

ALMA MATER STUDIORUM · UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

Scuola di Scienze
Dipartimento di Fisica e Astronomia
Corso di Laurea in Fisica

FONDAMENTI E APPLICAZIONI DELL'ARCHEOLOGIA GALATTICA

Relatore:
Prof. Alessio Mucciarelli

Presentata da:
Diego Gilioli

Anno Accademico 2022/2023

Indice

| | |
|--|----|
| 1. Abstract | 3 |
| 2. Introduzione | 4 |
| 2.1 <i>Composizione chimica delle stelle</i> | 4 |
| 3 Accrescimento galattico | 9 |
| 3.1 <i>Teorie di accrescimento galattico</i> | 9 |
| 3.2 <i>Accrescimento della galassia Sagittarius</i> | 11 |
| 3.3 <i>Utilizzo della spettroscopia come mezzo di indagine</i> | 13 |
| 4 Missione GAIA | 16 |
| 4.1 <i>Obbiettivi della missione</i> | 16 |
| 4.2 <i>Navicella spaziale e carico utile</i> | 17 |
| 4.3 <i>Survey spettroscopiche</i> | 20 |
| 4.4 <i>GAIA-Enceladus</i> | 22 |
| 4.5 <i>Prove di merger nella Grande Nube di Magellano</i> | 25 |
| 5 Conclusioni | 28 |
| Referenze | 30 |

1. Abstract

Conoscendo le reazioni di nucleosintesi, i meccanismi che portano all'arricchimento di metalli del gas intragalattico e la composizione chimica delle stelle, è possibile ricostruire la storia di formazione ed evoluzione di una galassia. Con l'innovativa missione spaziale GAIA, e il relativo telescopio, è stato possibile ottenere anche informazioni sulla dinamica tridimensionale di un gran numero di stelle presenti nella Via Lattea, rendendone possibile la mappatura e lo studio delle orbite. Si nota spesso che stelle aventi orbite simili presentano proprietà chimiche analoghe, testimoniando una regione d'origine comune. Attraverso i modelli basati sulla teoria Λ CDM, che sostiene l'accrescimento gerarchico delle galassie, è evidente che il merger tra due strutture mantiene pressoché inalterate le orbite originarie, rendendole distinguibili nella formazione risultante. Nasce così l'archeologia galattica, che unisce gli studi spettroscopici e astrometrici per ricostruire la storia delle galassie, in particolare la nostra. Attraverso la misura delle proprietà cinematiche e chimiche è stato possibile, ad esempio, identificare un evento di merging, avvenuto 10Gyr fa, tra la nostra galassia ed una satellite, Gaia-Enceladus. È stato inoltre possibile identificare un evento simile, ma su scala minore, riguardante l'unione dell'ammasso globulare NGC 2005 con la Grande Nube di Magellano, galassia satellite della Via Lattea.

2. Introduzione

2.1 Composizione chimica delle stelle

Attraverso l'osservazione di spettri stellari è possibile indagare la composizione chimica della stella. Essa rimane pressoché immutata durante l'evoluzione della stella, partendo addirittura da quando esisteva solo una nube di gas e polveri. Dato che, secondo i modelli, le nubi originano molteplici stelle in un breve arco temporale, è ragionevole pensare che tutte quelle derivanti dalla frammentazione di una singola nube madre abbiano una composizione uguale, indipendentemente dalla loro massa, rendendone possibile l'identificazione attraverso il *chemical tagging*. La massa, tuttavia, influenza fortemente la composizione chimica delle regioni nucleari a causa delle differenti reazioni termonucleari che avvengono; è fondamentale avvalersi di una statistica che consenta di conoscere la massa delle stelle alla loro nascita, la cosiddetta Initial Mass Function (*IMF*) con espressione

$$\int_0^{\infty} \Phi(m)m dm = 1$$

dove m è la massa e $\Phi(m)$ è un parametro che varia sia a seconda dei modelli, sia della massa stellare. L'initial mass function è una statistica basata sul fatto che le stelle nate dalla medesima nube madre abbiano masse distribuite su una funzione pressoché universale, nella quale sono presenti molte stelle di piccola massa e un numero esponenzialmente minore di stelle all'aumentare della massa, come mostrato in *fig.1*. Recenti studi [1] hanno osservato che ambienti a bassa metallicità formano stelle mediamente più massive rispetto ad ambienti ricchi di metalli, smentendo così l'assunzione cardine dell'*IMF*; probabilmente non si riuscirà mai ad ottenere una *IMF* accurata in tutte le sue variabili, tale da potersi considerare universale, in quanto il campione di dati disponibili (popolazioni stellari risolte) spazia su una frazione infinitesima dell'Universo, il *Local Group*.

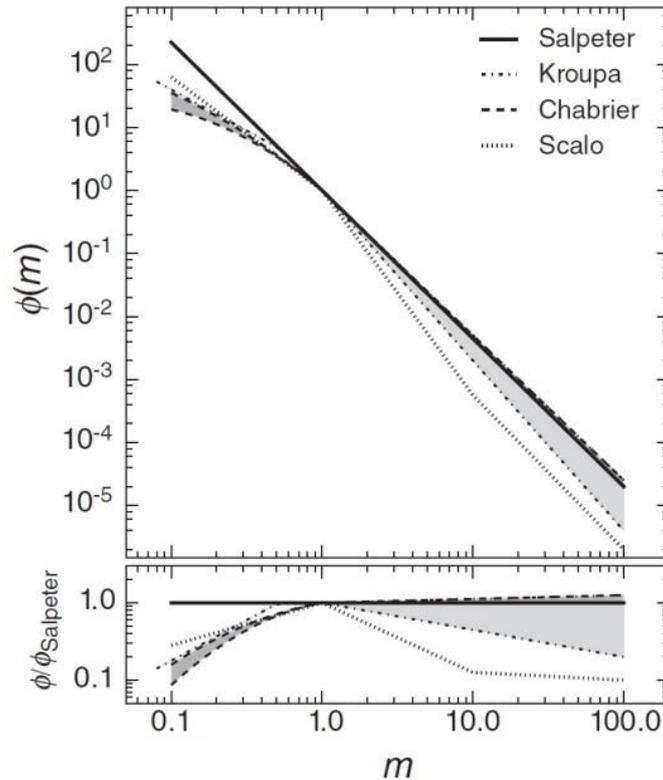


Fig. 1: nel grafico in alto sono rappresentati 4 diversi modelli di IMF, mentre in quello in basso il rapporto tra $\Phi(m)$ di ognuno e quella di Salpeter (1955), assunta spesso come riferimento.

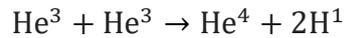
Assunto che la composizione chimica dell'universo primordiale fosse $X = 0.75, Y = 0.25$ e $Z = 0$, eccetto qualche traccia di Li, le stelle di 1° generazione erano composte solamente da H e He, mentre i restanti elementi, quelli metallici, sono comparsi in seguito alle reazioni termonucleari che li hanno prodotti [2].

La reazione termonucleare comune a qualunque tipo di stella è la trasformazione dell'idrogeno in elio, nello specifico $4\text{H} \rightarrow 1\text{He}^4$, che può avvenire in due modi differenti: attraverso la *PP-chain*, se $M < 2.2M_{\odot}$, o attraverso il *ciclo CNO*, per masse superiori. Entrambi i cicli di bruciamento dell'idrogeno hanno bisogno di temperature di innesco dell'ordine di 10^7K . La PP-chain a sua volta può essere eseguita in tre differenti meccanismi, chiamati PPI, PPII e PPIII, che in comune hanno l'assenza di catalizzatori ma differiscono per durata e prodotti intermedi. In seguito vengono rappresentate le reazioni e sottoreazioni termonucleari delle varie catene PP, in particolare γ sono fotoni e ν sono neutrini elettronici.

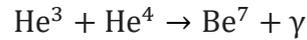
Innanzitutto avvengono due reazioni comuni, ovvero



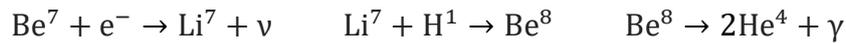
Successivamente il 69% dei prodotti delle precedenti reazioni contribuisce alla PPI



Mentre il restante 31% esegue un'altra reazione



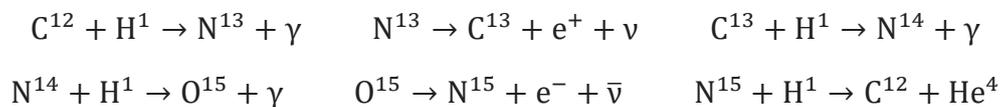
A questo punto il 99.7% del Be^7 entra nella PPII



Mentre il restante 0.3% entra nella PPIII



Il ciclo CNO [3] invece, avviene solamente in presenza degli elementi più pesanti, già presenti nella nube madre, che danno il nome alla reazione: carbonio, azoto e ossigeno, consumati e rigenerati continuamente durante il processo (per questo motivo è chiamato *ciclo*). È doveroso specificare che non si tratta di reazioni univoche, ma che all'aumentare della temperatura possono verificarsi reazioni differenti che compongono i cosiddetti *cicli secondari*. Il ciclo primario, quello essenziale per tale tipo di fusione termonucleare è costituito dalle seguenti reazioni:



Terminato il bruciamento dell'idrogeno e con esso la sequenza principale (*MS*), se $M < 0.5M_{\odot}$ non può avvenire l'ignizione dell'elio, dunque la stella diventa una nana bianca di He (in letteratura *Helium white dwarf*) destinata a raffreddarsi e spegnersi progressivamente. Per stelle più massive invece, iniziano le reazioni termonucleari di bruciamento dell'He, con evoluzioni diverse se M è maggiore o minore di $8M_{\odot}$. Nel caso in cui $M < 8M_{\odot}$ si forma un nucleo di C e O e al suo esterno gli strati di He ed H che bruciano in modo alternato, producendo carbonio e ossigeno dal bruciamento dell'He e *s-elements* (elementi più pesanti del ferro) attraverso cattura neutronica lenta. Durante questi processi, il raggio stellare aumenta finché le regioni più esterne risentono talmente poco della gravità che si separano attraverso il fenomeno dei venti stellari; la stella perde circa $10^{-4}M_{\odot}yr^{-1}$, originando così una nebulosa planetaria che disperde nel mezzo interstellare (*ISM*) i reagenti del ciclo CNO (se $M > 2.2M_{\odot}$), Li, C, O e *s-elements*. Rimane quindi il nucleo di C e O (*nana bianca CO*) al centro di una sfera di gas in espansione nello spazio circostante, come mostrato in *fig. 2* [4].

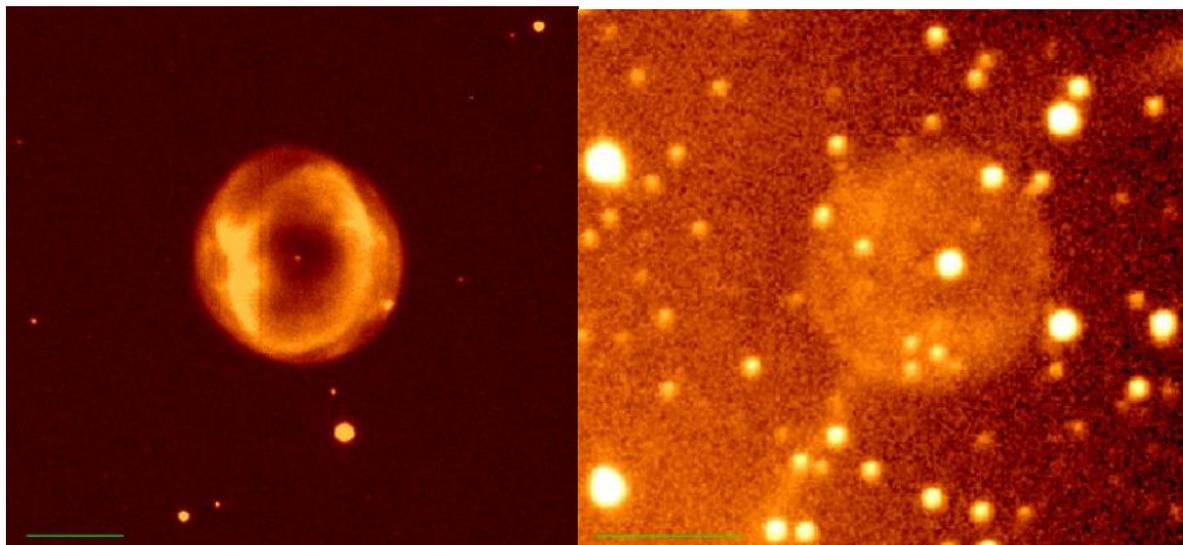


Fig.2: immagini di nebulose planetarie catturate con filtri in banda stretta, centrati sul picco di emissione di N II, con i telescopi di apertura moderata CASLEO e EABA. La scala di lunghezza mostrata dalla barra verde misura 60arcsec.

In un sistema binario di nane bianche (WD) oppure in un'interazione di cannibalizzazione, da parte di una WD nei confronti degli strati esterni di una gigante rossa (RG), si ottiene una *supernova di tipo Ia*, che libera nell'ISM elevate quantità di elementi derivati dal bruciamento dell'He, specialmente C e O, e dal bruciamento del Si, ovvero quelli del gruppo del ferro.

Per stelle con $M > 8M_{\odot}$ si forma un nucleo di Fe e una serie di strati "a cipolla" di elementi sempre più leggeri (Si, O, C, He, H) dei quali, una volta terminato il bruciamento nel nucleo, inizia quello nel suddetto strato. Essendo gli elementi del gruppo del ferro molto stabili, non avvengono ulteriori reazioni termonucleari, ma nel nucleo degenerato di Fe cominciano fenomeni di cattura elettronica, fotodisintegrazione e cattura neutronica. Di conseguenza la concentrazione di elettroni cala drasticamente, mentre i neutrini si accumulano nel nucleo o si disperdono, insieme all'energia, causando un rapido crollo della pressione di radiazione, ormai incapace di bilanciare la gravità. Gli strati esterni, quindi, iniziano un moto di caduta libera verso il nucleo addensandosi fino a quando non rimbalzano e producono un'onda d'urto incentivata dai neutrini, ora interagenti con la materia, originando una *supernova di tipo II*, mostrata in fig. 3 [5], oppure di *tipo Ib* o *Ic*. La classificazione delle SNe [6] è puramente empirica e dipende dalle righe spettrali osservate: quelle di tipo II presentano righe di H, mentre quelle di tipo I no. Le SNe di tipo Ia sono caratterizzate dalle righe del Si, quelle di tipo Ib hanno forti righe di He, mentre quelle di tipo Ic non presentano né Si, né forti righe di He.

Nell'ISM sono eiettati principalmente H, He e α -elements (C, N, O, Ne, Mg, Si, S, Ar, Ca Ti), in quantità minori s-elements e r-elements prodotti da cattura neutronica veloce durante l'esplosione, e una piccola percentuale di elementi del gruppo del Fe prodotti da nucleosintesi esplosiva nello strato di Si; della stella rimane solamente il nucleo di protoni, una *proto-stella di neutroni*.

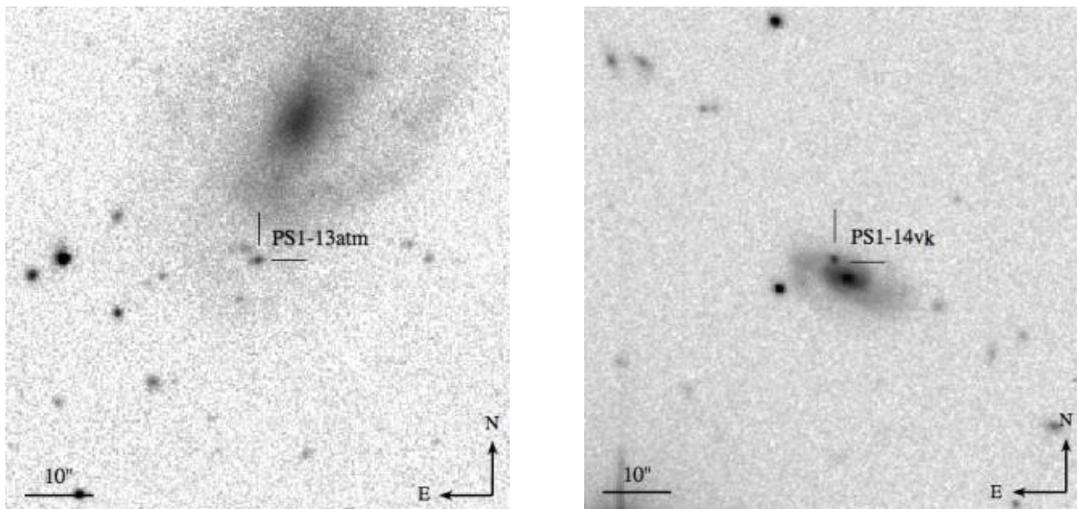


Fig. 3: immagini di supernove di tipo II ottenute in banda i; i trattini indicano la stella che ha originato l'esplosione.

Se $M > 25M_{\odot}$ la proto-stella di neutroni è talmente densa che forma un buco nero, mentre, se la massa è minore, si forma una stella di neutroni (NS). In queste stelle, per cattura neutronica veloce, avviene la nucleosintesi degli isotopi più pesanti degli elementi del gruppo del ferro. Capita che un sistema binario di NS collassi in un'unica stella, chiamata *stella di neutroni ipermassiccia*, nella quale vengono sintetizzati gli elementi più pesanti come platino e uranio, che si disperdono nell'ISM durante la collisione tra le NS.

È importante considerare che la vita media delle stelle, e di conseguenza anche il tempo impiegato a rilasciare nell'ambiente galattico il materiale al loro interno, è fortemente condizionato dalla loro massa. In particolare la durata della MS, lo stadio evolutivo di gran lunga più longevo, si stima secondo la relazione $t_{MS} \cong 10^{10} \left(\frac{M}{M_{\odot}}\right)^{-3}$ yr.

3 Accrescimento galattico

3.1 Teorie di accrescimento galattico

I meccanismi di formazione e accrescimento delle galassie sono alcuni tra i temi più studiati e dibattuti nell'astrofisica odierna, ma restano ancora senza una risposta certa. Al momento il modello cosmologico maggiormente accreditato, il modello Lambda-Cold Dark Matter (Λ CDM), teorizza che l'accrescimento delle galassie sia dovuto all'unione gerarchica (*merger* in letteratura) con sistemi stellari di massa inferiore, tipicamente piccole galassie, ma anche ammassi stellari. Tale processo può avvenire sia tra galassie con masse comparabili, sia tra galassie con masse significativamente differenti; in questo caso quelle meno massive vengono chiamate anche galassie satellite. Il nome non deriva solamente dal rapporto dimensionale tra le due, ma suggerisce il tipo di interazione che sussiste: l'interazione gravitazionale. È proprio la gravità che consente i fenomeni di *merging*, i quali possono riguardare sia i gas che le stelle precedentemente formate. Nel primo caso una galassia attira a sé i gas presenti in una galassia satellite attraverso il *ram-pressure stripping* mostrato in *fig. 4* [7], oppure il *tidal stripping*, di origine mareale.

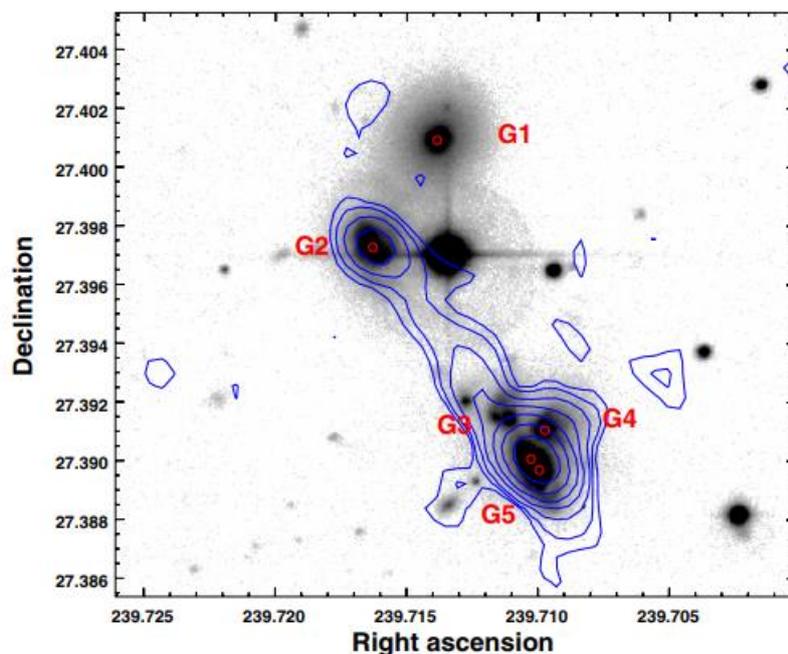


Fig. 4: viene mostrato il processo di ram-pressure stripping in un ammasso di galassie. L'immagine è stata ottenuta attraverso l'osservazione in banda X e in banda radio; in particolare le linee blu corrispondono con l'emissione a 610MHz osservate dal GMRT.

Nel secondo caso invece possono avvenire sia collisioni tra galassie, come quella che coinvolgerà la Via Lattea e Andromeda tra circa 4.5Gyr, una cui simulazione è mostrata in *fig.5* [8], sia assorbimenti graduali di galassie satellite dovuti alle maree gravitazionali.

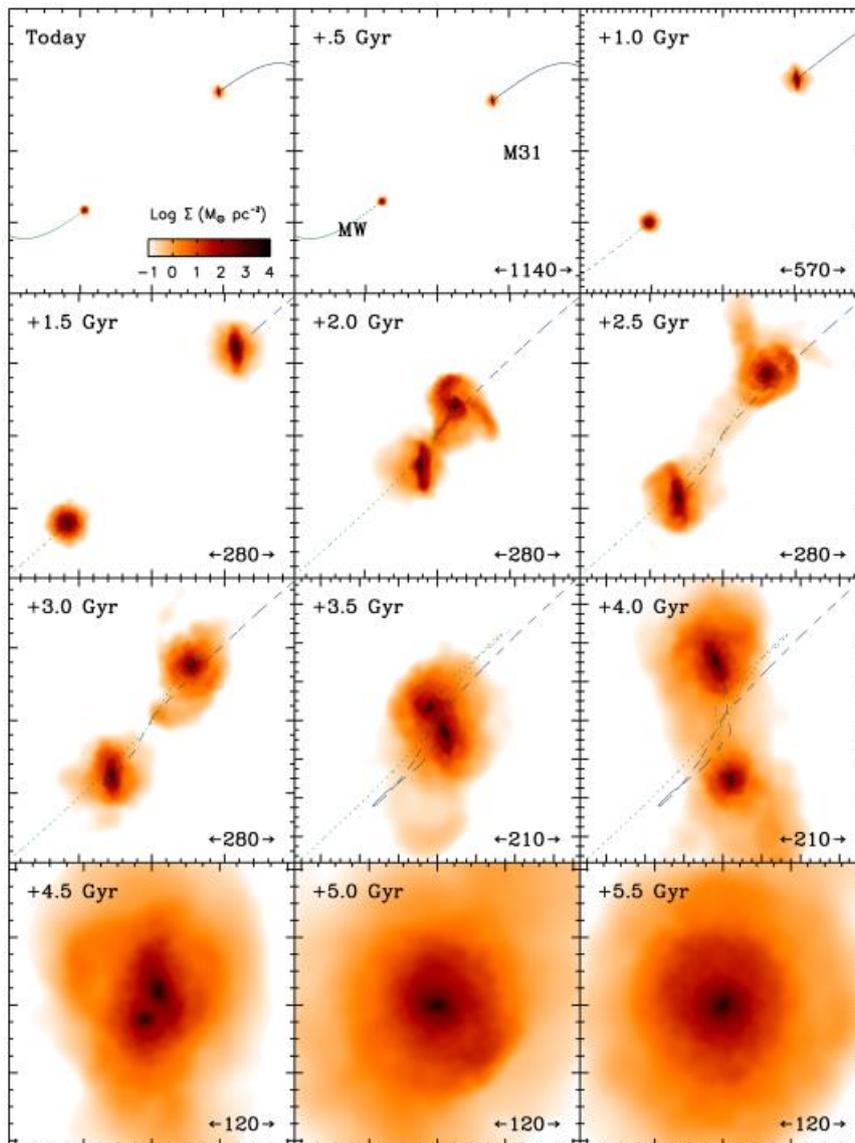


Fig. 5: è raffigurata una simulazione dell'unione tra le galassie Via Lattea e Andromeda. Per ogni immagine, in alto a sinistra è visibile la distanza temporale dell'evento, mentre in basso a destra è presente la scala di lunghezza misurata in kpc.

Nonostante la presenza di modelli a N-corpi, resta complicato prevedere il risultato di un merger, in quanto fortemente influenzato dalla dinamica delle galassie, per la quale sono cruciali l'angolo di collisione, la velocità di collisione e la dinamica delle stesse stelle che

compongono le galassie, in particolare la loro velocità e dispersione. Essendo la componente dominante delle galassie, nonché quella spazialmente più estesa, la prima interazione di un merger avviene tra gli aloni di materia oscura, che successivamente si uniscono in un unico alone comprensivo di entrambe le galassie. Nell'unione, le stelle mantengono pressoché invariato il loro moto perché, nonostante avvenga un processo violento su scala galattica, la distanza tra esse è tale da poterne mediamente trascurare la mutua interazione. Visto che le stelle della stessa galassia, specialmente se piccola, hanno dinamica stellare simile, è ragionevole concludere che anche gli integrali del moto sono simili (energia e momento angolare o uno dei suoi componenti). In caso di tidal-stripping stellare, o di merger con ammassi molto minori, le orbite si mantengono invariate, mentre nel caso di interazioni maggiori le orbite osservate e gli integrali del moto delle singole stelle sono più vari e spaziano in un range maggiore. Si fa quindi riferimento ai flussi stellari (ma anche gassosi), ovvero insiemi di stelle che seguono indicativamente le stesse orbite, che provengono dal medesimo oggetto, il quale ha subito un merger in passato.

3.2 *Accrescimento della galassia Sagittarius*

È emblematico il caso della galassia nana sferoidale Sagittarius (*Sgr dSph*) [9] [10], una galassia satellite della Via Lattea che, ormai da qualche miliardo di anni, sta venendo accresciuta. È relativamente semplice da osservare perché è la galassia nana più vicina al centro della MW, distante solamente ~ 15 kpc. Al momento, Sgr si presenta come una struttura sferoidale allungata, con bassa luminosità ($\sim 10^8 L_{\odot}$) ed è costituita da un nucleo di stelle senza particolari legami gravitazionali e da alcuni flussi stellari di diversa luminosità che cingono la MW. I due flussi principali sono ad una distanza calcolata [11] di 102.5 ± 2.5 kpc dal centro della Via Lattea, ma alcuni flussi minori si estendono fino a ~ 300 kpc, ben oltre il raggio viriale, e rappresentano le stelle più lontane appartenenti alla galassia. La massa totale e la massa stellare odierne, con valori rispettivamente di $M \sim 4 \times 10^8 M_{\odot}$ e $M_{*} \sim 10^8 M_{\odot}$, risultano decisamente inferiori a quelle stimate prima del merger in $M \sim 10^{10-11} M_{\odot}$ e $M_{*} \sim 1.6 \times 10^9 M_{\odot}$. L'antenato di Sgr si è formato tra 14 Gyr e 7 Gyr fa, ma successivamente, quando era distante ancora ~ 80 kpc, ha iniziato a perdere gas a causa dell'attrazione mareale della Via Lattea, che ne ha bloccato irreversibilmente l'accrescimento circa 6 Gyr fa; solo in un secondo periodo, tutt'ora in corso, anche le stelle hanno iniziato a fluire verso la galassia più massiva. Il merger ha contribuito notevolmente allo sviluppo della Via Lattea, in particolare ne ha

aumentato la dimensione del disco di materia oscura e lo SFR, inoltre ha inciso sulla cinematica stellare. Quest'ultima è stata condizionata dai flussi stellari di Sgr [12], che compiono un'orbita quasi perpendicolare rispetto al piano del disco della MW; al pericentro stimolano la formazione di asimmetrie nella struttura galattica e l'accentuazione dei movimenti radiali a spirale e simmetrici. Le simulazioni con modelli a N-corpi confermano che la perturbazione di densità indotta dal passaggio dei flussi si ripercuote sia sui bracci a spirale principali Scutum-Centaurus e Perseus, sia su due bracci secondari e meno luminosi (del Sagittarius e della Norma), presumibilmente formati grazie agli ultimi passaggi, mostrati in *fig. 6*.

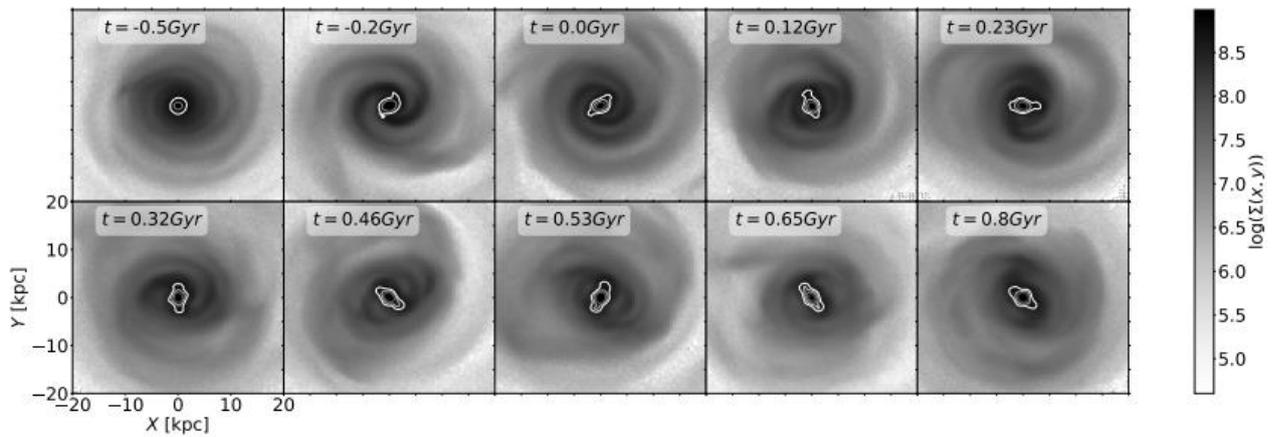


Fig. 6: modello evolutivo della densità del disco galattico durante l'ultima fase di merger (da -0.5Gyr a 0.80Gyr da oggi). Gli ultimi passaggi pericentrici sono avvenuti a ~ -0.50 Gyr e ~ 0 Gyr e hanno portato alla formazione dei bracci minori. Sono visibili anche i bracci maggiori e alcune asimmetrie di densità, incentivate anche dalla presenza dei flussi stellari.

È doveroso specificare che modelli e simulazioni differenti conducono anche a risultati lievemente discordanti tra loro: alcune simulazioni imputano la formazione dei bracci secondari ai primi passaggi pericentrici, altri agli ultimi, la massa stellare odierna di Sgr ha differenze dell'ordine di unità di $10^8 M_{\odot}$, mentre la datazione del merger è compresa tra 5Gyr e 7 Gyr.

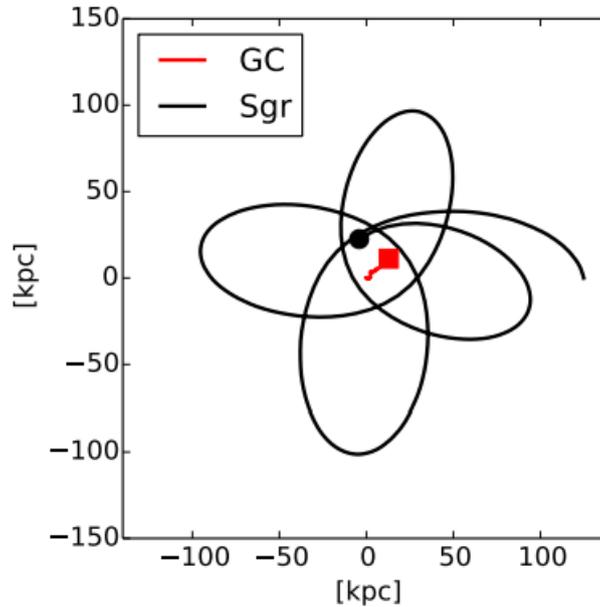


Fig. 7: best fit delle simulazioni relative ai modelli semi-analitici delle orbite del centro della MW (linea nera) e del progenitore di Sgr (linea rossa) rispetto al piano orbitale di Sgr. Il quadrato rosso è la posizione attuale di Sgr, mentre il cerchio nero è la posizione attuale del centro della MW.

3.3 Utilizzo della spettroscopia come mezzo di indagine

Al giorno d'oggi la frequenza dei merger è più bassa rispetto al passato a causa della notevole diminuzione della densità dell'Universo, perciò è assai difficile trovare una prova diretta di tale fenomeno; è quindi necessario ricorrere ad altri metodi. L'archeologia galattica è basata sull'osservazione della dinamica e degli spettri delle stelle, sia membri di ammassi stellari che appartenenti ad una data galassia; analizzando i dati raccolti e confrontandoli con le aspettative iniziali e i modelli proposti, si cercano eventuali discordanze e aspetti in comune tra le stelle in una stessa regione del cosmo. È dal confronto tra le proprietà chimiche delle stelle con quelle presenti nella stessa galassia, che si può intuire se la formazione è avvenuta in loco, oppure in tutt'altra parte della galassia, o addirittura dell'universo.

Una volta che i prodotti delle reazioni termonucleari (in letteratura *yield* o y) vengono rilasciati nel mezzo interstellare, questi si mischiano con il gas presente nelle nubi, che a loro volta andrà a costituire nuove stelle, ma con metallicità maggiore (*chemical enrichment*); ci si accorge che stelle più metalliche sono necessariamente il risultato di molteplici rilasci di materiale da parte di stelle di precedenti generazioni. Utilizzando questo metodo è possibile anche stimare l'ambiente di origine di una determinata popolazione stellare in relazione alla sua metallicità (Z), in particolare avvalendosi dello *star formation rate* e dell'IMF, come

mostrato in *fig. 8* [13].

L'IMF può essere dedotta dal rapporto tra concentrazione di α -elements e quella di Fe, indicata con $[\alpha/\text{Fe}]$: una regione con IMF spostata verso stelle più massicce produce un numero maggiore di SN II, aventi $[\alpha/\text{Fe}]$ più elevato, il che si ripercuote per le successive generazioni. Anche lo star formation rate, $\text{SFR} = \frac{dM}{dt} = [M_{\odot} \text{yr}^{-1}]$ cioè la massa stellare prodotta in un arco temporale, influenza $[\alpha/\text{Fe}]$: in presenza di elevata produzione stellare, il gas raggiunge alti livelli di $[\alpha/\text{Fe}]$ antecedentemente delle prime esplosioni di SN Ia (indicate dal ginocchio della funzione graficata in *fig. 8*) e tale punto si trova a maggiori valori di $[\alpha/\text{Fe}]$. Proprio per questo il ginocchio è un buon riferimento temporale, tantoché si stima lo SFR dalla frazione di stelle al di sotto del punto stesso.

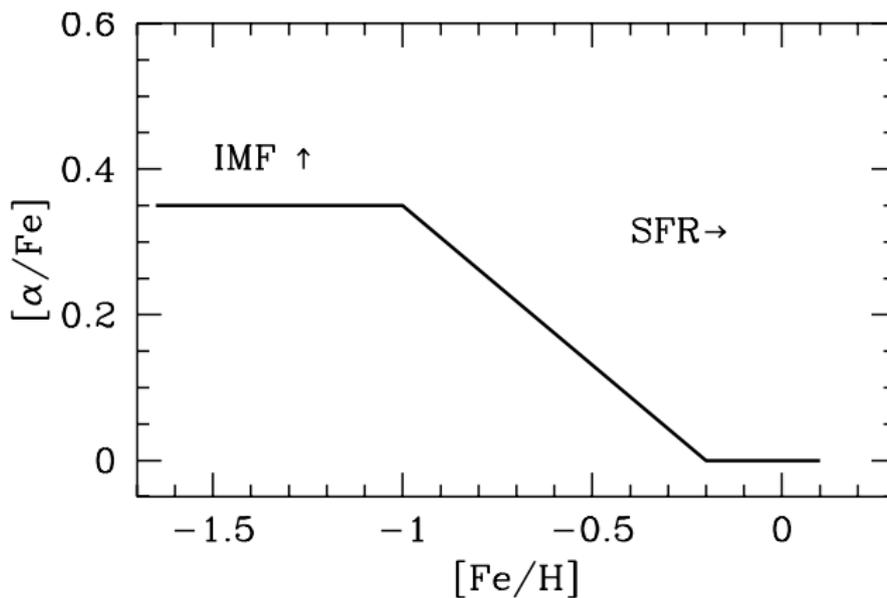


Fig. 8: rappresentazione schematica ed estremamente semplificata dell'andamento di $[\alpha/\text{Fe}]$ in funzione di $[\text{Fe}/\text{H}]$ variando IMF e SFR.

Tendenzialmente lo SFR è più alto e localizzato nelle galassie giovani e massive, dove è presente una grande quantità di gas, nelle galassie che compiono interazioni di merger e negli *starburst*, ovvero regioni interne di alcune galassie (solitamente giovani) nelle quali c'è elevata produzione stellare per periodi brevi ($<10^8 \text{yr}$). Lo SFR è moderato, in quanto distribuzione sia temporale che spaziale, per il disco delle galassie a spirale, per le regioni più interne di galassie di età intermedia (come la Via Lattea) e per nubi molecolari, con densità piuttosto elevata e bassa temperatura. Infine lo SFR è basso nelle galassie primordiali a causa

dell'esaurimento dei gas, nelle galassie nane perché spesso vengono private del gas da galassie più grandi e nelle regioni più esterne del disco galattico.

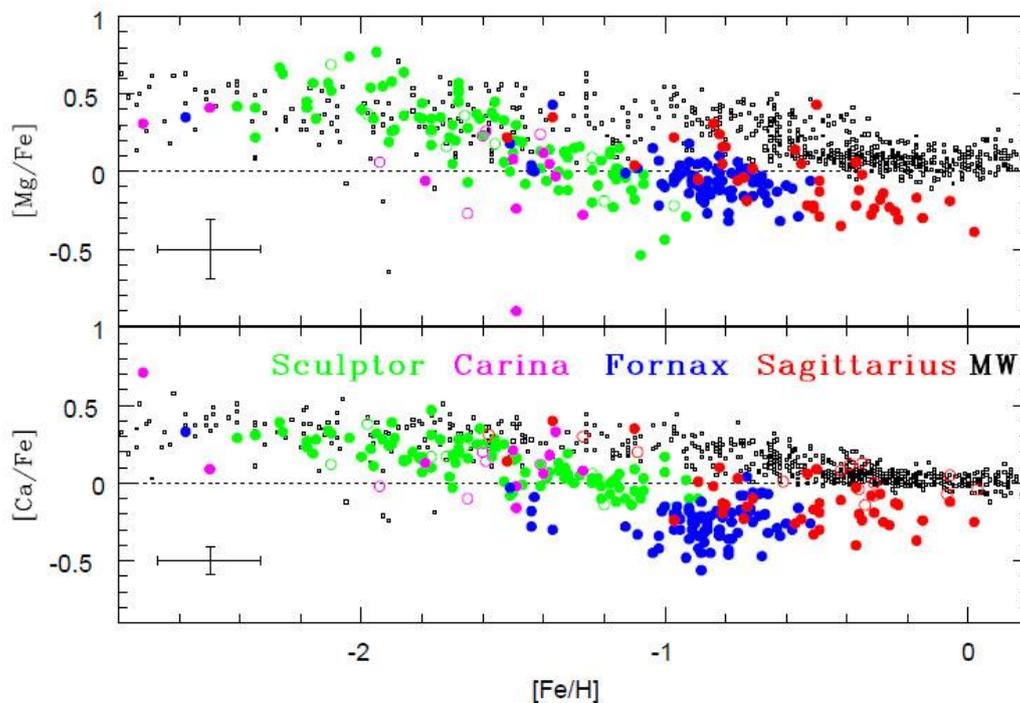


Fig. 9 [14]: confronto tra le abbondanze di Ca e Mg in una galassia di medie dimensioni (MW) e in tre galassie nane (Fornax, Carina e Sculptor). È evidente che la MW ha un intervallo di metallicità molto ampio, tuttavia la maggior parte delle sue stelle sono più metalliche rispetto a quelle delle galassie nane.

4 Missione GAIA

4.1 Obiettivi della missione

GAIA [15], acronimo di *Global Astrometric Interferometer for Astrophysics*, è una missione spaziale lanciata dall'Agenzia Spaziale Europea (ESA) il 19 dicembre 2013, con durata prevista di 5 anni, ma successivamente prolungata più volte fino al 2025. Tutt'oggi il satellite occupa un'orbita di Lissajous intorno al secondo punto lagrangiano del sistema Terra-Sole (L2), che garantisce stabilità termica, esclusione dalla vista di Terra, Luna e Sole e poca interferenza luminosa con radiazione indesiderata. L'obiettivo principale della missione è, sostanzialmente, osservare la struttura spaziale e il movimento tridimensionale attuali di un campione di oltre 10^9 stelle e milioni di altri oggetti, che hanno prodotto oltre 124TB di dati relativi al loro spazio delle fasi e alle loro spettrometrie. Più specificatamente sono una decina gli ambiti esplorativi di GAIA:

- Struttura, dinamica ed evoluzione della Via Lattea: studio limitato ($\sim 1\%$ del totale) ma rappresentativo delle stelle della galassia, dei loro raggruppamenti e dell'ISM, per comprendere la distribuzione della materia barionica e della materia oscura, al fine di evidenziare le proprietà e i potenziali delle varie regioni che compongono la MW. Particolare attenzione è posta sul vicinato solare.
- Storia della formazione stellare della Via Lattea: attraverso l'analisi della luminosità assoluta e dello spettro chimico, si studiano sia le stelle singole della galassia, sia gli oggetti extragalattici nel raggio di influenza della MW (entrambi ad elevato red shift) per capire l'origine e l'evoluzione della materia barionica all'interno della galassia.
- Fisica ed evoluzione delle stelle: studio ad alta risoluzione delle stelle individuali al fine di capirne la distanza (e costruire una mappa cosmica) e di produrre un diagramma *colour-magnitude* più corretto in ogni fase evolutiva, compresa quella pre-MS. È fondamentale avere dati fotometrici accurati, cosa impossibile da fare al suolo per colpa di effetti ottici parassitari dell'atmosfera.
- Variazione delle stelle: attraverso misure astrometriche periodiche, le stelle vengono costantemente monitorate in modo da notare qualsiasi cambiamento di luminosità, aumentando il numero di variabili che ne contribuiscono alla caratterizzazione. L'astrosimologia è diventata fondamentale per comprendere i meccanismi interni e

grazie ad essa è possibile stimare l'età delle stelle con maggiore accuratezza.

- Stelle binarie e multiple: studio delle interazioni tra stelle fortemente interagenti tra loro, in particolare delle conseguenze sulla loro composizione chimica e sulla massa circostante.
- Esopianeti: in collaborazione con i telescopi di terra, si effettua una ricerca dettagliata di pianeti extrasolari in zone della galassia fino ad ora poco esplorate, cercando in primis esopianeti con caratteristiche simili a quelle della terra (massa, composizione chimica e abitabilità) e successivamente esopianeti giganti, ovvero ammassi di gas non sufficientemente massivi per diventare stelle, come Giove.
- Sistema solare: il sole e i pianeti del sistema solare sono troppo vicini a GAIA per poter essere osservati. Invece, gli asteroidi rientrano perfettamente nel range di luminosità della missione e possono aiutarci a comprendere il sistema solare primordiale, nonché essere catalogati in funzione difensiva o per future missioni esplorative.
- Local Group: studio delle stelle risolvibili nelle galassie del Local Group, catalogando centinaia di milioni di stelle tra Andromeda, Nubi di Magellano (MCs) e le stelle più luminose nelle galassie nane. In queste osservazioni sono comprese la dinamica delle galassie nane, l'interazione tra MCs e MW [16] e gli effetti della materia oscura su scala intergalattica e come mezzo di interazione.
- Galassie irrisolte: analogamente alle stelle, vengono analizzate le spettrometrie e la dinamica di milioni di galassie su tutta la volta celeste al fine di ottenere dati statistici rilevanti. Anche i quasar vengono sottoposti ad un'indagine a frequenze luminose differenti per capirne le proprietà intrinseche e il loro ruolo negli AGN.
- Fisica di base: vengono condotti esperimenti e osservazioni soprattutto riguardo fenomeni relativistici influenzati dai campi gravitazionali, come la distorsione dello spazio causata da Giove.

4.2 Navicella spaziale e carico utile

Il satellite di GAIA, mostrato in *fig. 10*, è stato costruito interamente dall'*Airbus Defence and Space* ed è composto da tre parti principali: il modulo di carico utile (PLM), il modulo di

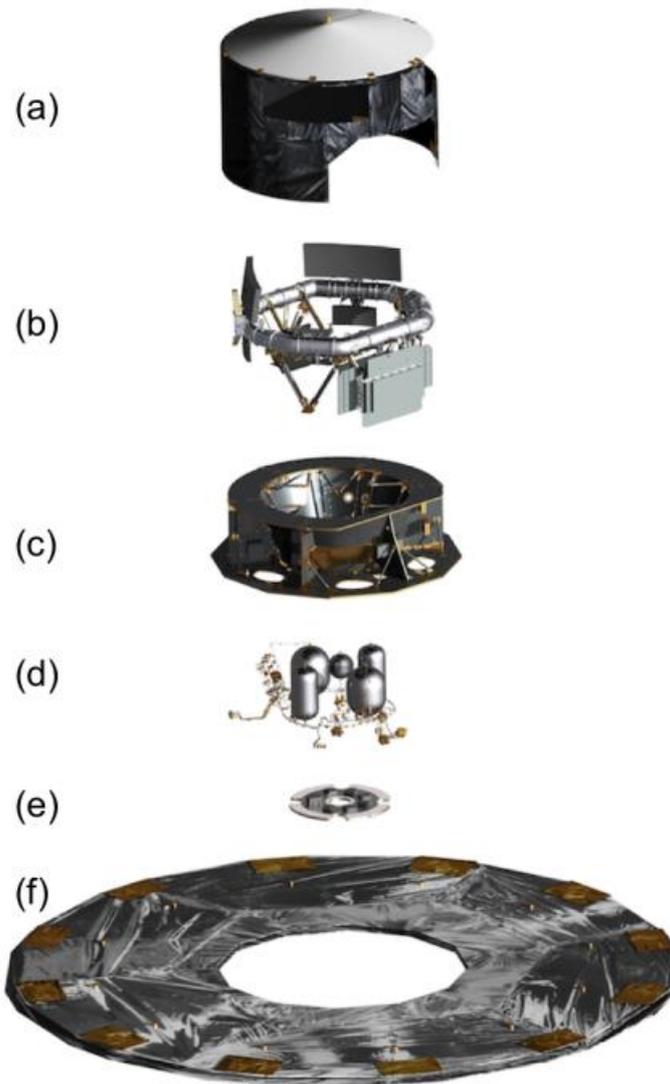
servizio meccanico (*M-SVM*) e il modulo di servizio elettrico (*E-SVM*). Il telescopio poggia su un satellite in lenta rotazione (a terra è impostata a $60''\text{s}^{-1}$) che misura il tempo di attraversamento del piano focale da parte dei bersagli, rappresentandone la posizione unidimensionale in relazione agli assi di misura. GAIA è una missione auto-calibrante, in grado di riconoscere la propria posizione ed eventuali parametri indesiderati, ed è dotata di due direzioni di osservazione convergenti nello stesso piano focale, separate da un angolo costante di $106^{\circ}5'$ per avere una maggiore separazione delle immagini.

Il modulo di servizio, comprensivo di *M-SVM* e *E-SVM*, contiene i dispositivi strutturali, meccanici e termici ed è essenzialmente l'insieme di tutti i supporti tecnici necessari al sostentamento e al mantenimento della missione. Al suo interno sono contenuti anche gli hardware di elaborazione e analisi dati, il dispositivo di funzionamento del timer di scatto e quello per scambiare informazioni con il centro di controllo, mantenuti nel delicato equilibrio termico necessario. È presente il meccanismo di controllo dell'altitudine e dell'orbita, che può modificare la traiettoria attraverso micro-propulsori a bi-propellente, a loro volta controllati da sensori ridondanti che sopperiscono a piccoli errori o malfunzionamenti. Il satellite è alimentato grazie ai pannelli fotovoltaici, ed è tenuto isolato termicamente (e dall'impatto con micro-meteoriti) da una tenda a sandwich di fibra di carbonio rinforzata da polimeri e alluminio, al fine di proteggere i telescopi. Gli strumenti di misura sono due telescopi identici a tre specchi (in realtà divisi in un complicato insieme di specchi, ognuno con funzioni differenti) anastigmatici (*TMA*), con aperture $1.45\text{m} \times 0,50\text{m}$, uniti in un percorso comune e doppiamente piegati in modo da avere distanza focale di 35m . Grazie a sistemi di isolamento termico e compensazione di vibrazioni e fenomeni gravitazionali, l'errore totale sul fronte d'onda è ridotto a 50nm , mentre quello sulla luminosità a pochi decimi di magnitudine; risultati sensazionali dato che il telescopio svolge ricerche astrometriche, fotometriche e spettrometriche contemporaneamente. Le immagini vengono generate con quasi un miliardo di pixel, ma non tutti vengono salvati: solo la piccola area intorno al punto d'interesse è rilevante e, oltre ad una notevole diminuzione di memoria utilizzata, si diminuisce il rumore di fondo causato da pixel indesiderati. La strumentazione astrometrica ha una copertura a lunghezze d'onda tra 330nm e 1050nm , con elevata presenza di rumore, e copre tutta la volta celeste riuscendo a catturare oggetti con luminosità fino a magnitudine 20; il suo scopo principale è quello di individuare la posizione dei bersagli e costruire la mappa celeste più accurata mai redatta attraverso la parallasse trigonometrica delle stelle fuori dall'immediato

vicinato solare. La strumentazione fotometrica utilizza due filtri, uno blu che opera a lunghezze d'onda tra 330nm e 680nm, e uno rosso, operante a lunghezze d'onda tra 640nm e 1050nm; serve per la catalogazione degli oggetti osservati, per la correzione cromatica delle misure astrometriche e per effettuare le ricerche in abito astrosismico. Queste infatti, derivano dallo studio dell'evoluzione stellare, attentamente monitorata grazie al confronto tra le immagini catturate nell'arco temporale della missione (circa 14 ogni anno). La strumentazione spettroscopica si avvale di un filtro che cattura lunghezze d'onda tra 845nm e 872nm, range del tripletto del Ca II, mentre per stelle vecchie si usano lunghezze d'onda nel range della serie di Paschen dell'idrogeno. Si studia la velocità radiale degli oggetti grazie all'effetto Doppler, si eseguono una parametrizzazione e una caratterizzazione grossolane delle stelle estrapolando dati come velocità di rotazione, parametri atmosferici e abbondanze chimiche. La conoscenza del vettore velocità è probabilmente il dato più rivoluzionario che GAIA può fornire, è il risultato dell'analisi degli spettri stellari ad alta risoluzione: solitamente si osservano due delle tre componenti di \vec{v} , ovvero quelle perpendicolari alla velocità radiale. Per ottenere anche quest'ultima, ci si avvale dell'effetto Doppler, confrontando gli spettri di emissione del bersaglio con quelli attesi da una stella con velocità radiale nulla attraverso la formula

$$\lambda_O = \sqrt{\frac{1 + \beta}{1 - \beta}} \lambda_E \quad \beta = \frac{v}{c}$$

Dove λ_O è la lunghezza d'onda osservata, λ_E quella emessa, v la velocità radiale e c quella della luce.



*Fig. 10: rappresentazione schematica dei componenti di GAIA. **a)** tenda termica che protegge il carico utile; **b)** modulo del carico utile; **c)** modulo di servizio; **d)** sistema di propulsione; **e)** antenna; **f)** scudo solare*

4.3 Survey spettroscopiche

Nonostante GAIA sia dotata di strumenti in grado di eseguire indagini spettroscopiche, i dati raccolti non vengono utilizzati per stabilire le abbondanze chimiche stellari, bensì vengono sfruttati soprattutto per studiare la distanza e il moto proprio degli astri attraverso considerazioni di red shift. Per ottenere delle misure spettroscopiche accurate, in grado di rivelare la chimica delle stelle, ci si avvale dei telescopi di terra, posizionati in punti strategici del globo; spesso sono costruiti in luoghi remoti e ad elevate altitudini, per minimizzare l'inquinamento luminoso e le vibrazioni prodotte dalle attività umane e per ridurre l'interazione con l'atmosfera. I principali fornitori dei dati spettroscopici di GAIA sono stati i

telescopi APOGEE (*Apache Point Observatory Galactic Evolution Experiment*) situato in New Mexico (USA) e ESO (*European Southern Observatory*) che ha tre siti di osservazione nel deserto di Atacama (Cile).

APOGEE [17] [18] , rappresentato in *fig. 11*, è usato prevalentemente per l'osservazione di stelle giganti, ha un campo visivo di 3° ed è funzionale alle SDSS (*Sloan Digital Sky Survey*). È composto internamente da uno specchio primario con $\varnothing=2.5\text{m}$ che riflette la luce su uno specchio secondario, dal diametro di 1.08, il quale riflette la luce attraverso un piccolo buco nello specchio primario e due lenti correttive disposte in serie sopra la fotocamera. Le misure si avvalgono delle correzioni effettuate da un telescopio fotometrico dal diametro di 0.50m, il quale monitora le (quasi) impercettibili variazioni della temperatura e della pressione atmosferica durante l'osservazione; in questo modo si può calibrare il telescopio principale sulla corretta luminosità. La realizzazione delle immagini avviene in una camera sottovuoto raffreddata a -80°C , nella quale 30 sensori CCD, divisi e diversamente filtrati in file di 5, ricevono gli elettroni sotto forma di segnali elettrici amplificati; ogni CCD è composto da circa 4 milioni di pixel. Gli spettri sono ricostruiti attraverso una procedura più complicata: la luce passa attraverso una serie di fogli di alluminio contenenti 640 fori, ognuno in corrispondenza di un oggetto osservato, poi è separata nelle sue componenti tendenti al blu e in quelle tendenti al rosso, che attraverso fibra ottica raggiungono due spettroscopi che separano ulteriormente le lunghezze d'onda. Ogni spettro è misurato tra 380nm e 920nm e può risalire a oggetti (in prevalenza stelle, galassie non risolte e quasar) di magnitudine ≤ 17.8 . APOGEE ha una struttura esterna innovativa, infatti è l'unico telescopio mantenuto costantemente al di fuori della sua cupola; questo perché, se lo si portasse all'esterno solo per le osservazioni notturne (come per gli altri telescopi), il calore accumulato durante la giornata produrrebbe delle turbolenze davanti alla lente. Inoltre è stato costruito con una struttura metallica protettiva che lo avvolge, riparandolo dalle raffiche di vento.

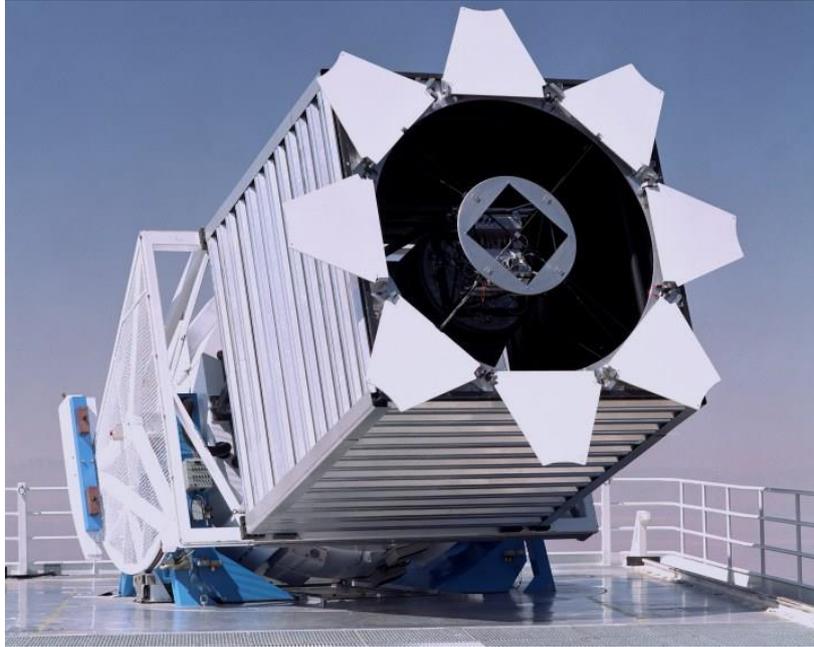


Fig. 11: visione frontale del telescopio APOGEE, compresi lente e struttura protettiva.

ESO [19] ha la funzione di osservare alcune stelle e ammassi, scelti in base al loro moto proprio o alla loro parallasse. Le misurazioni vengono effettuate in tre diversi siti e con altrettanti strumenti diversi: un VTL (*Very Large Telescope*), un NTT (*New Technology Telescope*) e ALMA (*Atacama Large Millimeter/submillimeter Array*). Il VLT, usato come interferometro, cattura porzioni di cielo di milliarcosecondi, con incertezza di 10 microarcosecondi; è formato da 4 telescopi di $\varnothing=8.2\text{m}$ che operano sia con luce visibile sia con IR, affiancati da un telescopio ausiliare di 1.8m di diametro con funzione correttiva e da altri telescopi di varia grandezza che elaborano le survey. Nel sito NTT operano due telescopi di 3.6m di diametro nelle lunghezze d'onda visibili e primo infrarosso, con funzioni di ricerca nel campo degli esopianeti e dell'astrosismologia. ALMA è l'insieme di 66 antenne ad alta precisione operanti con lunghezze d'onda comprese tra 0.32mm e 3.6mm; il sito presenta 50 antenne principali con $\varnothing=12\text{m}$ e le restanti 12 complementari con $\varnothing=7\text{m}$, che possono essere spostate da una distanza minima di 150m ad una massima di 16km tra loro.

4.4 GAIA-Enceladus

Scandagliando la regione più interna dell'halo della Via Lattea, nel vicinato solare, si osservano stelle con la metallicità tipica del thick disc, ma con una cinematica tipica dell'halo; una conoscenza più approfondita è arrivata solamente grazie alla missione GAIA, che ne ha

rivelato la dinamica [20]. Il 44% delle stelle con regime cinematico dell'halo appartiene alla parte calda del thick disc, mentre la maggior parte delle restanti fa parte dei detriti di una formazione chiamata Gaia-Enceladus (o Gaia-Sausage). Costruendo il CMD delle stelle con tale dinamica, si nota chiaramente che esistono due popolazioni distinte, mostrate in *fig. 12*, aventi diversa età e diversa composizione chimica. Indagando gli spettri emissivi di Gaia-Enceladus, mostrati in *fig. 14*, si nota una concentrazione minore di α -elements rispetto a quella del thick disc, evidenziando una differenza nei processi evolutivi delle due popolazioni; infatti si è calcolato che Gaia-Enceladus si sia formata con uno SFR di $0.3M_{\odot} yr^{-1}$, incompatibile con quello medio della MW di $\sim 1.5M_{\odot} yr^{-1}$. Da questo si deduce che Gaia-Enceladus fosse una galassia nana formatasi in un arco temporale di circa 2Gyr, risultando in $M_{*} \sim 6 \times 10^8 M_{\odot}$ con metallicità indicativamente di $-1.5 \leq [Fe/H] \leq -0.6$. La metallicità del thick disc, come prevedibile, si aggira intorno a quella solare con valori indicativamente di $-0.5 \leq [Fe/H] \leq 0.5$, nettamente maggiore rispetto a quella di Gaia-Enceladus. Mettendo in relazione gli spettri e i dati astrometrici, le stelle più vecchie, che sono quelle povere di metalli, presentano un'orbita più retrograda rispetto alle altre; in *fig. 13* è mostrato l'insieme cinematico di tali astri, chiamato "*blob*". Il moto radiale di questi astri è diverso da quello rintracciabile nel disco galattico, e l'unica spiegazione a tale anisotropia è che le due popolazioni si siano evolute in sistemi differenti. Si ha finalmente la prova che, come osservato già nel 1950, stelle con dinamica simile hanno composizione chimica simile, siano esse originate all'interno della galassia, sia in altre parti dell'Universo, testimoniando così l'avvenuta di un merger.

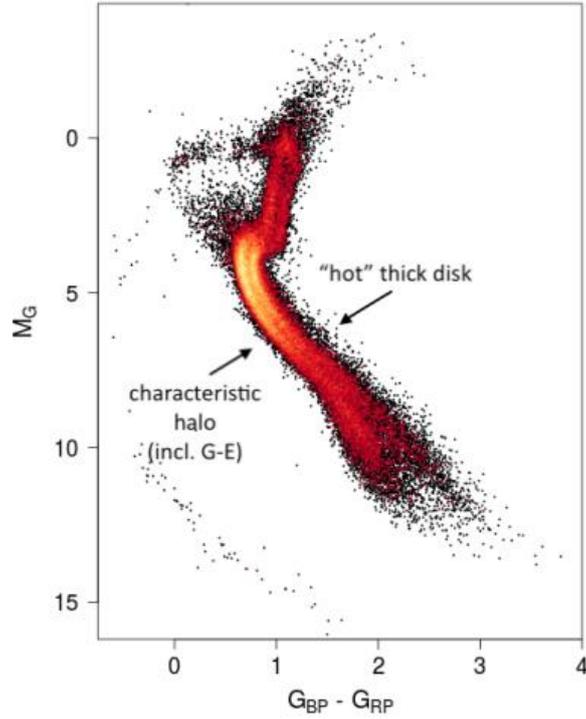


Fig. 12: CMD assoluta delle stelle con cinematica “halo-like” e velocità tangenziale $>200\text{km/s}$, dove sono evidenziate le due diverse popolazioni del thick-disk e di Gaia-Enceladus.

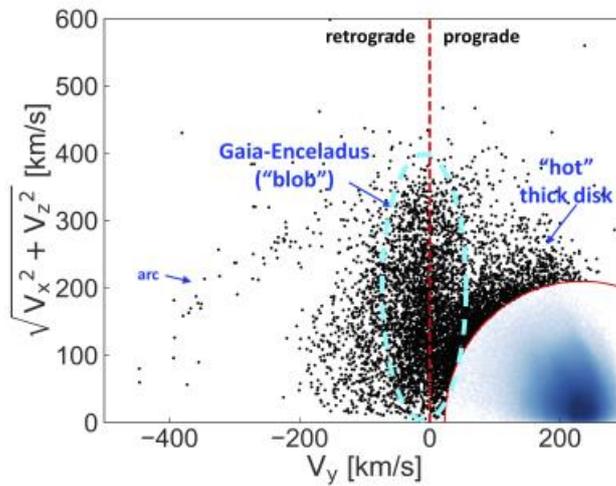


Fig. 13: confronto tra velocità planare (asse y) e velocità tangenziale delle stelle con cinematica “halo-like”. Sono evidenziate sia la popolazione del thick disk, sia quella del blob di Gaia-Enceladus; si nota che le orbite del blob sono decisamente più retrograde rispetto a quelle del disco.

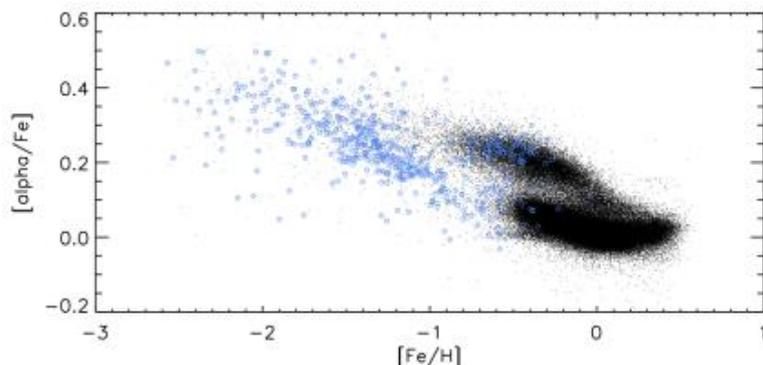


Fig. 14: confronto tra la metallicità delle stelle del thick disc (in nero) e quelle di Gaia-Enceladus (in blu). Ogni punto rappresenta una stella

Le stelle più recenti e metalliche di Gaia-Enceladus, con una concentrazione di α -elements minore rispetto a quella tipica del disco, sono più giovani di quelle presenti nel thick disc della MW, portando a due importanti conclusioni: si può identificare la distanza temporale del merger, circa 10Gyr, e si capisce che in quell'epoca il disco era già formato. Si pensa che sia stato il merger maggiore avvenuto nella storia della MW, con un rapporto tra le masse stellari delle galassie di circa 4:1; questo ha profondamente cambiato l'evoluzione della MW, soprattutto del vicinato solare dato che, ad oggi, circa metà delle stelle presenta una cinematica "halo-like". Lo SFR è il parametro che ha maggiormente risentito di questa fusione, infatti aumentando considerevolmente la massa stellare della galassia e la quantità di gas disponibile, è cresciuto anche il tasso di formazione stellare, specialmente nel thin disc durante le fasi finali del merger.

4.5 Prove di merger nella Grande Nube di Magellano

La Grande Nube di Magellano (LMC) è la maggiore galassia satellite della MW, con massa totale $\sim 1 - 2.5 \times 10^{11} M_{\odot}$ e massa stellare $\sim 3 \times 10^9 M_{\odot}$. È naturale supporre che una struttura così massiva abbia un suo sistema di galassie satelliti (per una galassia di questa massa le simulazioni prevedono fino a 40 satelliti), e che anch'essa si sia formata per accrescimento gerarchico grazie ai merger con formazioni minori. L'unico satellite conosciuto di LMC è la Piccola Nube di Magellano (SMC) con massa totale $\sim 2 \times 10^9 M_{\odot}$; gli altri non sono ancora stati scoperti, ma dovrebbero avere masse minori comprese tra $\sim 10^8 M_{\odot}$ e $\sim 10^4 M_{\odot}$. Il limite inferiore deriva dalle galassie nane ultra-deboli (UFD), ovvero le formazioni stellari meno luminose, più antiche e maggiormente costituite da materia oscura piuttosto che da

materia barionica. Prima dell'arrivo del secondo pacchetto dati della missione GAIA si conosceva solo l'interazione tra le due Nubi di Magellano, ma le nuove spettroscopie e astrometrie hanno permesso di identificare 11 vecchi ammassi globulari (GC) di LMC, consentendone lo studio [16]. Probabilmente si tratta della regione centrale di antiche galassie satellite, ormai private di gran parte delle loro stelle e del loro gas a causa delle maree gravitazionali dovute a LMC. Individuando 13 elementi chimici (ognuno indicatore di un differente meccanismo di nucleosintesi) e relative abbondanze incompatibili con quelle rintracciabili negli ammassi globulari della Via Lattea, appare evidente che MW e LMC presentano storie evolutive distinte. Tra gli ammassi ne spicca uno particolarmente povero di metalli, mostrato in *fig.15*, (con $[Fe/H] = -1.75 \pm 0.04$), chiamato NGC 2005, con massa $2 - 3 \times 10^5 M_{\odot}$ e distante ~ 0.23 kpc dal centro di LMC. Sono presenti anche altri 5 ammassi con concentrazione di Fe simile a NGC 2005, tuttavia l'incompatibilità delle abbondanze di α -elements, s-elements e r-elements suggerisce che l'ambiente di formazione di NGC 2005 e degli altri 5 GCs sia diverso. In particolare, quello di NGC 2005 presenta uno SFR minore ($1 - 1.5 M_{\odot} yr^{-1}$ dei 5 GCs contro i $\sim 5 \times 10^{-4} M_{\odot} yr^{-1}$ di NGC 2005), tipico di una galassia nana sferoidale, e un $[Zn/Fe]$ basso al punto da suggerire una scarsissima presenza di stelle con massa $> 30 M_{\odot}$; lo Zn, infatti, viene prodotto solamente dall'esplosione delle ipernove derivanti da stelle con massa molto elevata. Il tutto è confermato da un recente studio che mette in relazione lo SFR inefficace (visibile dalle basse metallicità e luminosità di un sistema) con il limite superiore alla massa delle stelle formate in $\sim 40 M_{\odot}$. Per quanto riguarda la dinamica orbitale di NGC 2005 non si riscontrano particolari anomalie rispetto agli altri ammassi globulari, ma questo è imputabile ad una probabile omogenizzazione delle loro orbite con il passare del tempo, stimato in qualche miliardo di anni dall'inizio del merger.

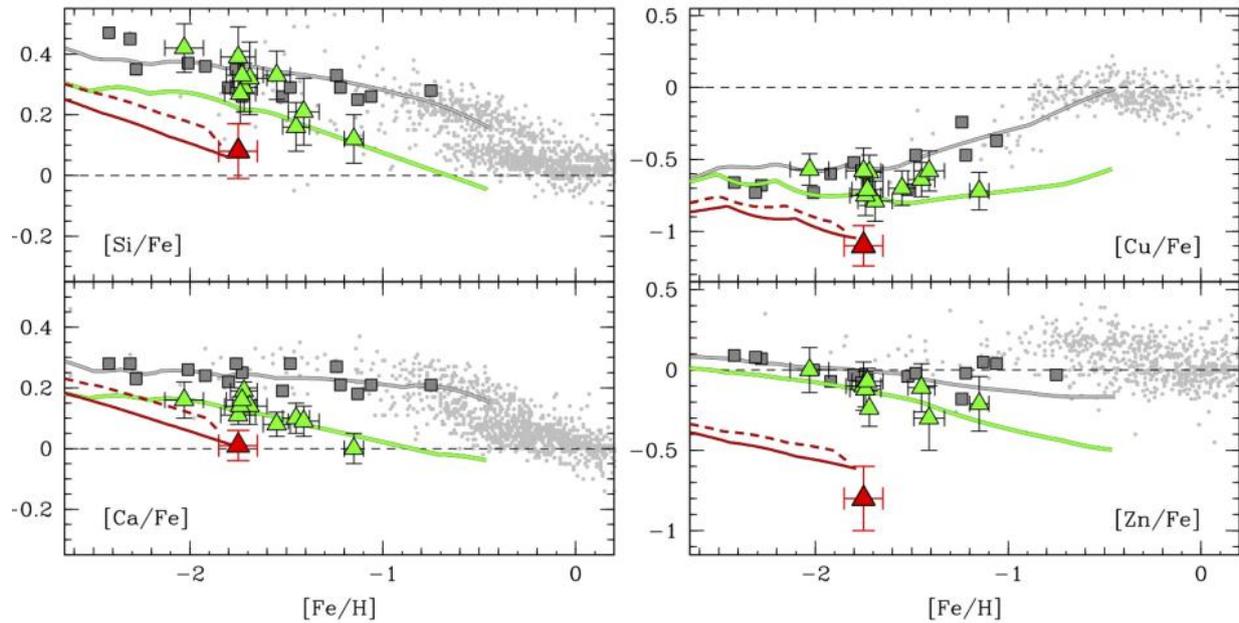


Fig. 15: abbondanze chimiche di diversi elementi riscontrate nella Via Lattea (quadrati grigi), nella Grande Nube di Magellano (triangoli verdi), nel NGC 2005 (triangoli rossi) e nel vicinato solare (puntini grigi). Le linee rappresentano l'andamento i modelli evolutivi attesi delle abbondanze chimiche.

Cercando il progenitore di NGC 2005, le uniche galassie nane sferoidali che possono formare un ammasso simile sembrano essere Sagittarius, Fornax, Ursa Minor e Draco. Ursa Minor e Draco vanno escluse perché, pur avendo una spettroscopia simile a quella di NGC 2005, hanno massa comparabile a quella dell'ammasso globulare stesso, per cui non possono averlo originato. Sagittarius invece, ha una massa decisamente maggiore ($\sim 4 \times 10^8 M_\odot$), ma una composizione simile a LMC, quindi non può essere l'opzione corretta. Rimane solo Fornax, con massa $\sim 2 \times 10^7 M_\odot$ e ospitante i 5 ammassi con $[Fe/H]$ simile a quella di NGC 2005; 4 di questi ammassi hanno anche massa comparabile con quella di NCG 2005, per cui è plausibile che il suo progenitore sia stata una galassia simile a Fornax.

5 Conclusioni

Si osserva che in alcune regioni della galassia, le stelle con cinematica differente da quella mediamente riscontrabile nella medesima zona, presentano anche una composizione chimica diversa dalle altre. In particolare le stelle con dinamica simile tra loro (ma atipica rispetto alla media) costituiscono i flussi stellari, cioè famiglie di orbite con caratteristiche comuni. Tali strutture condividono anche la composizione chimica, contraddistinta da bassa metallicità, inferiore rispetto alle stelle circostanti. Si comprende che la chimica della nube madre, per cui anche il luogo della sua formazione, è incompatibile con la zona dell'Universo in cui si trovano questi flussi stellari, identificando come luogo originario una struttura di massa minore rispetto a quella in cui si locano al momento dell'osservazione. Integrando gli studi astrometrici e spettroscopici con le simulazioni basate sul Λ CDM, si ottiene un accrescimento gerarchico delle galassie, che grazie all'interazione gravitazionale riescono a strappare gas e stelle a formazioni minori. L'interazione tra stelle appartenenti a sistemi diversi è talmente bassa che viene mantenuta la cinematica che le caratterizzava precedentemente al merger, rendendo così riconoscibili gli astri formati in ambienti differenti.

La missione GAIA è finalmente riuscita a fornire le prove della formazione gerarchica della galassia, confermando l'ipotesi di accrescimento teorizzata dal Λ CDM. Grazie ai telescopi di ultima generazione, sia a terra che dallo spazio, è stato possibile ottenere dati risolti come mai prima d'ora e, di conseguenza, implementare in modo rivoluzionario le conoscenze chimiche e dinamiche riguardanti le stelle della Via Lattea e del suo vicinato. Le stelle della nostra galassia sono state analizzate dalle strumentazioni di APOGEE ed ESO, che hanno fornito gli spettri di emissione di milioni di stelle, e dal satellite GAIA, che si ha prodotto una mappa rappresentativa della MW contenente la posizione e l'orbita di oltre un miliardo di stelle. Osservando la parte più interna dell'halo si è così scoperto ciò che resta del più grande merger della Via Lattea, avvenuto circa 10Gyr fa con la galassia satellite Gaia-Enceladus, in rapporto di massa 4:1. I suoi resti hanno cinematica tipica dell'halo, ma metallicità tipica del thick disc, e rappresentano indicativamente la metà della popolazione stellare nei pressi del Sole. La datazione dell'interazione è stata effettuata risalendo all'età delle stelle allora già presenti nel disco galattico; la conoscenza della massa di Gaia-Enceladus di $M_* \sim 6 \times 10^8 M_\odot$ deriva dal suo SFR, rintracciabile grazie alla metallicità. L'unione della vecchia Via

Lattea con una galassia nana ha aumentato considerevolmente la presenza di gas all'interno del disco, accelerando la formazione stellare nel thick disc e rendendosi responsabile della nascita della maggior parte delle stelle presenti nel thin disc. Anche le galassie satellite accrescono con i merger, proprio come successo a LMC e ad una sua galassia satellite di piccola massa, dove si è originato l'ammasso NGC 2005. In questo caso non si possono fare considerazioni rilevanti riguardo la dinamica dei due sistemi, in quanto NGC 2005 si comporta come un ammasso globulare qualunque della galassia maggiore; tuttavia le sue abbondanze chimiche sono molto diverse rispetto a LMC e agli altri GCs satelliti. Infatti la metallicità, comprese le concentrazioni di α -elements, s-elements e r-elements, è decisamente minore rispetto agli altri ammassi globulari di LMC. La spiegazione più logica è che si siano formati in regioni differenti, con caratteristiche distinte e che solo in un secondo momento si siano uniti per interazione mareale dovuta alla gravità. Si ipotizza che l'ambiente progenitore di NGC 2005 sia stato una galassia sferoidale nana di massa comparabile a quella di Fornax (o una struttura simile), l'unica con massa sufficiente per la produzione di un ammasso globulare e con composizione chimica affine a quella ricercata.

Referenze

- [1] M. Chruslinska, T. Jeřábková, G. Nelemans and Z. Yan, “The effect of the environment-dependent IMF on the formation,” *Astronomy & Astrophysics*, 2020.
- [2] F. R. Ferraro, “Reazioni Termonucleari,” in *Astrofisica stellare: struttura delle stelle*.
- [3] S. G. Ryan and A. J. Norton, “Nuclear fusion,” in *Stellar Evolution and Nucleosynthesis*, 2010, pp. 68-72.
- [4] W. A. Weidmann, E. O. Schmidt, R. R. V. Valdarenas, J. A. Ahumad, M. G. V. and A. Mudrik, “Atlas of monochromatic images of planetary nebulae (Research Note),” *Astronomy & Astrophysics*, pp. 22-27, 2016.
- [5] E. E. E. Gall, R. Kotak, B. Leibundgut, S. Taubenberger, W. Hillebrandt, M. Kromer, W. S. Burgett, K. Chambers, H. Flewelling, M. E. Huber, N. Kaiser, R. P. Kudritzki, E. A. Magnier, N. Metcalfe, K. Smith, J. L. Tonry, R. J. Wainscoat⁹ and C. Waters, “An updated Type II supernova Hubble diagram,” *Astronomy & Astrophysics*, p. 4, 2018.
- [6] S. G. Ryan and A. J. Norton, “Supernovae, neutron stars & black holes,” in *Stellar Evolution and Nucleosynthesis*, 2010, pp. 155-157.
- [7] D. Eckert, S. M. M. Owers, M. Gaspari, T. Venturi, L. Rudnick, S. Etori, S. Paltani, F. Gastaldello and M. Rossetti, “The stripping of a galaxy group diving,” *Astronomy & Astrophysics*, p. 7, 2014.
- [8] T. J. Cox and A. Loeb, “The collision between the Milky Way and Andromeda,” p. 5, 2008.
- [9] A. M. e. al., “The metallicity distribution in the core of the Sagittarius dwarf spheroidal: Minimising the metallicity biases,” *Astronomy & Astrophysics*, 2023.
- [10] T. d. Boer, V. Belokurov and S. Koposov, “The star formation history of the Sagittarius stream,” 2018.
- [11] M. I. P. Dierickx and A. Loeb, “PREDICTED EXTENSION OF THE SAGITTARIUS STREAM TO THE MILKY WAY VIRIAL RADIUS,” 2017.
- [12] C. F. P. Laporte, I. Minchev, K. V. Johnston and F. A. Gómez, “Footprints of the Sagittarius dwarf galaxy in the Gaia data set,” 2019.

- [13] A. McWilliam, "ABUNDANCE RATIOS AND," pp. 2-4, 1997.
- [14] Tolstoy and e. al., 2009.
- [15] G. Collaboration, "The Gaia mission," *Astronomy & Astrophysics*, pp. 3-16, 2016.
- [16] A. Mucciarelli, D. Massari, A. Minelli, D. Romano, M. Bellazzini, F. R. Ferraro, F. Matteucci and L. Origlia, "A relic from a past merger event in the Large Magellanic Cloud," 2021.
- [17] "SDSS," [Online]. Available: <https://www.sdss.org/>. [Accessed ottobre 2023].
- [18] A. Mints and S. Hekker, "Selection functions of large spectroscopic surveys," *Astronomy & Astrophysics*, 2018.
- [19] "Telescopes and Instrumentation," [Online]. Available: <https://www.eso.org/public/teles-instr/>. [Accessed ottobre 2023].
- [20] A. Helmi, "Streams, substructures and the early history of the Milky Way," *Annual Reviews*, 2020.