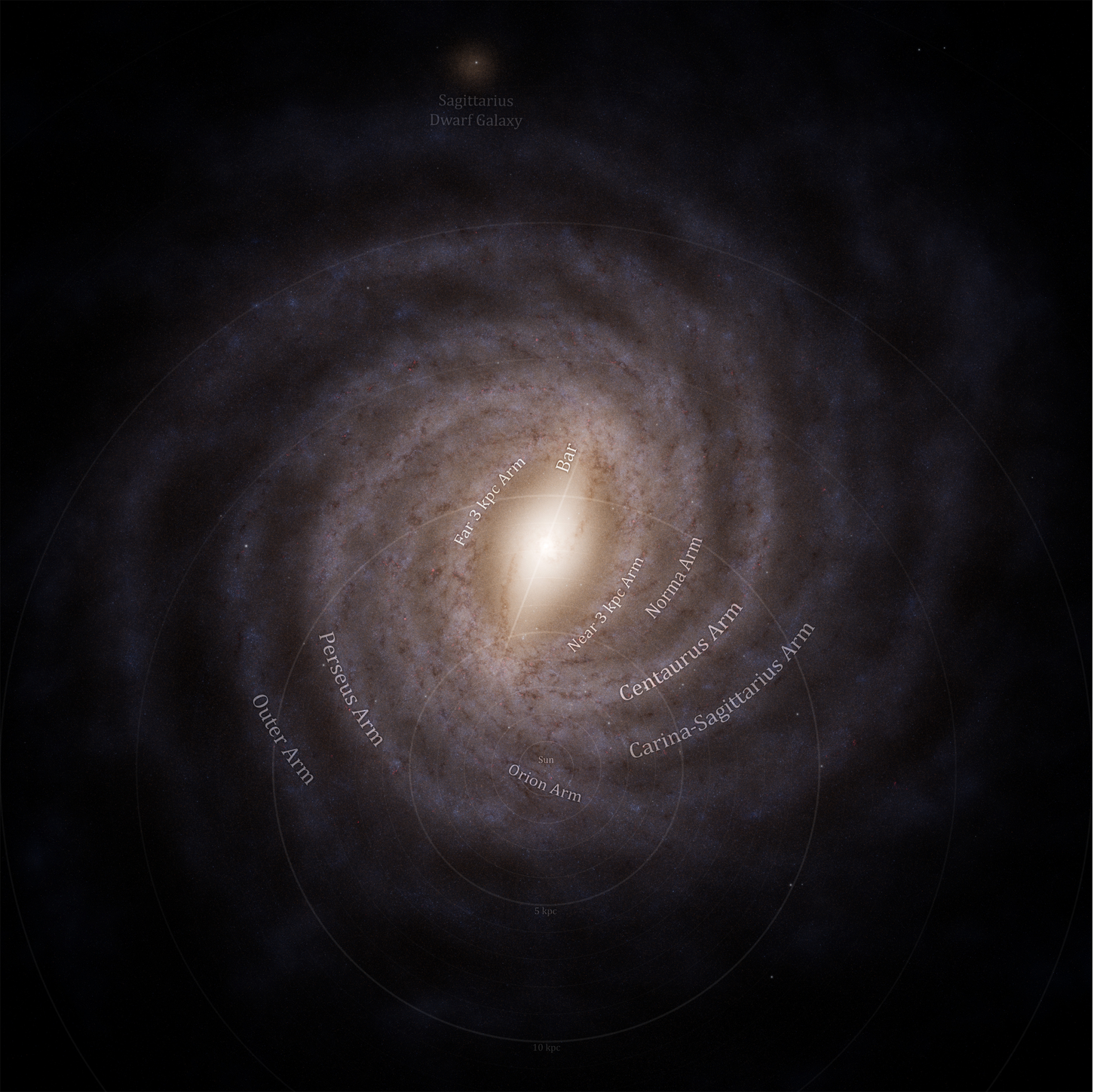


Archeologia Galattica

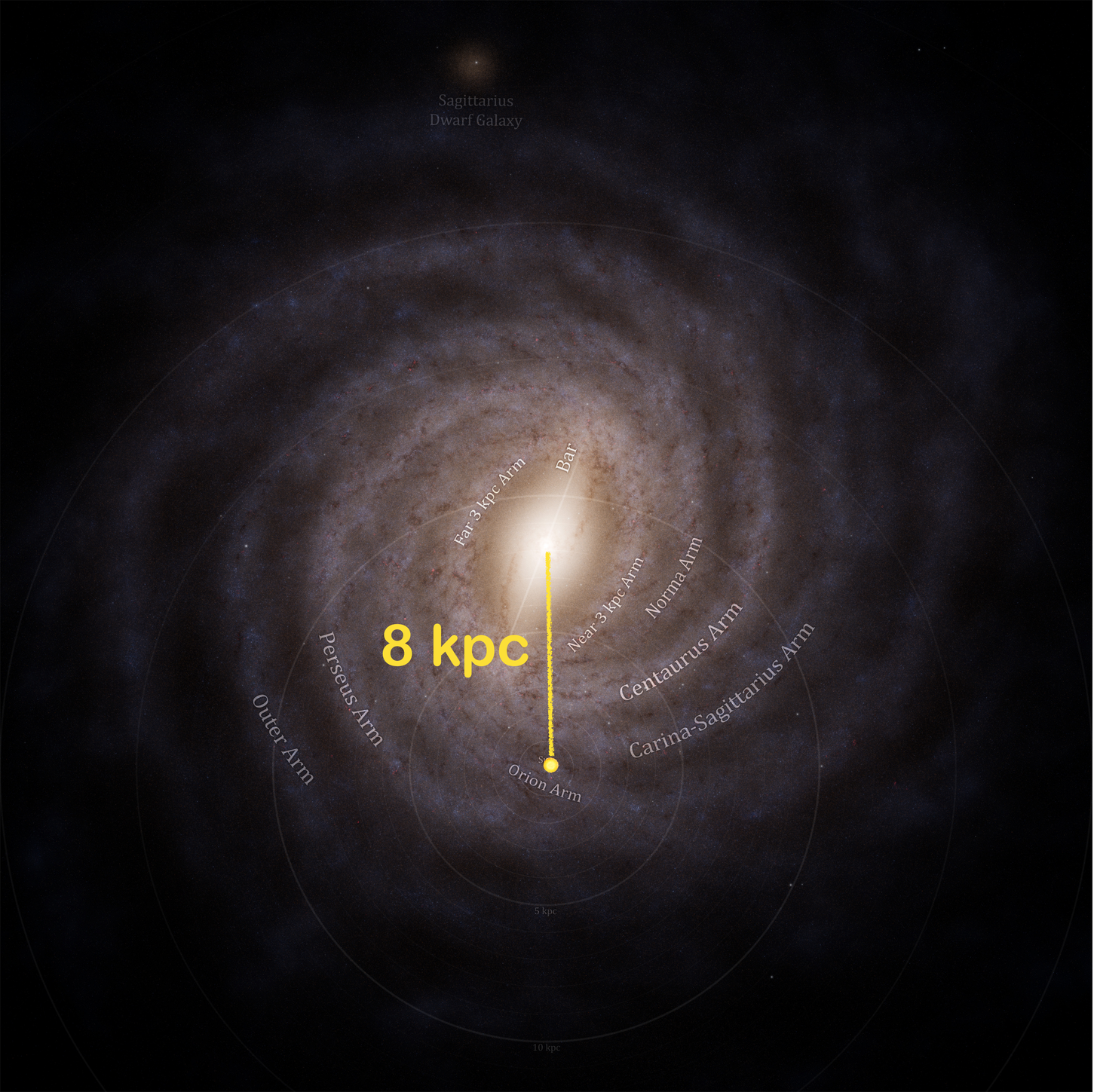
Le stelle come fossili viventi per ricostruire 13.7 miliardi di anni di storia della Galassia

Donatella Romano

INAF, Osservatorio di Astrofisica e Scienza dello Spazio di Bologna

INAF
ISTITUTO NAZIONALE
DI ASTROFISICA

Rappresentazione artistica della nostra galassia, la Via Lattea, basata sui dati del telescopio spaziale Gaia dell'ESA (Crediti: ESA/Gaia/DPAC, Stefan Payne-Wardenaar – ESA Standard Licence)



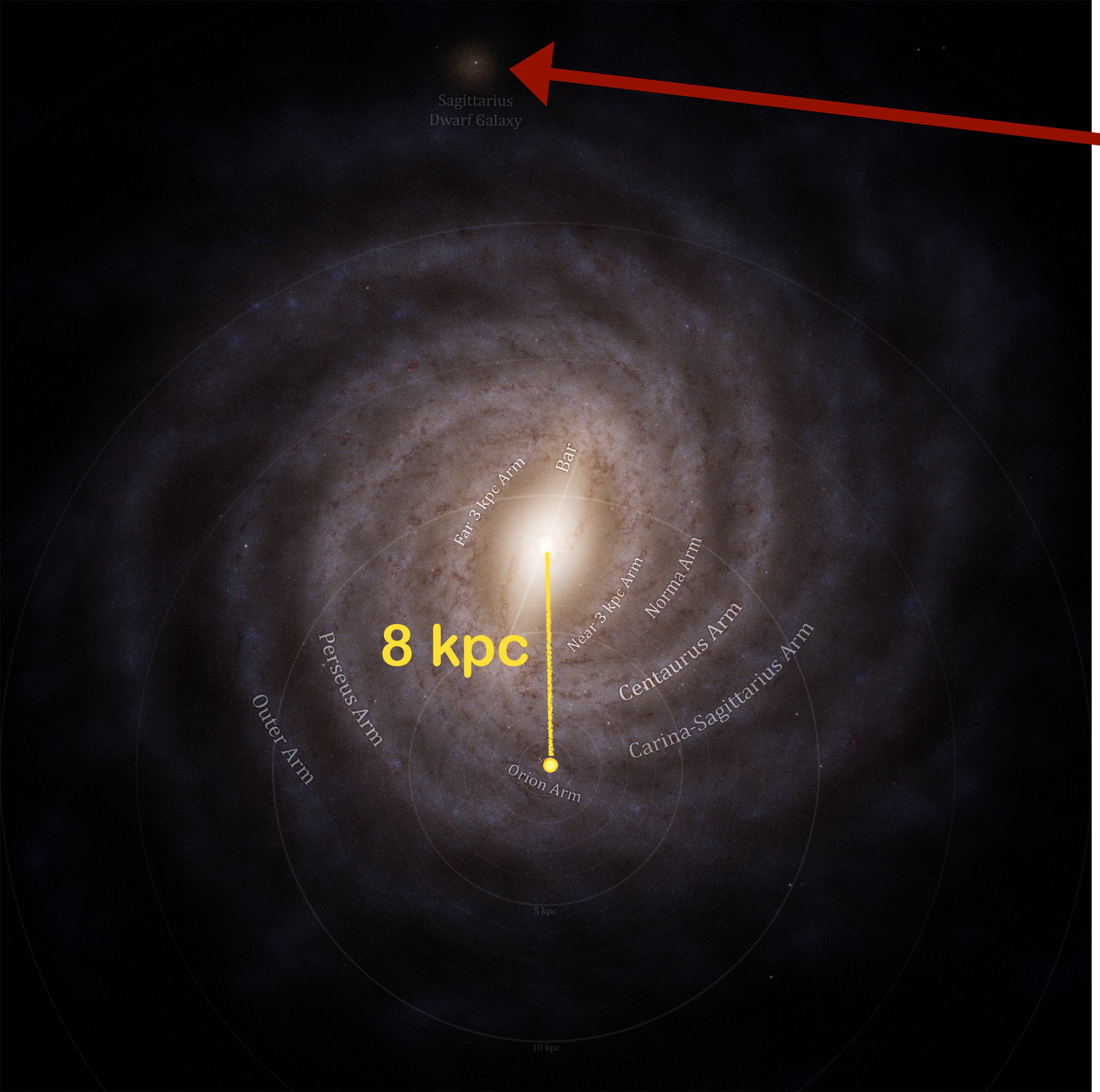
8 kpc = 26100 anni luce

1 kpc = 1000 pc

1 pc = $3{,}086 \times 10^{18}$ cm

1 anno luce = $9{,}46 \times 10^{17}$ cm

Rappresentazione artistica della nostra galassia, la Via Lattea, basata sui dati del telescopio spaziale Gaia dell'ESA (Crediti: ESA/Gaia/DPAC, Stefan Payne-Wardenaar – ESA Standard Licence)



Sgr dSph

8 kpc = 26100 anni luce

1 kpc = 1000 pc

1 pc = 3,086 × 10^{18} cm

1 anno luce = 9,46 × 10^{17} cm

Rappresentazione artistica della nostra galassia, la Via Lattea, basata sui dati del telescopio spaziale Gaia dell'ESA (Crediti: ESA/Gaia/DPAC, Stefan Payne-Wardenaar – ESA Standard Licence)



Filmato disponibile al seguente indirizzo: https://www.youtube.com/watch?v=i2qR72eXbok

Crediti: David R. Law (Dunlap Institute, University of Toronto. Gabriel Pérez Díaz, SMM (IAC). Licenza Creative Commons

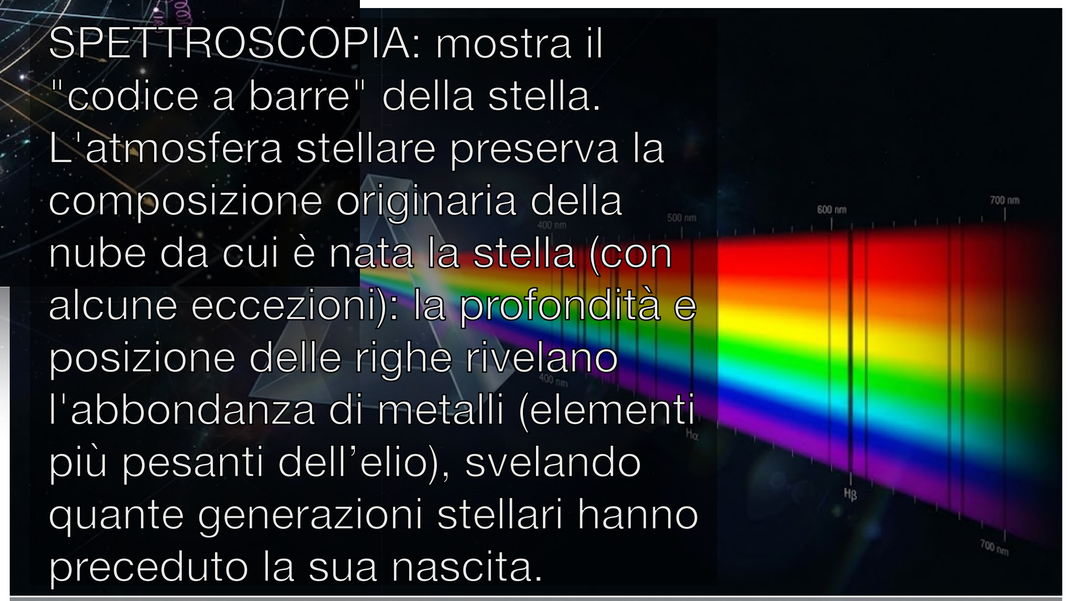
I tre pilastri dell’indagine:



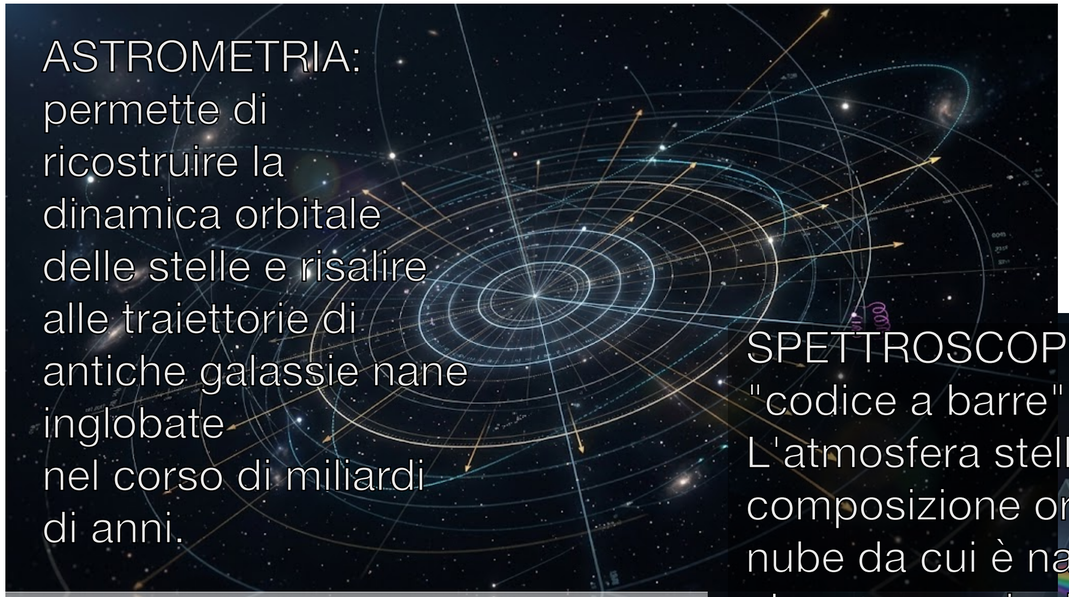
I tre pilastri dell’indagine:

ASTROMETRIA: permette di ricostruire la dinamica orbitale delle stelle e risalire alle traiettorie di antiche galassie nane inglobate nel corso di miliardi di anni.

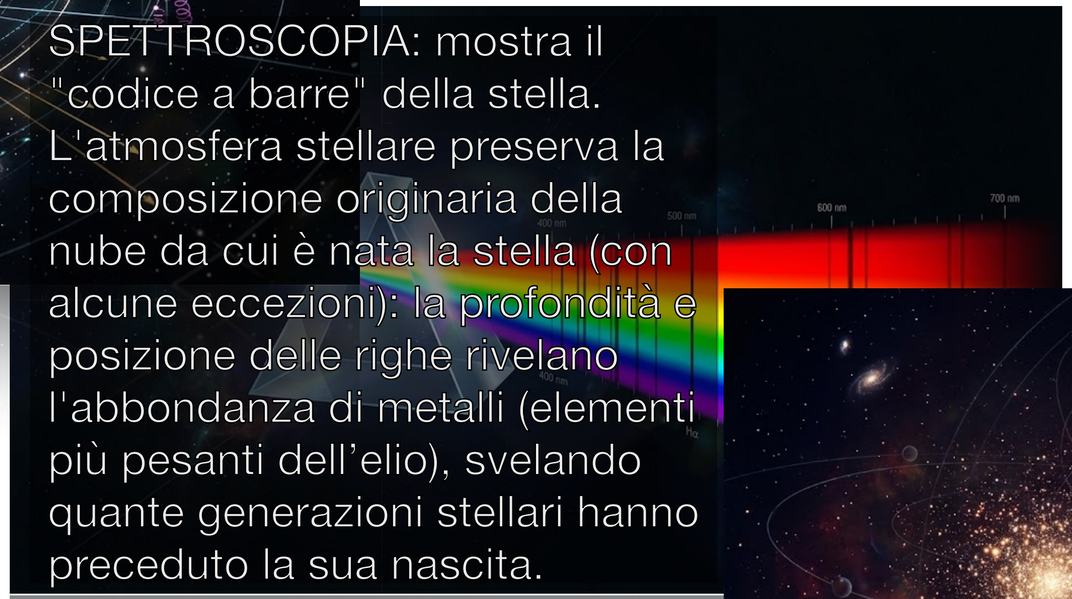
SPETTROSCOPIA: mostra il "codice a barre" della stella. L'atmosfera stellare preserva la composizione originaria della nube da cui è nata la stella (con alcune eccezioni): la profondità e posizione delle righe rivelano l'abbondanza di metalli (elementi più pesanti dell’elio), svelando quante generazioni stellari hanno preceduto la sua nascita.



I tre pilastri dell’indagine:



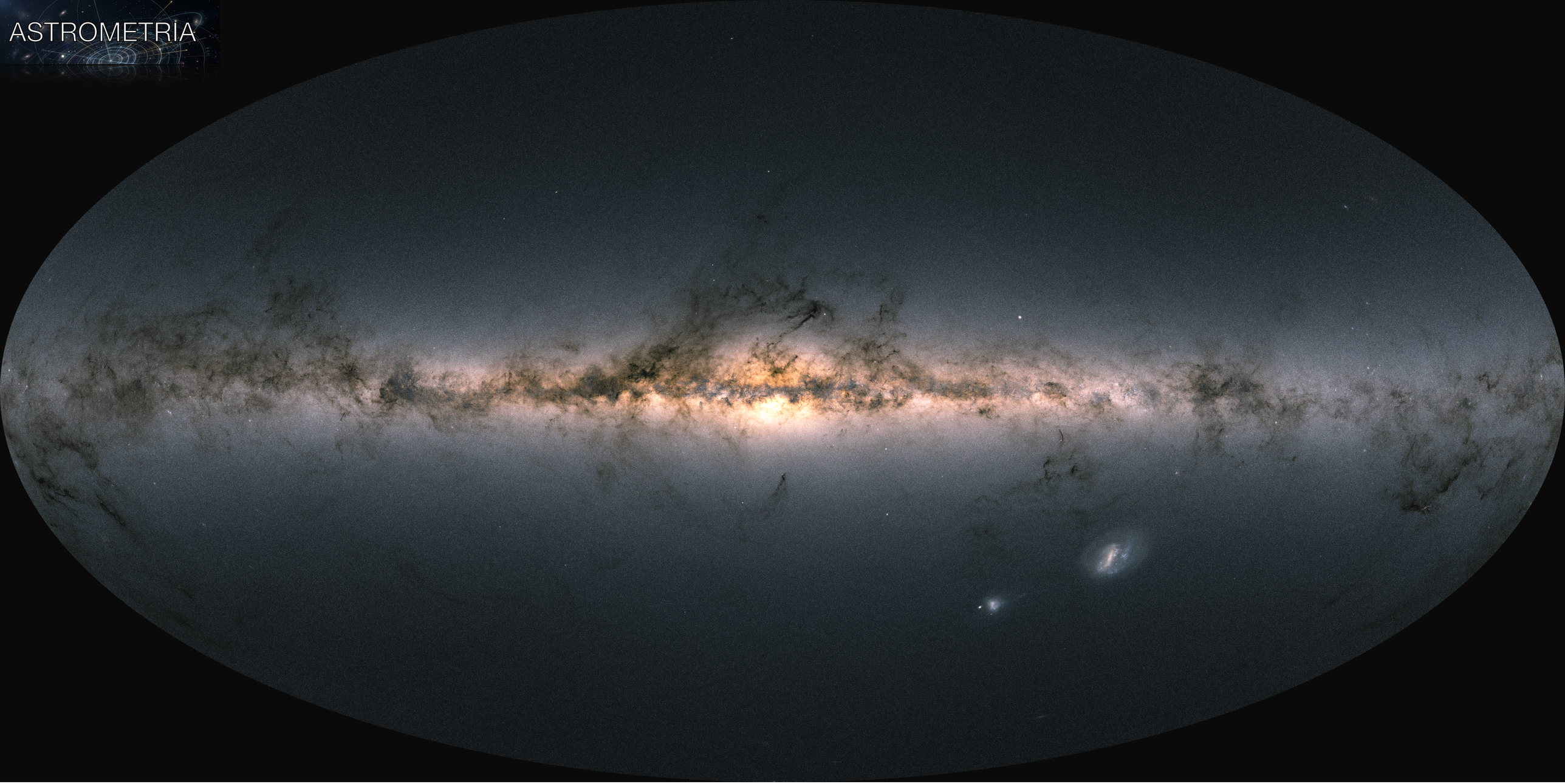
ASTROMETRIA: permette di ricostruire la dinamica orbitale delle stelle e risalire alle traiettorie di antiche galassie nane inglobate nel corso di miliardi di anni.



SPETTROSCOPIA: mostra il "codice a barre" della stella. L'atmosfera stellare preserva la composizione originaria della nube da cui è nata la stella (con alcune eccezioni): la profondità e posizione delle righe rivelano l'abbondanza di metalli (elementi più pesanti dell’elio), svelando quante generazioni stellari hanno preceduto la sua nascita.

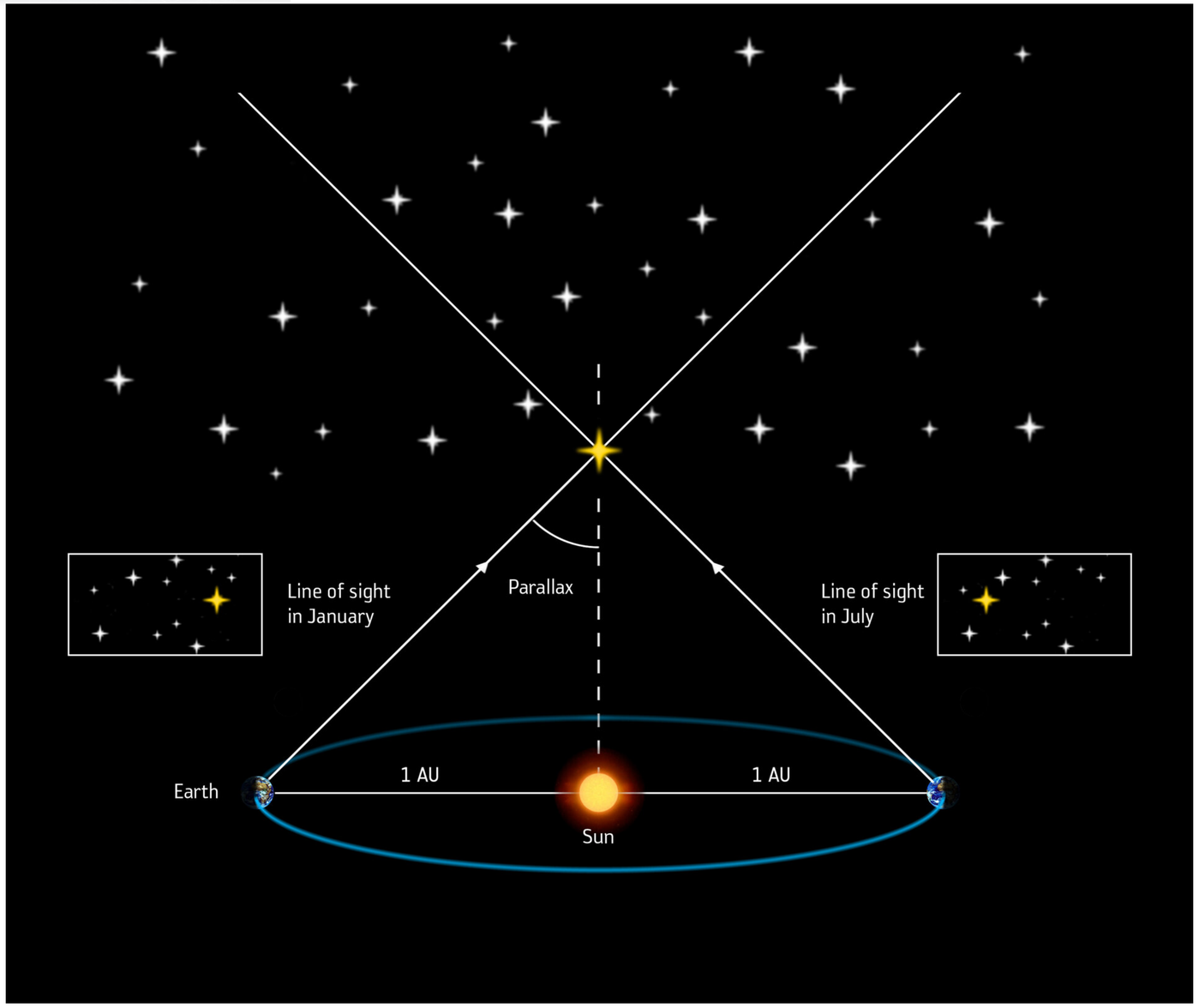


ETÀ STELLARI (ottenibili tramite, per esempio, isocrone o astrosismologia): servono ad ordinare cronologicamente gli eventi.



Per creare questa mappa dell'intero cielo, si sono utilizzati i dati di oltre 1,8 miliardi di stelle. La mappa mostra la luminosità totale e il colore delle stelle osservate da Gaia, pubblicati come parte della Early Data Release 3 (Gaia EDR3). (Crediti: ESA/Gaia/DPAC, A. Moitinho, ESA Standard Licence)

ASTROMETRIA



Crediti: ESA/ATG medialab

Gaia misura le distanze utilizzando la parallasse trigonometrica:

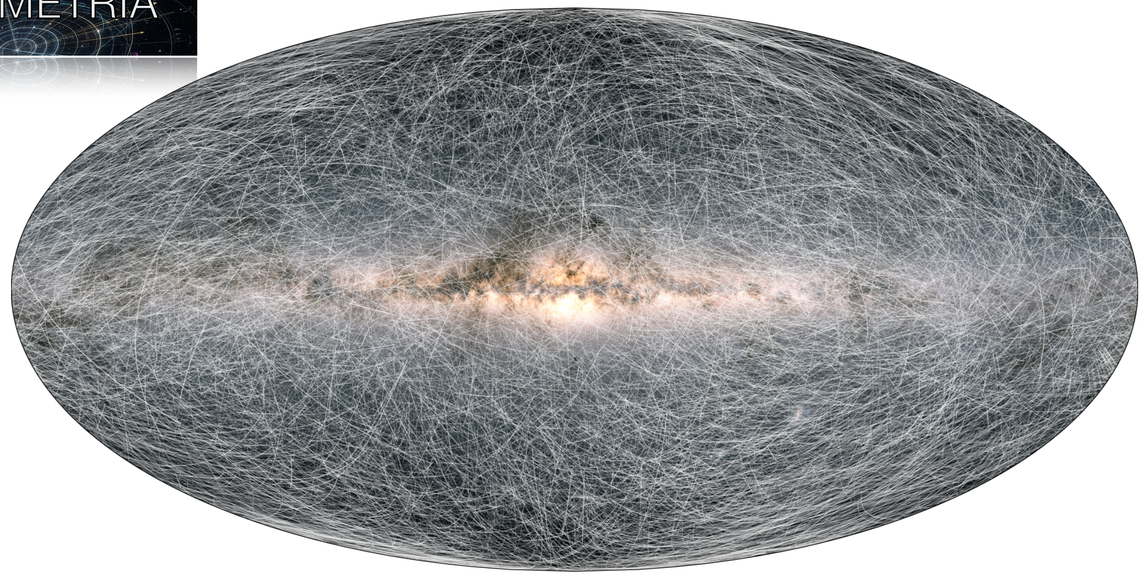
$$\tan(p) = \frac{1\ \mathrm{AU}}{d}$$

Poiché gli angoli di parallasse delle stelle sono estremamente piccoli, definito il parsec come la distanza a cui il raggio dell'orbita terrestre (1 AU) sottende un angolo di 1 secondo d'arco, si ha:

$$d \approx \frac{1}{p}$$

dove la distanza si misura in pc e l'angolo in secondi d'arco (arcsec)

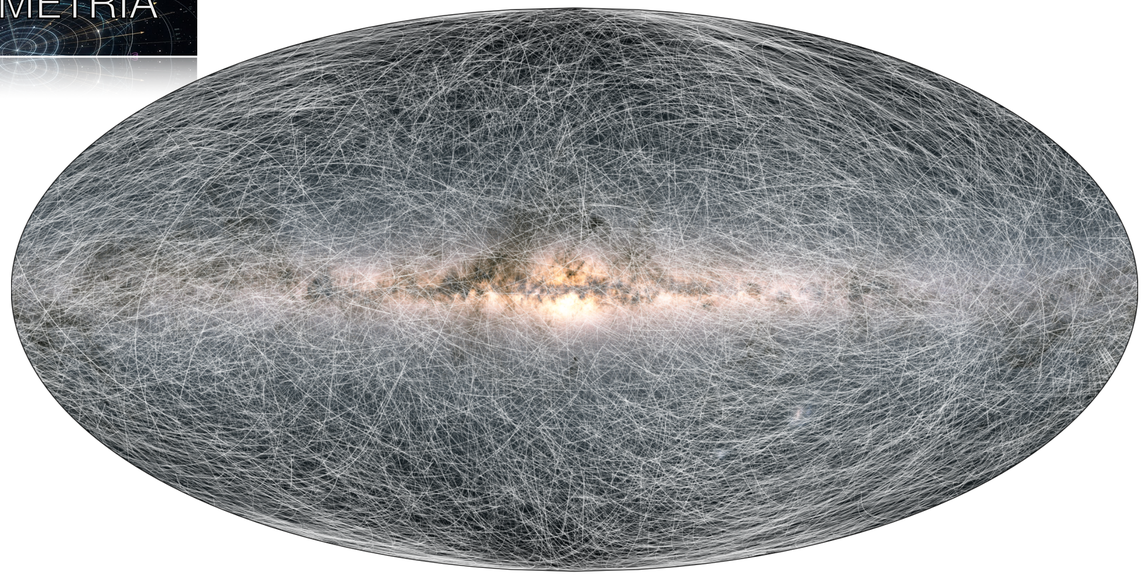
ASTROMETRIA



Complicazioni: le stelle non sono immobili, ma hanno un moto proprio.

Soluzione astrometrica a 5 parametri di Gaia: fornisce contemporaneamente posizione (α, δ), parallasse (distanza), e moti propri (velocità angolari con cui si sposta la stella, μ_α, μ_δ)

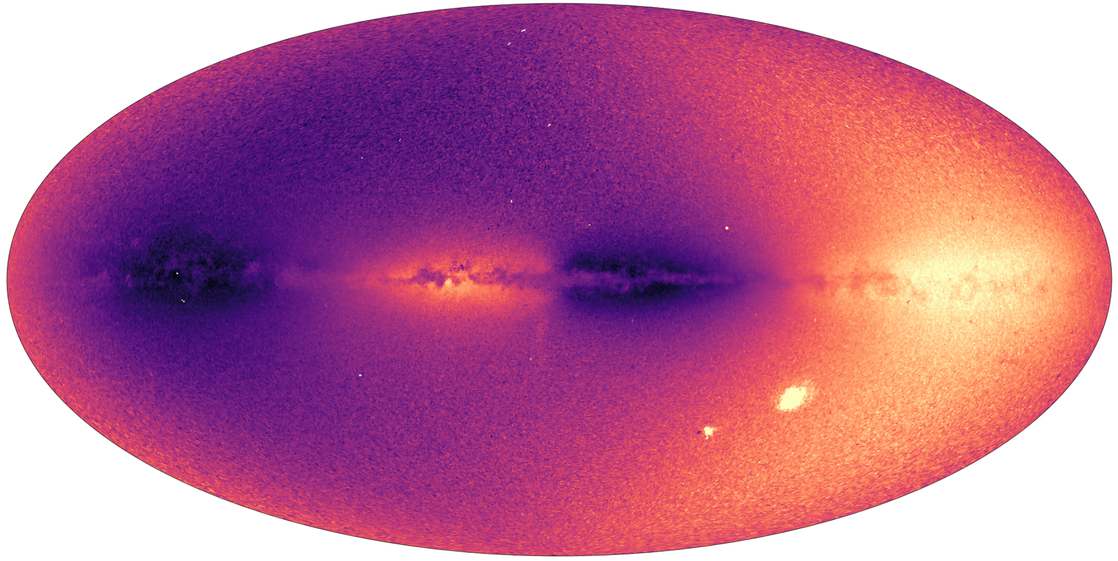
In alto: le scie raccontano il cammino delle stelle nel cielo, proiettato nei 400 000 anni a venire. Crediti: ESA/Gaia/DPAC, CC BY-SA 3.0 IGO.



Complicazioni: le stelle non sono immobili, ma hanno un moto proprio.

Soluzione astrometrica a 5 parametri di Gaia: fornisce contemporaneamente posizione (α, δ), parallasse (distanza), e moti propri (velocità angolari con cui si sposta la stella, μ_α, μ_δ)

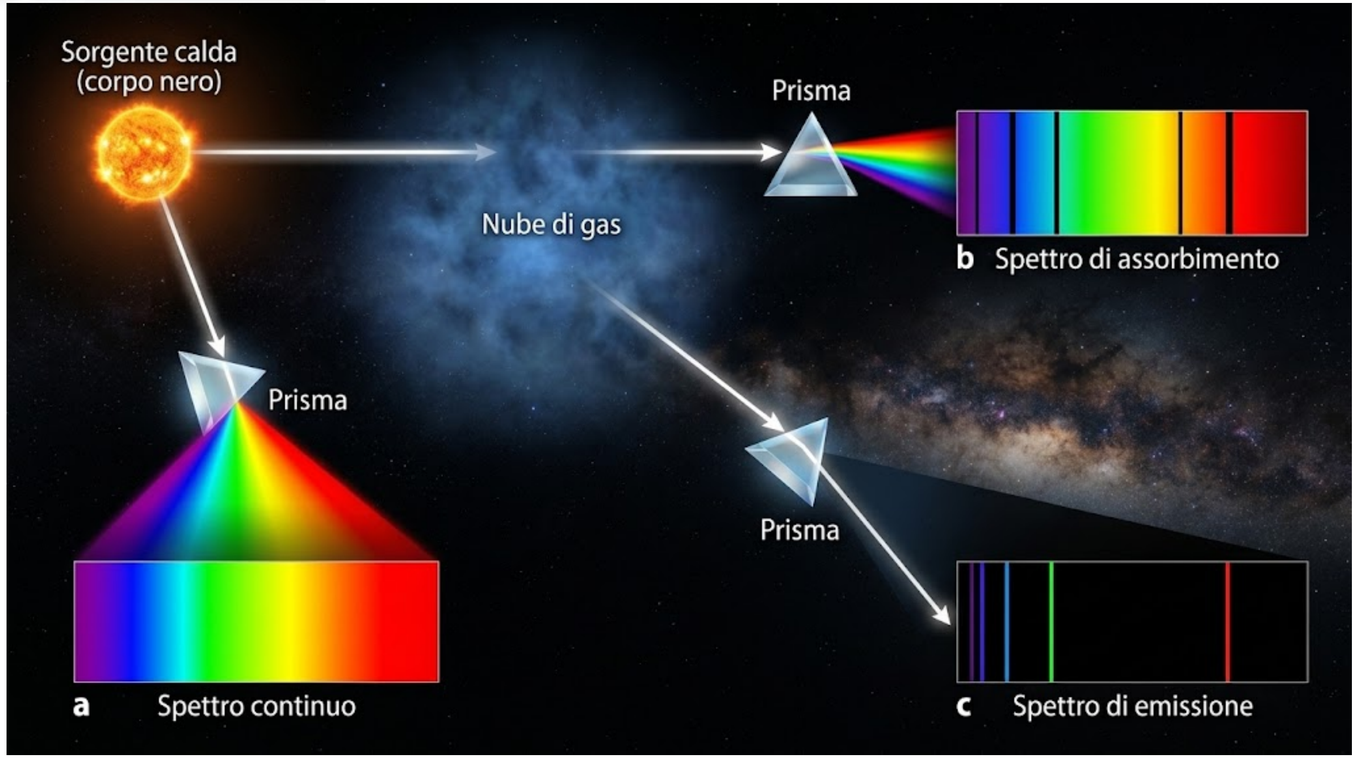
In alto: le scie raccontano il cammino delle stelle nel cielo, proiettato nei 400 000 anni a venire. Crediti: ESA/Gaia/DPAC, CC BY-SA 3.0 IGO.
In basso: mappa delle velocità radiali Gaia. Crediti: ESA/Gaia/DPAC, CC BY-SA 3.0 IGO. Ringraziamenti: ESA/Gaia/DPAC/CU6, D. Katz, N. Leclerc, P. Sartoretti and the CU6 team.



Utilizzando lo spostamento Doppler osservato nelle righe spettrali di una stella rispetto alle loro lunghezze d'onda a riposo, gli astronomi sono in grado di misurare la velocità radiale della stella, ovvero se questa si stia allontanando o avvicinando a noi.

Combinando le componenti tangenziali e radiali della velocità, otteniamo il moto delle stelle in 3D per circa 34 milioni di stelle.

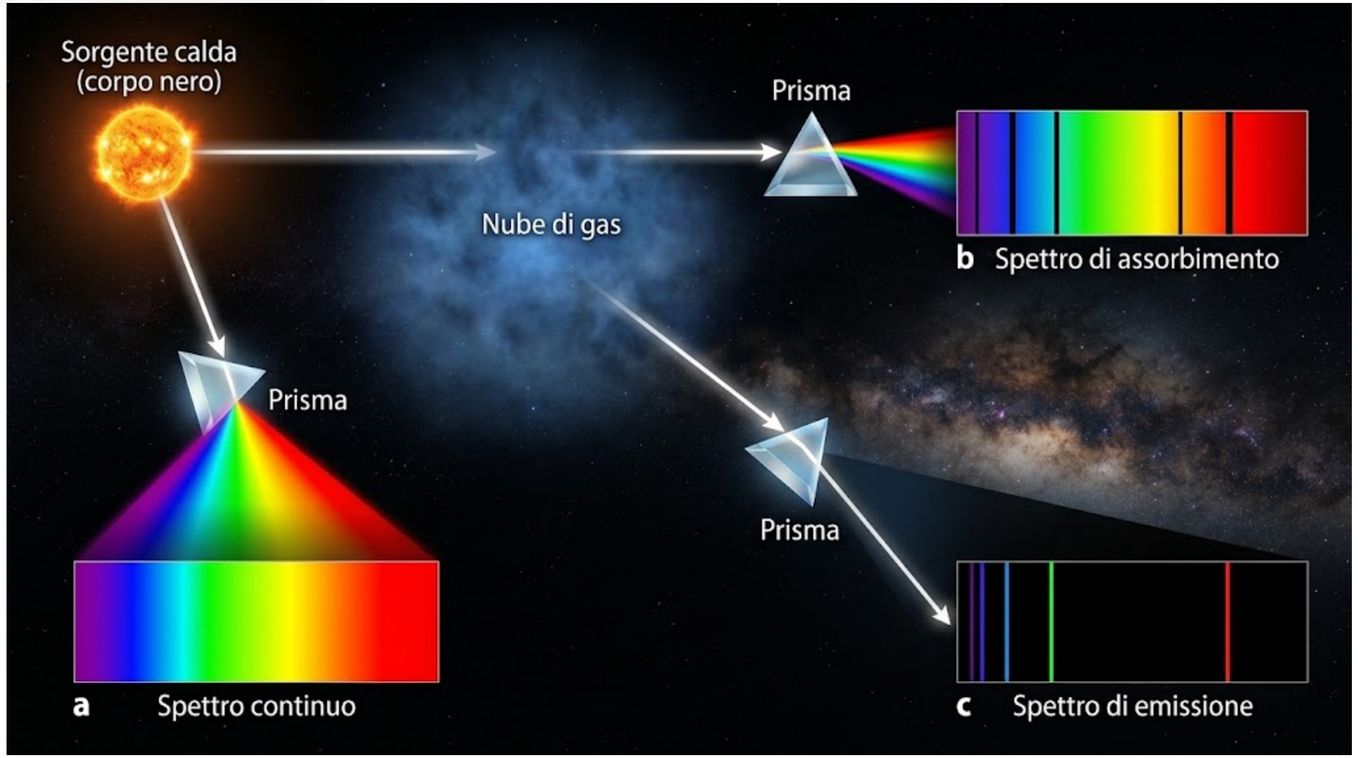
SPETTROSCOPIA

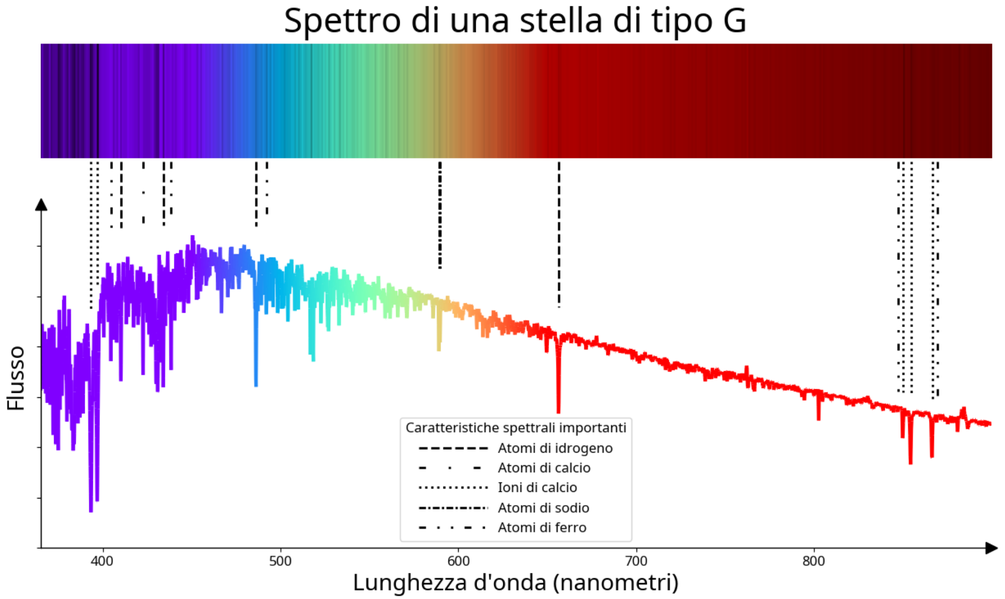


Le righe spettrali stellari si formano negli strati esterni più freddi:

- Le regioni interne, più calde, emettono uno spettro continuo
- La luce, nel suo viaggio verso l'esterno, incontra gli strati più freddi e meno densi; gli atomi e gli ioni presenti in questi strati freddi assorbono specifiche lunghezze d'onda
- Le lunghezze d'onda assorbite appaiono come bande nere nello spettro che emerge dall'atmosfera

SPETTROSCOPIA



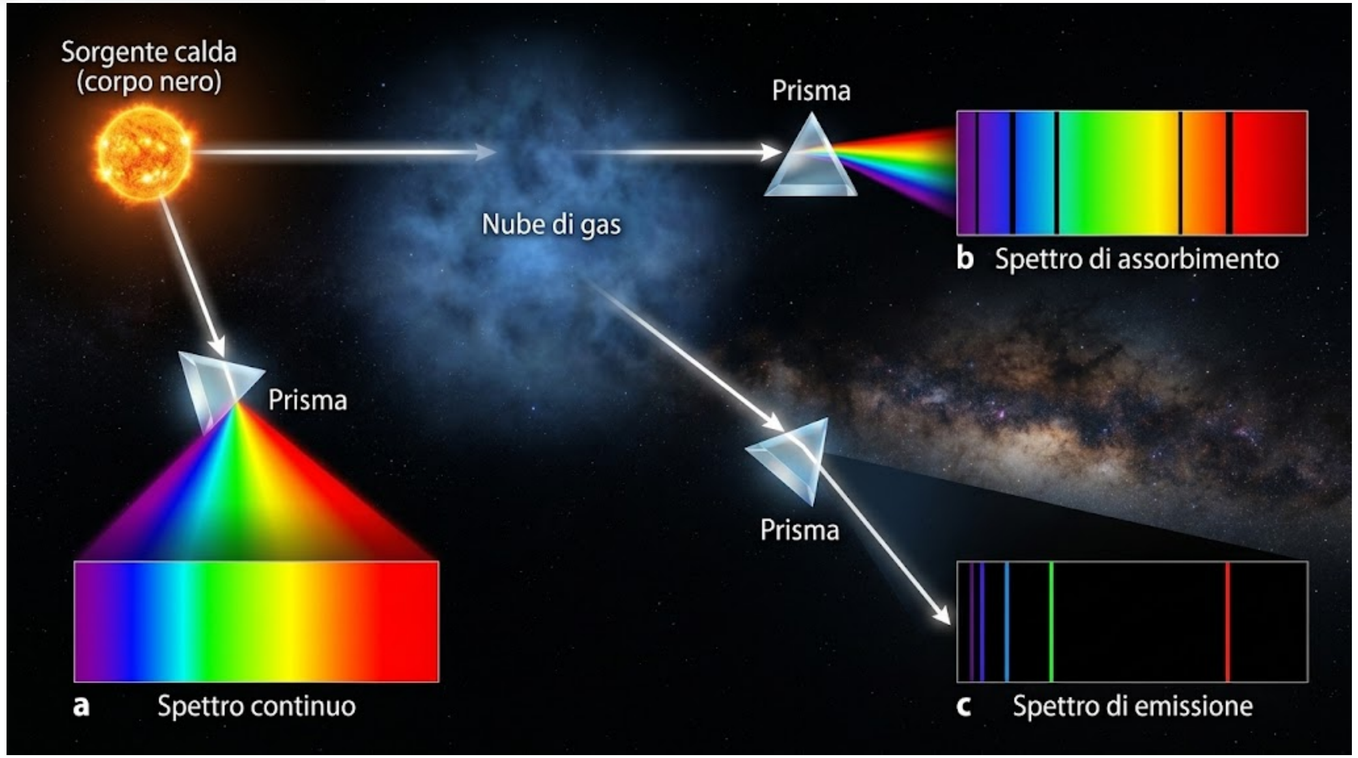


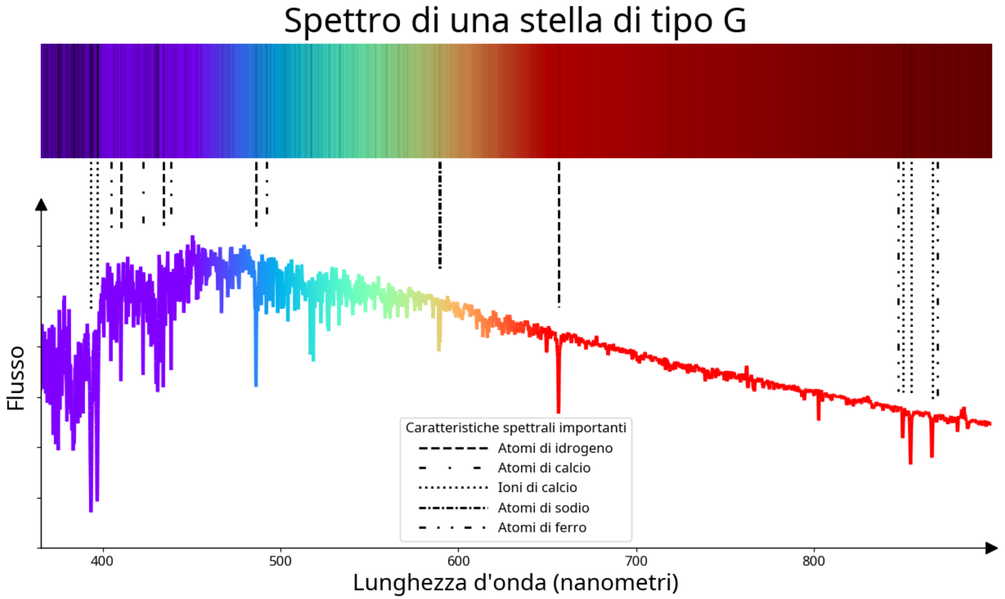
Le righe spettrali stellari si formano negli strati esterni più freddi:

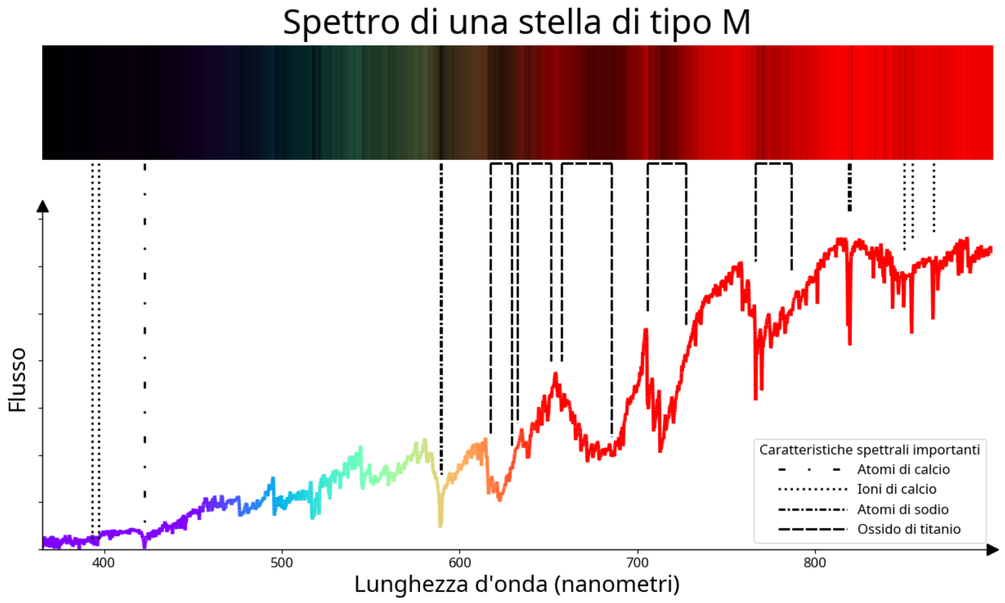
- Le regioni interne, più calde, emettono uno spettro continuo
- La luce, nel suo viaggio verso l'esterno, incontra gli strati più freddi e meno densi; gli atomi e gli ioni presenti in questi strati freddi assorbono specifiche lunghezze d'onda
- Le lunghezze d'onda assorbite appaiono come bande nere nello spettro che emerge dall'atmosfera

Crediti per le immagini degli spettri stellari: IAU OAE/SDSS/Niall Deacon. Licenza: Creative Commons Attribuzione 4.0 Internazionale (CC BY 4.0)

SPETTROSCOPIA





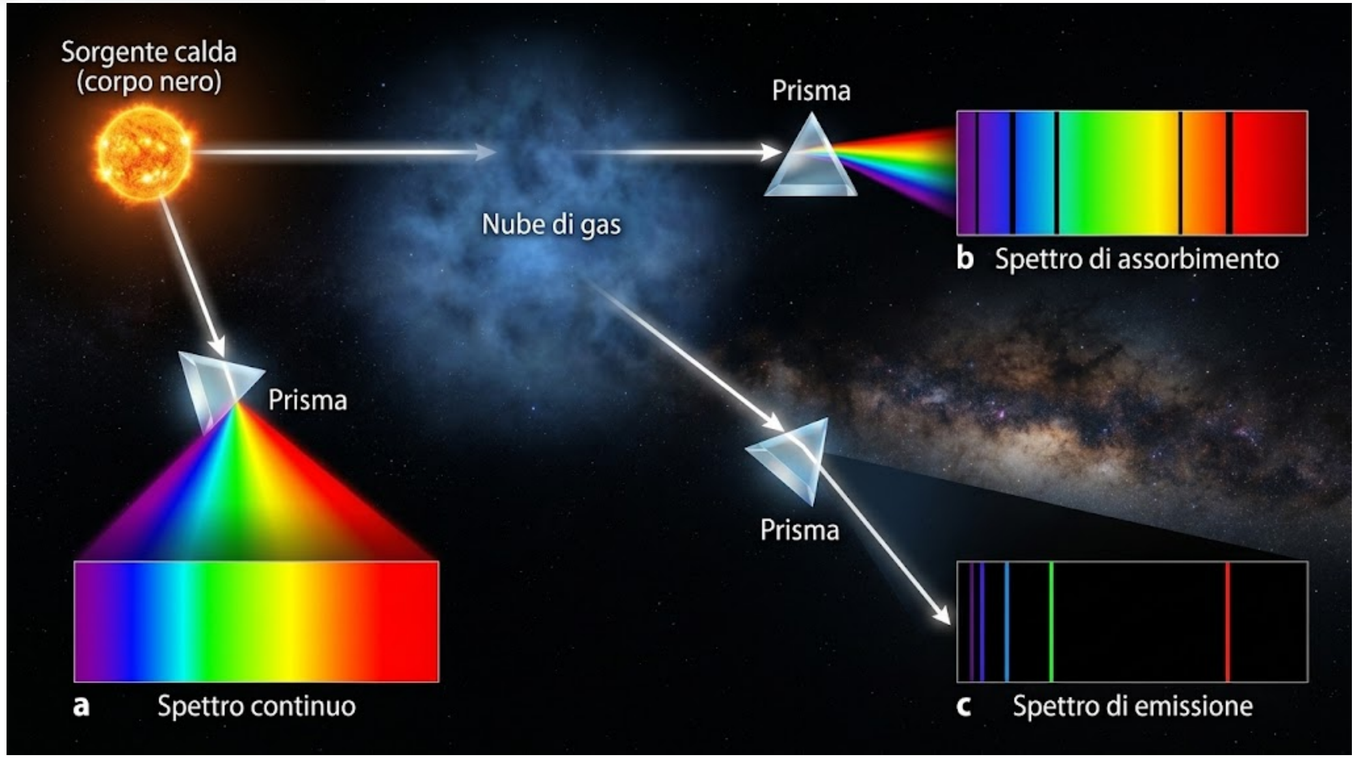


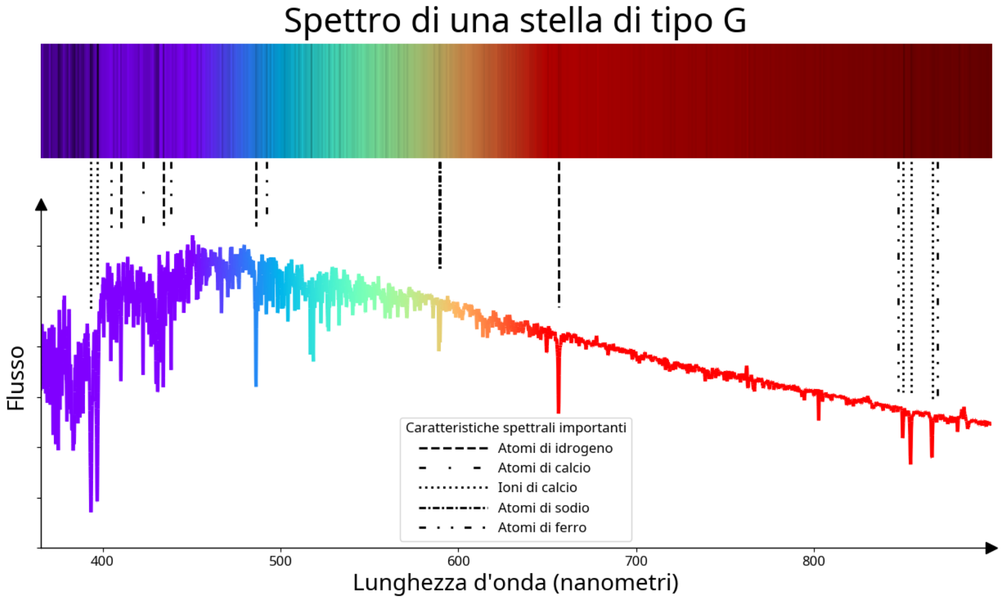
Le righe spettrali stellari si formano negli strati esterni più freddi:

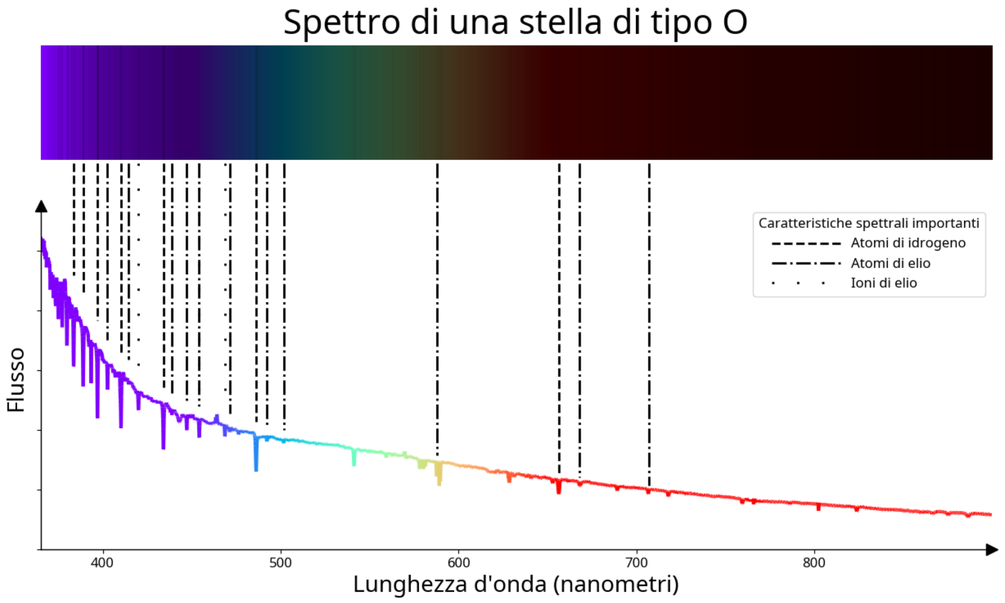
- Le regioni interne, più calde, emettono uno spettro continuo
- La luce, nel suo viaggio verso l'esterno, incontra gli strati più freddi e meno densi; gli atomi e gli ioni presenti in questi strati freddi assorbono specifiche lunghezze d'onda
- Le lunghezze d'onda assorbite appaiono come bande nere nello spettro che emerge dall'atmosfera

Crediti per le immagini degli spettri stellari: IAU OAE/SDSS/Niall Deacon. Licenza: Creative Commons Attribuzione 4.0 Internazionale (CC BY 4.0)

SPETTROSCOPIA







Le righe spettrali stellari si formano negli strati esterni più freddi

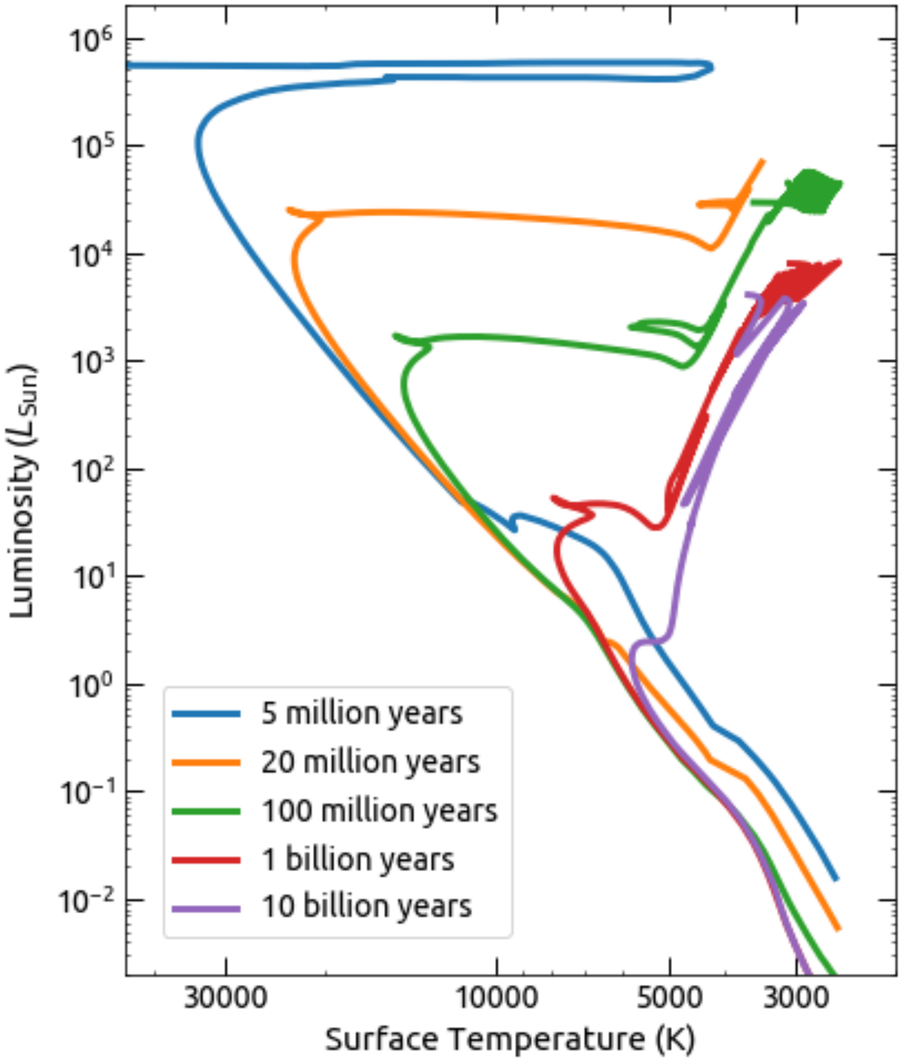
- Le regioni interne, più calde, emettono uno spettro continuo
- La luce, nel suo viaggio verso l'esterno, incontra gli strati più freddi e meno densi; gli atomi e gli ioni presenti in questi strati freddi assorbono specifiche lunghezze d'onda
- Le lunghezze d'onda assorbite appaiono come bande nere nello spettro che emerge dall'atmosfera

Crediti per le immagini degli spettri stellari: IAU OAE/SDSS/Niall Deacon. Licenza: Creative Commons Attribuzione 4.0 Internazionale (CC BY 4.0)



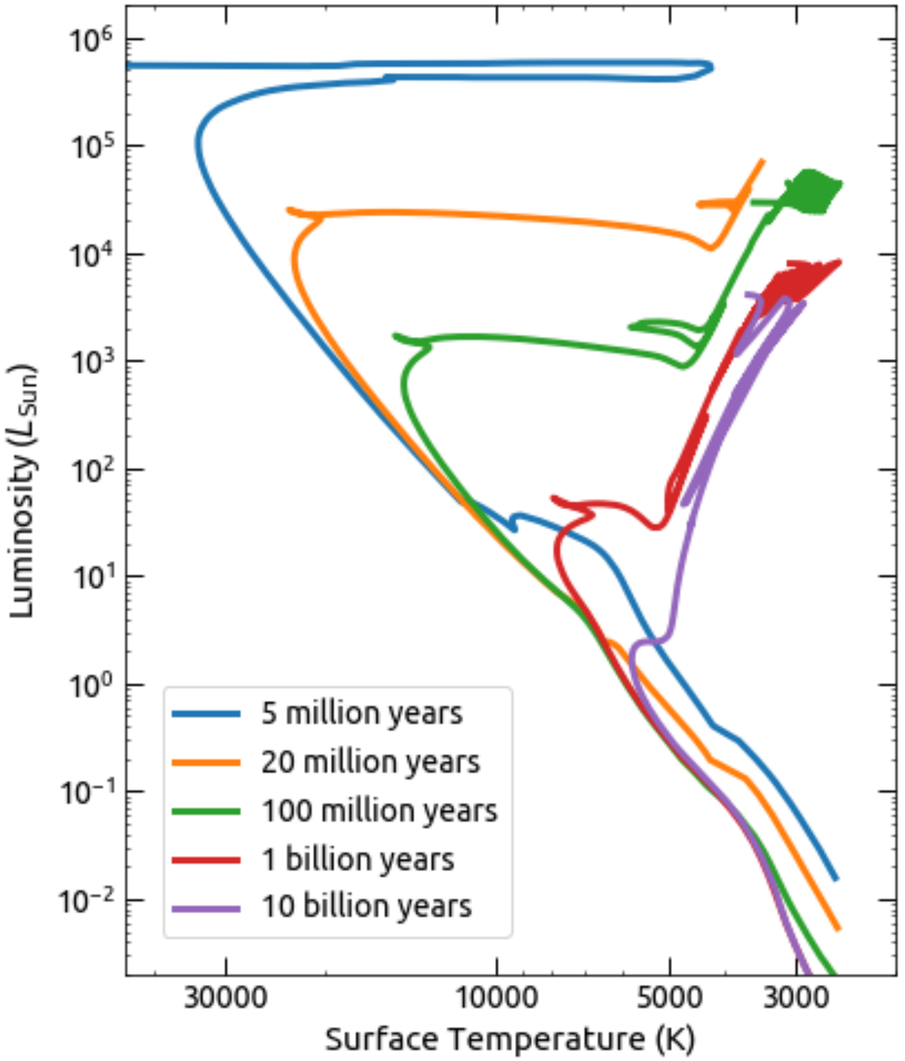
Gli astronomi classificano le stelle in base al loro **tipo spettrale**, che dipende essenzialmente dalla loro temperatura superficiale, detta **temperatura efficace** (o effettiva)

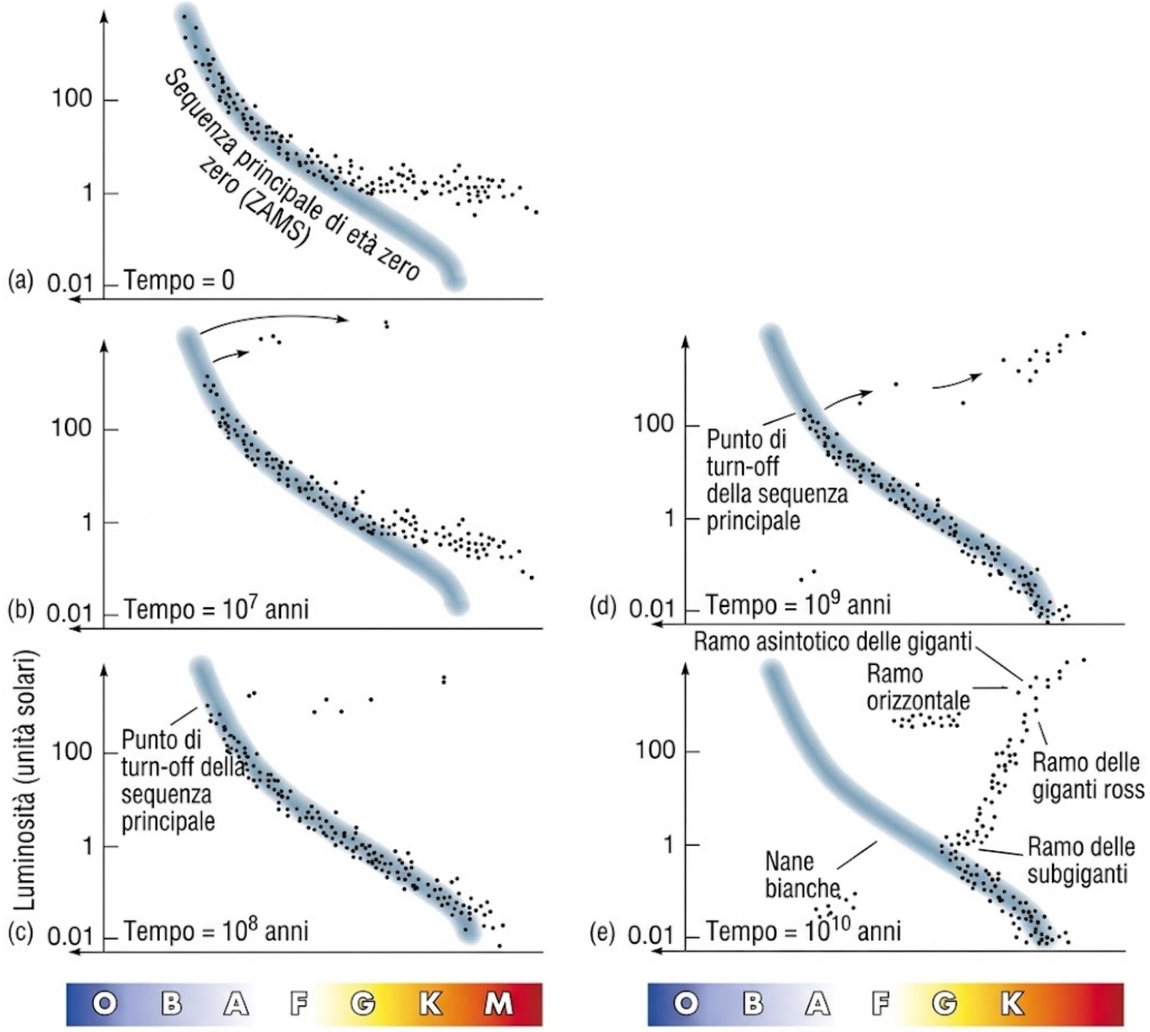
Isocrone stellari: sono curve tracciate sul diagramma di Hertzsprung-Russell (H-R) che uniscono punti corrispondenti a stelle aventi le stesse età ma masse diverse



Crediti: Ivan Ramirez. Licenza: CC BY 4.0

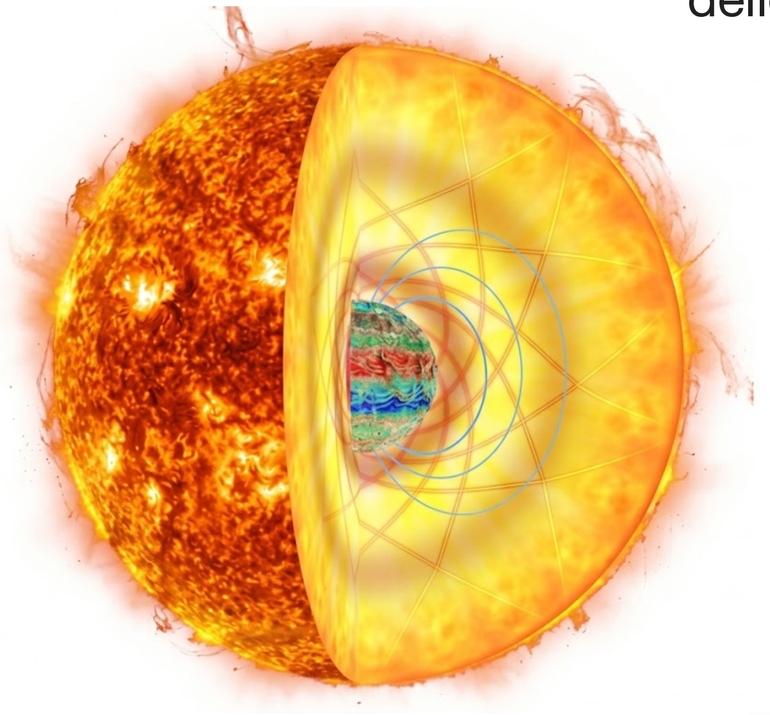
Isocrone stellari: sono curve tracciate sul diagramma di Hertzsprung-Russell (H-R) che uniscono punti corrispondenti a stelle aventi le stesse età ma masse diverse

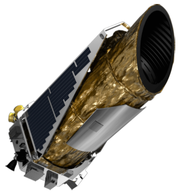




Crediti: Ivan Ramirez. Licenza: CC BY 4.0

Astrosismologia: si basa sull'osservazione di oscillazioni causate da onde sonore che si propagano attraverso l'interno delle stelle, influenzando la loro luminosità e temperatura superficiale. Dallo studio di queste oscillazioni è possibile determinare raggi, masse ed età delle stelle con estrema precisione.



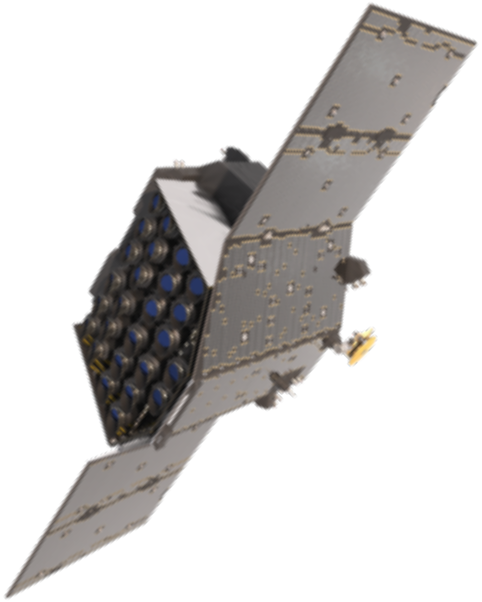


2009



2018

2027



I satelliti Kepler/K2, TESS e PLATO; campi magnetici e onde sonore in un interno stellare [crediti immagine: Rafael A. García (SAp CEA), Kyle Augustson (HAO), Jim Fuller (Caltech) & Gabriel Pérez (SMM, IAC)]

Oggi l'Archeologia Galattica sta vivendo una vera e propria rivoluzione, spinta dall'accesso a una quantità di dati senza precedenti:



Posizioni e moti dettagliati —> dinamica stellare e fusioni galattiche

Età stellari —> caratterizzazione completa della storia chimica delle componenti della Via Lattea

Composizione chimica delle stelle in tutte le fasi evolutive (solo nella Via Lattea) —> evoluzione stellare e nucleosintesi

SURVEY SPETTROSCOPICHE SU LARGA SCALA CONCLUSE:

- RAVE | Periodo: 2003-2013 | ~500,000 stelle brillanti e vicine ($9 < I < 12$) | R ~ 7500 | Lunghezza d'onda: 8410-8800 A (tripletto del Ca II)
- SDSS | Periodo: 2005-2011 | ~250,000 stelle deboli ($14 < g < 20.3$) | R ~ 2000 | Lunghezza d'onda: 3800-9200 A (ottico)
- Gaia-ESO Survey | Periodo: 2011-2018 | ~115,000 stelle (soprattutto nel disco Galattico) & ammassi aperti | R ~ 17000 (GIRAFFE) 47000 (UVES) | Lunghezza d'onda: 4000-9000 A
- APOGEE | Periodo: 2011-2021 | ~600,000 giganti rosse ($H < 14$), ammassi aperti, alcuni ammassi globulari | R ~ 22500 | Lunghezza d'onda: 1.51-1.70 μm (infrarosso)
- GALAH | Periodo: 2014-2023 | ~600,000 nane e giganti FGK ($V < 14$), ammassi aperti, alcuni ammassi globulari | R ~ 28000 | Lunghezza d'onda: 471-789 nm
- Gaia DR3 (2022) | ~5e6 stelle FGK | R ~ 11500 | Lunghezza d'onda: 845-872 nm

SURVEY SPETTROSCOPICHE SU LARGA SCALA PIENAMENTE OPERATIVE:

- LAMOST | Periodo: 2012-ora | >1e6 (a bassa risoluzione), > 5e6 (a media risoluzione) | R ~ 1800 o 7500 | Lunghezza d'onda: 3700-9000 A

... E MOLTO ALTRO STA ARRIVANDO:

- WEAVE@WHT (La Palma, Canarie)
- 4MOST@VISTA (Paranal, Chile)
- MOONS@VLT (Paranal, Chile)







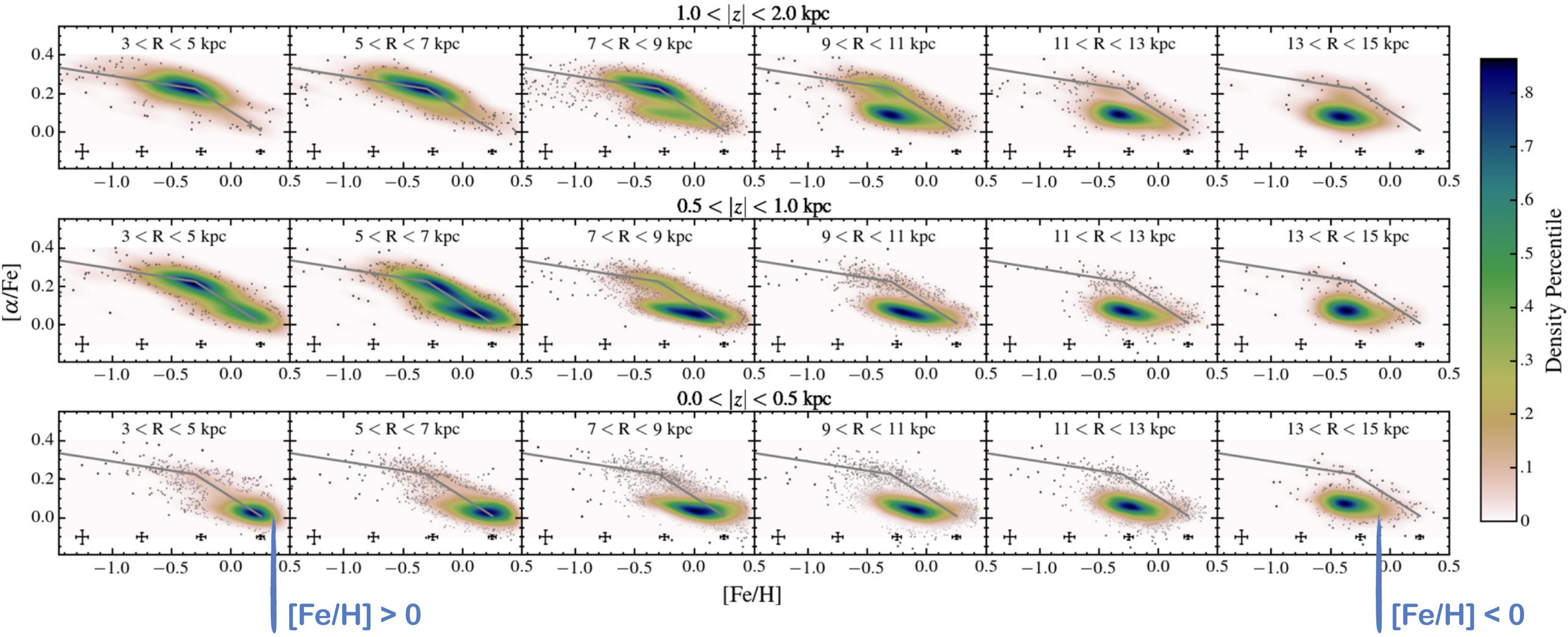
Slide courtesy: S. Lucatello

Alcuni risultati: gradienti di abbondanze radiali e verticali nel disco Galattico; mappatura della storia evolutiva del disco

$$[X/Y] = \log(N_X/N_Y)_{star} - \log(N_X/N_Y)_{Sun}$$

$$A(X) = \log\varepsilon(X) = \log(NX/NH)_{star} + 12$$

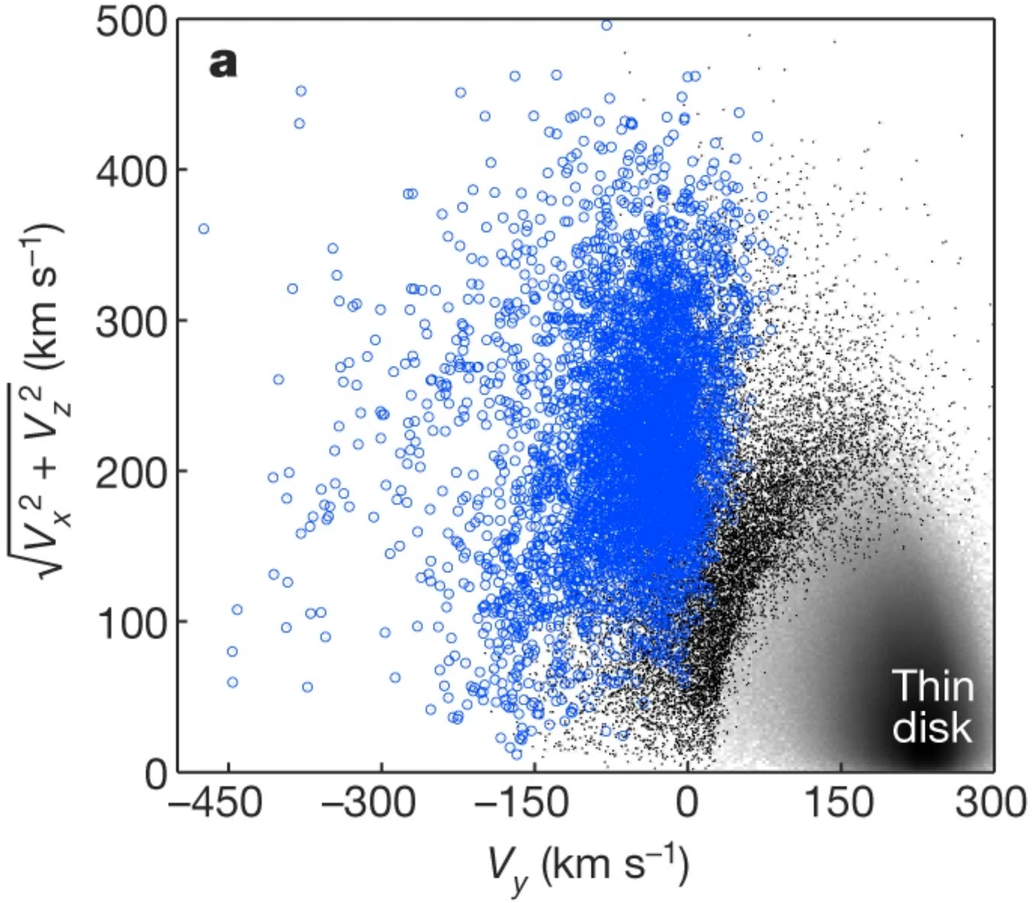
Figura da Hayden et al. (2015)

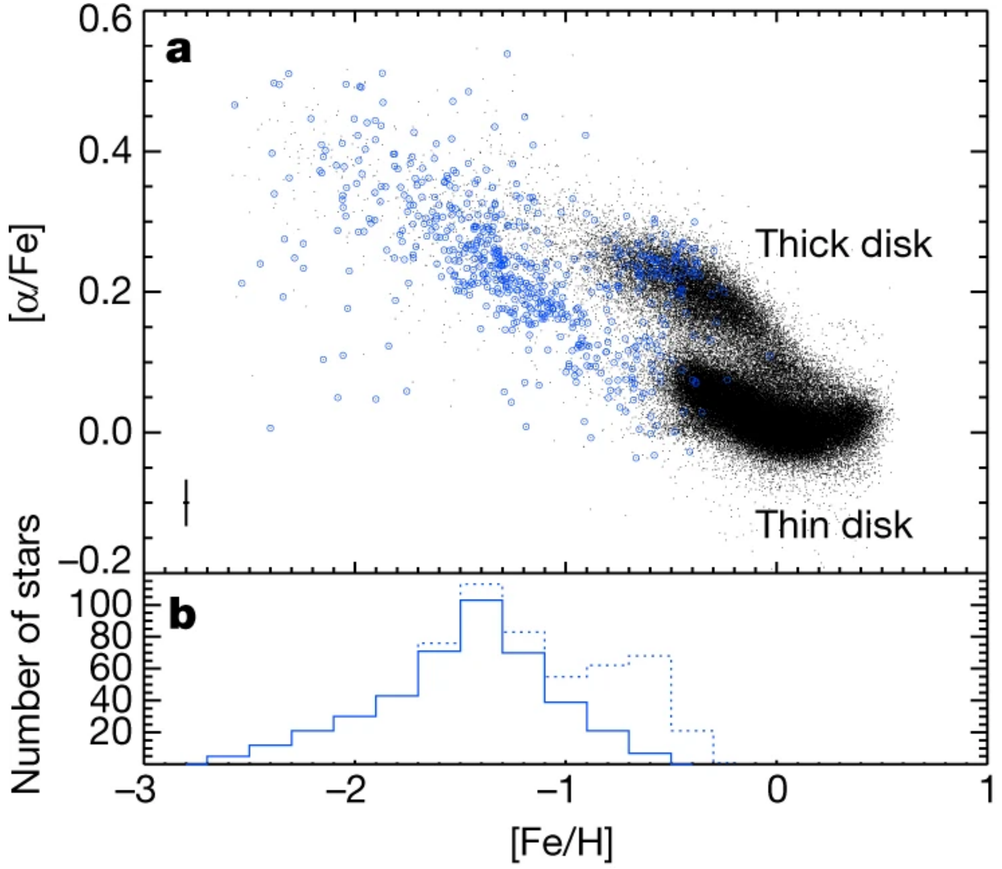


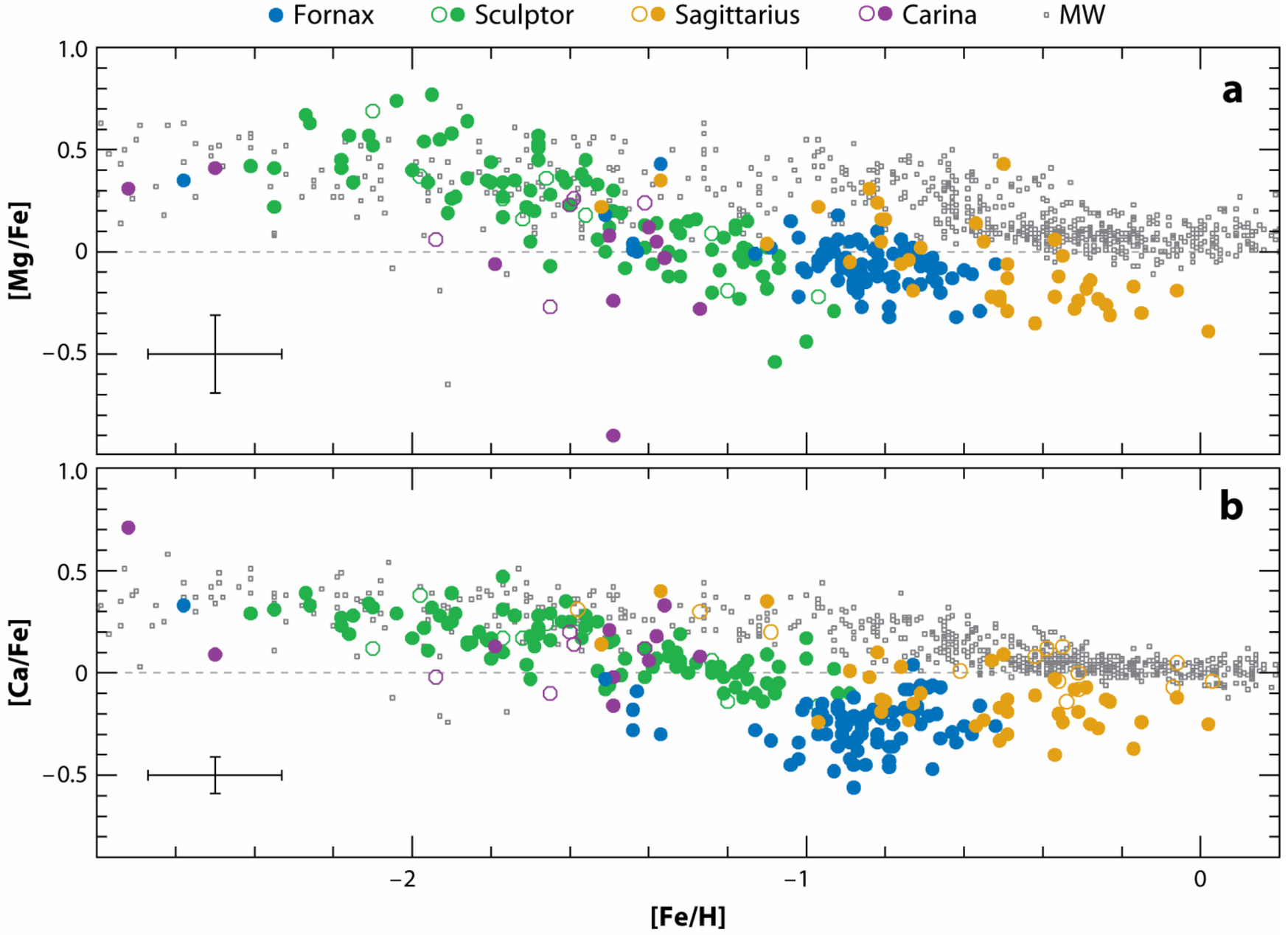
Alcuni risultati: mappatura di eventi di accrescimenti di satelliti

L'analisi dei moti di milioni di stelle in Gaia DR2 ha evidenziato un comportamento anomalo di un grande gruppo di stelle vicine (orbite estremamente eccentriche, moto retrogrado). Analizzando il loro DNA chimico, gli astronomi hanno visto che le loro proprietà chimiche e (diagramma [α/Fe] vs [Fe/H]) erano compatibili con l'evoluzione di una galassia nana —> scoperta di Gaia-Encelado

Figure da Helmi et al. (2018)







Tolstoy E, et al. 2009.
Annu. Rev. Astron. Astrophys. 47:371–425

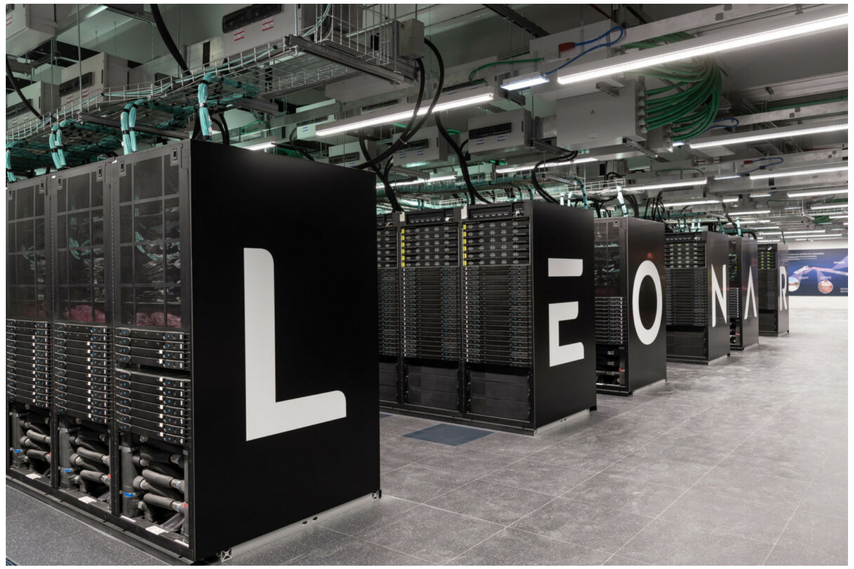
Descrivono come la composizione chimica del mezzo interstellare da cui si formano le stelle varia al passare del tempo nelle diverse componenti Galattiche (alone, disco spesso, disco sottile e nucleo centrale) e nelle galassie esterne, sotto l'azione di diversi processi fisici (accrescimento di gas dall'alone caldo, *mergers*, formazione stellare, venti galattici, moti radiali di stelle e gas, etc.)

—> Codici a sé o moduli inglobati in complesse simulazioni idrodinamiche (anche cosmologiche)

- Computazionalmente "economici"
- Possono seguire l'evoluzione di un grandissimo numero di elementi chimici su un PC



- Fanno un massiccio uso di risorse di calcolo ad alte prestazioni (e.g. CINECA supercomputers)
- Possono seguire l'evoluzione di un set limitato di elementi chimici



Produzione degli elementi

- Nucleosintesi del Big Bang: H, D, ^{3}He, ^{4}He, ^{6}Li, ^{7}Li
- (e.g., Pitrou et al. 2021)
- Processi di spallazione dei raggi cosmici nel mezzo interstellare: Li, Be, B
- (e.g., Meneguzzi et al. 1971; Lemoine et al. 1998)
- Stelle singole di massa bassa ed intermedia (1–8 $M_{\odot}$): ^{3}He, ^{4}He, ^{12}C, ^{13}C, ^{14}N, ^{17}O, F, elementi da processi s (Sr, Y, Zr, Ba, Pb, …)
  (e.g., Cristallo et al. 2009, 2011, 2015; Lagarde et al. 2012; Ventura et al. 2013, 2018, 2020, 2021; Karakas & Lugaro 2016; Cinquegrana & Karakas 2022)
- Novae (sistemi binari costituiti da stelle di massa bassa ed intermedia): ^{7}Li, ^{13}C, ^{15}N, ^{17}O, ^{26}Al, ^{60}Fe…
  (e.g., José & Hernanz 1998; José et al. 2020; Starrfield et al. 2020)
- Supernove di tipo Ia (SNeIa; sistemi binari costituiti da stelle di massa bassa ed intermedia): Si, S, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Ni, Co, Cu, Zn
  (e.g., Iwamoto et al. 1999; Leung & Nomoto 2018, 2020; Seitenzahl et al. 2013)





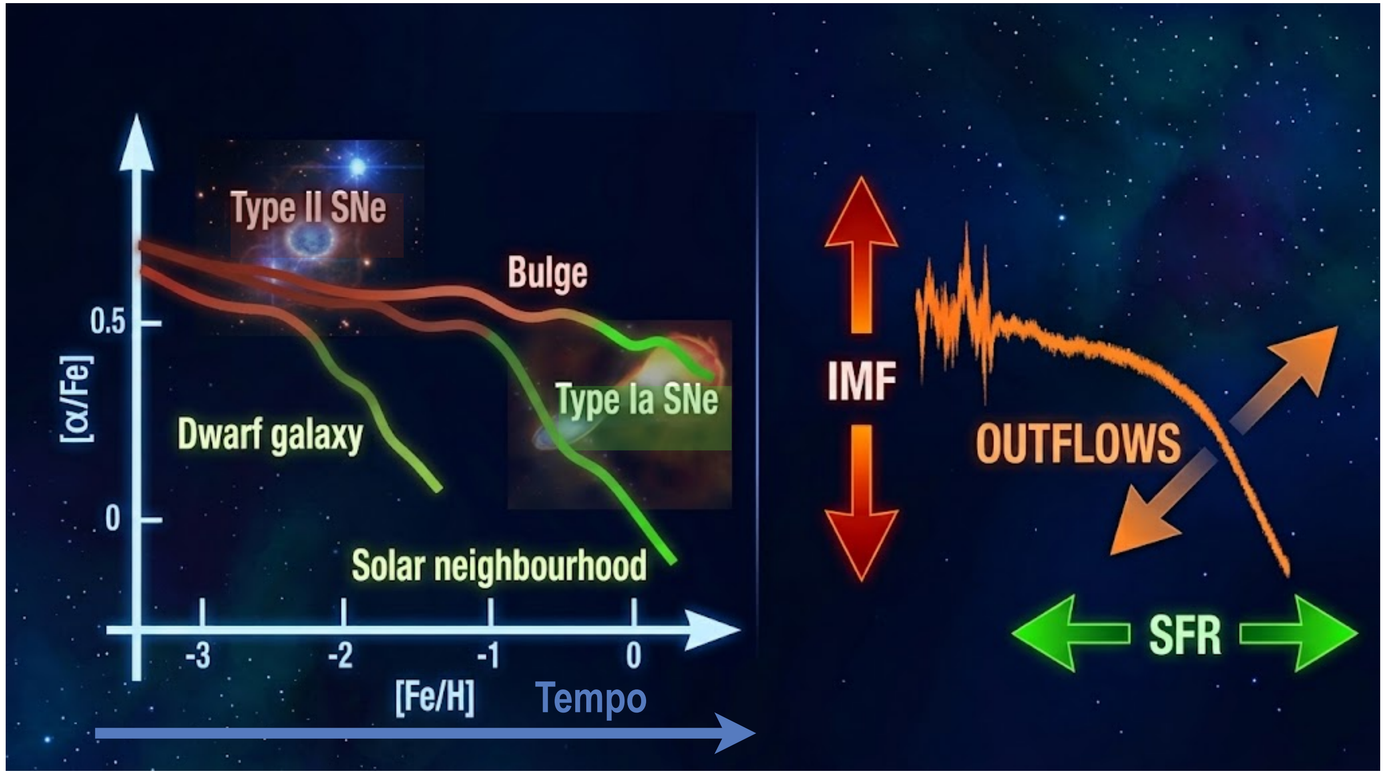
Produzione degli elementi

- Electron-capture supernovae (8–10 $M_\odot$): elementi da processi s (Sr, Y, Zr, …)
  (e.g., Poelarends et al. 2008; Doherty et al. 2015; Jones et al. 2019)
- Stelle massicce (M > 10 $M_\odot$): ^{4}He, ^{7}Li (?), ^{12}C, ^{13}C, ^{14}N, ^{15}N (?), ^{17}O, ^{18}O, F, P, Na, Al, elementi α, elementi del picco del Fe, elementi da cattura neutronica lenta (s) e veloce (r)
  (e.g., Heger & Woosley 2010; Nomoto et al. 2013; Pignatari et al. 2015; Nishimura et al. 2017; Limongi & Chieffi 2018; Roberti et al. 2024; Limongi et al. 2025)
- Coalescenza di sistemi binari compatti (sistemi formati da due stelle di neutroni o una stella di neutroni e un buco nero): elementi da processi r
  (e.g., Lattimer & Schramm 1974, 1976; Hotokezaka et al. 2013; Rosswog 2013)





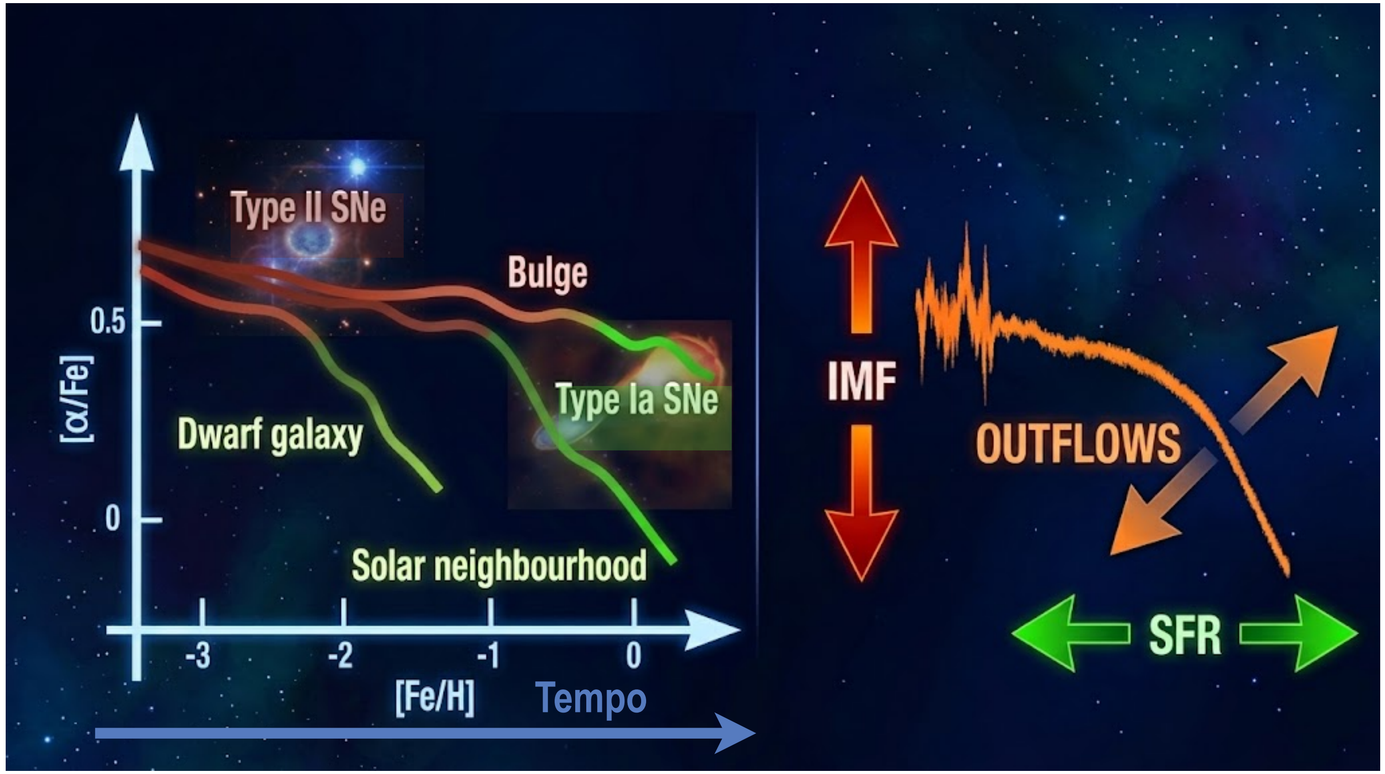
Time-delay model

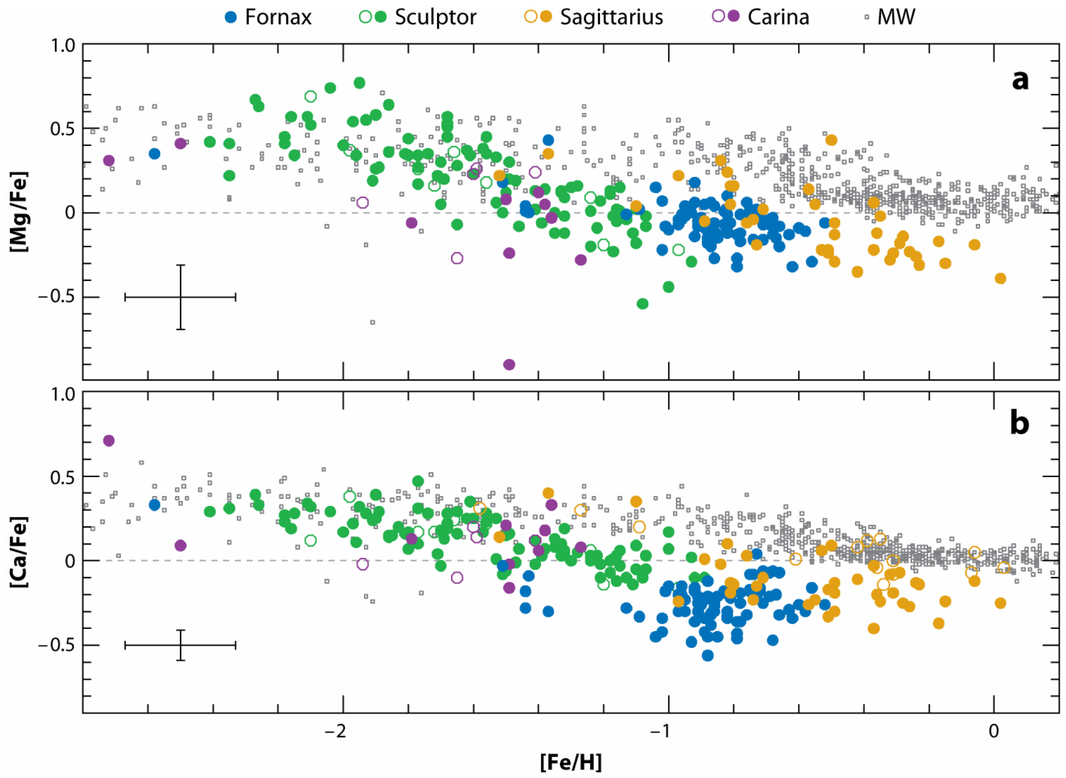


Paradigma fondamentale dell'evoluzione chimica galattica: spiega l'andamento del rapporto [α/Fe] in funzione della metallicità, [Fe/H], attraverso la differente scala temporale di rilascio degli elementi chimici da parte di due classi distinte di progenitori:

- Stelle massicce: producono grandi quantità di elementi α (O, Mg, Si, Ca, Ti) su tempi scala brevi (3-30 Myr). Esplodono come CCSNe lasciandosi dietro un oggetto compatto (stella di neutroni o buco nero)
- SNela (stadio finale dell'evoluzione di particolari sistemi binari formati da una nana bianca e da una compagna di massa bassa meno evoluta): producono grandi quantità di elementi del picco del ferro, non lasciano alcun oggetto compatto dietro di sé

Time-delay model

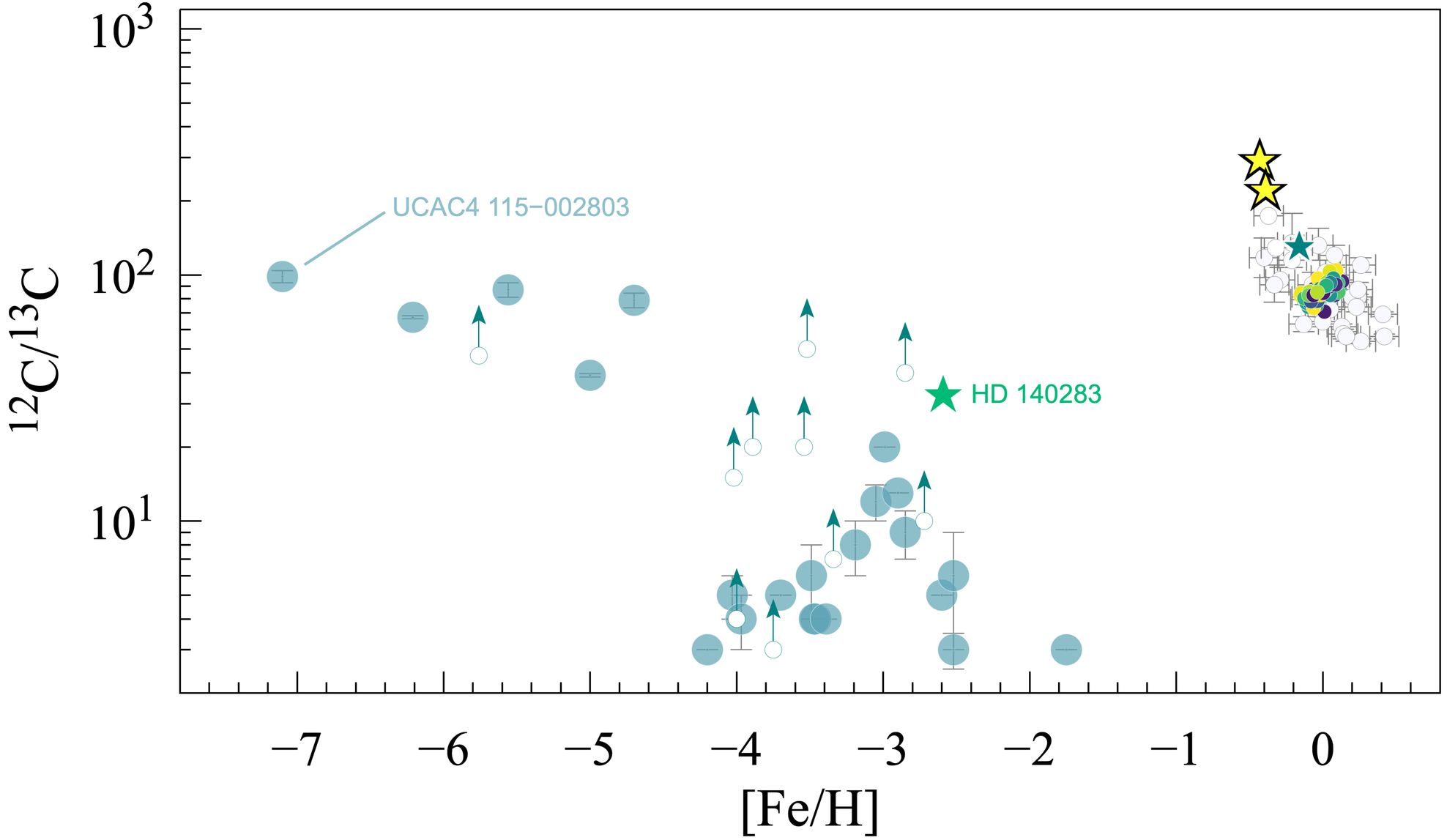




Paradigma fondamentale dell'evoluzione chimica galattica: spiega l'andamento del rapporto [α/Fe] in funzione della metallicità, [Fe/H], attraverso la differente scala temporale di rilascio degli elementi chimici da parte di due classi distinte di progenitori:

- Stelle massicce: producono grandi quantità di elementi α (O, Mg, Si, Ca, Ti) su tempi scala brevi (3-30 Myr). Esplodono come CCSNe lasciandosi dietro un oggetto compatto (stella di neutroni o buco nero)
- SNela (stadio finale dell'evoluzione di particolari sistemi binari formati da una nana bianca e da una compagna di massa bassa meno evoluta): producono grandi quantità di elementi del picco del ferro, non lasciano alcun oggetto compatto dietro di sé

Un’applicazione particolare del time-delay model: il rapporto isotopico del carbonio…



Un’applicazione particolare del time-delay model: il rapporto isotopico del carbonio… al TNG

1. Title

Galactic evolution of the carbon isotopic ratio

2. Abstract

Determinations of abundance ratios in stars can be used to constrain theories of stellar and galactic evolution. Unluckily, we still miss a satisfactory picture of how some key elemental and isotopic abundance ratios evolve in our Milky Way. The atmospheric abundances of the two stable isotopes of carbon may be altered by several processes during a star's lifetime. Therefore, in order to get insight into the evolution of the $^{12}C/^{13}C$ abundance ratio from the Big Bang to the present time, it is mandatory to observe unmixed stars with well-defined ages. We have selected 6 nearby ($d \leq 450$ pc) subgiant branch stars (free from evolutionary effects) with precise age determinations. Our proposed GIARPS observations will put unprecedented constraints on models of Galactic evolution and stellar synthesis of ^{13}C, while also allowing to check the consistency of $^{12}C/^{13}C$ abundance ratios measured from CH and CO bands in stars. This is a pilot programme, to verify the potentialities of GIARPS for these challenging observations. If successful we foresee to request further time.

3a. Number of requested hours per telescope and instrument (must include overheads)

TNG						REM	
DOLORES	DOL.+MOS	NICS	HARPS-N	GIANO-B	SIFAP2	ROSS	REMIR
			24	27			

Primo step: l’idea

Un’applicazione particolare del time-delay model: il rapporto isotopico del carbonio… al TNG

1. Title

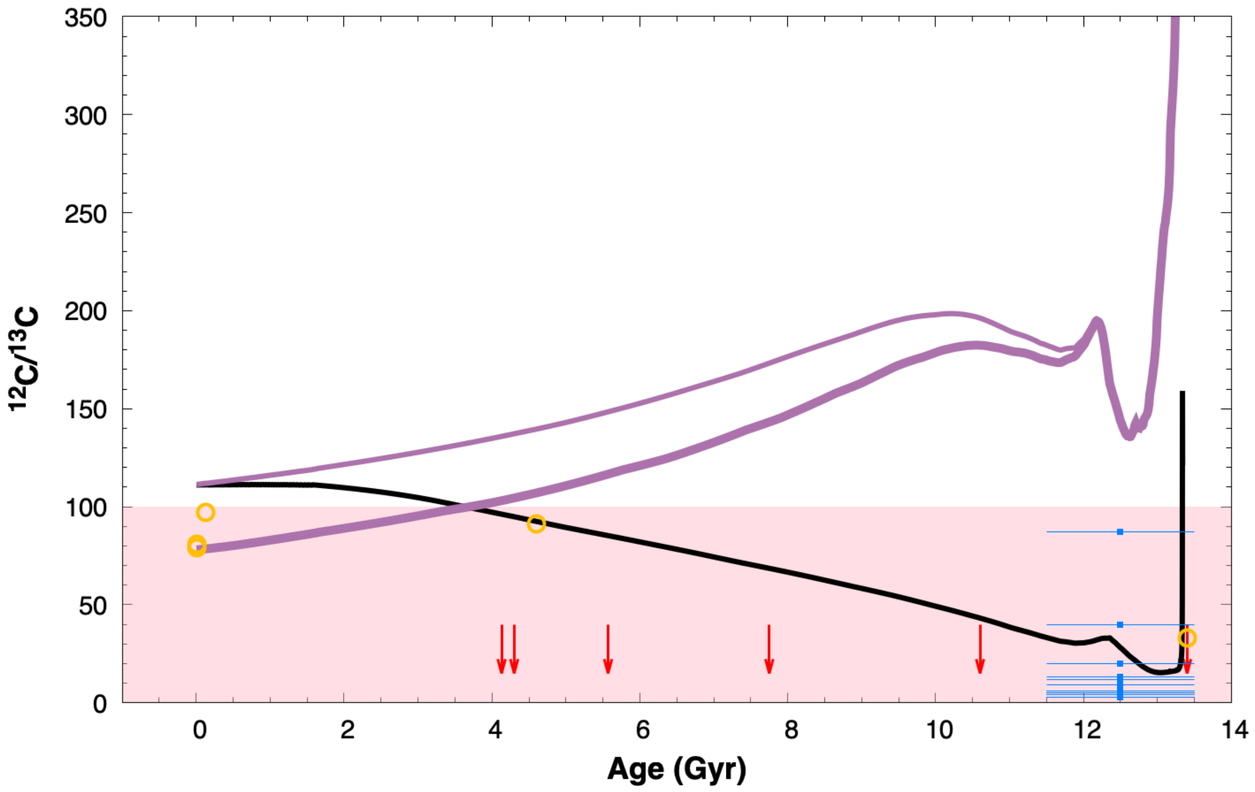
Galactic evolution of the carbon isotopic ratio

2. Abstract

Determinations of abundance ratios in stars can be used to constrain theories of stellar and galactic evolution. Unluckily, we still miss a satisfactory picture of how some key elemental and isotopic abundance ratios evolve in our Milky Way. The atmospheric abundances of the two stable isotopes of carbon may be altered by several processes during a star's lifetime. Therefore, in order to get insight into the evolution of the $^{12}C/^{13}C$ abundance ratio from the Big Bang to the present time, it is mandatory to observe unmixed stars with well-defined ages. We have selected 6 nearby ($d \leq 450$ pc) subgiant branch stars (free from evolutionary effects) with precise age determinations. Our proposed GIARPS observations will put unprecedented constraints on models of Galactic evolution and stellar synthesis of ^{13}C, while also allowing to check the consistency of $^{12}C/^{13}C$ abundance ratios measured from CH and CO bands in stars. This is a pilot programme, to verify the potentialities of GIARPS for these challenging observations. If successful we foresee to request further time.

3a. Number of requested hours per telescope and instrument (must include overheads)

TNG						REM	
DOLORES	DOL.+MOS	NICS	HARPS-N	GIANO-B	SIFAP2	ROSS	REMIR
			24	27			



Primo step: l’idea

Secondo step: il target

Un’applicazione particolare del time-delay model: il rapporto isotopico del carbonio… al TNG

Ottico | **IR**

HARPS-N | **GIANO-B**

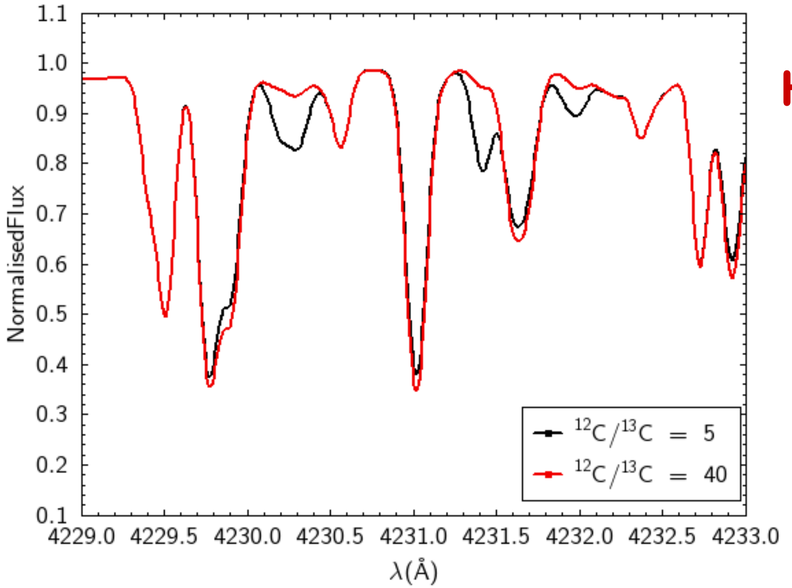


Figure 2: Portion of synthetic spectra for a subgiant star with $T_{\rm eff}$ =5540 K, $\log g$ = 3.2 dex, [Fe/H] = −1 dex and $^{12}C/^{13}C$ = 5 (black line) and 40 (red line).

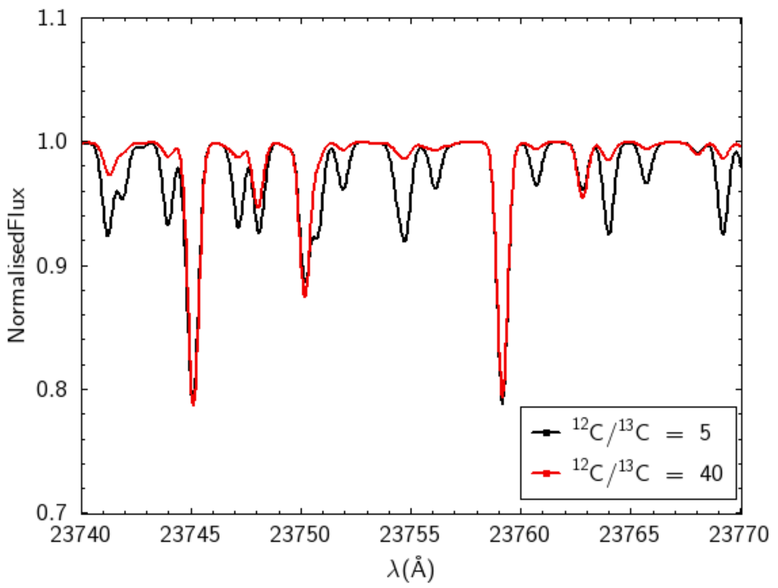


Figure 3: Portion of synthetic spectra for a subgiant star with $T_{\rm eff}$ =5100 K, $\log g$ = 3.2 dex, [Fe/H] = −0.5 dex and $^{12}C/^{13}C$ = 5 (black line) and 40 (red line).

11. List of targets (note that the absence of a proper object list, or poor target visibility, may weaken the proposal)

Name	α	δ	Epoch	Mag.	Time	Additional Information
TYC1448-343-1	188 17 31.85	+19 15 35.14	J2000	V=10.38	2hr	K=8.59
TYC1978-1594-1	165 06 38.56	+23 15 10.51	J2000	V=10.78	3hr	K=9.01
TYC1983-1091-1	168 19 16.21	+29 15 49.39	J2000	V=10.84	3hr	K=8.89
TYC3089-246-1	268 21 01.66	+39 19 26.47	J2000	V=10.99	3,5hr	K=8.98
BSD55-784	175 08 23.82	+30 30 21.92	J2000	V=11.03	3,5hr	K=9.17
TYC3044-206-1	223 59 54.10	+38 07 19.34	J2000	V=11.13	4hr	—

Terzo step: la fattibilità

Un’applicazione particolare del time-delay model: il rapporto isotopico del carbonio… al TNG

Ottico | **IR**

HARPS-N | **GIANO-B**

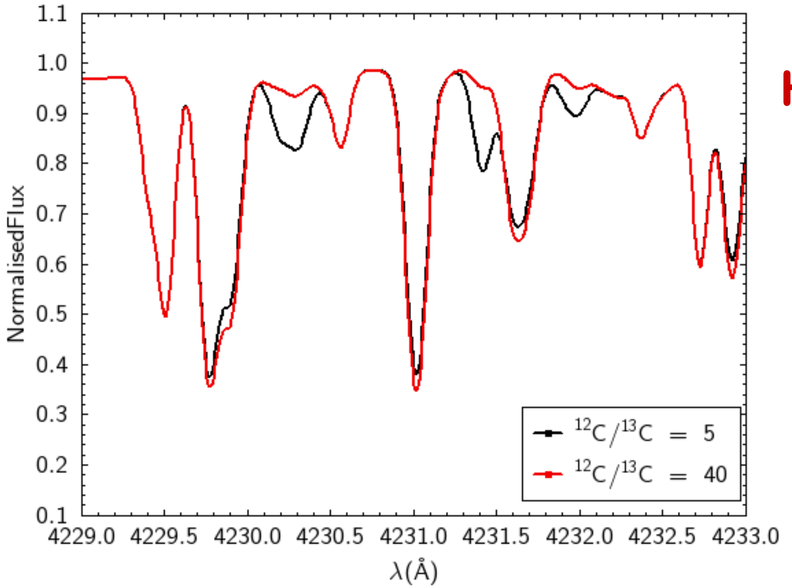


Figure 2: Portion of synthetic spectra for a subgiant star with $T_{\rm eff}$ =5540 K, $\log g$ = 3.2 dex, [Fe/H] = −1 dex and $^{12}C/^{13}C$ = 5 (black line) and 40 (red line).

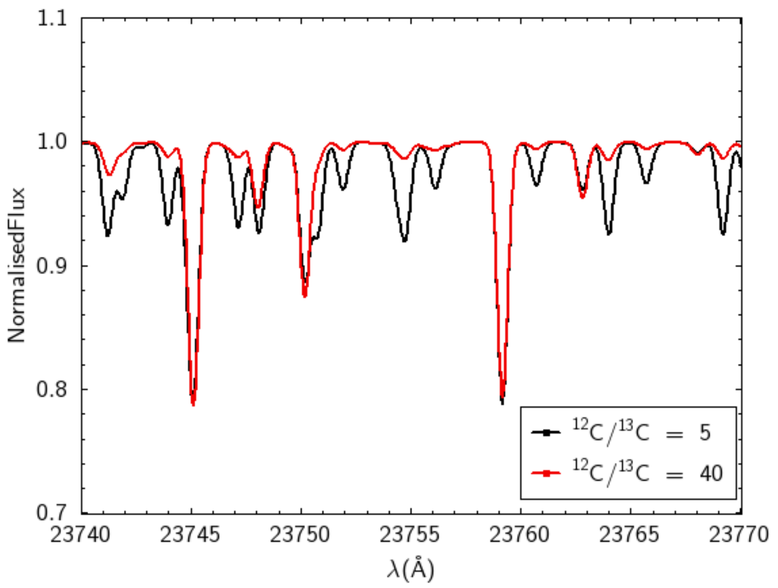


Figure 3: Portion of synthetic spectra for a subgiant star with $T_{\rm eff}$ =5100 K, $\log g$ = 3.2 dex, [Fe/H] = −0.5 dex and $^{12}C/^{13}C$ = 5 (black line) and 40 (red line).

11. List of targets (note that the absence of a proper object list, or poor target visibility, may weaken the proposal)

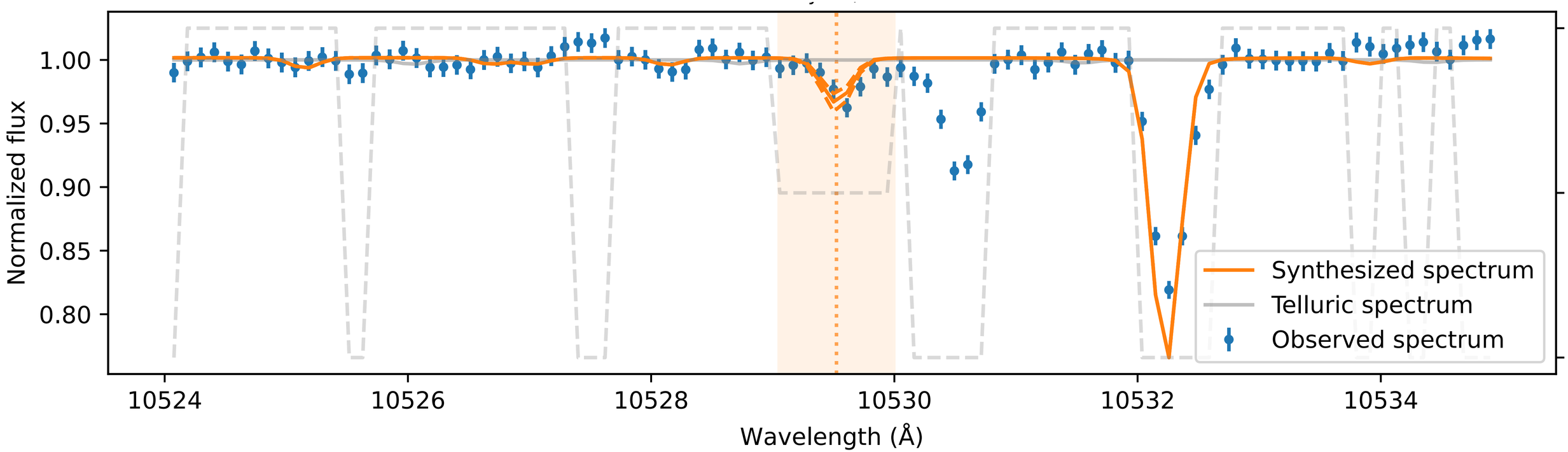
Name	α	δ	Epoch	Mag.	Time	Additional Information
TYC1448-343-1	188 17 31.85	+19 15 35.14	J2000	V=10.38	2hr	K=8.59
TYC1978-1594-1	165 06 38.56	+23 15 10.51	J2000	V=10.78	3hr	K=9.01
TYC1983-1091-1	168 19 16.21	+29 15 49.39	J2000	V=10.84	3hr	K=8.89
TYC3089-246-1	268 21 01.66	+39 19 26.47	J2000	V=10.99	3,5hr	K=8.98
BSD55-784	175 08 23.82	+30 30 21.92	J2000	V=11.03	3,5hr	K=9.17
TYC3044-206-1	223 59 54.10	+38 07 19.34	J2000	V=11.13	4hr	—

(usare l’ETC…)

Terzo step: la fattibilità

HARPS-N
+
GIANO-B
=
GIARPS

Figura da Jean et al. (2026)



Monthly Notices of the ROYAL ASTRONOMICAL SOCIETY

MNRAS **545,** 1–15 (2026)
Advance Access publication 2025 November 6

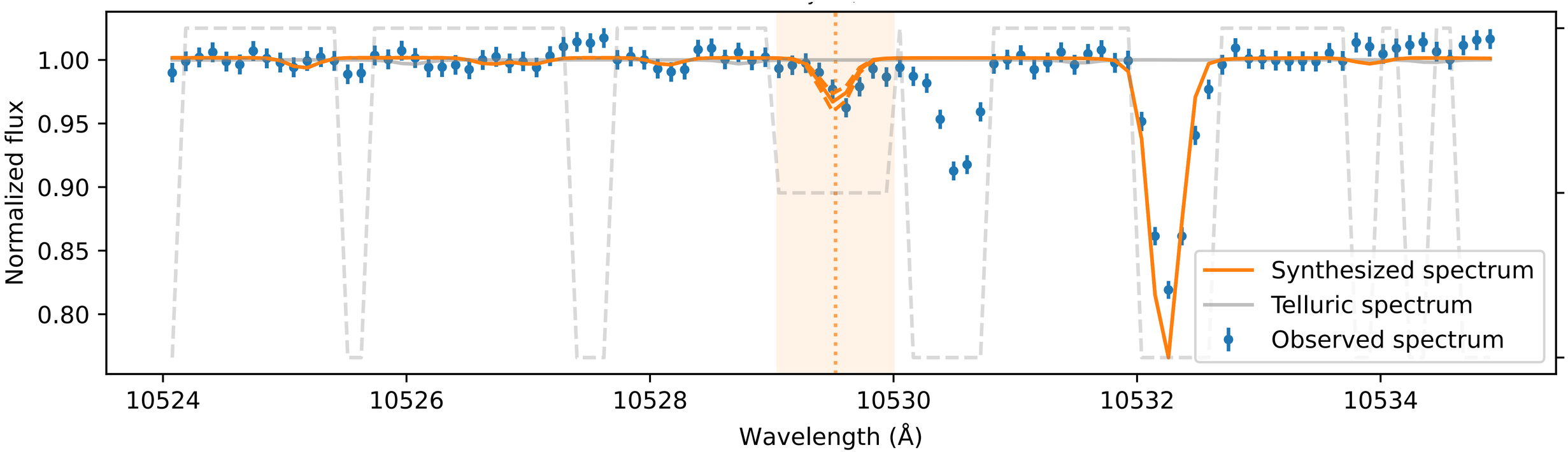
https://doi.org/10.1093/mnras/staf1797

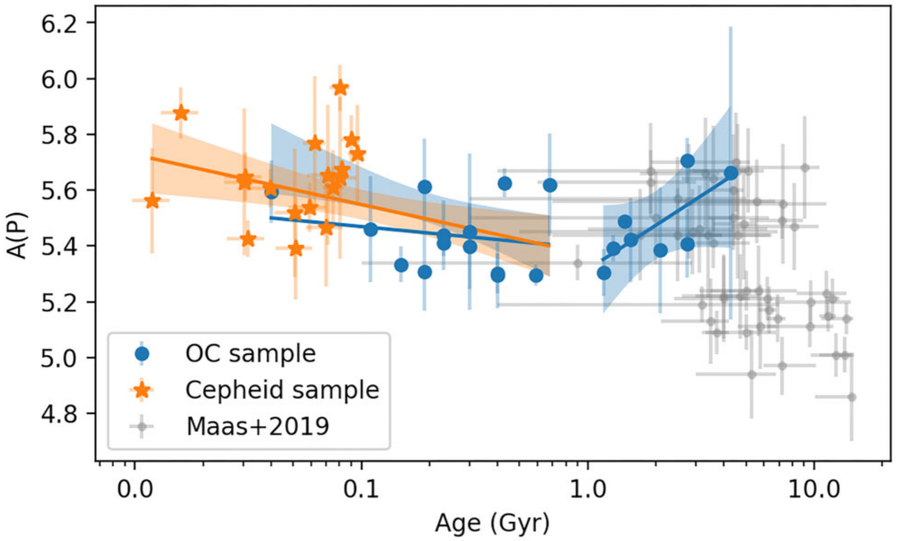
HARPS-N + GIANO-B = GIARPS

Stellar population astrophysics (SPA) with the TNG. The phosphorus abundance on the young side of Milky Way

Mingjie Jian(简明杰),[1★] Xiaoting Fu(符晓婷),[2,3] Valentina D'Orazi,[4,5] Angela Bragaglia,[3] S. Bijavara Seshashayana,[6,7] He Zhao(赵赫),[8] Ziyi Guo(郭子怡),[9,10] Karin Lind,[1] Noriyuki Matsunaga(松永典之),[11] Antonino Nunnari,[4,12] Giuseppe Bono,[4] Nicoletta Sanna,[13] Donatella Romano[3] and Marina Dal Ponte[5]

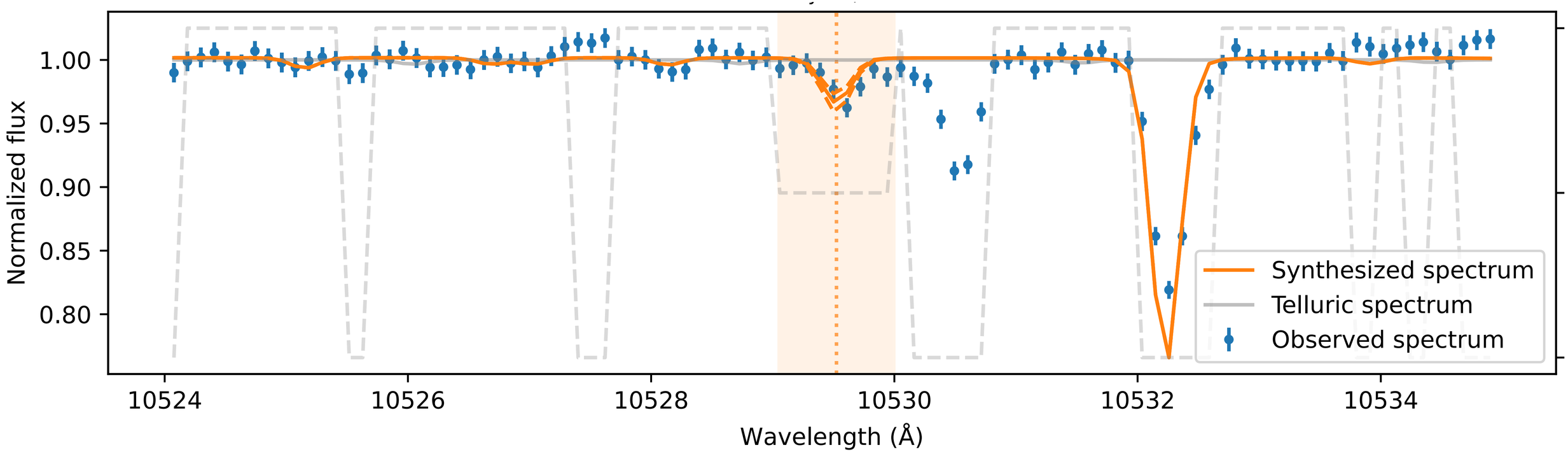
Figura da Jean et al. (2026)

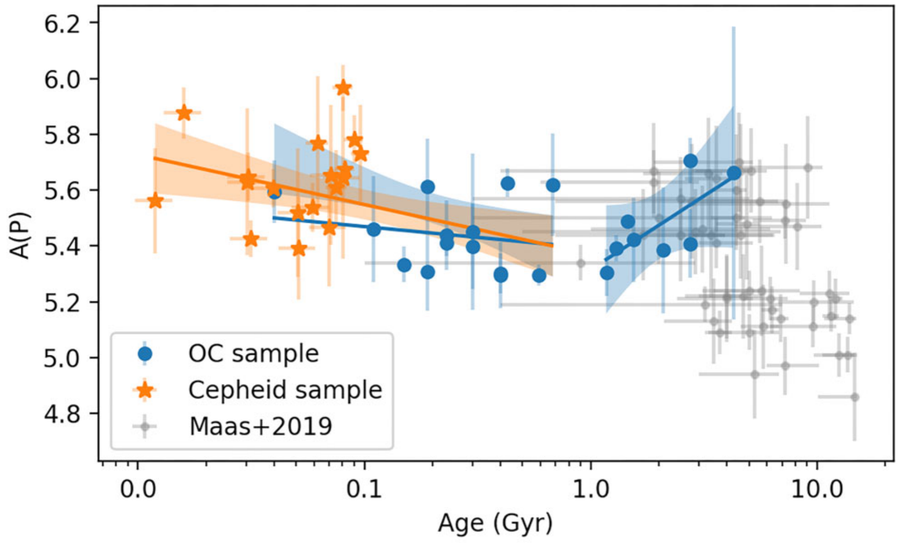




Comportamento anomalo dell'abbondanza di fosforo: trend o scatter?

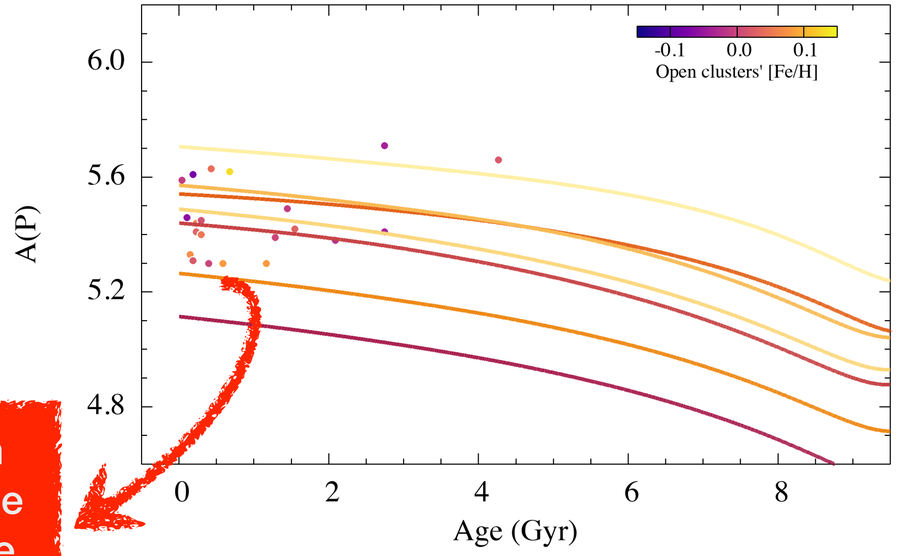
Figura da Jean et al. (2026)





Comportamento anomalo dell'abbondanza di fosforo: trend o scatter?

Modelli di evoluzione chimica con produzione di P da stelle massicce dipendente dalla rotazione stellare



Archeologia Galattica

Donatella Romano
INAF, Osservatorio di Astrofisica e Scienza dello Spazio di Bologna

