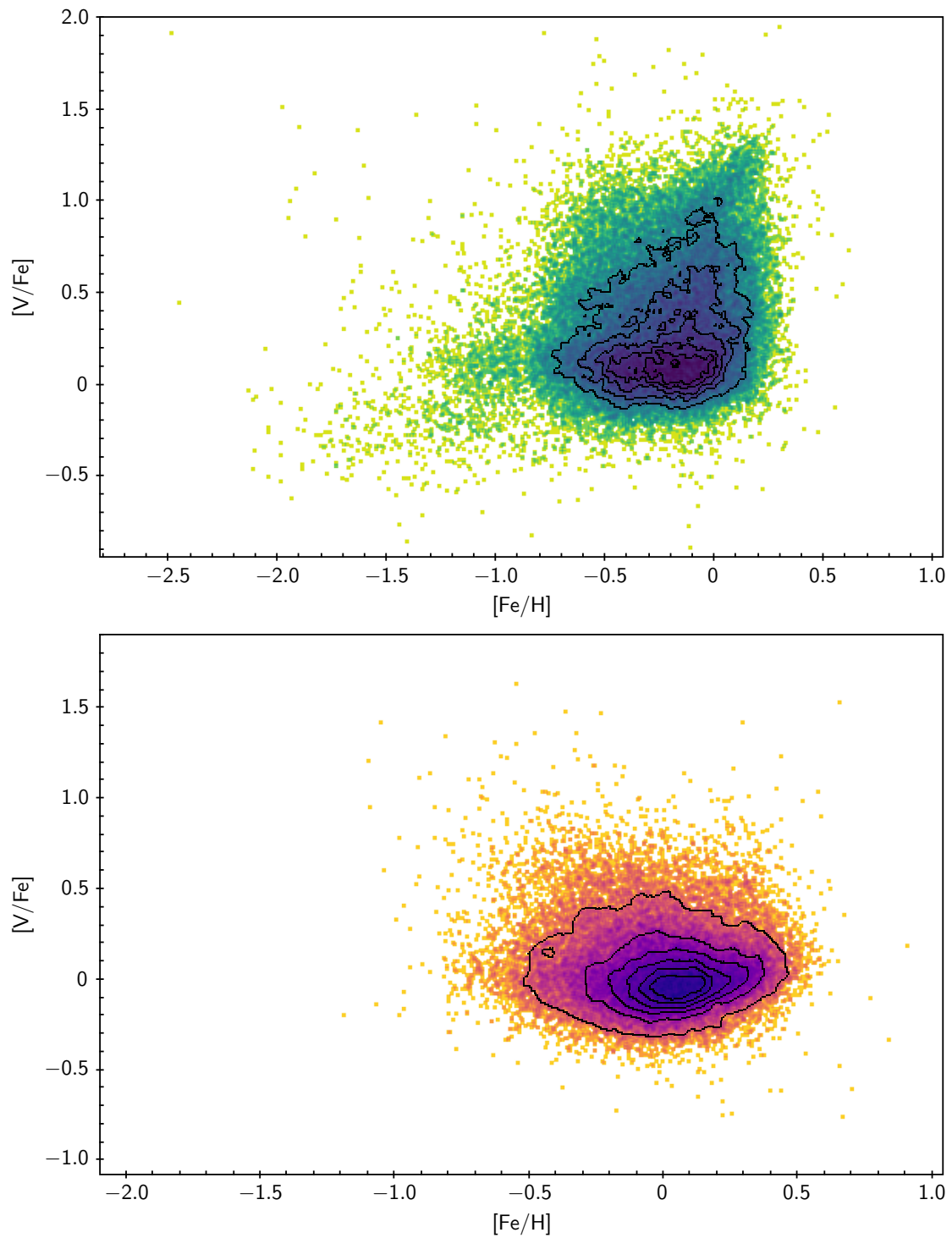


Figura 4.8: La figura mostra l'andamento dell'elemento del picco del ferro vanadio  $[V/Fe]$  in funzione della metallicità  $[Fe/H]$  per le stelle giganti (in alto) e nane (in basso).

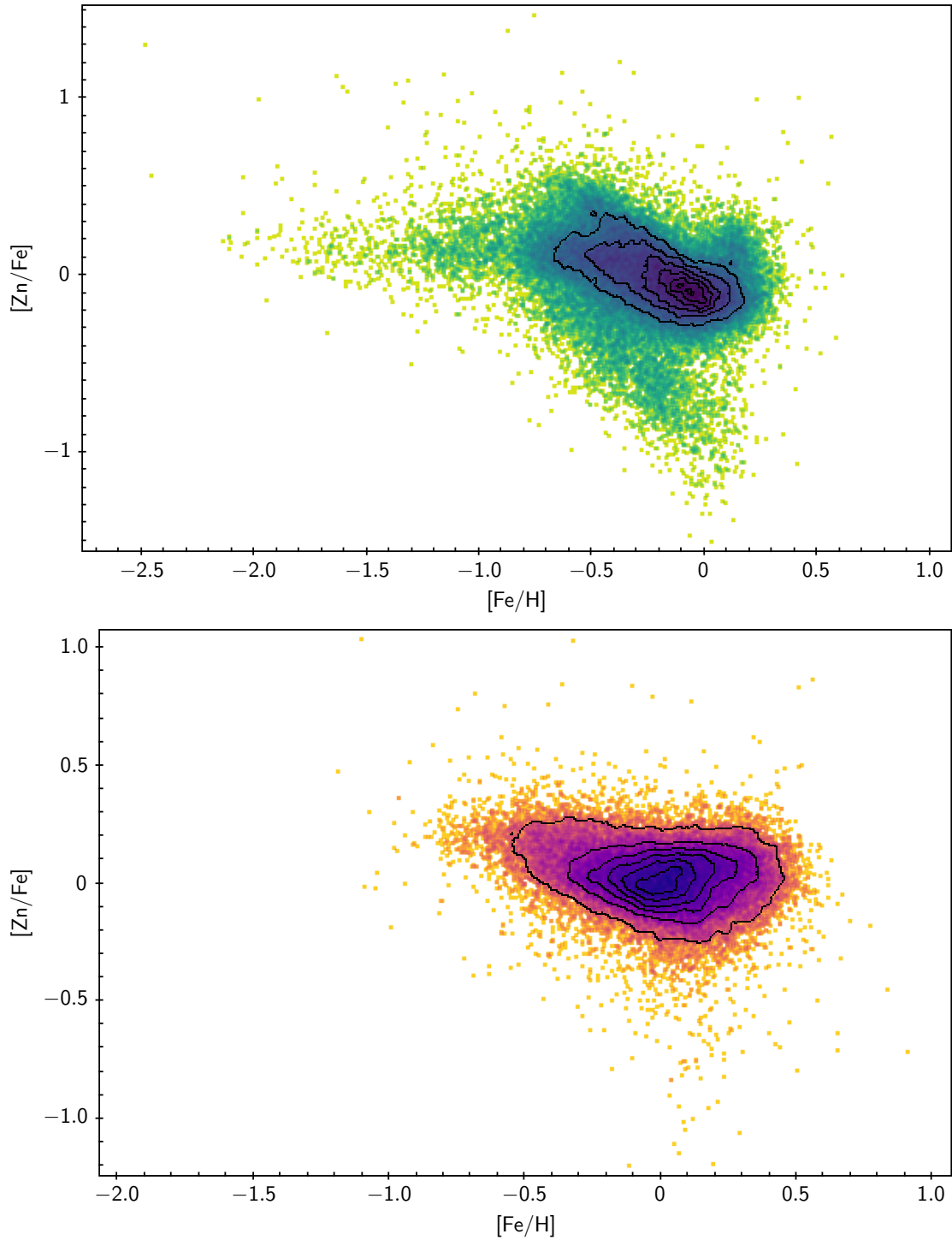


Figura 4.9: La figura mostra l'andamento dell'elemento del picco del ferro zinco  $[Zn/Fe]$  in funzione della metallicità  $[Fe/H]$  per le stelle giganti (in alto) e nane (in basso).

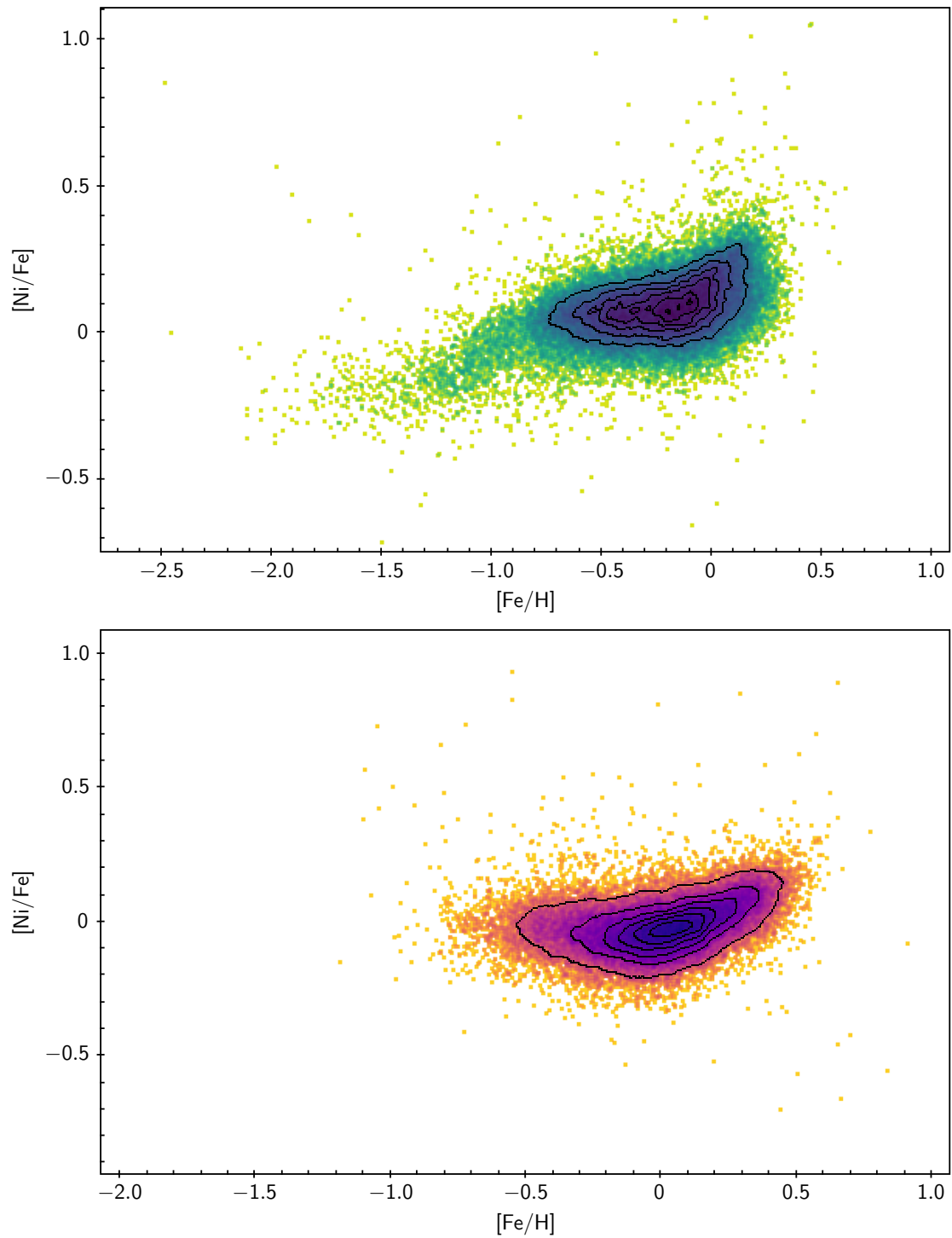


Figura 4.10: La figura mostra l'andamento dell'elemento del picco del ferro nichel  $[Ni/Fe]$  in funzione della metallicità  $[Fe/H]$  per le stelle giganti (in alto) e nane (in basso).

## 4.2 Trend delle abbondanze misurate con la temperatura effettiva

Sottostime o sovrastime delle abbondanze stellari possono anche essere introdotte da bias nell'analisi spettroscopica. Per verificare la presenza di eventuali bias nell'analisi automatica della pipeline di GALAH si è proceduto a graficare l'andamento delle abbondanze di tutti gli elementi di interesse in funzione delle temperature. I grafici da Figura 4.11 a 4.18 mostrano per ciascun elemento (e singolarmente per il sottocampione delle giganti e delle nane) il trend del rapporto di abbondanza rispetto alla temperatura. La scala di colori riflette la densità dei punti in una determinata regione del piano  $T_{eff}$  vs.  $[X/Fe]$ . Curve di livello sono mostrate sovrapposte alla distribuzione discreta per immediata visualizzazione. La riga tratteggiata rappresenta un fit lineare ai dati.

Dallo studio dei plot si può facilmente determinare quali elementi non dimostrano avere trend preoccupanti in funzione della temperatura e quelli che invece hanno evidenti bias. In generale, dalle Figure 4.12, 4.14 e 4.18, si può osservare che gli elementi  $[Ca/Fe]$ ,  $[Ti/Fe]$  e  $[Ni/Fe]$  non mostrano trend insoliti con la temperatura. Gli elementi che sembrano avere andamenti inattesi con  $T_{eff}$  sono principalmente  $[Mg/Fe]$  in Figura 4.11,  $[Si/Fe]$  in Figura 4.13,  $[V/Fe]$  in Figura 4.16 e  $[Zn/Fe]$  in Figura 4.17. Si può notare che generalmente l'analisi delle stelle non-evolute (nane) sembra meno problematica, nel caso dell'elemento  $[Si/Fe]$  si può infatti vedere come l'andamento con la temperatura sia affetto da bias solo nel caso del campione di stelle giganti, mentre il campione delle stelle nane non risulta avere particolari problemi. Inoltre, gli elementi del picco del ferro hanno in generale una dispersione maggiore degli altri elementi analizzati, sia per quanto riguarda le stelle giganti che le stelle nane. In particolare, si osservano dei trend evidenti con la temperatura per il campione di stelle giganti nei plot  $[V/Fe]$ ,  $[Zn/Fe]$  vs.  $T_{eff}$ , i quali verranno discussi in seguito. Tra gli elementi del picco del ferro, l'elemento meno problematico e la cui analisi potrebbe risultare interessante sembra essere lo scandio  $[Sc/Fe]$  in Figura 4.15.

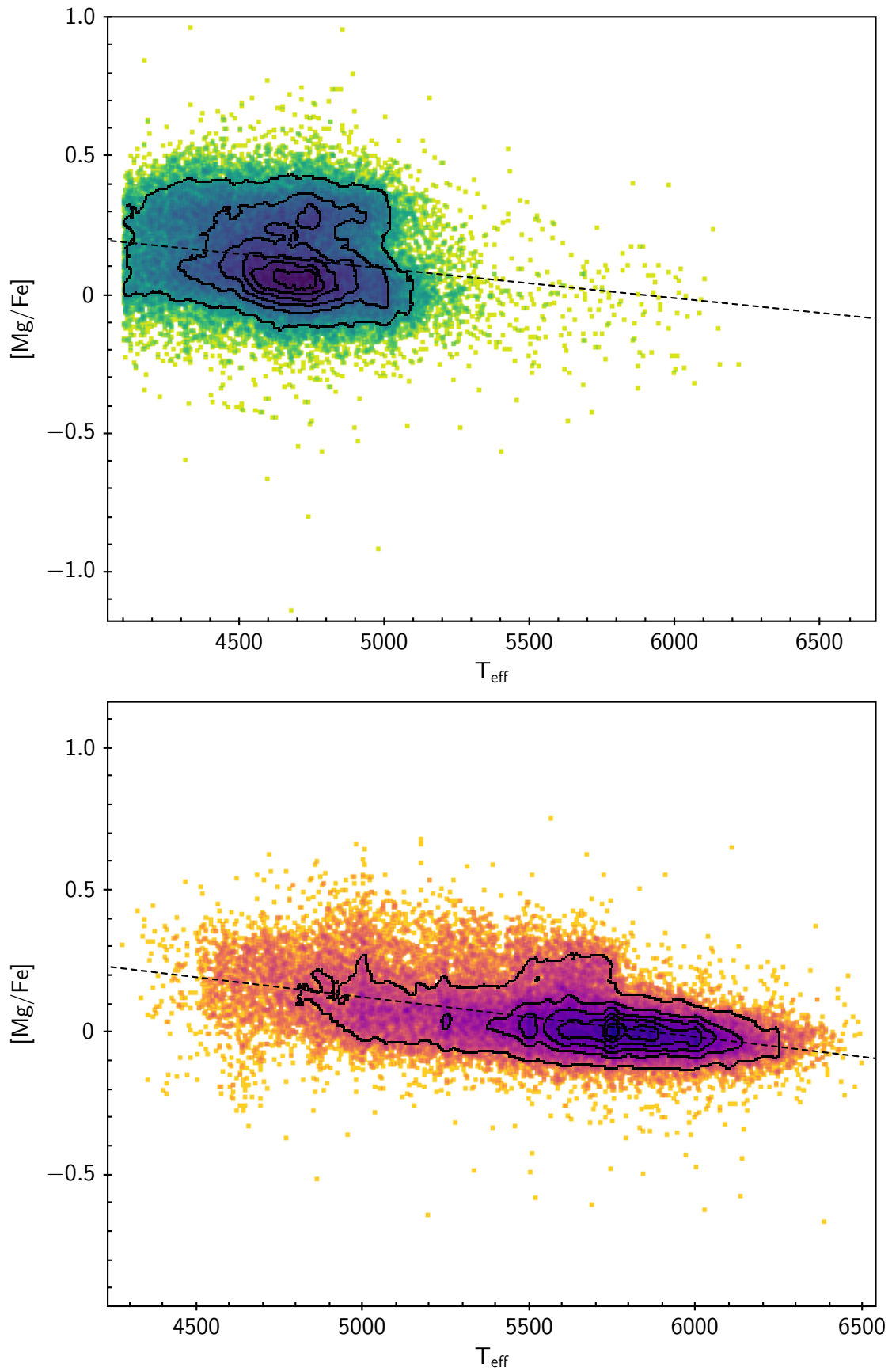


Figura 4.11: Trend del rapporto di abbondanza  $[Mg/Fe]$  in funzione della temperatura effettiva per le stelle giganti (in alto) e nane (in basso). La linea tratteggiata rappresenta un fit lineare dei dati.

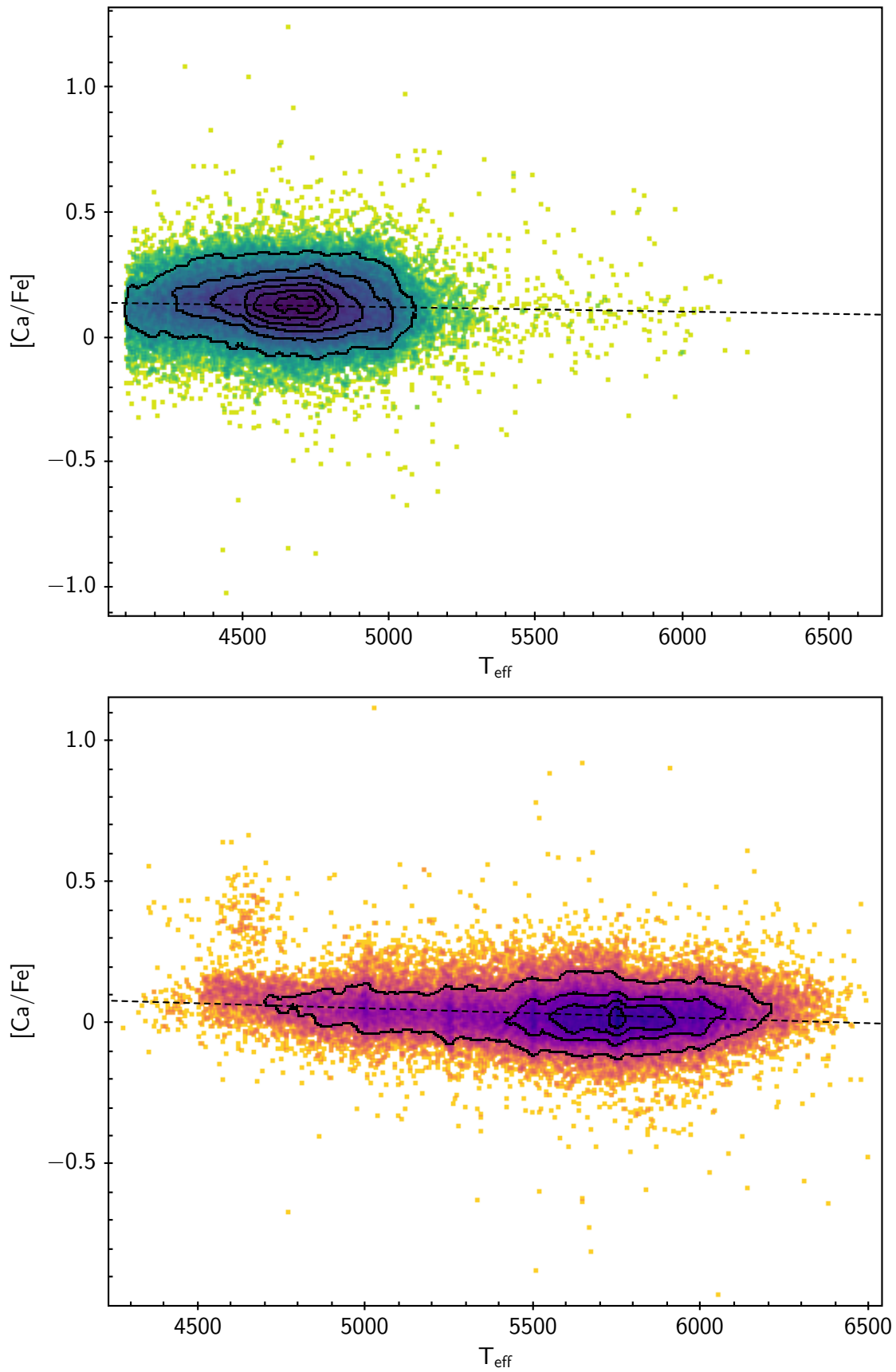


Figura 4.12: Trend del rapporto di abbondanza  $[\text{Ca}/\text{Fe}]$  in funzione della temperatura effettiva per le stelle giganti (in alto) e nane (in basso). La linea tratteggiata rappresenta un fit lineare dei dati.

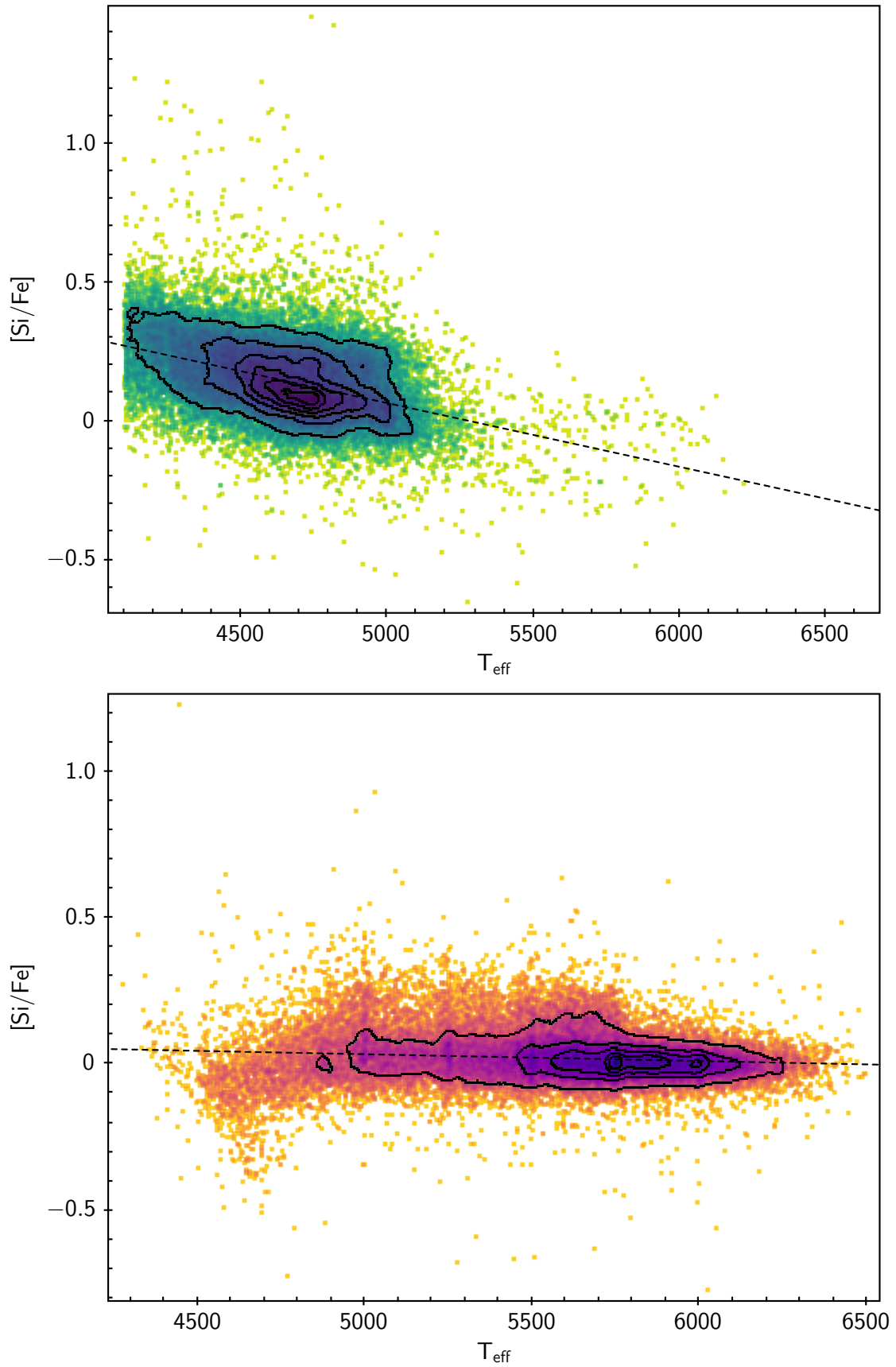


Figura 4.13: Trend del rapporto di abbondanza  $[Si/Fe]$  in funzione della temperatura effettiva per le stelle giganti (in alto) e nane (in basso). La linea tratteggiata rappresenta un fit lineare dei dati.

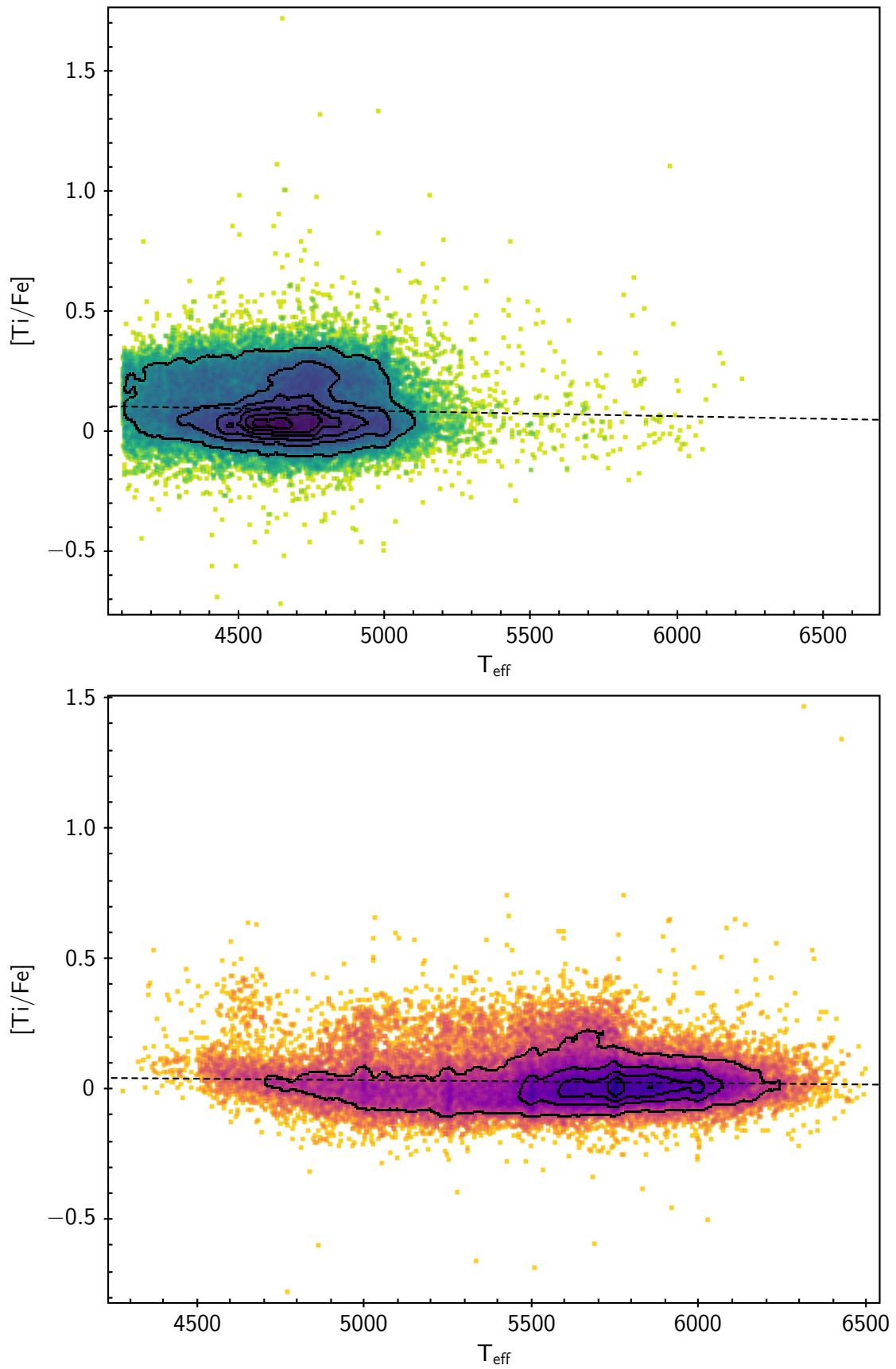


Figura 4.14: Trend del rapporto di abbondanza  $[Ti/Fe]$  in funzione della temperatura effettiva per le stelle giganti (in alto) e nane (in basso). La linea tratteggiata rappresenta un fit lineare dei dati.

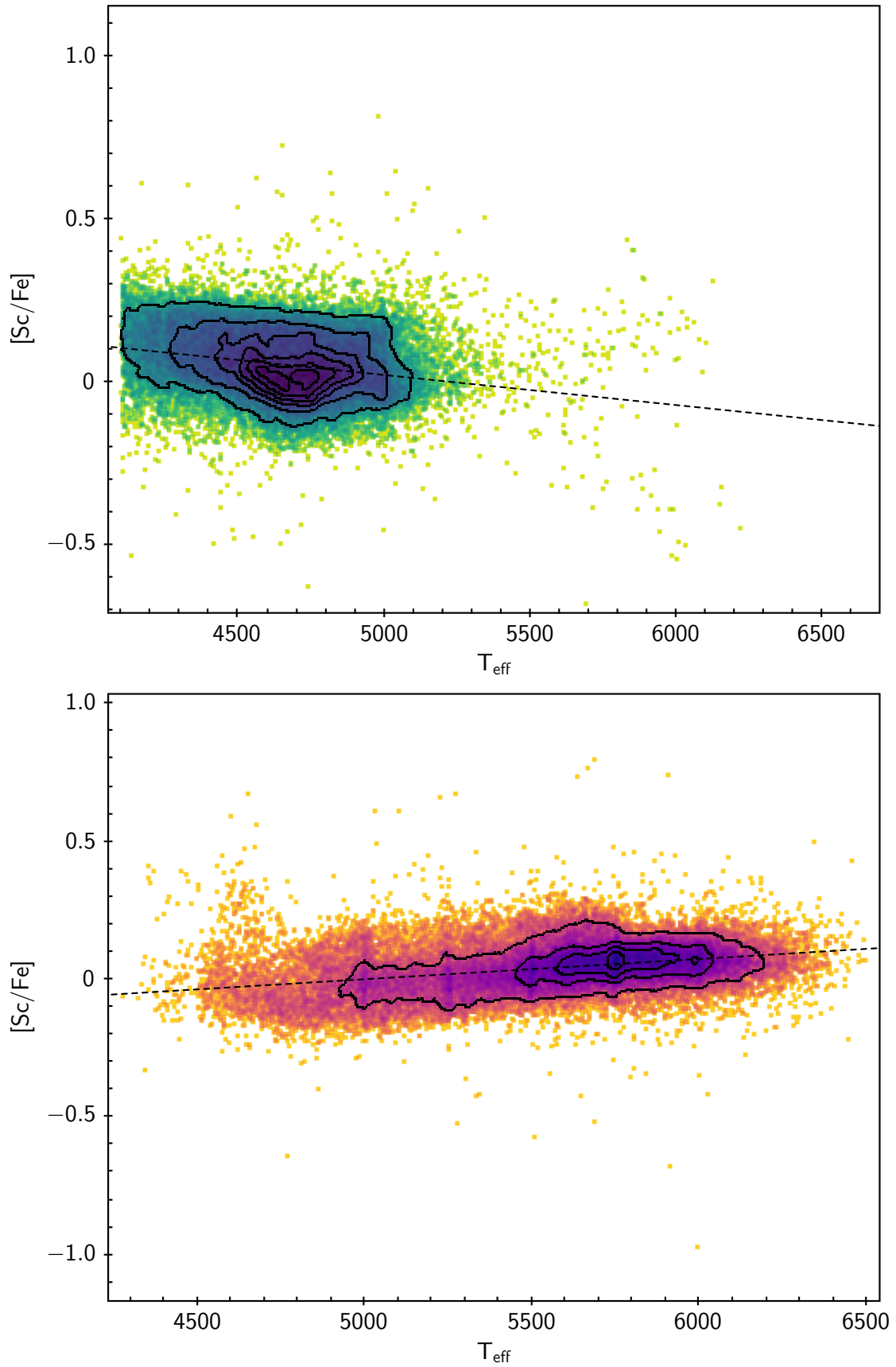


Figura 4.15: Trend del rapporto di abbondanza  $[\text{Sc}/\text{Fe}]$  in funzione della temperatura effettiva per le stelle giganti (in alto) e nane (in basso). La linea tratteggiata rappresenta un fit lineare dei dati.

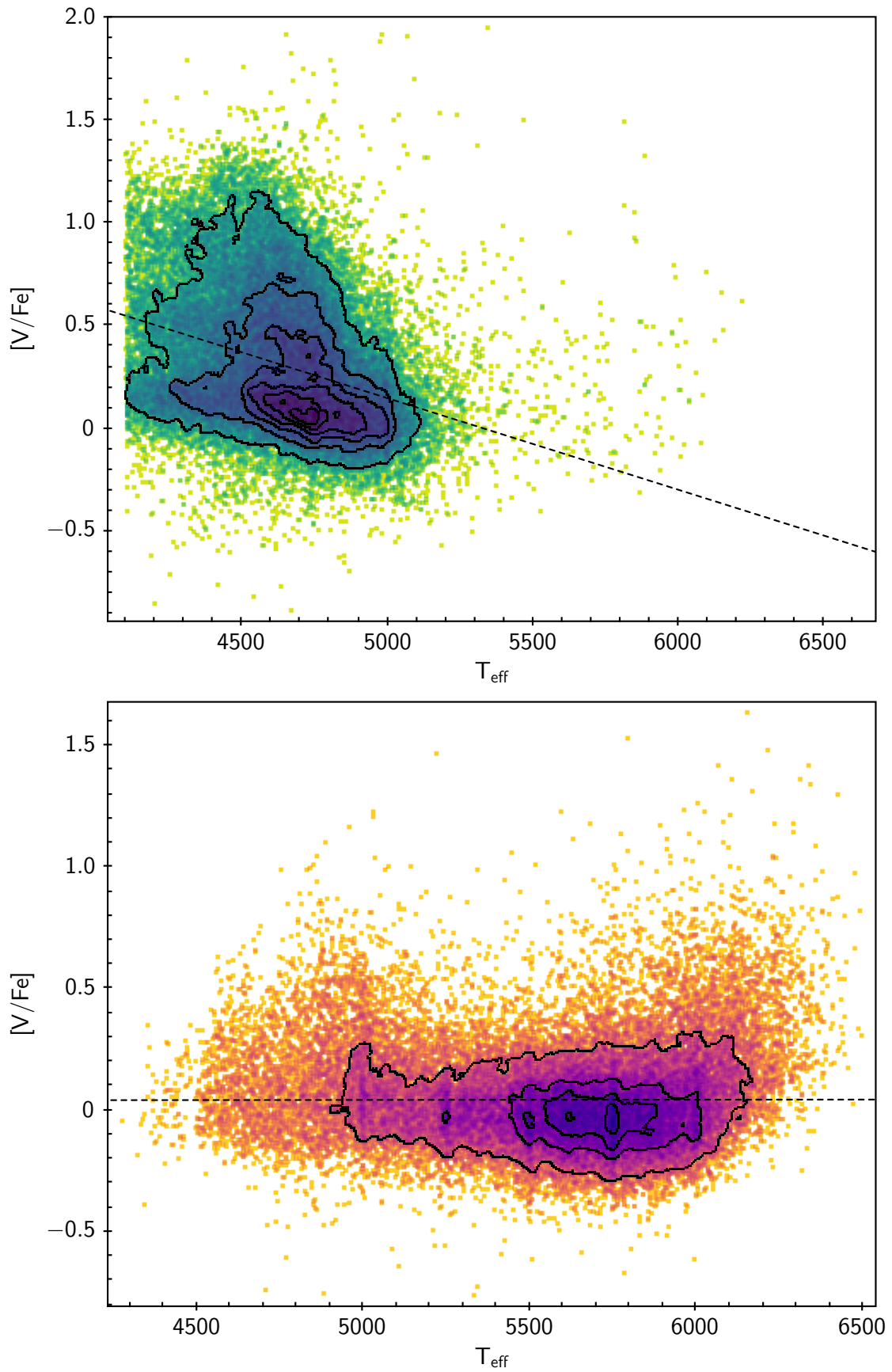


Figura 4.16: Trend del rapporto di abbondanza  $[V/Fe]$  in funzione della temperatura effettiva per le stelle giganti (in alto) e nane (in basso). La linea tratteggiata rappresenta un fit lineare dei dati.

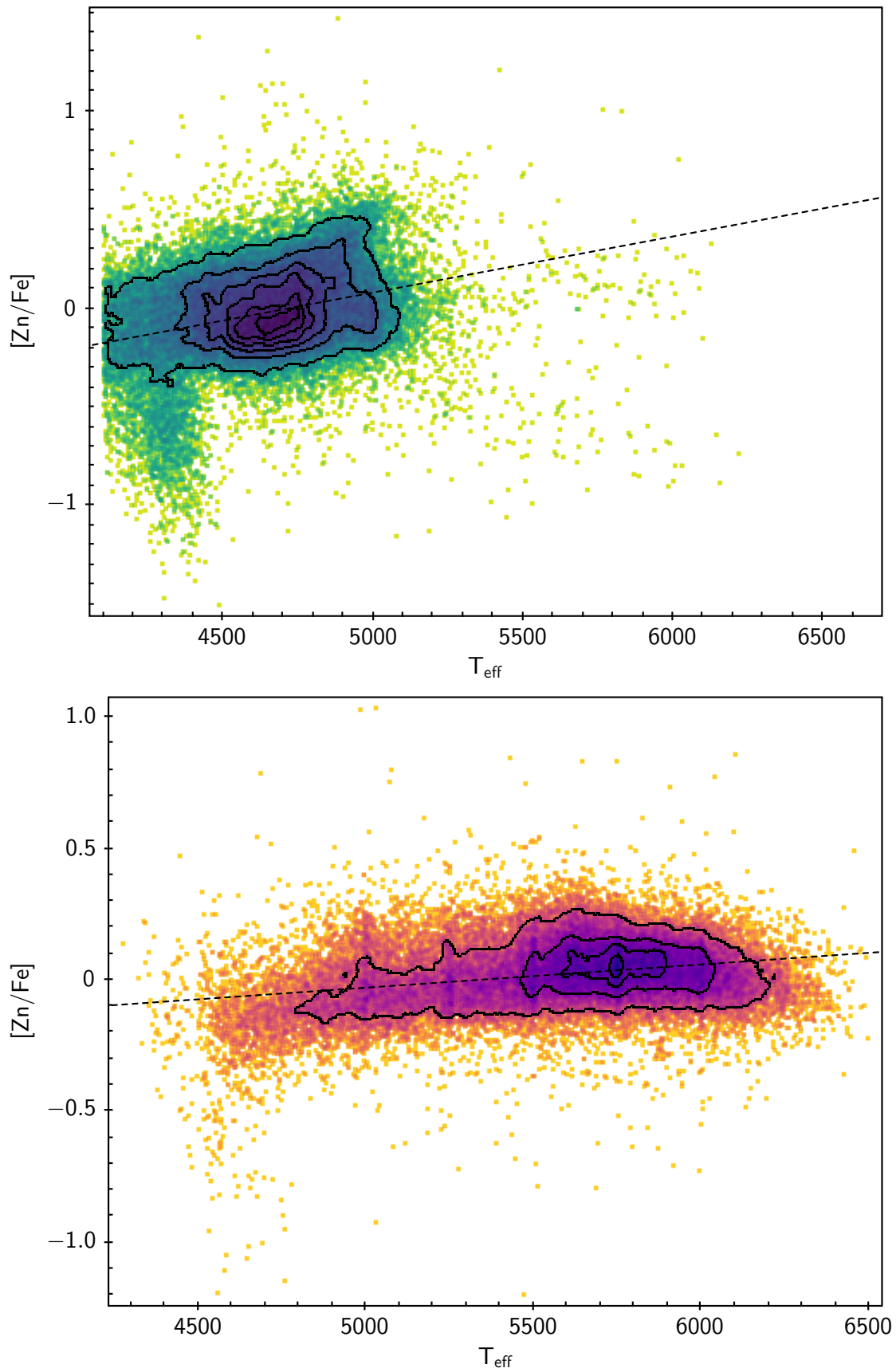


Figura 4.17: Trend del rapporto di abbondanza  $[Zn/Fe]$  in funzione della temperatura effettiva per le stelle giganti (in alto) e nane (in basso). La linea tratteggiata rappresenta un fit lineare dei dati.

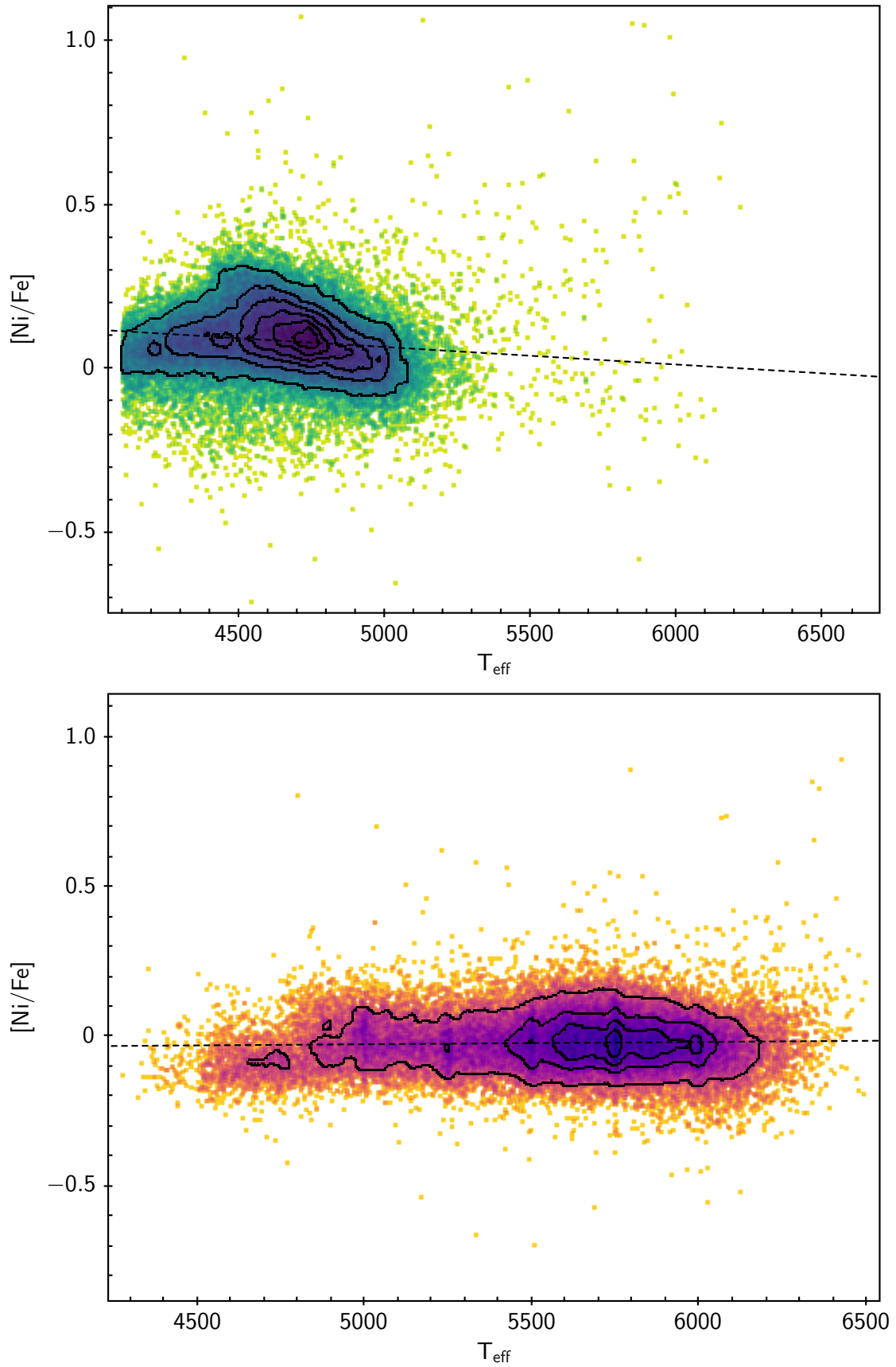


Figura 4.18: Trend del rapporto di abbondanza  $[Ni/Fe]$  in funzione della temperatura effettiva per le stelle giganti (in alto) e nane (in basso). La linea tratteggiata rappresenta un fit lineare dei dati.

### 4.3 Studio delle incertezze associate alle misure di abbondanza

Per verificare che gli spread e i trend con la temperatura discussi in precedenza non siano causati dall'inclusione di stelle con *cattive misure* nel nostro campione, studiamo in questa sezione gli andamenti degli errori.

Viene fatta una stima data dalla somma del valore medio degli errori di ciascun elemento chimico studiato e della standard deviation, così facendo è possibile fare una nuova selezione sul campione di stelle. Verranno dunque eliminate tutte le stelle con incertezze relative all'elemento X superiori al valor medio + una deviazione standard. In questo modo si possono ricavare nuovamente i rapporti delle abbondanze con il  $[\text{Fe}/\text{H}]$  e avere plot ripuliti dalle stelle con errori sulle stime troppo grandi. Di seguito, si possono osservare gli istogrammi degli errori sugli elementi con relativa funzione gaussiana che ne indica il valore medio e standard deviation.

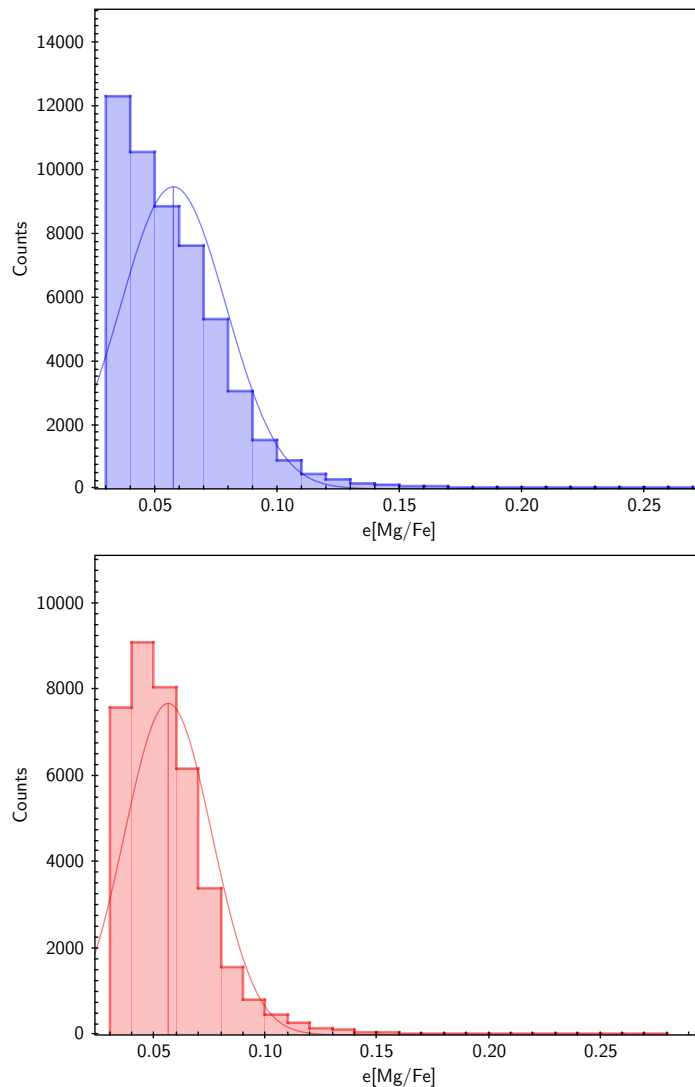


Figura 4.19: Istogramma della distribuzione dell'errore sul rapporto di abbondanza  $[\text{Mg}/\text{Fe}]$  per le stelle giganti (in alto) e nane (in basso). Le figure mostrano il fit Gaussiano ai dati con media corrispondente evidenziata.

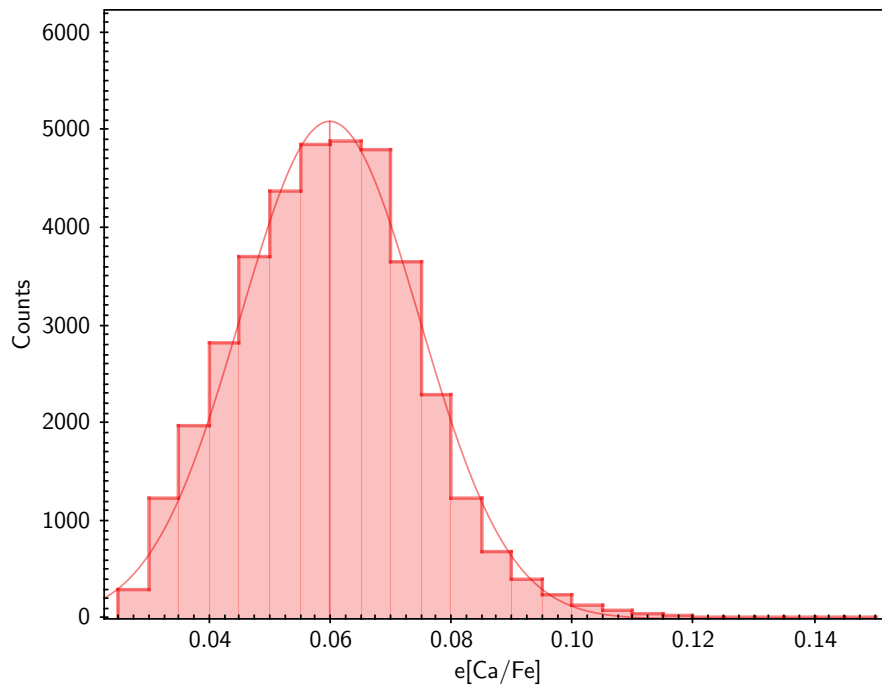
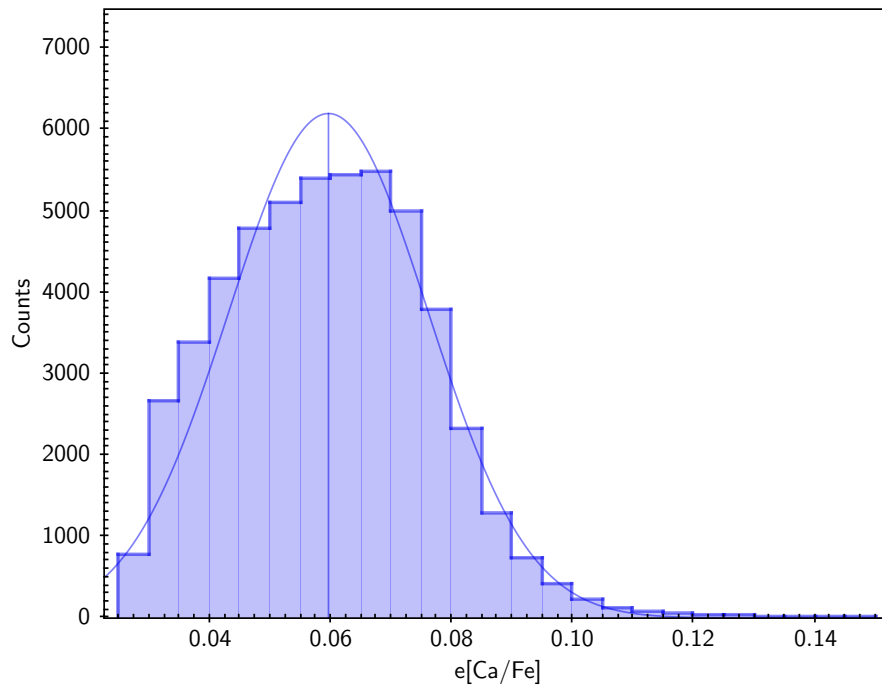


Figura 4.20: Istogramma della distribuzione dell'errore sul rapporto di abbondanza  $[Ca/Fe]$  per le stelle giganti (in alto) e nane (in basso). Le figure mostrano il fit Gaussiano ai dati con media corrispondente evidenziata.

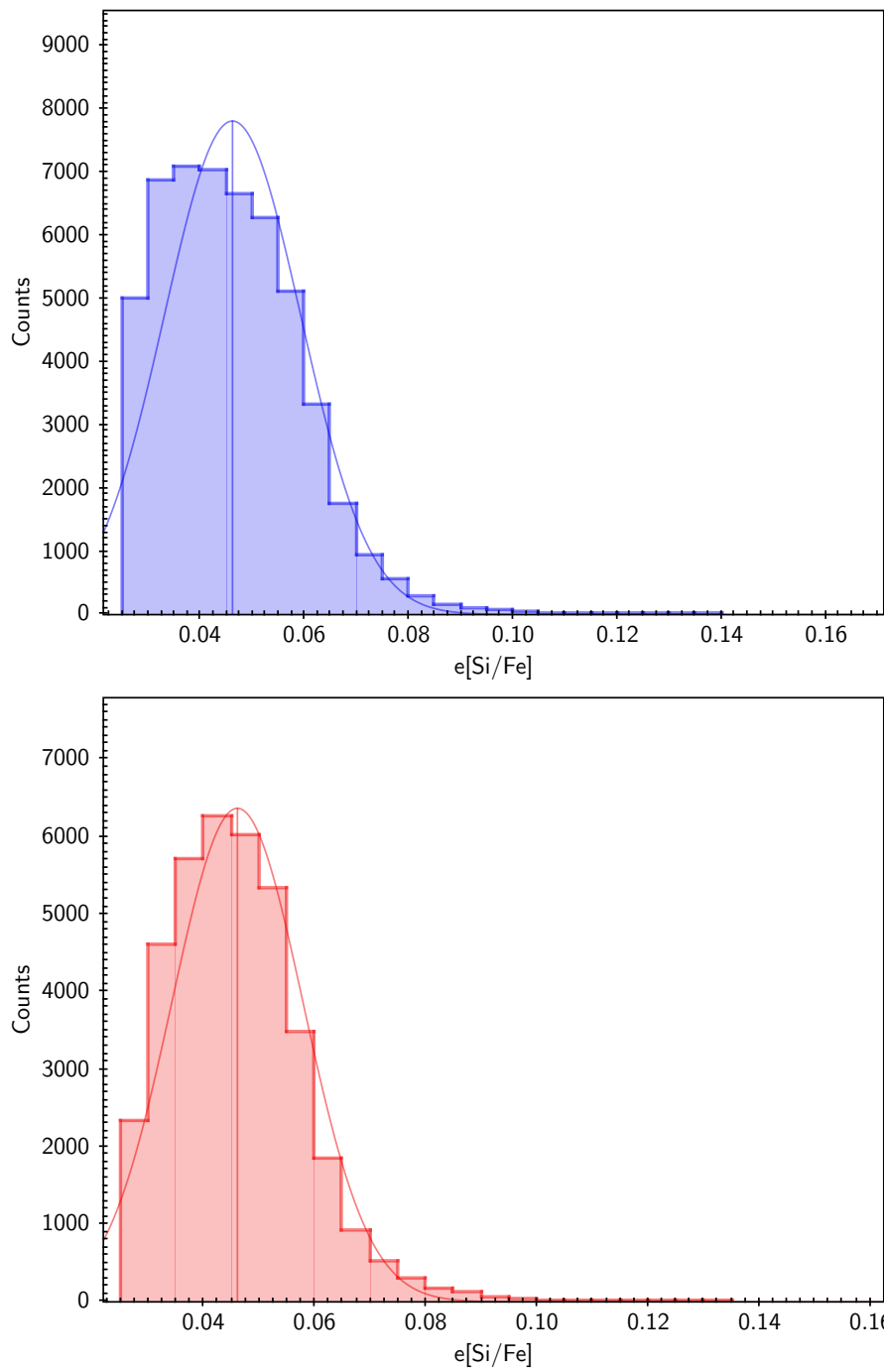


Figura 4.21: Istogramma della distribuzione dell'errore sul rapporto di abbondanza  $[\text{Si}/\text{Fe}]$  per le stelle giganti (in alto) e nane (in basso). Le figure mostrano il fit Gaussiano ai dati con media corrispondente evidenziata.

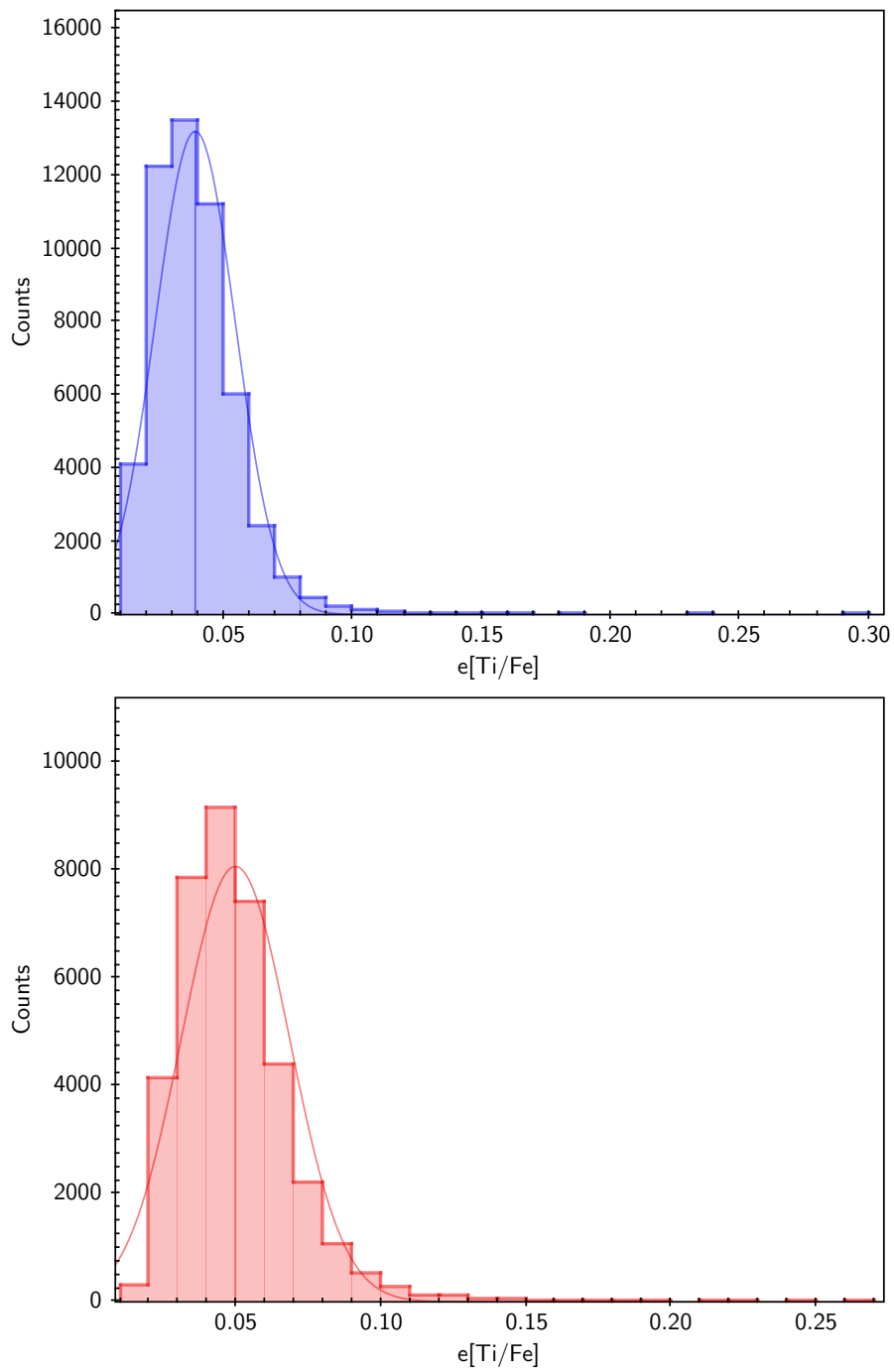


Figura 4.22: Istogramma della distribuzione dell'errore sul rapporto di abbondanza  $[\text{Ti}/\text{Fe}]$  per le stelle giganti (in alto) e nane (in basso). Le figure mostrano il fit Gaussiano ai dati con media corrispondente evidenziata.

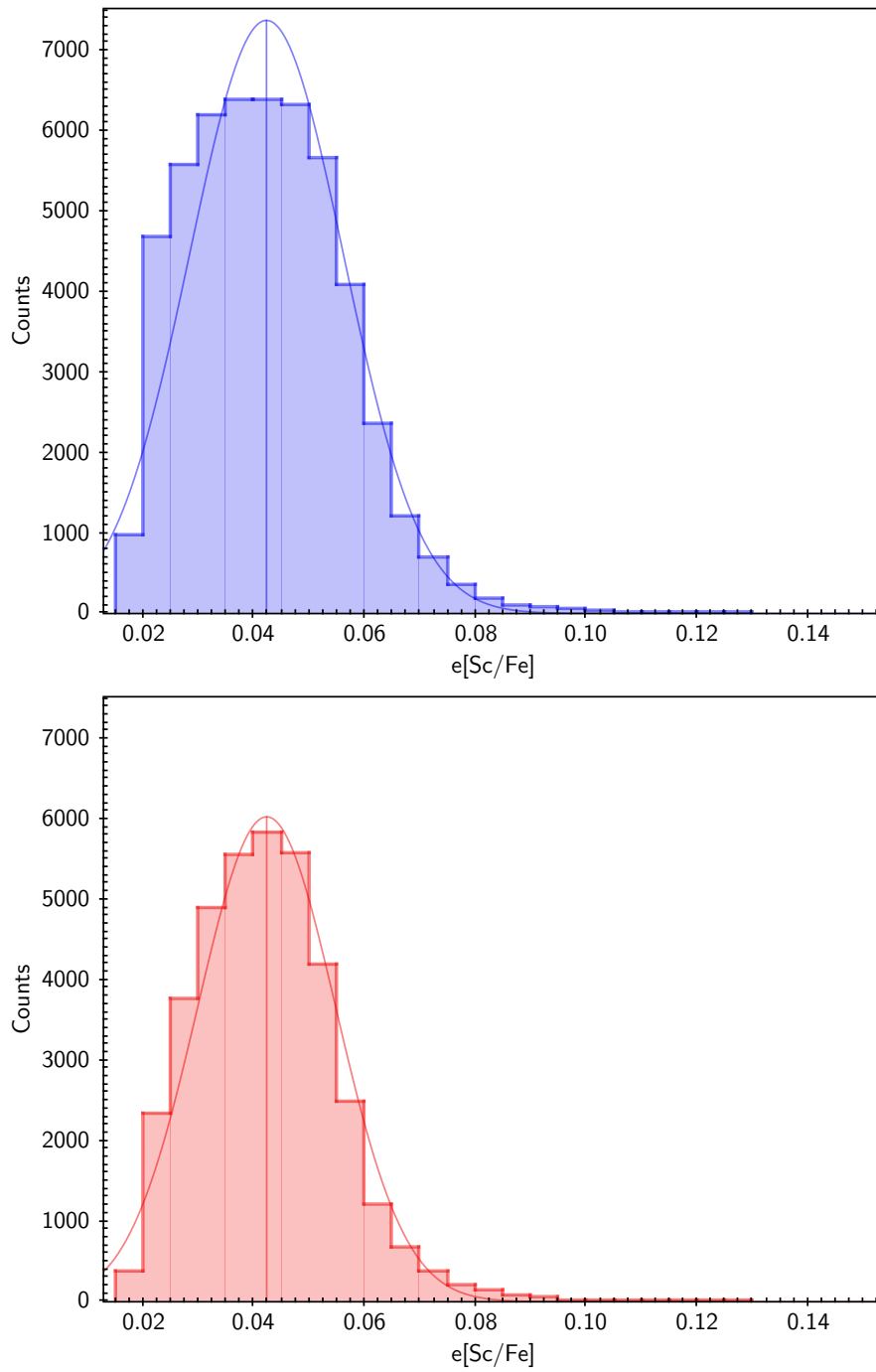


Figura 4.23: Istogramma della distribuzione dell'errore sul rapporto di abbondanza  $[Sc/Fe]$  per le stelle giganti (in alto) e nane (in basso). Le figure mostrano il fit Gaussiano ai dati con media corrispondente evidenziata.

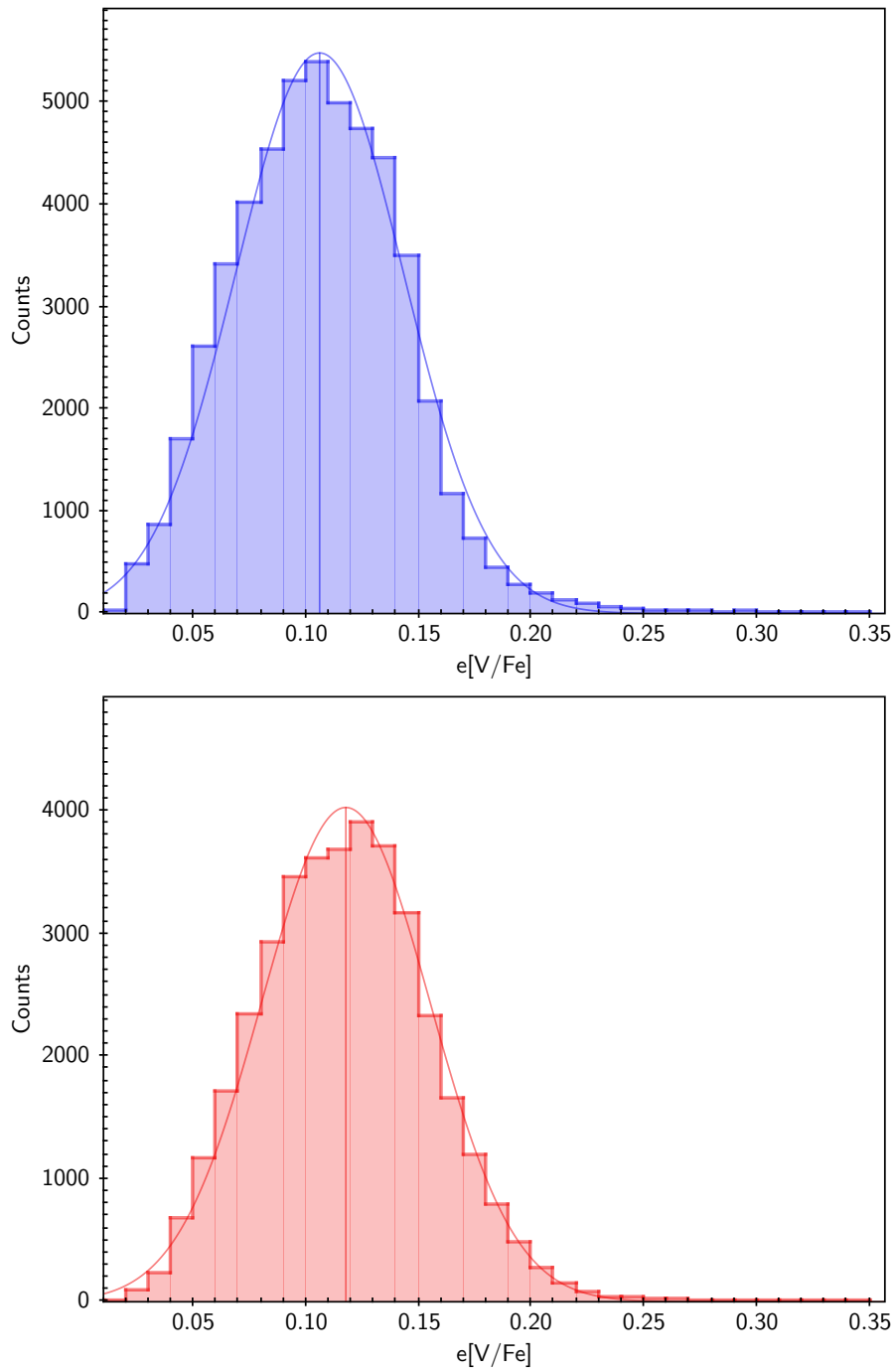


Figura 4.24: Istogramma della distribuzione dell'errore sul rapporto di abbondanza  $[V/Fe]$  per le stelle giganti (in alto) e nane (in basso). Le figure mostrano il fit Gaussiano ai dati con media corrispondente evidenziata.

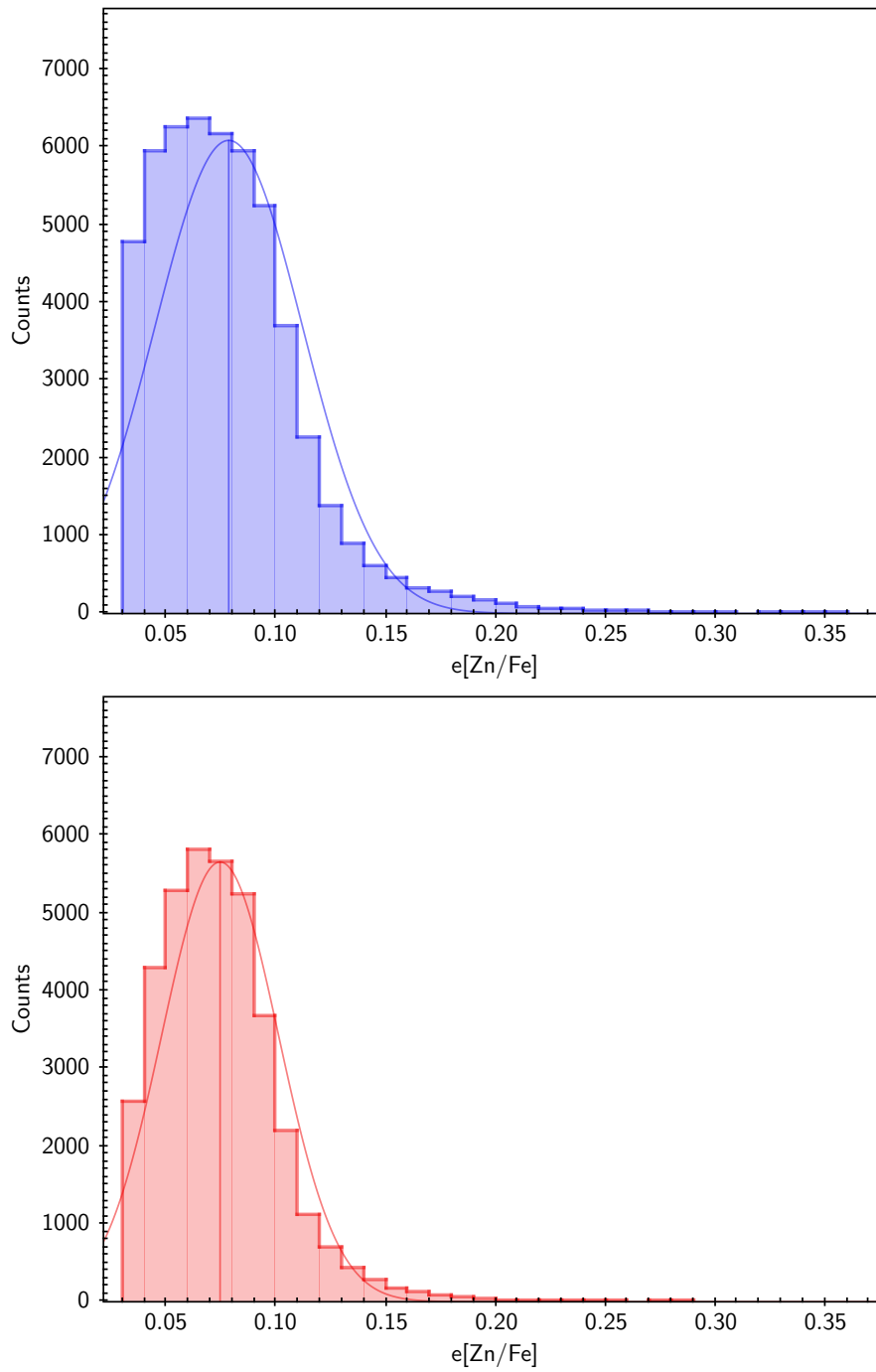


Figura 4.25: Istogramma della distribuzione dell'errore sul rapporto di abbondanza  $[Zn/Fe]$  per le stelle giganti (in alto) e nane (in basso). Le figure mostrano il fit Gaussiano ai dati con media corrispondente evidenziata.

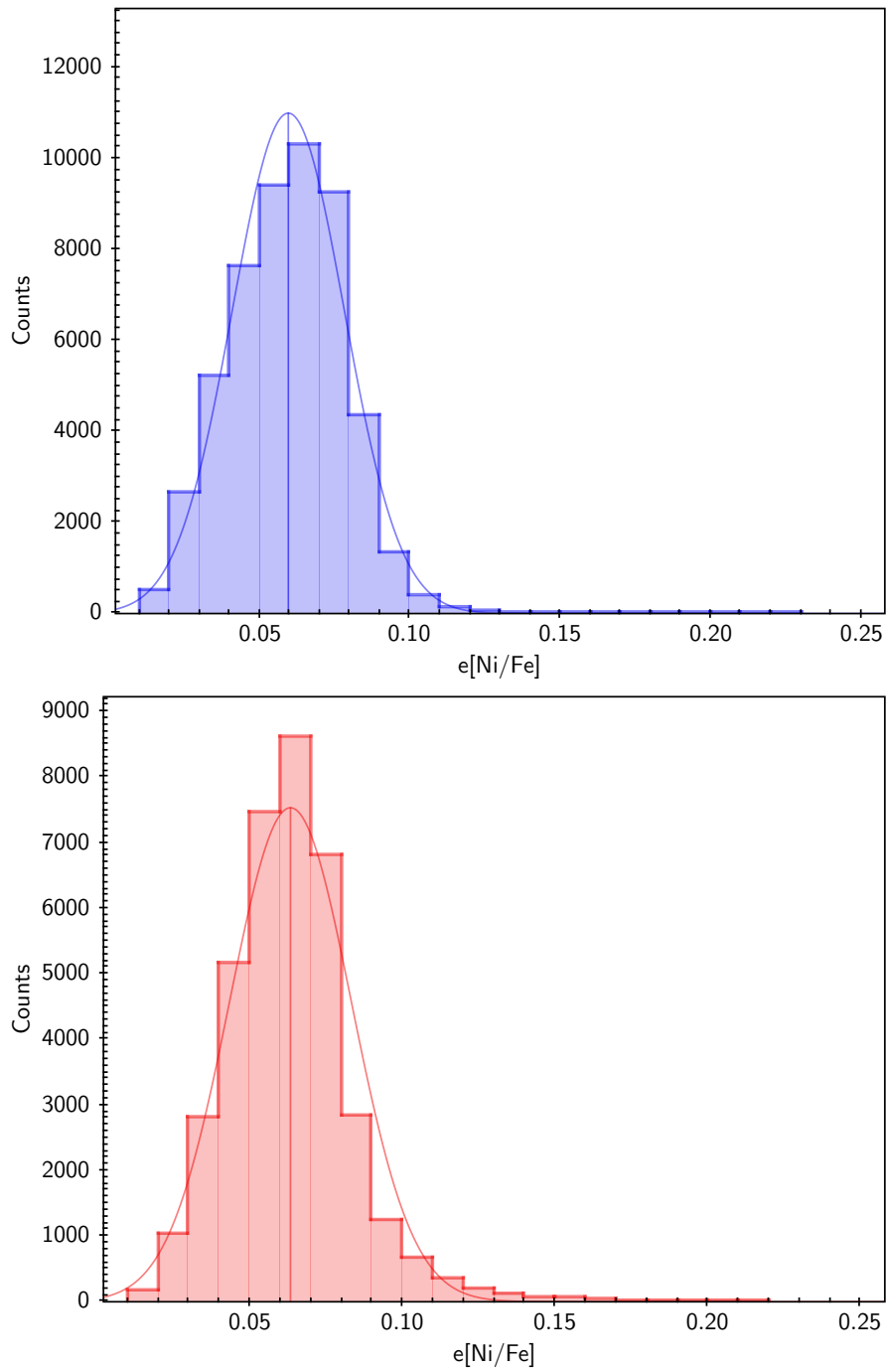


Figura 4.26: Istogramma della distribuzione dell'errore sul rapporto di abbondanza [Ni/Fe] per le stelle giganti (in alto) e nane (in basso). Le figure mostrano il fit Gaussiano ai dati con media corrispondente evidenziata.

Ottenuti i plot, può essere utile osservare i valori degli errori medi con relativa deviazione standard per ogni elemento chimico così da poter vedere nel dettaglio i calcoli svolti e che valori numerici esatti sono stati inseriti per ripulire il campione di stelle. Nelle Tabelle 4.1 e 4.2 vengono inseriti per ogni elemento chimico X di ciascun gruppo di stelle il relativo errore, deviazione standard e somma, la quale rappresenta il limite oltre il quale le stelle con tale errore associato alla misura dell'abbondanza dell'elemento X vengono eliminate dalla selezione.

Tabella 4.1: Calcoli degli errori per il campione di stelle giganti.

Abbondanza elemento	Errore medio	Standard deviation	Errore limite
[Mg/Fe]	0.057	0.021	0.078
[Ca/Fe]	0.059	0.016	0.075
[Si/Fe]	0.046	0.013	0.059
[Ti/Fe]	0.038	0.015	0.053
[Sc/Fe]	0.042	0.013	0.055
[V/Fe]	0.105	0.037	0.142
[Zn/Fe]	0.078	0.033	0.111
[Ni/Fe]	0.059	0.018	0.077

Tabella 4.2: Calcoli degli errori per il campione di stelle nane.

Abbondanza elemento	Errore medio	Standard deviation	Errore limite
[Mg/Fe]	0.056	0.019	0.075
[Ca/Fe]	0.059	0.014	0.073
[Si/Fe]	0.046	0.011	0.057
[Ti/Fe]	0.049	0.018	0.067
[Sc/Fe]	0.042	0.012	0.054
[V/Fe]	0.117	0.037	0.154
[Zn/Fe]	0.074	0.026	0.100
[Ni/Fe]	0.063	0.019	0.082

### 4.3.1 Selezione del sample finale per lo studio dei rapporti di abbondanza

Avendo ricavato i limiti sugli errori per ogni abbondanza studiata e per entrambi i campioni di stelle, è possibile rimuovere stelle le cui misure sulle abbondanze hanno errori maggiori di quelli stimati e ottenere così i nuovi plot ripuliti che verranno mostrati a partire dalla pagina successiva.

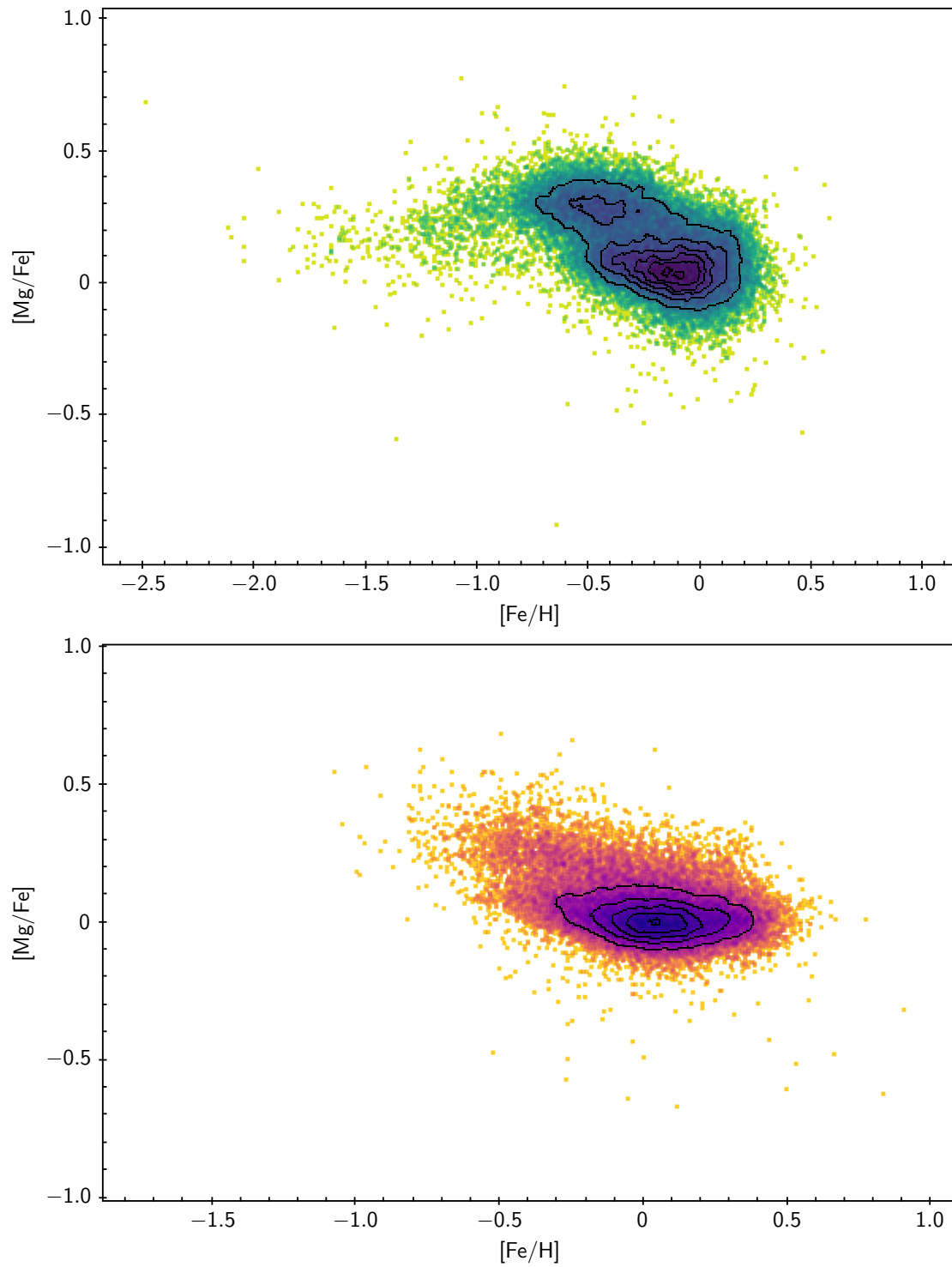


Figura 4.27: La figura mostra l'andamento del magnesio  $[Mg/Fe]$  in funzione della metallicità  $[Fe/H]$  per le stelle giganti (in alto) e nane (in basso) dopo aver rimosso stelle le cui misure erano caratterizzate da errori troppo grandi.

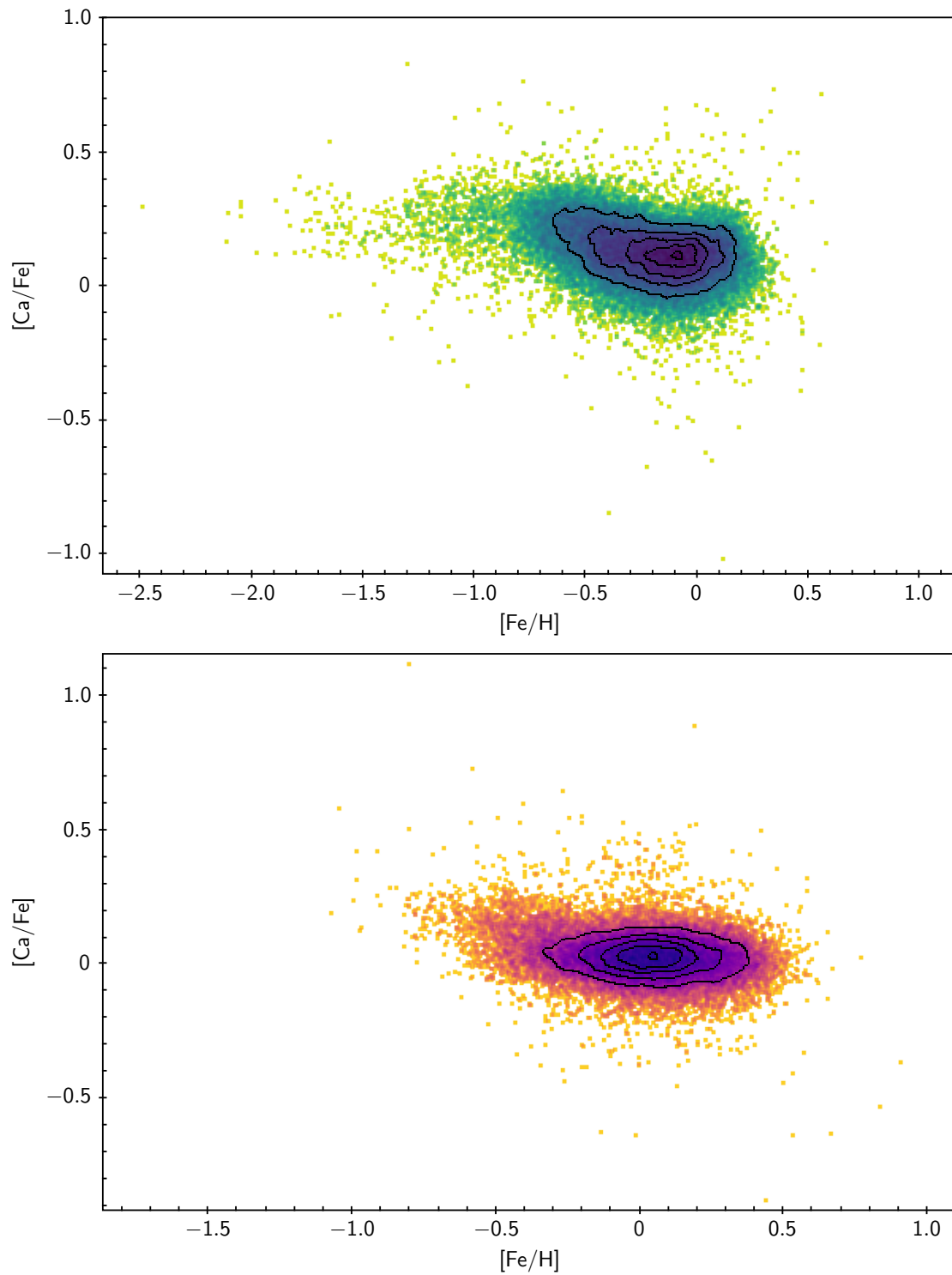


Figura 4.28: La figura mostra l'andamento del calcio  $[Ca/Fe]$  in funzione della metallicità  $[Fe/H]$  per le stelle giganti (in alto) e nane (in basso) dopo aver rimosso stelle le cui misure erano caratterizzate da errori troppo grandi.

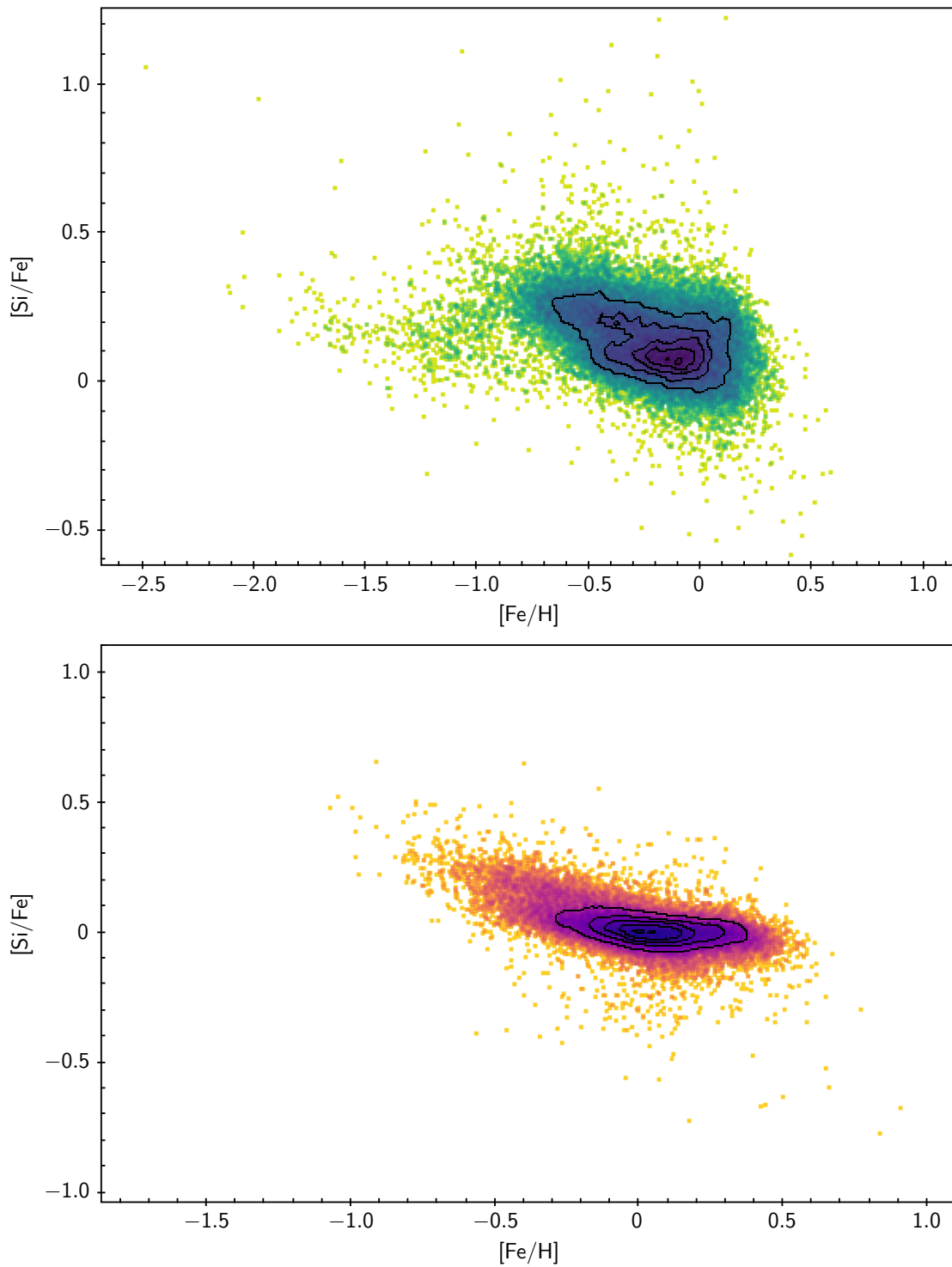


Figura 4.29: La figura mostra l'andamento del silicio  $[Si/Fe]$  in funzione della metallicità  $[Fe/H]$  per le stelle giganti (in alto) e nane (in basso) dopo aver rimosso stelle le cui misure erano caratterizzate da errori troppo grandi.

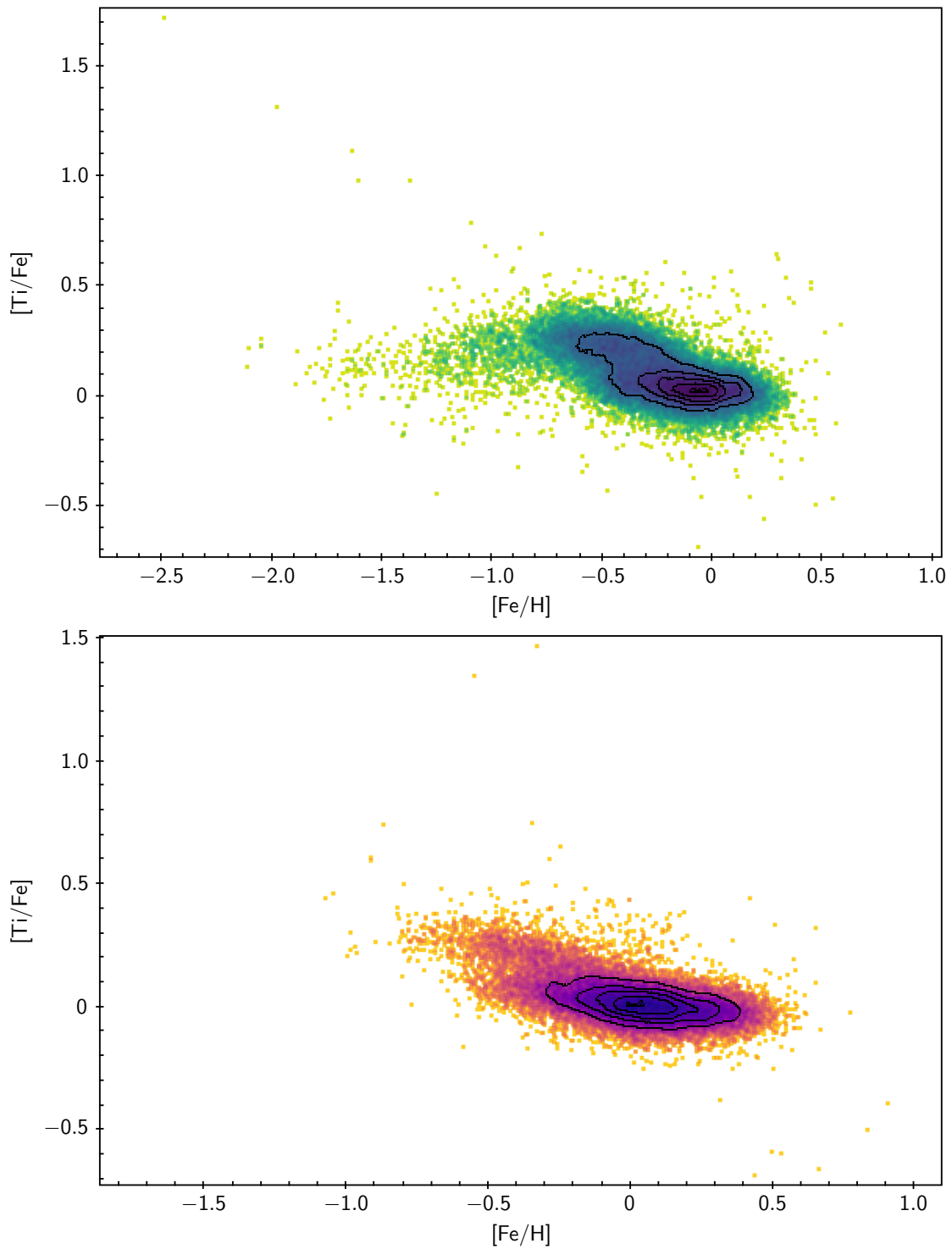


Figura 4.30: La figura mostra l'andamento del titanio  $[Ti/Fe]$  in funzione della metallicità  $[Fe/H]$  per le stelle giganti (in alto) e nane (in basso) dopo aver rimosso stelle le cui misure erano caratterizzate da errori troppo grandi.

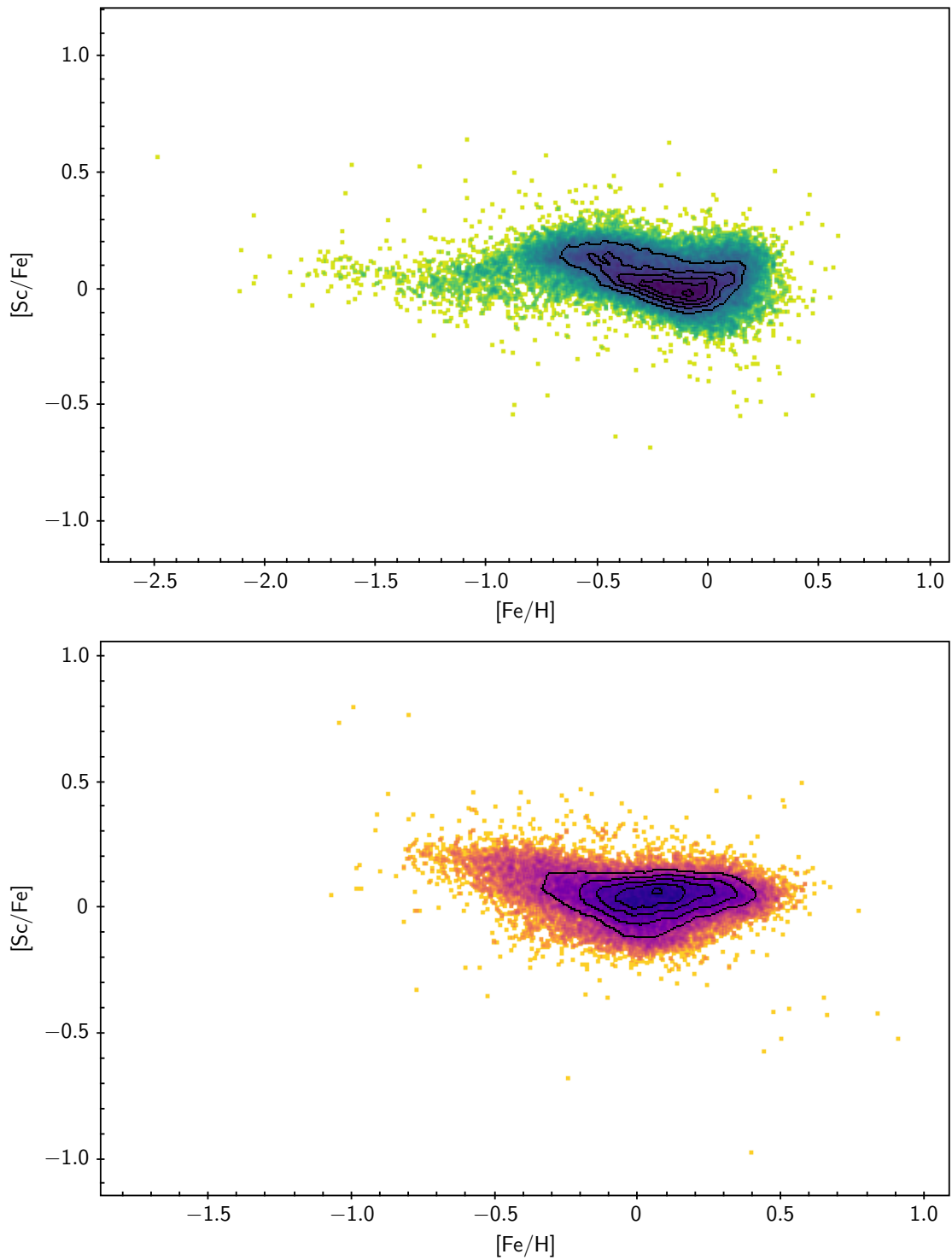


Figura 4.31: La figura mostra l'andamento del scandio  $[Sc/Fe]$  in funzione della metallicità  $[Fe/H]$  per le stelle giganti (in alto) e nane (in basso) dopo aver rimosso stelle le cui misure erano caratterizzate da errori troppo grandi.

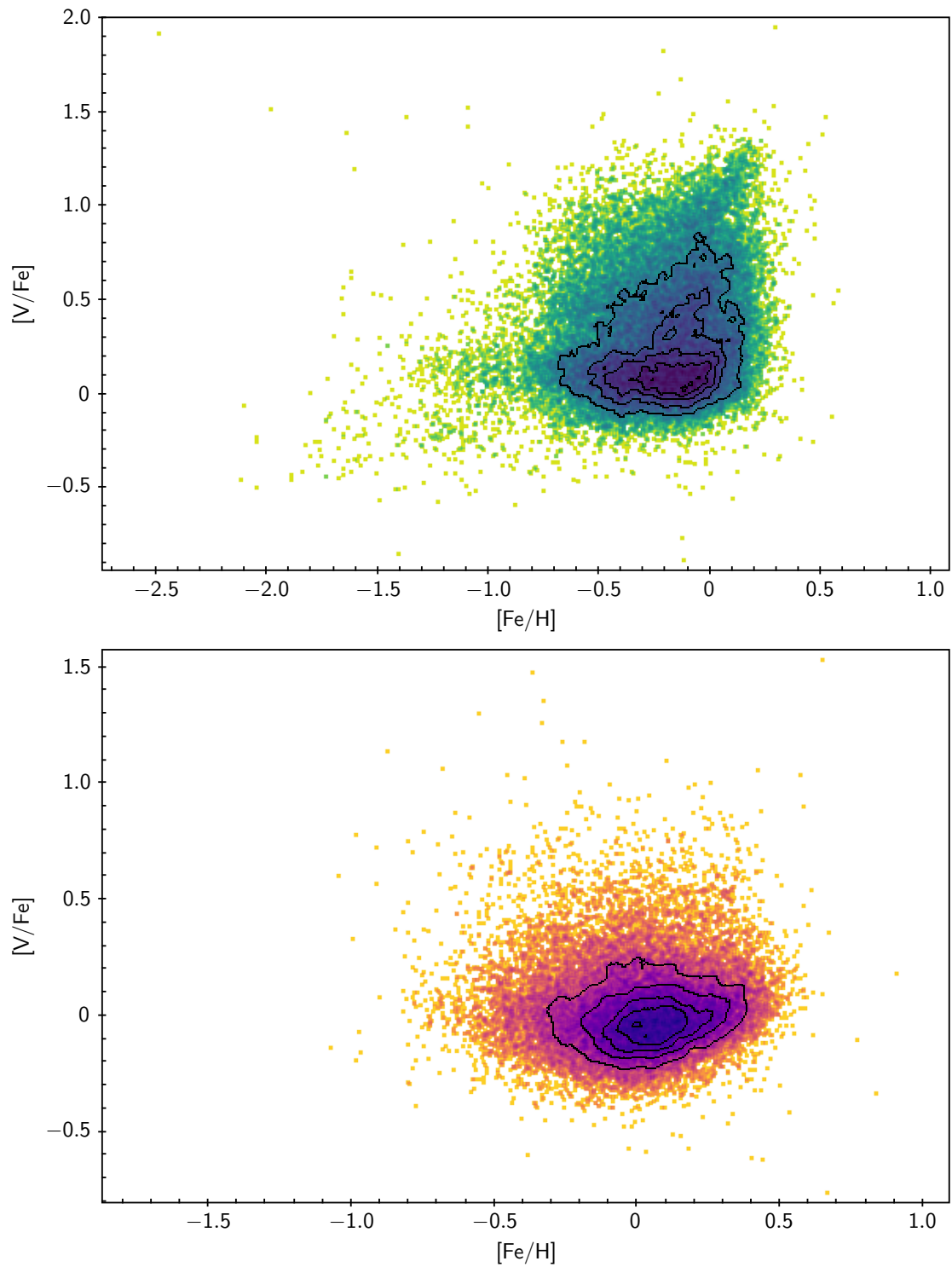


Figura 4.32: La figura mostra l'andamento del vanadio  $[V/Fe]$  in funzione della metallicità  $[Fe/H]$  per le stelle giganti (in alto) e nane (in basso) dopo aver rimosso stelle le cui misure erano caratterizzate da errori troppo grandi.

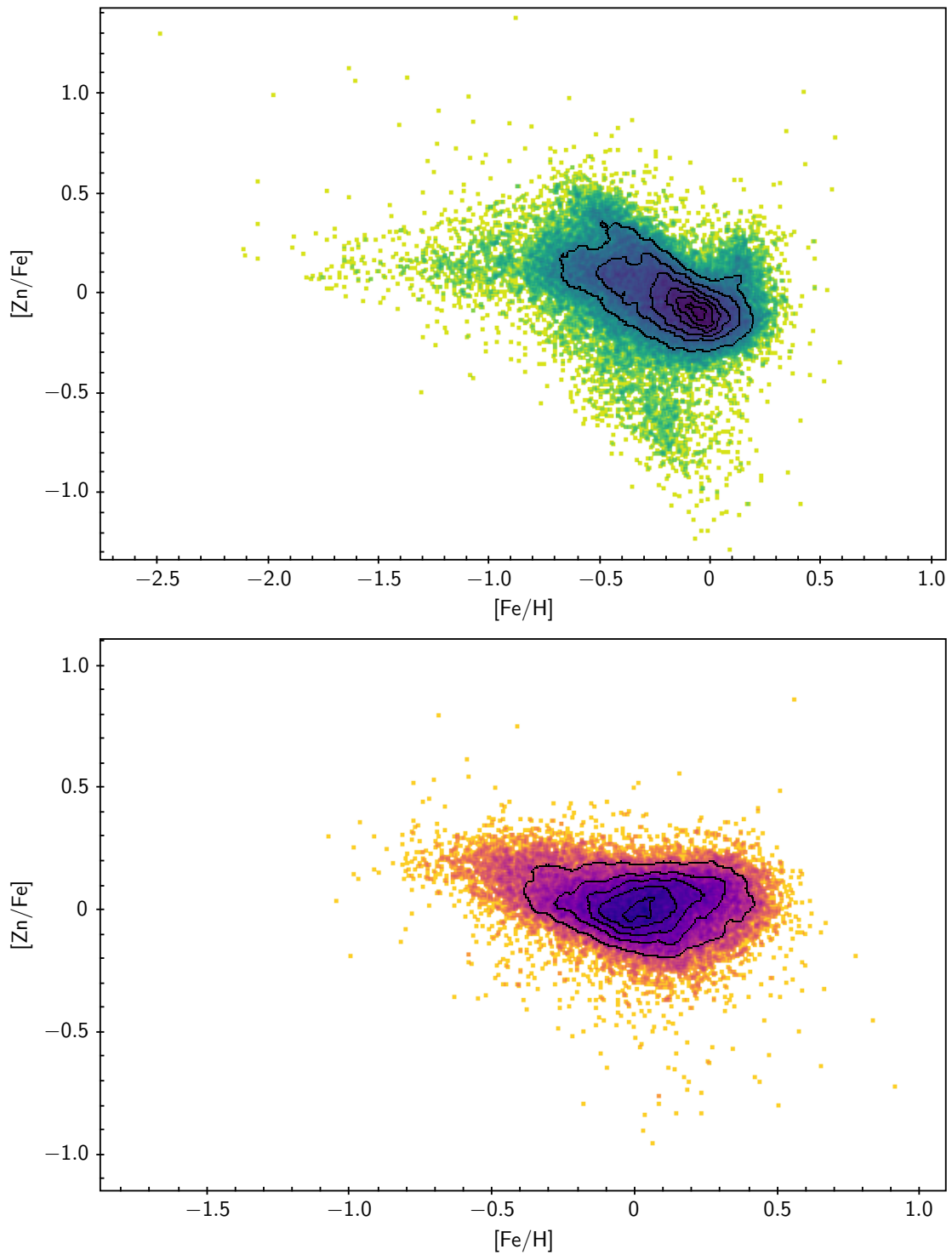


Figura 4.33: La figura mostra l'andamento del zinco  $[Zn/Fe]$  in funzione della metallicità  $[Fe/H]$  per le stelle giganti (in alto) e nane (in basso) dopo aver rimosso stelle le cui misure erano caratterizzate da errori troppo grandi.

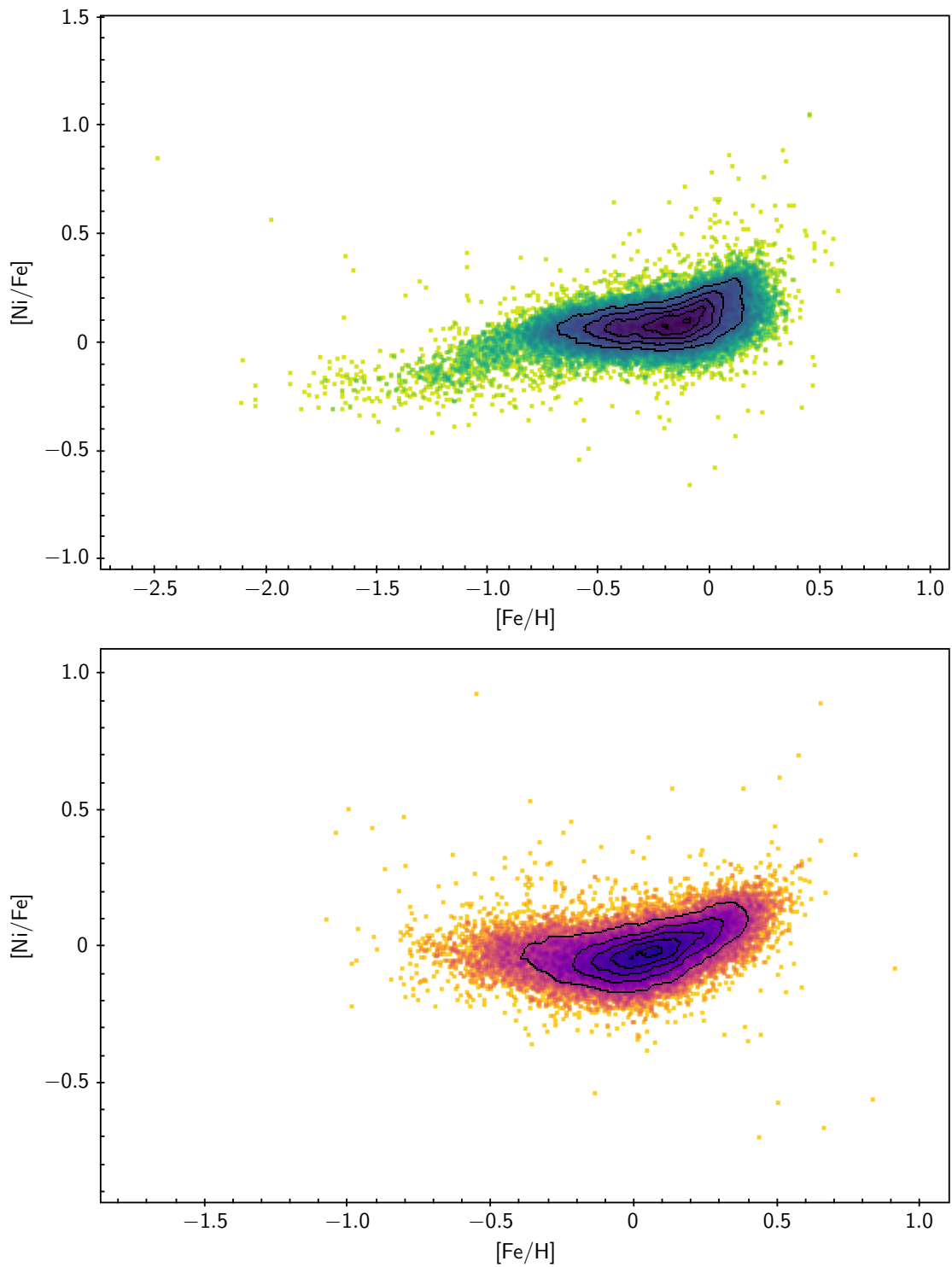


Figura 4.34: La figura mostra l'andamento del nichel  $[\text{Ni}/\text{Fe}]$  in funzione della metallicità  $[\text{Fe}/\text{H}]$  per le stelle giganti (in alto) e nane (in basso) dopo aver rimosso stelle le cui misure erano caratterizzate da errori troppo grandi.

Dall'analisi dei grafici da Figura 4.27 a 4.34 si possono ricavare diverse informazioni. Prima di tutto, si osserva che il campione di stelle nane arriva a metallicità massime di  $[\text{Fe}/\text{H}] = -1.0$ , a differenza invece del campione di stelle giganti che si estende a metallicità più basse. Questo gruppo di stelle giganti metal-poor si osserva in tutte le abbondanze degli elementi e ha un comportamento insolito, dal momento che le abbondanze di queste stelle tendono ad aumentare con la metallicità fino al disco ( $[\text{Fe}/\text{H}] \sim -0.5$ ). In prima approssimazione, il risultato atteso è invece un andamento costante dei rapporti delle abbondanze degli elementi  $\alpha$  con il ferro in funzione della metallicità, fino a che non inizia anche il contributo da parte delle SNe Ia in cui i rapporti di abbondanza iniziano a calare. Prima di questo contributo, a metallicità basse, ci si aspetta un andamento più o meno costante. Questo significa che rapporti di abbondanza ben conosciuti come i rapporti  $[\alpha/\text{Fe}]$  della nostra Galassia, non vengono riprodotti bene per stelle con metallicità  $[\text{Fe}/\text{H}] < -1$  con i dati di GALAH DR3.

Ci si concentra ora sulla possibilità di usare GALAH per identificare possibili stelle accresciute utilizzando come diagnostici gli elementi del picco del ferro (Sc, V, Zn e Ni). Come verrà discusso nella sezione 4.4, è evidente che le misure di  $[\text{V}/\text{Fe}]$  per l'intero campione di stelle presentano problemi sistematici, perciò questi rapporti di abbondanza possono essere considerati inutilizzabili per l'analisi e la ricerca di possibili stelle accresciute. I rapporti  $[\text{Zn}/\text{Fe}]$  potrebbero essere invece interessanti, un'analisi più approfondita verrà eseguita in seguito nel paragrafo 4.4.4. Dall'analisi dei trend con la temperatura (grafici da Figura 4.11 a 4.18) si possono osservare molti elementi con andamenti anomali. Le abbondanze che vengono misurate dipendono anche dai parametri atmosferici, ovvero la profondità di una riga spettrale dipende da quanto è abbondante quel determinato elemento e dai parametri (temperatura e gravità superficiale della stella). La misura di abbondanza chimica che viene derivata è dunque funzione della temperatura che viene messa in input, il che significa che questi due termini correlano tra loro. Se viene sbagliato il parametro, ad esempio la temperatura, viene sbagliata anche la misura dell'abbondanza dell'elemento. Questo significa automaticamente che se si hanno temperature molto precise non si dovrebbero osservare trend nei rapporti di abbondanza in funzione della temperatura effettiva. Gli andamenti inaspettati che si osservano dall'analisi di GALAH DR3 indicano la presenza di misure presumibilmente non precise dei parametri stellari. Inoltre, dai grafici sopracitati si nota che in media il campione di stelle nane non presenta evidenti o importanti problemi, a differenza del campione di stelle giganti in cui c'è quasi sempre una sorta di trend inaspettato.

## 4.4 Problemi noti su abbondanze

GALAH DR3 include stime più accurate e precise rispetto a GALAH DR2 tuttavia, per diversi parametri e abbondanze stellari i mezzi di stima dell'accuratezza sono limitati. GALAH avverte l'utente che le incertezze di accuratezza potrebbero essere sottostimate e anche non complete in termini di dipendenza dai parametri. Ad esempio, per le stelle calde è stata identificata una tendenza sistematica che causa  $T_{eff}$  sempre più sottostimato per le stelle più calde al di sopra di 6000 K. Difatti, è stato osservato anche un andamento anomalo nelle abbondanze degli elementi in funzione del ferro per queste stelle calde, che sono state successivamente rimosse dal campione come detto in precedenza.

### 4.4.1 Stelle di Red Clump

Vi è in corso un disaccordo che riguarda i parametri stellari delle giganti metal-rich, in particolare stelle del Red Clump (RC) metal-rich. L'analisi in GALAH DR2 aveva già prodotto parametri stellari irragionevoli (nel caso di DR2 i  $\log g$  stimati si discostavano significativamente fino a 0.7 dex da quelli attesi dall'astrofotometria, mentre  $T_{eff}$  e  $[Fe/H]$  concordavano con altre stime della letteratura). Per DR3, l'uso dell'astrometria e della fotometria ci consente di ottenere  $\log g$  più accurati. Per le giganti metal-rich ( $[Fe/H] > 0$ ) e le stelle RC, tuttavia, le abbondanze di ferro stimate mostrano una tendenza di  $[Fe/H]$  sottostimato con l'aumento della metallicità. Questo è un indicatore che gli spettri sintetici sono imprecisi per questo specifico tipo di stelle. Come discusso sopra, Jofre et al. (2017) hanno mostrato che per le stelle giganti, una velocità sovrastimata/sottostimata può modificare significativamente le abbondanze misurate di alcune righe, fino a 1.5 dex. Le ragioni per la sottostima di  $[Fe/H]$  sono però diverse e includono anche dati di linee molecolari mancanti/inaffidabili, la sottostima del blending e la normalizzazione errata del continuum. Si ritiene di poter escludere stime errate delle stime  $\log g$ , perché le posizioni fotometriche e spettroscopiche nei diagrammi CMD e Kiel concordano bene. GALAH sottolinea anche il fatto che i parametri stellari per le stelle più giovani ( $< 0.5$  Gyr) sono probabilmente inaffidabili. Ciò è causato dall'impostazione dell'analisi basata sulla selezione di isocrone che favoriscono le stelle più vecchie.

### 4.4.2 Possibili trend sistematici

In DR3, vengono spinti i limiti di ciò che può essere estratto dagli spettri osservati con l'obiettivo di fornire il maggior numero possibile di misure delle abbondanze degli elementi. Questo, tuttavia, non solo spinge i limiti nel decidere quale misura sia affidabile, ma porta a casi complicati in cui le linee si fondono, portando a possibili errori sistematici. Pertanto, GALAH mette in guardia sull'uso di abbondanze elevate (specialmente  $[X/Fe]$  al di sopra di 0.3) per V, Co, Rb, Sr, Zr, Mo, Ru, La, Nd e Sm, poiché si sospetta che questi siano molto probabilmente influenzati da problemi di blending. Nel caso dell'analisi effettuata in questo elaborato, si può notare come sia i grafici dell'andamento del  $[V/Fe]$  in funzione della metallicità  $[Fe/H]$  per stelle giganti e nane (Figura 4.8 e 4.32) che il trend del rapporto di abbondanza  $[V/Fe]$  in funzione della temperatura effettiva (Figura 4.16) mostrano andamenti anomali o con una grande dispersione, dimostrazione del fatto che le misure fatte da GALAH

per l'abbondanza di  $[V/Fe]$  per l'intero campione non possono essere considerate affidabili e risultano quindi inutilizzabili per lo scopo della tesi.

### 4.4.3 Binarie

Un'importante ipotesi delle osservazioni di GALAH è che ogni fibra osserva solo una stella. Si cerca di garantire questo selezionando solo sorgenti puntiformi da 2MASS con una separazione sufficiente da altre sorgenti vicine luminose. La selezione di GALAH non esclude tuttavia stelle binarie.

I mezzi per identificare spettroscopicamente le binarie sono limitati, perché è possibile risolvere binarie solo se le linee di entrambe le componenti vengono sufficientemente separate, il che dipende dallo strumento utilizzato e dalla rotazione stellare. Price-Whelan et al. (2020) trovano 19.635 binarie tra 232.495 sorgenti di APOGEE (8%) e El-Badry et al. (2018b) scoprono che 2645 su 20.142 di target di sequenza principale analizzati (13%), più di una stella contribuisce in modo significativo allo spettro. Sulla base dei risultati di Price-Whelan et al. (2020) ci si può aspettare che almeno il 10% delle stelle con una temperatura  $T_{eff} > 6000$  K (23% di GALAH DR3) e oltre il 40% delle stelle con  $T_{eff} > 7000$  K (3% di GALAH DR3) sono binarie. Le implicazioni di non identificare una stella come binaria possono essere molteplici. In primo luogo la presenza di una binaria cambia la soluzione astrometrica, ciò può falsificare la distanza stimata degli oggetti. In secondo luogo, la fotometria di un sistema binario può deviare significativamente da quella del componente primario, a seconda del contributo del flusso del secondario. In terzo luogo, il contributo del flusso all'interno dello spettro porta a fit inaccurati quando si assume una singola stella, risultando quindi in parametri stellari e abbondanze di elementi imprecisi.

#### 4.4.4 Problema [Zn/Fe]

Un andamento insolito si può osservare nel rapporto di abbondanza [Zn/Fe] con [Fe/H] nel caso del campione delle stelle giganti. Nel grafico di Figura 4.33 si nota un gruppo di stelle giganti con un andamento molto diverso dalla distribuzione delle nane a metallicità  $-0.5 < [Fe/H] < 0.5$ . Si vuole capire se si tratta di un problema della survey e se quindi queste misure non possono essere ritenute affidabili per lo studio dello zinco. Di seguito si cerca di fare un'analisi più dettagliata, selezionando stelle giganti con  $[Zn/Fe] < -0.5$  ed osservando l'andamento con la temperatura di questo gruppo di stelle selezionato con corrispettivi errori sulle misure dello zinco.

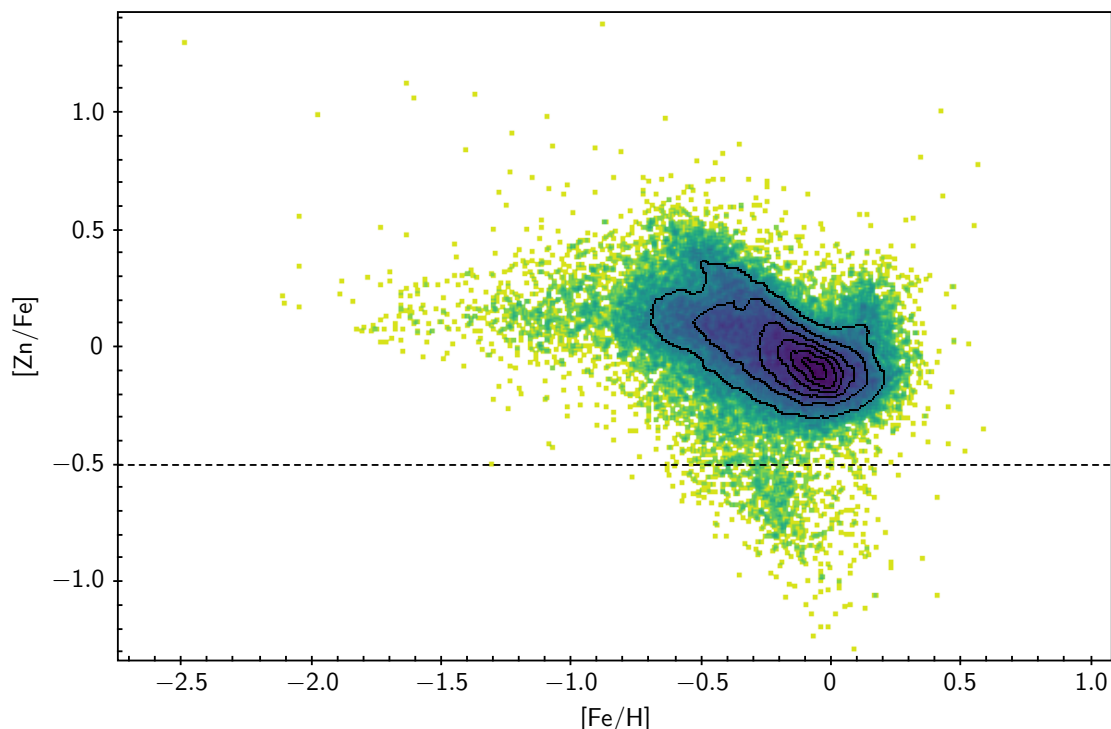


Figura 4.35: La figura mostra l'andamento dello zinco [Zn/Fe] in funzione della metallicità [Fe/H] per le stelle giganti. La linea tratteggiata rappresenta il taglio per la selezione di stelle con  $[Zn/Fe] < -0.5$ .

Dall'analisi del trend della temperatura di Figura 4.17 e 4.36 si può osservare che una parte di stelle del campione delle giganti sono segregate in temperatura, in particolare si tratta di stelle con una temperatura  $T_{eff} < 4500K$ . Se si trattasse effettivamente di stelle accresciute, queste non dovrebbero presentare una segregazione in temperatura come quella che viene osservata. Ci si dovrebbe aspettare in realtà un campione composto da un piccolo numero di stelle, tutte distribuite in maniera più o meno omogenea in temperatura. Il risultato che si può ricavare da questa analisi è che il rapporto di abbondanza [Zn/Fe] misurato da GALAH non è totalmente affidabile, dal momento che è evidente che debba esserci un qualche tipo di trend sistematico sulle stelle più fredde a temperature  $< 4500K$ . Questo andamento si osserva soprattutto nel campione di stelle giganti tuttavia, anche il campione di stelle nane ne è affetto e si osserva un simile raggruppamento sempre per stelle fredde a temperature minori di 4500 K.

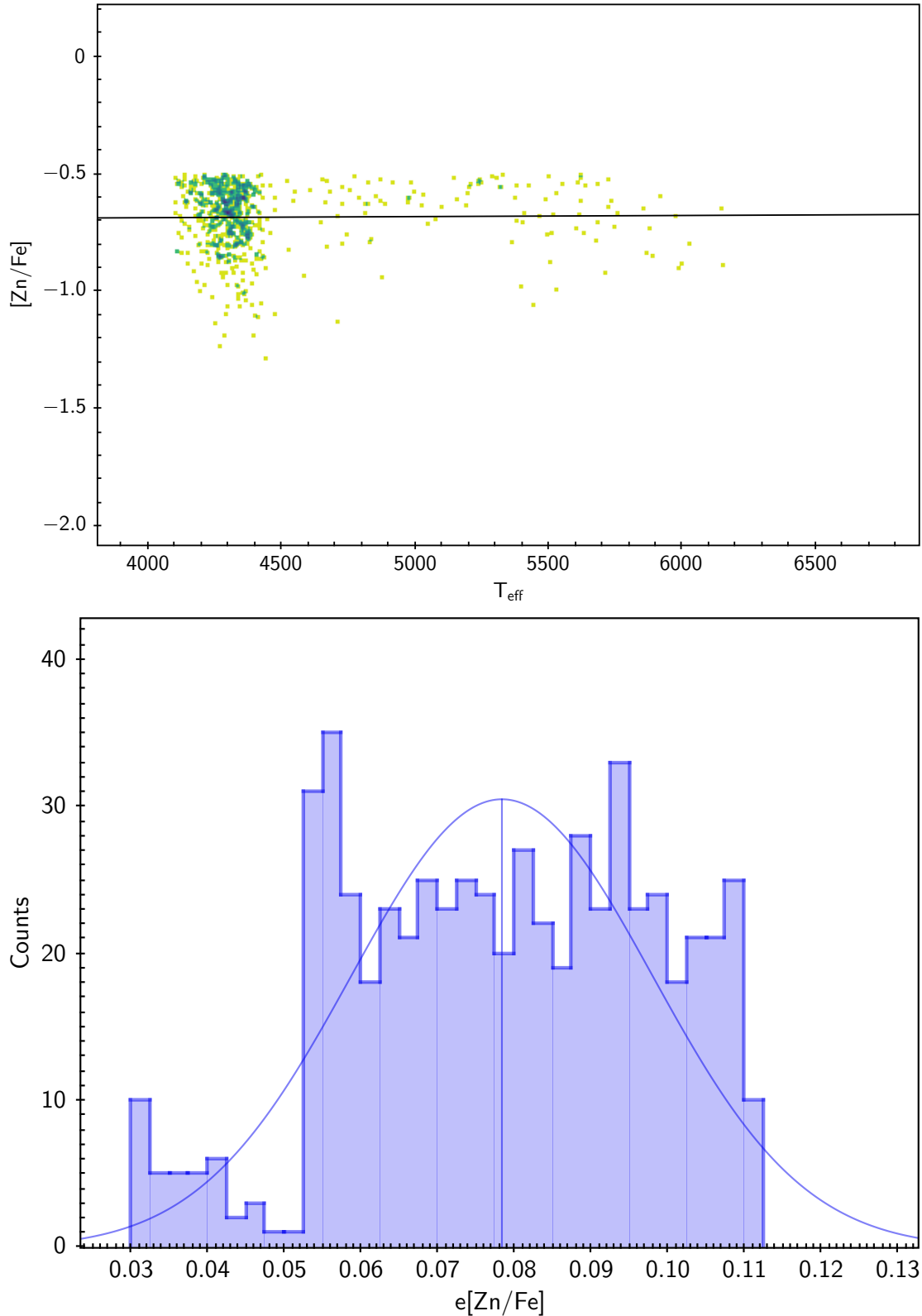


Figura 4.36: In alto il trend del rapporto di abbondanza  $[Zn/Fe]$  in funzione della temperatura effettiva per le stelle giganti con  $[Zn/Fe] < -0.5$ . La linea tratteggiata rappresenta un fit lineare dei dati. In basso l'istogramma della distribuzione dell'errore sul rapporto di abbondanza  $[Zn/Fe]$  per lo stesso gruppo di stelle.

#### 4.4.5 Problema [Sc/Fe]

Analogamente, come fatto per lo zinco, si possono studiare gruppi di stelle con un rapporto [Sc/Fe] interessante. In questo caso, dal grafico di Figura 4.31 si possono osservare poche stelle, in entrambi i campioni di stelle giganti e nane, che si discostano dall'andamento generale. Si tratta di stelle con  $[\text{Sc}/\text{Fe}] < -0.3$ , come fatto precedentemente se ne osserva l'andamento con la temperatura e si discutono le stime degli errori sullo scandio. I risultati di quest'analisi verranno brevemente discussi nel capitolo 5.

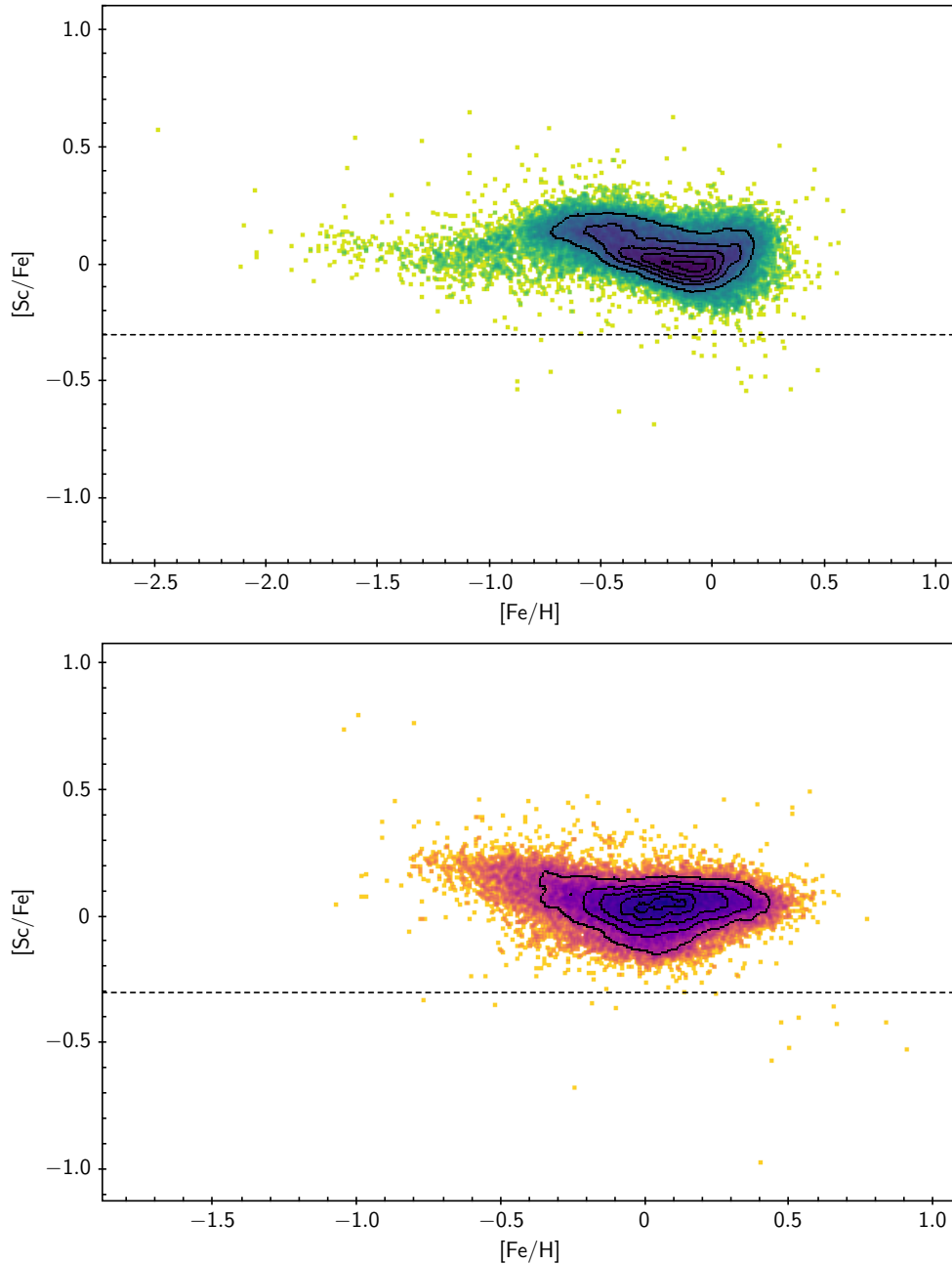


Figura 4.37: La figura mostra l'andamento del scandio [Sc/Fe] in funzione della metallicità [Fe/H] per le stelle giganti e nane. La linea tratteggiata rappresenta il taglio per la selezione di stelle con  $[\text{Sc}/\text{Fe}] < -0.3$ .

Inoltre, dall'analisi dell'errore sul rapporto di abbondanza  $[\text{Sc}/\text{Fe}]$  per le stelle giganti e nane con  $[\text{Sc}/\text{Fe}] < -0.3$  si ricavano le seguenti stime:

Campione di stelle	Errore medio $e[\text{Sc}/\text{Fe}]$	Deviazione standard $e[\text{Sc}/\text{Fe}]$
Stelle giganti	0.032	0.010
Stelle nane	0.040	0.010

Tabella 4.3: Valore medio e standard deviation associati agli errori del rapporto di abbondanza  $[\text{Sc}/\text{Fe}]$  per il campione di stelle giganti e nane.

Si può notare dalla Tabella 4.3 che si tratta di errori piccoli per entrambi i campioni di stelle in esame.

# Capitolo 5

## Conclusioni

In questo capitolo verranno evidenziati i principali risultati ottenuti dall'analisi di GALAH DR3, ricordando che l'obiettivo dell'elaborato è quello di individuare possibili presenze di stelle accresciute all'interno della MW tramite l'analisi dei rapporti di abbondanza degli elementi del picco del ferro in funzione della metallicità. Se all'interno dell'intero campione di stelle si trovano misure dei rapporti di abbondanza che si discostano dalla media generale, si può passare ad un'analisi più approfondita. Laddove quest'ultima analisi non evidenzia nessun tipo di errore sistematico legato a misure poco affidabili, si è allora in presenza di possibili candidati provenienti da galassie esterne accresciute dalla MW a cui dovrà seguire un confronto cinematico per poter confermare che si tratti effettivamente di stelle non nate in situ.

- Il primo risultato trovato in seguito all'analisi della survey GALAH è la presenza di una piccola componente di stelle giganti metal-poor  $[\text{Fe}/\text{H}] < -1.0$  del campione i cui rapporti di abbondanza di tutti gli elementi studiati sembrano discostarsi dal trend atteso per una popolazione di stelle  $\alpha$ -enhanced. Osservando gli andamenti in funzione della metallicità  $[\text{Fe}/\text{H}]$  si nota che i rapporti di abbondanza tendono ad aumentare con  $[\text{Fe}/\text{H}]$ , mentre il risultato atteso dovrebbe essere un andamento piatto/costante alle basse metallicità fino a che non si raggiunge la metallicità del ginocchio in cui inizia il contributo da parte di SNe Ia dove i rapporti di abbondanza tendono a diminuire all'aumentare di  $[\text{Fe}/\text{H}]$ . È da notare che per le stelle giganti con  $[\text{Fe}/\text{H}] < -1$  con rapporti di abbondanze discrepanti, i flag di qualità forniti da GALAH non sono in grado di identificare tali stelle per poterle escludere.
- Il secondo importante risultato riguarda un elemento che può essere utile per l'identificazione di stelle accresciute: lo zinco  $[\text{Zn}/\text{Fe}]$ . Quello che si trova dall'analisi dei rapporti di abbondanza e anche dal trend con la temperatura è un andamento insolito per solo un gruppo di stelle. Si tratta di stelle fredde con una temperatura esclusivamente  $T_{eff} < 4500\text{K}$ , il che può far sospettare ad un problema relativo all'analisi in quella specifica tipologia di stelle. Il motivo per cui non si osserva quest'anomalia anche negli altri rapporti di abbondanza è perché l'abbondanza di Zn è derivata da una sola riga, la quale è molto sensibile alla temperatura. Questa conclusione è anche supportata dall'evidenza che le stelle con un trend che si discosta da quello generale nel diagramma  $[\text{Zn}/\text{Fe}]$  hanno in generale  $[\text{Fe}/\text{H}] > -0.5$  (i.e. metal-rich), il che suggerisce

che i problemi nella determinazione dei parametri stellari discussi in sezione 4.4.1 sono probabilmente alla base della sottostima osservata del rapporto di abbondanza  $[Zn/Fe]$  in questo regime di metallicità. Dunque, le misure ricavate dalla survey GALAH per  $[Zn/Fe]$  non possono essere considerate affidabili per l'analisi con l'obiettivo di identificare possibili stelle accresciute.

- Un altro aspetto interessante emerso nel corso dello studio della survey GALAH riguarda le molte e non trascurabili differenze tra il campione di stelle nane e giganti. Queste differenze portano alla conclusione che si tratti di un vero e proprio problema di analisi da parte di GALAH. Dal momento che si tratta di oggetti con temperature e gravità molto diverse, è estremamente probabile che l'utilizzo di un'unica procedura automatica di analisi per stelle con parametri atmosferici molto diversi fornisce in alcuni casi risultati poco attendibili.

In conclusione, GALAH DR3 mette a disposizione una grande quantità di dati e spettri che sono estremamente utili per studiare la formazione della MW e che hanno portato ad importanti scoperte scientifiche (vedi capitolo 3). Tuttavia, bisogna sottolineare il fatto che l'ultima pubblicazione dati presenta problemi nell'analisi che si riflettono sulla possibilità di un utilizzo preciso di questi dati per la scienza di Archeologia Galattica. In particolare, con DR3 non si è ancora in grado di fare in maniera sicura un'analisi sugli elementi del picco del ferro (Sc, V, Zn, Ni), dei quali soprattutto V e Zn sono gli elementi maggiormente affetti da errori. I rapporti di abbondanza  $[Sc/Fe]$  potrebbero essere gli unici a poter fornire qualche risposta interessante e potrebbe dunque essere fatta un'analisi più approfondita tuttavia, verrebbe a mancare la possibilità di ottenere una conferma dell'analisi dagli altri elementi che risultano inutilizzabili.

Il grande numero di stelle osservate si riflette in un enorme quantitativo di spettri ridotti e analizzati. La pipeline automatica utilizzata all'interno della collaborazione, garantisce che questi spettri siano analizzati in un tempo ragionevole e ad un costo computazionale contenuto. Ovviamente questo approccio, dichiaratamente *time effective* sacrifica in qualche caso l'affidabilità dell'analisi in casi più complicati e/o estremi (stelle molto calde, stelle fredde e binarie).

GALAH DR3 è infatti una survey caratterizzata da un'elevata statistica, in cui è necessario omogeneizzare l'analisi e trovare un unico buon metodo così da poter studiare una grande quantità di stelle in poco tempo. Sulla base di questo, è inevitabile il bisogno di dover scendere a compromessi tra la velocità dell'analisi e riduzione dei dati e la qualità dell'analisi, perciò necessariamente fallisce in alcuni casi. Per gli scopi scientifici di questa tesi sarebbe dunque più opportuno utilizzare un approccio specificatamente inteso all'analisi delle righe degli elementi di interesse (Sc, V, Zn), utilizzando fotometria Gaia per la stima dei parametri (Mucciarelli & Bonifacio 2020; Mucciarelli, Bellazzini, Massari 2021).

# Bibliografia

- [1] Andrews B. H., Weinberg D. H., Schönrich R., Johnson J. A. (2017). *Inflow, Outflow, Yields, and Stellar Population Mixing in Chemical Evolution Models*. The Astrophysical Journal, 835, 224.
- [2] Belokurov V., Erkal D., Evans N. W., Koposov S. E., Deason A. J. (2018). *Co-formation of the disc and the stellar halo*. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 478, Issue 1, Pages 611–619.
- [3] Belokurov V., et al. (2020). *The biggest splash*. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 494, 3880.
- [4] Bennett M. and Bovy J. (2019). *Vertical waves in the solar neighbourhood in Gaia DR2*. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 482, 1417.
- [5] Bland-Hawthorn J., et al. (2019). *The GALAH survey and Gaia DR2: dissecting the stellar disc’s phase space by age, action, chemistry, and location*. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 486, 1167.
- [6] Buder S., et al. (2019). *The GALAH survey: An abundance, age, and kinematic inventory of the solar neighbourhood made with TGAS*. Astronomy and Astrophysics, 624, A19.
- [7] Buder S., et al. (2021). *The GALAH+ survey: Third data release*. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 506, Issue 1, Pages 150–201.
- [8] Chiappini C., Matteucci F., Gratton R. (1997). *The Chemical Evolution of the Galaxy: The Two-Infall Model*. The Astrophysical Journal, 477, 765.
- [9] Duong L., et al. (2018). *The GALAH survey: properties of the Galactic disc(s) in the solar neighbourhood*. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 476, 5216.
- [10] El-Badry K., Rix HW. (2018). *The wide binary fraction of solar-type stars: emergence of metallicity dependence at a  $j$  200 au*. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters, Volume 482, Issue 1, Pages L139–L144.
- [11] Xudong Gao, et al. (2020). *The GALAH survey: a new constraint on cosmological lithium and Galactic lithium evolution from warm dwarf stars*. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters, Volume 497, Issue 1, Pages L30–L34.

- [12] Harris W. E. (1996). *A Catalog of Parameters for Globular Clusters in the Milky Way*. *The Astronomical Journal*, 112, 1487.
- [13] Hayden M.R., et al. (2020). *The GALAH Survey: Chemical Clocks*. arXiv e-prints, arXiv:2011.13745.
- [14] Haywood M., Lehnert M. D., Di Matteo P., Snaith O., Schultheis M., Katz D., Gomez A. (2016). *When the Milky Way turned off the lights: APOGEE provides evidence of star formation quenching in our Galaxy*. *Astronomy and Astrophysics*, 589, A66.
- [15] Helmi A., Babusiaux C., Koppelman H. H., Massari D., Veljanoski J., Brown A. G. A. (2018). *The merger that led to the formation of the Milky Way's inner stellar halo and thick disk*. *Nature*, 563, 85.
- [16] Kobayashi C., Nomoto K. (2009). *The Role of Type Ia Supernovae in Chemical Evolution. I. Lifetime of Type Ia Supernovae and Metallicity Effect*. *The Astrophysical Journal*, 707, 1466.
- [17] Kobayashi C., Karakas A. I., Lugaro M. (2020). *The Origin of Elements from Carbon to Uranium*. *The Astrophysical Journal*, 900, 179.
- [18] Jofré P., Das P., Bertranpetit J., Foley R. (2017). *Cosmic phylogeny: reconstructing the chemical history of the solar neighbourhood with an evolutionary tree*. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 467, Issue 1, Pages 1140–1153.
- [19] Lewis I. J., et al. (2002). *The Anglo-Australian Observatory 2dF facility*. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 333, Issue 2, Pages 279–298.
- [20] Licquia T. C. and Newman J. A. (2015). *Improved Estimates of the Milky Way's Stellar Mass and Star Formation Rate from Hierarchical Bayesian Meta-Analysis*. *The Astrophysical Journal*, 806, 96.
- [21] Mackereth J. T., et al. (2019). *The origin of accreted stellar halo populations in the Milky Way using APOGEE, Gaia, and the EAGLE simulations*. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 482, Issue 3, Pages 3426–3442.
- [22] Mackereth J. T., Bovy J. (2020). *Weighing the stellar constituents of the galactic halo with APOGEE red giant stars*. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 492, 3631.
- [23] Matsuno T., Hirai Y., Tarumi Y., Hotokezaka K., Tanaka M., and Helmi A. (2021). *R-process enhancements of Gaia-Enceladus in GALAH DR3*. *Astronomy and Astrophysics*, 650, A110.
- [24] Matteucci F., Brocato E. (1990). *Metallicity Distribution and Abundance Ratios in the Stars of the Galactic Bulge*. *The Astrophysical Journal*, 365, 539.

- [25] Minelli A., Mucciarelli A., Massari D., Bellazzini M., Romano D., Ferraro F. R. (2021). *A New Set of Chisels for Galactic Archeology: Sc, V, and Zn as Taggers of Accreted Globular Clusters*. The Astrophysical Journal, 918, L32.
- [26] Molaro P., Cescutti G., Fu X. (2020). *Lithium and beryllium in the Gaia-Enceladus galaxy*. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 496, Issue 3, Pages 2902–2909.
- [27] Mucciarelli A., Bellazzini M., Massari D. (2021). *Exploiting the Gaia EDR3 photometry to derive stellar temperatures*. Astronomy and Astrophysics, 653, A90.
- [28] Mucciarelli A., Bonifacio P. (2020). *Facing problems in the determination of stellar temperatures and gravities: Galactic globular clusters*. Astronomy and Astrophysics, 640, A87.
- [29] Mucciarelli A., Massari D., Minelli A., Romano D., Bellazzini M., Ferraro F. R., Matteucci F., Origlia L. (2021). *A relic from a past merger event in the Large Magellanic Cloud*. Nature Astronomy, 5, 1247.
- [30] Posti L., Helmi A. (2019). *Mass and shape of the Milky Way’s dark matter halo with globular clusters from Gaia and Hubble*. Astronomy and Astrophysics, 621, A56.
- [31] Price-Whelan, A.M., et al. (2020). *Close Binary Companions to APOGEE DR16 Stars: 20,000 Binary-star Systems Across the Color-Magnitude Diagram*. The Astrophysical Journal, 895, 2.
- [32] Quillen A. C., et al. (2018). *The GALAH survey: stellar streams and how stellar velocity distributions vary with Galactic longitude, hemisphere, and metallicity*. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 478, Issue 1, Pages 228–254.
- [33] Schönrich R., Binney J. (2009). *Chemical evolution with radial mixing*. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 396, 203.
- [34] Sharma S., et al. (2021). *Fundamental relations for the velocity dispersion of stars in the Milky Way*. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 506, 1761.
- [35] Sharma S. et al. (2022). *The GALAH Survey: dependence of elemental abundances on age and metallicity for stars in the Galactic disc*. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 510, 734.
- [36] Sheinis A. I., et al. (2015). *First light results from the High Efficiency and Resolution Multi-Element Spectrograph at the Anglo-Australian Telescope*. Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems, Vol. 1, Issue 3, 035002.
- [37] Simpson J.D., et al. (2021). *The GALAH survey: accreted stars also inhabit the Spite plateau*. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 507, 43.
- [38] van Dokkum, P.G. (2001). *Cosmic-Ray Rejection by Laplacian Edge Detection*. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 113, 1420.