

Concorso Nazionale
Giovani Astronomi al Telescopio Nazionale Galileo
III Edizione

1 TITOLO DELLA PROPOSTA

Il rapporto tra la dinamica delle regioni HII e le popolazioni stellari nel sistema di galassie interagenti NGC 5194 - NGC 5195.

2 CASO SCIENTIFICO

- ☒ Galassie e Cosmologia
- ☐ Stelle e Popolazioni Stellari
- ☐ Pianeti Extrasolari
- ☐ Sistema Solare

3 ABSTRACT

La galassia M51 (NGC 5194/5195), distante 31 Mly, è un sistema interagente composto da una spirale grand-design e da un satellite, la cui interazione modula la formazione stellare. Evidenze osservative indicano un'origine mista della struttura a spirale: onda di densità quasi-stazionaria nei segmenti interni e pattern transiente nel disco esterno. Studi recenti mostrano differenze significative tra braccio settentrionale e meridionale nei profili radiali degli offset azimutali tra ammassi giovani e regioni HII, suggerendo dinamiche distinte. Proponiamo un'analisi spettroscopica con il Telescopio Nazionale Galileo (DOLORES, modalità LR-B e VHR-V) per caratterizzare i campi di velocità delle regioni HII e delle popolazioni stellari, al fine di identificare firme cinematiche a supporto della teoria di "material arm" per il braccio meridionale di M51.

4 STRUMENTI UTILIZZATI

Per l'osservazione proposta si richiede l'utilizzo di **DOLORES** (*Device Optimized for the Low RESolution*) **LRS** (*Low Resolution Spectrograph*). Questo è uno strumento a riduzione focale installato permanentemente al Nasmyth B del Telescopio Nazionale Galileo (TNG), che permette sia l'imaging che la spettroscopia. Il detector è una CCD E2V 42-40, con 2048×2048 pixels di $13.5 \mu m$, che garantisce un FoV totale di circa $8.6' \times 8.6'$. Lo spettrografo ha un potere risolutivo compreso tra $R_s \in [500, 6000]$.

In particolare, ci prefiggiamo di utilizzare DLRS (Dolores LRS) in due configurazioni:

- Utilizzando il Grism **LR-B**, che consente l'acquisizione di spettri a bassa risoluzione ($R_S = 585$), ma ad una banda molto ampia: $\lambda \in [300, 843] \text{ nm}$;
- Utilizzando il Grism **VHR-V**, che consente l'acquisizione di spettri a risoluzione più alta rispetto al grism LB-R ($R_S = 1527$), ma con una banda più stretta: $\lambda \in [475.2, 669.8] \text{ nm}$.

Il tempo totale richiesto allo strumento è di 6h40m, divisi equamente in due notti di osservazioni.

5 DESCRIZIONE DELLA PROPOSTA

La Galassia M51

Il sistema di galassie interagenti NGC 5194–5195 (Figura 1), più comunemente noto come M51, o Galassia Vortice, è composto da una galassia principale (NGC 5194–M51a), e una piccola galassia satellite che interagisce con uno dei bracci a spirale della principale. Data la sua vicinanza di circa 9.5 Mpc ($\sim 31 \text{ Mly}$), M51 è stato il primo sistema del suo genere ad essere osservato e studiato, diventando di fatto la definizione per questa tipologia di sistemi di galassie interagenti (sistemi “M51–type”)

La storia delle osservazioni riguardanti la Galassia M51 ha visto l'intervento di vari astronomi, tra cui Charles Messier. Egli fu il primo ad individuarla, il 13 ottobre del 1773, mentre osservava una cometa. Messier descrisse la galassia in questione come una doppia nebulosa e la inserì all'interno del suo catalogo. Cinque anni dopo un astronomo francese, Pierre Méchain, identificò la galassia con cui interagiva M51, pur non riuscendo a stabilire con precisione se i due oggetti dell'osservazione fossero vicini o se trattasse di un fenomeno di prospettiva. Ci fu poi il contributo di William Herschel, che, assieme al figlio John, notò che nella parte centrale, in prossimità del nucleo, si presentava un effetto ottico, che fu accomunato da alcuni colleghi all'aspetto di Saturno. Nel 1845, più di cinquant'anni dopo, William Parsons, conte di Rosse, individuò la forma spirale della galassia. M51 fu quindi il primo oggetto celeste dove si osservò la struttura in questione. Parsons riconobbe anche la connessione con l'oggetto posto a nord. Solo nel XX secolo però, grazie al lavoro di Edwin Hubble e le sue osservazioni della galassia di Andromeda, si comprese che queste nebulose a spirale erano vere e proprie galassie esterne alla nostra. Infine, grazie ad osservazioni con i radiotelescopi, si riuscì a chiarire il collegamento e l'interazione tra le due componenti di M51.

M51 è distante dalla Terra circa 31 Mly, ha un diametro di 75 kly. e la sua magnitudine apparente è di 8.4, mentre la magnitudine superficiale è di circa 22 mag/arcsec^2 . Buona parte della sua intensa luminosità è dovuta alla presenza nei bracci a spirale di giovani ammassi stellari. NGC 5194 è unita a NGC 5195 attraverso un involucro comune di gas. Si ipotizza che in passato le due galassie siano entrate in collisione due volte. L'interazione gravitazionale tra le due galassie ha innescato un'intensa attività di formazione stellare in M51a. Inoltre, essendo il nucleo di quest'ultima particolarmente luminoso a causa di grandi quantità di gas ionizzato dovuto a formazione stellare, M51a è stata classificata come una galassia **Seyfert attiva**.

Le ipotesi

Alla base dei meccanismi principali della formazione della struttura a spirale del sistema M51 ci sono due ipotesi principali:



Figure 1. M51 in luce visibile, come vista dall'Hubble Space Telescope. Crediti @NASA/ESA

- l'ipotesi di Onda di Densità, per il quale l'origine della struttura a spirale è un'onda di densità gravitazionale quasi-stazionaria (**QSDW**) che si propaga lungo il disco galattico;
- l'ipotesi di transiente gravitazionale (material arm), che vede come complice della formazione dei bracci a spirale l'interazione gravitazionale con una galassia compagna (in questo caso M51b), provocando la soppressione della struttura preesistente di M51a.

In uno studio di Tully (1974) si concluse che il pattern a spirale nel disco esterno di M51 è una struttura transiente e non ondulatoria, indotta dall'interazione tra M51a e il suo satellite M51b, favorendo l'ipotesi 2, mentre i segmenti interni dei bracci a spirale sono generati da un'onda di densità gravitazionale quasi-stazionaria (ipotesi 1). Numerosi studi successivi sono risultati coerenti con questa ipotesi (e.g. Elmegreen et al (1989); Salo & Laurikainen (2000); Zimmer et al. (2004); Miyamoto et al. (2014)).

Ci si aspetta perciò che le regioni di formazione stellare abbiano una diversa distribuzione nei segmenti interni della struttura a spirale rispetto ai segmenti esterni dei bracci. In particolare, un indicatore chiave della propagazione della formazione stellare lungo le onde di densità a spirale è lo scostamento azimutale tra sottogruppi stellari di età diversa e la sua variazione lungo il raggio del disco galattico. Infatti, un'onda di densità gravitazionale quasi-stazionaria genera un'onda d'urto galattica nel gas interstellare. Poiché la velocità di rotazione della materia nel disco varia con la distanza dal centro galattico, mentre il pattern a spirale dell'onda di densità ruota rigidamente con velocità angolare costante a tutte le distanze galattocentriche, il fronte dell'onda d'urto, a una certa distanza dal centro, cambia posizione relativa rispetto al pattern a spirale: passa dal lato interno al lato esterno del braccio, oppure viceversa. Dato che la compressione del gas interstellare causata dall'incontro con l'onda d'urto innesca processi di formazione stellare, questo spiega la modulazione radiale della propagazione della formazione stellare nei segmenti interni della struttura a spirale.

La nostra proposta

La presente proposta mira a risolvere l'ambiguità sulla natura fisica della struttura a spirale della galassia M51a (NGC 5194), con particolare focus sull'asimmetria dinamica tra il braccio settentrionale e quello meridionale. Recenti analisi fotometriche condotte da Sakhibov et al. (2025) hanno evidenziato che, mentre il braccio Nord segue fedelmente le predizioni della QSDW, il braccio Sud mostra profili di offset azimutali anomali. Questi suggeriscono una natura complessa, potenzialmente dominata da effetti mareali transitori dovuti all'interazione con la compagna NGC 5195.

Per testare questa ipotesi, proponiamo uno studio cinematico utilizzando la *Long Slit Spectroscopy* con DOLORES LRS al Telescopio Nazionale Galileo (TNG), andando ad indagare tre aspetti fondamentali:

1. **Diagnostica del Mezzo Dissipativo (Gas):** Utilizzando il Grism LR-B, intendiamo mappare le righe di emissione tipiche delle RHII ($H\alpha$, $[NII]$, $[SII]$). L'obiettivo è identificare i cosiddetti "velocity wiggles" (moti di streaming non-circolari). Secondo la teoria QSDW, il gas che attraversa un potenziale d'onda di densità subisce un urto (shock) che si manifesta come una discontinuità a "dente di sega" nella curva di velocità radiale. La presenza di tali firme nel braccio Nord, contrapposta a una loro assenza o incoerenza nel braccio Sud, permetterebbe di fornire dei vincoli stringenti circa la natura materiale/mareale del braccio Sud.
2. **Determinazione del "Lag Dinamico" (Stelle vs. Gas):** Attraverso il Grism ad alta risoluzione VHR-V, acquisiremo spettri delle popolazioni stellari (righe di assorbimento come $H\beta$ e $[HeI]$). Il confronto tra il campo di velocità del gas (dissipativo) e quello delle stelle (collisionale) ci permetterà di misurare il ritardo dinamico (dynamical lag). Un'onda di densità stazionaria induce risposte diverse nelle due componenti; al contrario, in un braccio di origine puramente mareale, ci aspettiamo che gas e stelle rispondano in modo sincrono al potenziale gravitazionale esterno.
3. **Vincolo del Raggio di co-rotazione (R_C):** La strategia osservativa prevede il posizionamento della fenditura lunga (long-slit) lungo diversi angoli di posizione (PA), intersecando i bracci a varie distanze galattocentriche. Questo ci permetterà di individuare il raggio di co-rotazione — il punto in cui i moti di streaming invertono la loro direzione rispetto alla rotazione galattica. Determinare se i due bracci condividano lo stesso pattern speed (Ω_p) o se il braccio meridionale sia cinematicamente disaccoppiato è fondamentale per comprendere l'evoluzione a lungo termine del sistema M51.

Con tempi di integrazione di 20 minuti per posizione della slitta, garantiremo un rapporto S/N sufficiente per risolvere gradienti di velocità dell'ordine di pochi km/s, necessari per distinguere i moti circolari da quelli perturbati. Essendo la fenditura della slitta lunga 8.6 arcominuti, sarà possibile campionare simultaneamente sia le regioni settentrionali che quelle meridionali di M51.

Bibliografia

1. <https://astronomy.swin.edu.au/cosmos/>, Swinburne University
2. https://en.wikipedia.org/wiki/Whirlpool_Galaxy

3. Braine, J., Hughes, A., Rosolowsky, E., et al. 2020, A&A, 633, A17
4. Dobbs et al. 2010, MNRAS, 403, 625
5. Egusa, F., Mentuch Cooper, E., Koda, J., & Baba, J. 2017, MNRAS, 465, 460
6. Elmegreen, B. G., Elmegreen, D. M., & Seiden, P. E. 1989, Astrophys. J., 343, 602
7. Font J. et al., 2024, ApJ, Volume 9676, Issue 1
8. Miyamoto, Y., Nakai, N., & Kuno, N. 2014, Publ. Astron. Soc. Japan, 66, 36
9. Knapen et al., 1992, ApJL, v.385, p.L37
10. Salo, H. & Laurikainen, E. 2000, MNRAS, 319, 393
11. Sakhibov et al., 2025, Astronomy Reports, v.69
12. Tully, R. B. 1974, ApJS, 27, 449
13. Zimmer, P., Rand, R. J., & McGraw, J. T. 2004, Astrophys. J., 607, 285
14. Croxall, et.al., 2015; ApJ, 808:42

6 VINCOLI OSSERVATIVI

Periodo ottimale per l'osservazione

Prima scelta:

- Intervallo date: 15 - 16 / Giugno / 2026
- Fase Lunare: 1 - 2 giorni dopo la Luna Nuova

Nota: Per mantenere una condizione di osservazione ottimale ($\text{AirMass} < 2$) l'osservazione dovrà essere effettuata tra le ore 22 e le 02 delle due notti selezionate.

7 LISTA TARGET E TEMPI DI ESPOSIZIONE

Nome	α	δ	Epoca	Magnitudine	Tempo di Esposizione	Setup	Note
Prima notte di osservazione 15 / 06 / 2026							
HZ 44	13h23m35.40s	+36°08'00"	J2000	11.6 V_{mag}	2 x 10 s + ~600s stimati per il pointing	Grism LR-B	Stella standard, prima e dopo le misure su M51
M51	13h29m22.66s	+47°11'04.1"	J2000	21 mag/arcsec ² (Expected Sky magnitude from TNG ETC)	1200 s Integrazione + ~600s stimati per il pointing	Grism LR-B	Misura di Background. Angolo = 90°
	13h29m52.76s	+47°11'43"		22 mag/arcsec ²			Angolo = 90°
	13h29m53.87s	+47°11'57.7"					Angolo = 55°
	13h29m52.93s	+47°11'25"					Angolo = 130°
	13h30m04.58s	+47°12'39.6"					Angolo = 74.5°
	13h29m52.33s	+47°10'48.4"					Angolo = 180°
Seconda notte di osservazione 16 / 06 / 2026							
HZ 44	13h23m35.40s	+36°08'00"	J2000	11.6 V_{mag}	2 x 10 s + ~600s stimati per il pointing	Grism VHR-V	Stella standard, prima e dopo le misure su M51
M51	13h29m22.66s	+47°11'04.1"	J2000	21 mag/arcsec ² (Expected Sky magnitude from TNG ETC)	1200 s Integrazione + ~600s stimati per il pointing	Grism VHR-V	Misura di Background. Angolo = 90°
	13h29m52.76s	+47°11'43"		22 mag/arcsec ²			Angolo = 90°
	13h29m53.87s	+47°11'57.7"					Angolo = 55°
	13h29m52.93s	+47°11'25"					Angolo = 130°
	13h30m04.58s	+47°12'39.6"					Angolo = 74.5°
	13h29m52.33s	+47°10'48.4"					Angolo = 180°

8 STRATEGIA OSSERVATIVA

Per poter portare a termine l'obiettivo scientifico che ci siamo prefissati, avremo bisogno di osservare M51 con la slitta posizionata in diverse posizioni e con diversi **Position Angles (PA)** (Figura 2 per riferimento alle slitte). Le notti di osservazioni richieste sono due, e per ogni notte, la prima misura da effettuare sarà una misura di sky background, con slitta posizionata a 40 arcosecondi verso Ovest dal centro di M51, con $PA=90^\circ$ (ogni angolo è considerato rispetto la retta orizzontale che definisce l'Est-Ovest nel sistema di coordinate dell'immagine, partendo da 0 in Ovest e aumentando in senso antiorario).

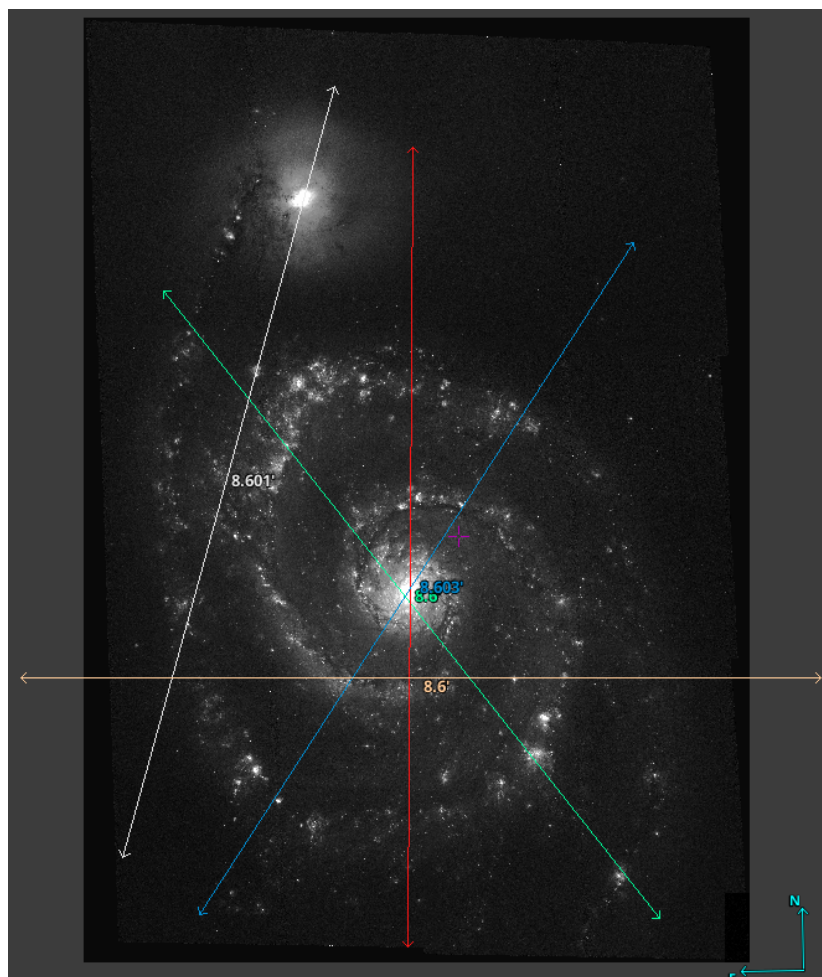


Figure 2. Mappa in banda H_α di M51, risultato di un mosaico di osservazioni fatte con HST. Sovrapposte ci sono le posizioni (rappresentative) delle slitte per l'osservazione con DLRS.

Per ogni osservazione, il tempo per il puntamento del telescopio e il setup della slitta (puntamento, inserimento slitta e acquisizione di verifica, posizionamento del Grism) è stimato essere circa 600 secondi, che uniti al tempo di esposizione richiesto di 1200 secondi, per le 6 posizioni della slitta, fanno un totale di 3 ore richieste a notte. Al fine di ottimizzare al meglio la strategia e il tempo di puntamento del telescopio, la prima osservazione scientifica viene effettuata con lo stesso PA di quella di background (slitta rossa in Figura 2), mentre seguono le slitte Blu ($PA=55^\circ$) e Verde ($PA=130^\circ$) di Figura 2, la cui posizione è di qualche arcosecondo diversa rispetto alla prima. Le ultime due osservazioni vedono la slitta Gialla

(PA = 180°), traslata lungo una sola direzione rispetto le precedenti, e infine la slitta Grigia (PA=74.5°) posizionata lungo il braccio che si congiunge a M51b. Le osservazioni tra le due notti differiscono solamente nel setup spettroscopico, ovvero nel Grism selezionato per la misura. La prima notte il LB-R, mentre la seconda notte il VHR-V (come descritto in Sezione 4).

Infine, prima e dopo l'inizio delle osservazioni, sarà effettuata un'osservazione di stella standard, sia per calibrare la risposta del CCD sia per osservare come questa varia al variare dell'AirMass. Queste saranno effettuate prima e dopo l'inizio del puntamento di M51 per ottimizzare la strategia di puntamento del telescopio, considerato che la stella standard scelta (HZ 44) dista circa 10 gradi d'arco dal target scientifico.

Calcolo dei tempi di esposizione

Per stimare il tempo di esposizione necessario per ottenere un rapporto segnale rumore sufficiente (SNR) utilizziamo come informazione il flusso spettrale tipico di una RHII in M51 da Croxall, et. al. (2015), da cui si evince un valore di circa $f_\lambda \simeq 20 \cdot 10^{-16} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ \AA}^{-1}$. Nonostante il SNR medio (a lunghezza d'onda centrale) sia circa 4 (TNG ETC), per la linea dell' $H\alpha$ ci si aspetta un SNR molto alto. Infatti, utilizzando l'approssimazione per il flusso di elettroni al secondo per pixel:

$$s_{pix} \simeq \frac{f_\lambda \Delta\lambda A \eta_{QE}}{E_{ph}(\lambda)}$$

dove:

- $\Delta\lambda$ è la dispersione spettrale del grism selezionato, che per il LR-B vale $\Delta\lambda = 2.52 \text{ \AA px}^{-1}$, mentre per VHR-V vale $\Delta\lambda = 0.7 \text{ \AA px}^{-1}$
- A è l'area di raccolta fotoni, cioè il primario del telescopio. Dato il diametro del telescopio $D = 358 \text{ cm}$, $A \simeq 1.06 \cdot 10^5 \text{ cm}^2$
- η_{QE} è il throughput del telescopio più la quantum efficiency della CCD. $QE(\lambda = 656.3 \text{ nm}) \simeq 90\%$, mentre $\eta \sim 10\%$, per cui approssimiamo $\eta_{QE} \simeq 0.1$;
- $E_{ph}(\lambda)$ è l'energia di un fotone alla lunghezza d'onda dell' $H\alpha$, che vale $E_{ph}(\lambda) \simeq 3.03 \cdot 10^{-12} \text{ erg}$

Questo si traduce, in $t_e = 1200$ secondi di integrazione e in una dimensione considerata di 4 pixel per spaziali per una tipica RHII (corrispondente a ~ 1 arcsec di dimensioni in cielo), in un SNR (integrato) di circa 280. Il rumore considerato è il solo photon noise ($N \simeq \sqrt{S \cdot t_e}$), poiché il Read out Noise, la Dark Current e il background noise (TNG ETC) sono trascurabili rispetto al primo.

Questo risultato è compatibile con il calcolatore di tempi di esposizione dell'ESO per lo strumento EFOSC2 (ESO Faint Object Spectrograph and Camera version 2), uno spettrografo montato al NTT in La Palma. Questo calcolatore è stato preferito a quello del TNG per la completezza di informazioni che produce in output, considerate le caratteristiche (diametro del telescopio e Grism disponibili su EFOSC2) molto simili dei due sistemi.

9 ELABORAZIONE E INTERPRETAZIONE DEI DATI

L'obiettivo del processo di analisi dei dati raccolti è quello di trasformare gli spettri 2D ottenuti in mappe di velocità radiali, necessari per testare i modelli teorici evolutivi dei bracci a spirale descritti nella proposta (Sezione 5). I dati ottenuti saranno ridotti utilizzando pipeline standard di analisi per la (long) slit spectroscopy, in particolare usando pacchetti IRAF e codici Python basati su Astropy. La riduzione del dato grezzo comprende:

- Calibrazione in lunghezza d'onda dello spettro utilizzando le lampade He-Ne (effettuata prima dell'inizio delle operazioni al telescopio sotto la guida del personale al TNG);
- Calibrazione della risposta del CCD attraverso le acquisizioni della Stella Standard HZ 44, fatta prima e dopo le osservazioni scientifiche;
- Correzione per estinzione della Via lattea e di M51;
- Sottrazione del fondo cielo, utilizzando le misure dedicate ad inizio notte osservativa.

Una volta ridotti i dati, avremo a disposizione due set di misure: dalle misure con il Grism LR-B estrarremo le velocità radiali del gas ionizzato delle RHII attraverso diversi metodi di fit/template comparison delle righe di emissione $H\alpha$, $[NII]$ e $[SII]$; dalle misure con il Grism VHR-V useremo tecniche di cross correlazione sulle righe di assorbimento stellari tipiche ($H\beta$, $[OIII]$, $[SIII]$) per mappare la velocità delle popolazioni stellari. L'interpretazione dei risultati si concentrerà nell'utilizzo dei parametri ottenuti per i seguenti obiettivi:

1. Identificare le discontinuità a “dente di sega” tipiche delle curve di rotazione dei bracci a spirale previste dalla teoria QSDW, nel nostro caso, il braccio settentrionale. D'altra parte, verificare la corrispettiva assenza o incoerenza di tali segnali nel braccio meridionale di M51, fornirebbe supporto all'ipotesi di struttura mareale transitoria causata dalla compagna M51b;
2. Confrontare direttamente le velocità del Gas (mezzo dissipativo) e delle stelle (sistema collisionale), così da poter quantificare il ritardo dinamico tra i due mezzi. Una risposta sincrona delle due componenti nel braccio Sud ne indicherebbe la natura puramente gravitazionale;
3. Determinare il raggio di co-rotazione analizzando il cambio di fase dei moti di streaming lungo i diversi raggi galattocentrici campionati dalle fenditure. Questo dato stabilirà se il pattern speed del sistema è globale (cioè uguale tra nord e sud) o se l'interazione con M51b ha disaccoppiato cinematicamente la struttura a spirale.

L'ultima delle misure scientifiche, acquisita lungo il braccio che fa da ponte tra M51a e M51b, ci permette (come task secondario) di ottenere le velocità di rotazione di M51b, e di indagare come varia il profilo di velocità lungo il braccio.

10 INFORMAZIONI SUI PROPONENTI

Scuola: Istituto Orsoline San Carlo, viale Varese 30, 22100 Como

Codice meccanografico: COPS055009

Dirigente Scolastico: Nicola Tagliabue

Docente di riferimento: Simona Donzelli

Indirizzo email del docente di riferimento: simona.donzelli@doc.orsoline.it

Partecipante 1: Lucia Monticelli, 3 SC

Partecipante 2: Antonio Invernizzi, 3 SC

Partecipante 3: Federica Senese Luna, 4 SC

Partecipante 4: Martina Baldassarri, 4 SC

Partecipante 5: Sofia Boukhris, 4 SC

Astronomo Tutor: Pietro Ferraiuolo

Indirizzo email tutor: pietro.ferraiuolo@inaf.it