

Laura Magrini¹, Giada Casali²

L'età di una stella rivelata dalla sua composizione chimica

Stellar age revealed by chemical composition

¹ INAF-Osservatorio Astrofisico di Arcetri

² Dipartimento di Fisica e Astronomia, Università degli Studi di Firenze

Riassunto. Le grandi *surveys* spettroscopiche forniscono uno straordinario insieme di dati utile per svelare i meccanismi di formazione ed evoluzione della Via Lattea, in cui la determinazione dell'età delle stelle gioca un ruolo fondamentale. In questo articolo presentiamo un metodo innovativo per ricavare le età stellari dalla misura del rapporto Carbonio/Azoto nelle atmosfere stellari. I risultati di questo studio, applicato al disco della Via Lattea, hanno messo in evidenza la differenza di età tra il disco sottile e il disco spesso della nostra Galassia.

Parole chiave. Età stellari, abbondanze chimiche, Via Lattea, ammassi di stelle.

Un importante passo avanti per studiare come la nostra Galassia, la Via Lattea, si è formata e si è evoluta fino alla sua struttura attuale è la determinazione delle età delle singole stelle che la compongono. La misura delle età stellari è, tuttavia, uno dei problemi più difficili dell'astrofisica. Le tecniche più comunemente utilizzate si basano sul confronto tra varie quantità osservabili e i risultati dei modelli di evoluzione stellare, sia utilizzando quantità osservabili direttamente, come magnitudini e colori, sia quantità derivate, come gravità superficiali e temperature efficaci. Questi metodi forniscono risultati migliori nelle regioni in cui

Abstract: High-resolution spectroscopic surveys provide an extraordinary dataset on the processes of the formation and evolution of our galaxy, in which the determination of the ages of individual stars plays a major role. We present here a method for measuring stellar ages based on the carbon/nitrogen abundance ratio in stellar atmospheres. We apply this relationship to the disc of the Milky Way, finding a clear age difference between the thin and thick discs of our galaxy.

Keywords. Stellar ages, chemical abundances, galaxy, star clusters.

An important step forward to study how our galaxy formed and evolved to its present-day structure is the determination of the ages of individual stars. Indeed, measuring stellar ages is one of the most difficult tasks of astrophysics. The most commonly used techniques are based on the comparison of observable quantities with the results of stellar evolution models, using



le isocrone (luoghi di uguale età stellare nel diagramma evolutivo) hanno una buona separazione, principalmente vicino al *turn-off* della sequenza principale. Purtroppo le isocrone si sovrappongono in corrispondenza del ramo delle giganti rosse, e quindi si hanno grandi incertezze sulle età derivate per queste stelle.

Fortunatamente, oltre alla procedura classica sopra descritta, esistono diversi metodi alternativi basati sulla relazione tra velocità di rotazione, attività, periodo di pulsazione, ecc. con l'età della stella. Negli ultimi anni, anche le proprietà chimiche sono state utilizzate per determinare le età stellari, tra cui i rapporti di abbondanze dipendenti dall'evoluzione chimica galattica, ad esempio i rapporti tra gli elementi Y, Mg, Al, Ba e Fe, e quelli relativi all'evoluzione stellare, come C e N (per brevità [C/N]).

Il valore di [C/N] nelle fotosfere delle stelle evolute è correlato alla loro massa iniziale. Entrambi gli elementi vengono processati attraverso il ciclo CNO nelle fasi evolutive precedenti e portati in superficie dalla penetrazione dell'involuppo convettivo verso l'interno. Come conseguenza di tale mescolamento, l'atmosfera mostra una variazione nella composizione chimica, cambiando in particolare il rapporto [C/N]. Poiché la penetrazione della convezione nelle regioni interne, e quindi la quantità di C e N portata verso la fotosfera stellare, dipendono dalla massa stellare, il rapporto [C/N] può essere usato per stimare l'età stellare, in quanto età e massa sono direttamente correlate per stelle nella stessa fase evolutiva.

Nel nostro lavoro abbiamo ottenuto una relazione empirica tra il rapporto [C/N] e l'età stellare utilizzando gli ammassi aperti come calibratori. L'età degli ammassi aperti, gruppi chimicamente omogenei di stelle coeve, può essere mi-

quantities that are both directly observable, such as stellar magnitudes and colors, and derived, such as surface gravities and effective temperatures. These methods provide better results in regions where isochrones (loci of equal stellar age in the evolutionary diagram) have good separation, usually close to the main sequence turn-off. Unfortunately, isochrones of different ages almost overlap on the red giant branch, resulting in large uncertainties in age determination.

In addition to the classical procedure described above, there are several alternative methods based on the relationship of stellar properties – such as rotational velocity, activity, and pulsation period – to stellar age. Over the last few years, chemical properties have also been used to infer stellar ages, among them ratios of elements dependent on galactic chemical evolution, such as Y, Mg, Al, Ba and Fe, and those related to stellar evolution, such as the C/N ratio ([C/N]).

The value of [C/N] in the photospheres of evolved stars is related to their initial mass. Carbon and nitrogen are processed through the CNO-cycle in previous evolutionary phases and carried towards the surface by the penetration of the convective stellar interior. As a result of this convective mixing, the stellar atmosphere shows variation in its chemical composition, changing in particular the abundance ratio [C/N]. Since the penetration of the convection in the inner regions, and therefore the abundances of C and N brought up to the stellar surface, depends on stellar mass, the [C/N] ratio can be used to estimate stellar ages.

In the present work, we calibrated an empirical relation between the [C/N] ratio and stellar age using open stellar clusters, a group of coeval and chemical homogeneous stars. In fact,

surata con una precisione molto più elevata di quella delle stelle di campo. Infatti le osservazioni di molte stelle appartenenti allo stesso ammasso ci permettono di campionare la sua sequenza in un diagramma evolutivo e quindi di determinarne, confrontando con modelli teorici, l'età. Pertanto, possono essere utilizzati come calibratori per identificare le relazioni tra età ed altre proprietà stellari.

In particolare abbiamo misurato l'abbondanza media di $[C/N]$ nelle stelle evolute in ammassi aperti sia nella *survey* Gaia-ESO che in APOGEE. Usando l'età degli ammassi determinate dal confronto con le isocrone, abbiamo quindi definito una relazione tra le età e $[C/N]$ (Fig. 1). Abbiamo poi applicato tale relazione ad un campione di circa 67.000 giganti di campo osservate in Gaia-ESO e APOGEE. Con la nostra relazione, possiamo studiare statisticamente le differenze di età per le popolazioni del disco sottile e del disco spesso, le due componenti stellari del disco della nostra Galassia.

In Fig. 2 mostriamo il rapporto tra i cosiddetti elementi alfa (O, Mg, Si, S, Ca e Ti) rispetto al Fe (per brevità $[\alpha/Fe]$) in funzione della metallicità (indicata con $[Fe/H]$) per stelle di cui possiamo stimare l'età (mostrata come scala di colore). Questo diagramma è utile per separare le due componenti del disco stellare Galattico: il disco sottile - caratterizzato da $[\alpha/Fe]$ inferiore e metallicità $-0.8 < [Fe/H] < +0.4$, e il disco spesso, con valori più alti di $[\alpha/Fe]$ e in genere metallicità inferiore. Con la nostra determinazione di età, possiamo notare che le due componenti sono ben separate anche in età: il disco sottile contiene stelle con età da 0 a circa 8 Gyr, mentre il disco spesso è formato solo da stelle vecchie. Questo risultato fornisce supporto all'ipotesi che il disco spesso si sia formato circa

the ages of open clusters can be measured with much higher accuracy than those of field stars, since in each cluster we can observe many member stars with different masses and which thus cover the whole cluster sequence in an evolutionary diagram. As a result, open clusters can be used as calibrators to identify the relationship between age and other stellar properties.

In particular, we measured the average $[C/N]$ in evolved stars in open clusters in both Gaia-ESO and APOGEE surveys. Using the ages of clusters which were determined by comparison with the isochrones, we defined the relationship between cluster ages and their $[C/N]$ (Fig. 1). We then applied this relationship to a sample of about 67,000 giants observed in the Gaia-ESO and APOGEE surveys. With our determination of stellar ages, we can investigate the age trends in the thin- and thick-disc stellar populations.

In Fig. 2 we show the ratio of the so-called alpha-elements (O, Mg, Si, S, Ca and Ti) vs. Fe (or $[\alpha/Fe]$) as a function of the stellar metallicity (indicated by $[Fe/H]$) of stars whose age we can estimate (shown by the color-scale). This diagram is useful for separating the two components of the stellar disc of the Milky Way: the thin disc, characterized by a lower $[\alpha/Fe]$ and by metallicities ranging from $-0.8 < [Fe/H] < +0.4$, and the thick disc, with higher $[\alpha/Fe]$ values. With our age determination, the two components are also well separated in age: the thin disc contains stars with ages from 0 to about 8 Gyr, while the thick disc is formed only by old stars. This result provides support for the hypothesis that the thick disc was created about 10 billion years ago by the merger of a galaxy called Gaia-Encelado with our galaxy.

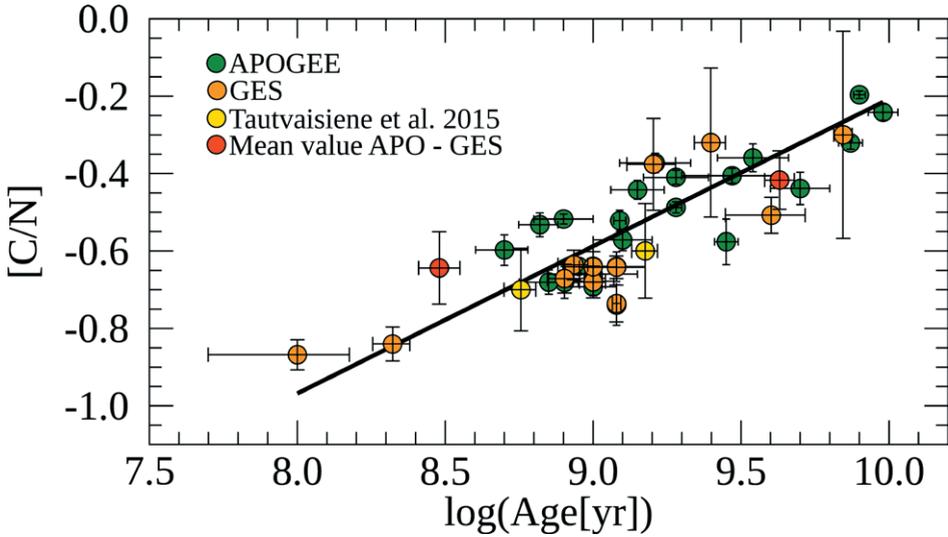


Figura 1. Rapporti medi di [C/N] negli ammassi stellari in funzione del logaritmo dell'età in anni per Gaia-ESO (cerchietti arancioni) e APOGEE (cerchietti verdi). Il cerchietto rosso rappresenta il valore medio [C/N] per gli ammassi NGC 6705 e M67, osservati in entrambe le *surveys*. La retta è il *fit* lineare dei dati.

Figure 1. Average [C/N] ratios of cluster member stars as a function of $\log(\text{Age}[\text{yr}])$ for the Gaia-ESO (orange circles) and the APOGEE (green circles) surveys. The red circle represents the mean [C/N] value for NGC 6705 and M67. The straight line is the linear weighted least-square fit of the data.

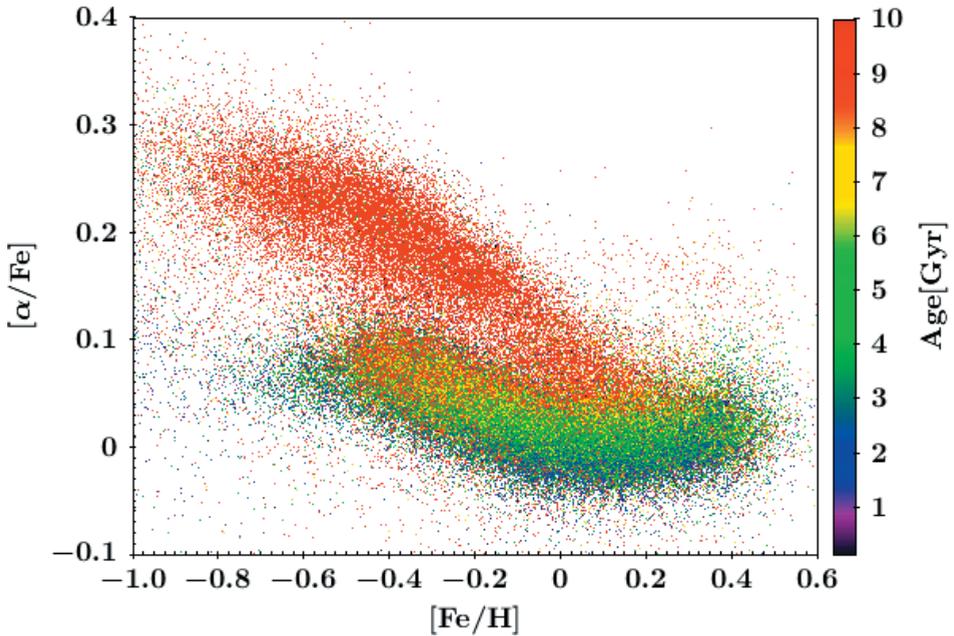


Figura 2. Rapporti di [alfa/Fe] in funzione di [Fe/H] per le stelle di campo nei campioni di Gaia-ESO e di APOGEE. Le età delle stelle sono identificate con la scala di colore.

Figure 2. [alpha/Fe] as a function of [Fe/H] for field stars in the APOGEE and Gaia-ESO samples. The stars are color-coded by age.

10 miliardi di anni fa da un *merger* tra una galassia denominata Gaia-Encelado e la nostra Galassia.

Laura Magrini è ricercatrice dal 2012 presso l'INAF-Osservatorio Astrofisico di Arcetri. È un'esperta di spettroscopia ad alta risoluzione (stellare e nebulare) nella Via Lattea e nelle galassie vicine e autrice di circa 130 articoli.

Giada Casali è dottoranda presso l'Università degli Studi di Firenze. Laureata in Fisica presso l'Università degli Studi di Pisa, si occupa attualmente di traccianti chimici delle età stellari.

Laura Magrini has been a staff researcher at the INAF-Osservatorio Astrofisico di Arcetri since 2012. She is an expert in high-resolution spectroscopy of resolved populations (stellar and nebular) in the Milky Way and beyond. She is author of about 130 refereed papers.

Giada Casali is a PhD student at the Università degli Studi di Firenze. Since taking her degree in Physics at the Università degli Studi di Pisa, she has been working on chemical clocks for stellar populations.