



INAF
ISTITUTO NAZIONALE
DI ASTROFISICA



Concorso Nazionale
Giovani Astronomi al Telescopio Nazionale Galileo
III Edizione

Allegato 2
Modulo di presentazione della proposta

1. Titolo della proposta:

Ma le galassie sognano materia oscura? *Osservazioni e narrazioni per avvicinare l'astronomia ai banchi di scuola.*

2. Caso scientifico:

[selezionare con una X l'area tematica della proposta]

- ☒ Galassie e cosmologia
- ☐ Stelle e popolazioni stellari
- ☐ Pianeti extra-solari
- ☐ Sistema solare

3. Riassunto (massimo 1000 caratteri, spazi inclusi)

La materia oscura è un argomento tanto affascinante quanto irrisolto dell'astronomia moderna. Il progetto mira a portare questo tema nel panorama scolastico italiano in maniera innovativa, accattivante ma accessibile per un contesto liceale. Ripercorrendo l'approccio di Vera Rubin, andremo alla scoperta della materia oscura studiando lo spostamento Doppler della riga H-alpha di tre galassie principali (M81, M63, NGC6503) valutando la curva di rotazione del disco galattico. Usando concetti del triennio (*shell theorem*, Gauss) ed elementi di programmazione (NumPy, Astropy), cercheremo di indagare quali distribuzioni di materia giustifichino le osservazioni. Il progetto si prefigge di riassumere il percorso in un'UDA replicabile in altre scuole e di produrre un articolo scientifico con i dati e le interpretazioni raccolte. Inoltre vogliamo restituire ad un pubblico ampio, sotto forma di podcast o evento narrativo teatrale, le vicende umane dietro a questo grande viaggio della conoscenza.

4. Strumenti utilizzati:

[per ogni strumento richiesto, inserire il numero di ore necessarie per portare a termine la proposta; se uno strumento non è necessario, cancellarlo dalla lista]

- DOLORES: 3h per lo studio di M81, 2.1h per M63, 1.6h per NGC 6503, 1.2h per M106, 3h per NGC 2403. I target principali sono M81, M63, NGC6503, ma abbiamo aggiunto M106 e NGC2403 per piani alternativi in caso di meteo/problemi tecnici. DOLORES verrà utilizzato in modalità spettroscopica (grism: VHR-R, banda R) con slit da posizionare sulle sorgenti H-alpha indicate in tabella. Eventualmente la camera potrà essere usata in modalità fotometrica se fossero richieste immagini dirette di regioni HII.

5. Descrizione della proposta (massimo 10.000 caratteri, spazi inclusi):

[descrivere la proposta in relazione ai criteri riportati nel bando. Esplicitare gli obiettivi che ci si prefigge di raggiungere con le osservazioni. È possibile inserire grafici o immagini per completare la descrizione, così come la bibliografia utile]

In breve: la nostra proposta ha l'obiettivo di studiare la materia oscura in galassie a spirale mediante i suoi effetti sulle curve di rotazione. Abbiamo scelto questo soggetto perché è un perfetto mix tra argomento di frontiera e tematica affrontabile con piena comprensione e autonomia in un contesto liceale di quarta superiore. Crediamo che rispecchi in pieno la definizione di *didattica laboratoriale finalizzata ad accrescere la motivazione* presente nel bando. Ci prefiggiamo di: osservare spostamenti Doppler nelle righe di emissione H-alpha in M81, M63, NGC6503; ricavare le curve di rotazione; usare i dati osservativi per interpretare la possibile distribuzione di materia oscura invertendo i dati di velocità osservati con un codice da noi realizzato.

In dettaglio: il progetto verte su quattro fasi.

- a. *Studio preliminare:* abbiamo inquadrato il problema della rotazione anomala dei dischi galattici da un punto di vista teorico e numerico. Lo studio teorico parte dal calcolo della velocità di rotazione per una particella in orbita circolare attorno ad un corpo centrale:

$$\frac{v^2}{r} = G \frac{M}{r^2} \rightarrow v(r) = \sqrt{\frac{GM}{r}}$$

Questo andamento – *kepleriano* – è atteso nelle zone esterne al bulge centrale se la massa gravitazionale coincidesse con quella rilevabile. Tuttavia sappiamo che l'andamento osservato non segue la legge $v \propto r^{-1/2}$ (Banhatti (2008), siti *a,b,c,d*), ma piuttosto un decadimento meno pronunciato all'allontanarsi dal centro (Fig.1). Come primo passo abbiamo ricavato quale distribuzione di materia a simmetria sferica dia una curva di velocità costante. Dal teorema di Gauss (Halliday, 2024) e definendo la massa interna come $M_{in} = \int_a^b \rho(r) 4\pi r^2 dr$, possiamo dedurre andamenti per $v = \sqrt{\frac{GM_{in}}{r}}$ come quelli riportati in tabella 1 al variare della densità di materia $\rho(r)$ (sito *d*):

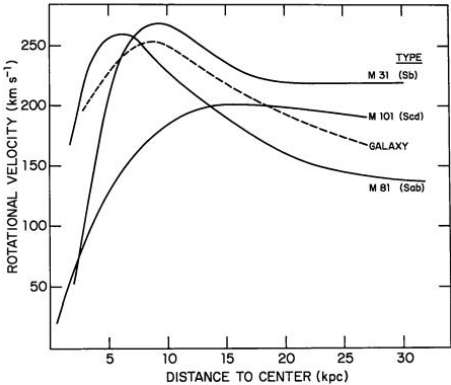


Figura 1 Curve di rotazione per M31, M101, M81 e la nostra Galassia [a]

Tabella 1 Velocità di rotazione in funzione della distribuzione di materia

Distribuzione di densità	M _{int}	Velocità
$\rho(r) = C$	$\propto r^3$	$\propto r$
$\rho(r) \propto r^{-2}$	$\propto r$	$\propto \text{costante}$

Per interpretare quali distribuzioni di materia oscura spieghino i dati raccolti al TNG è importante avere flessibilità nel calcolo delle orbite. Abbiamo realizzato un codice che, mediante un approccio Montecarlo, determina quali velocità iniziali producano orbite circolari per un punto test immerso nel campo generato da una distribuzione arbitraria di N punti fissi (Fig.2). Abbiamo testato campi a simmetria sferica ma il codice è flessibile per distribuzioni generiche, eventualmente provenienti anche da file STL (Rossi, 2021). In Fig.3 riportiamo i risultati per una distribuzione sferica di 10.000 punti random, con massa complessiva pari alla Via Lattea (1.5 trilioni di masse solari), raggio galattico $R_{\max} = 100.000$ a.l. e coordinata radiale r controllata dal parametro p tramite:

$$r = R_{\max} \cdot \left(\text{rand}(N_{\text{points}}) \right)^{1/p}$$

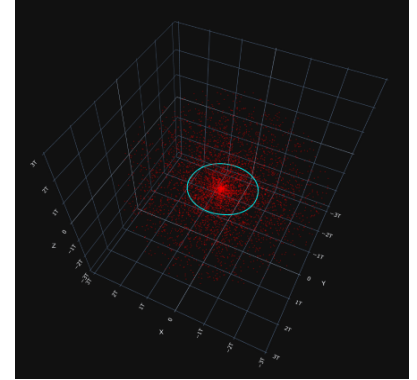


Figura 2 Simulazione di una singola orbita circolare in una nuvola di 10000 punti fissi

$p=1$ garantisce una distribuzione crescente linearmente della massa interna; $p>1$ crea crescite più ripide (Fig.3). Le velocità orbitali sono poi una conseguenza. Il codice mostra risultati in linea con quanto visto in precedenza, ma ha il vantaggio di potersi applicare ai dati raccolti al TNG in maniera versatile. Nella rielaborazione (paragrafo 9) proponiamo di usare il codice in modalità inversa per indagare i possibili valori di p , minimizzando una opportuna metrica tra le velocità osservate e quelle simulate.

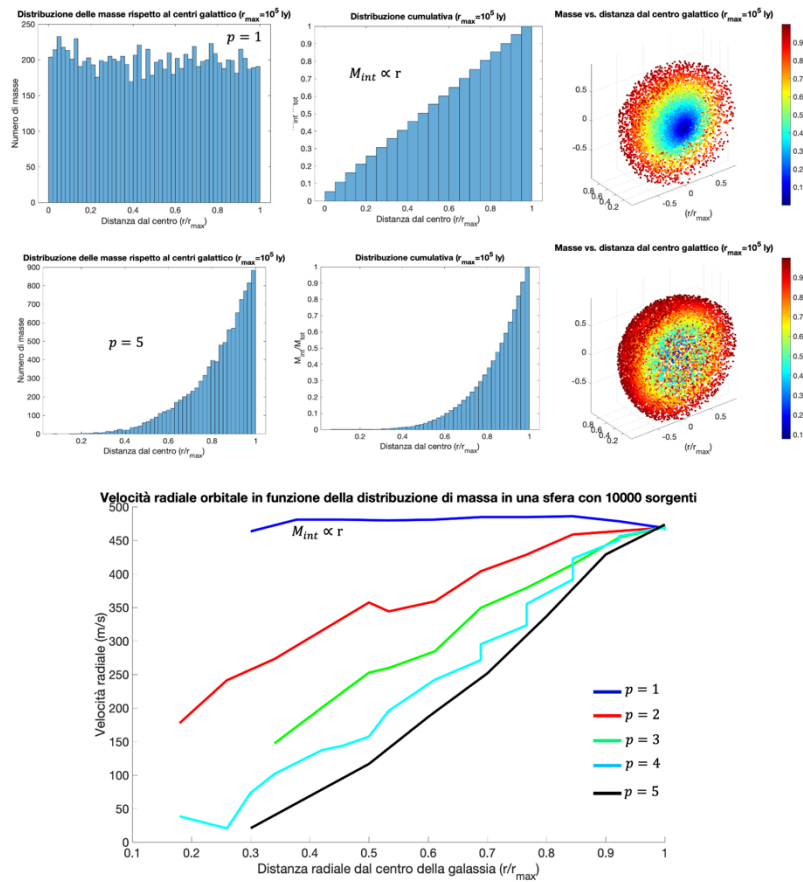


Figura 3 Curve di rotazione determinate mediante simulazioni per varie distribuzioni di massa

b. *Osservazioni astronomiche*: le osservazioni al TNG rappresentano la parte più importante del progetto. Il telescopio consentirà di determinare in maniera indiretta le velocità di rotazione di alcune galassie target studiando l'effetto Doppler della riga di emissione H-alpha in regioni a distanze crescenti dai centri. Abbiamo scelto tre obiettivi principali (M81, M63, NGC6503) e due secondari (M106, NGC2403) da usare nel caso di eventuali problematiche meteo/tecniche sui primi tre. I criteri che ci hanno guidato nella scelta dei target sono:

- *Osservabilità*: in base al bando e alle tempistiche scolastiche abbiamo scelto di concentrare gli sforzi nel mese di maggio. I target scelti garantiscono una buona osservabilità e copertura dell'intera notte astronomica per il periodo considerato (<https://astro.ing.iac.es/staralt/>).

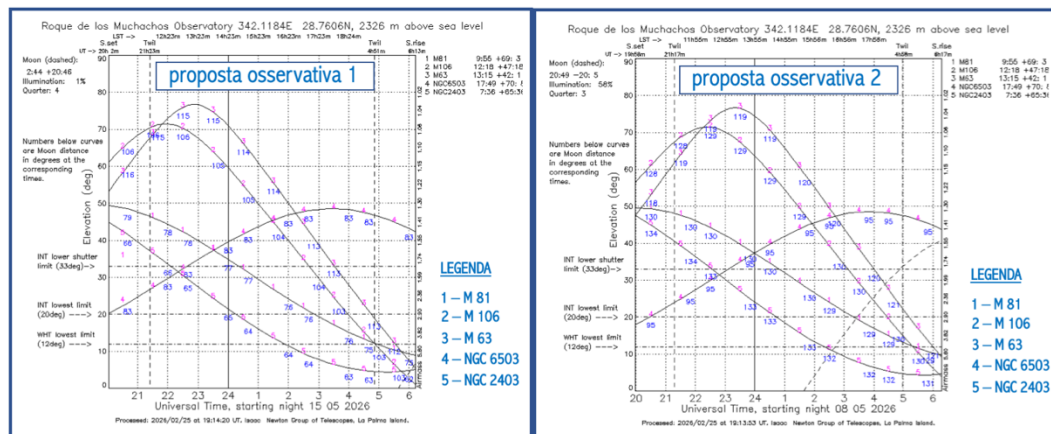


Figura 4 Osservabilità dei target

- *Inclinazione*: l'effetto Doppler dipende dall'inclinazione. Galassie con asse di rotazione allineato con la Terra ($\theta = 0$) mostrano un effetto nullo; quelle poste troppo di taglio possono portare invece ad un eccessivo allargamento di riga. I cinque target selezionati mostrano una inclinazione appropriata al lavoro. Le velocità misurate andranno corrette per $\sin(\theta)$ (paragrafo 9).

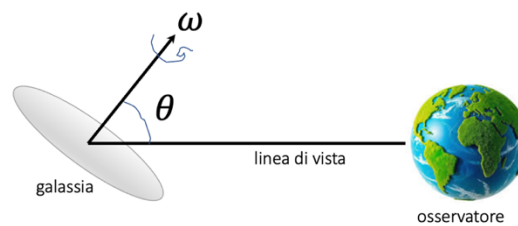


Figura 5 Angolo di inclinazione della galassia rispetto alla linea di vista

- *Spettroscopia e strumenti*: il progetto verte sull'analisi della riga di emissione H-alpha della serie di Balmer dell'idrogeno ($6563 \text{ \AA}$). In base a quanto riportato in <https://www.demomeemu.it/index.php/en/telescope-instruments/dolores.html>, la camera DOLORES con GRISM VHR-R in banda R è adatta al nostro scopo. Un setup simile è riportato in Marchesini et al. (2002). Il tipo di tecnica spettroscopica scelta è la spettroscopia *long-slit*, in cui una maschera con tagli (*slit*) viene posta nel percorso ottico prima degli elementi dispersivi. I calcoli dei tempi di esposizione prevedono slit di 1 arcsec (risoluzione $\sim 3 \text{ \AA}$). Le emissioni H-alpha si concentrano nelle regioni HII (idrogeno ionizzato). Per ognuno dei cinque target galattici abbiamo cercato in letteratura le posizioni di queste regioni (paragrafo 7), con preferenza per quelle poste

sull'asse longitudinale della galassia (Lin et al. (2003), Bresolin et al. (2011), Li et al. (2013), Gouliermis et al. (2015), Wu et al. (2025)) (Fig.6). Da Marchesini et al. (2002) vediamo come DOLORES possa essere eventualmente usato in modalità fotometrica per migliorare la precisione di posizionamento delle *slit* sulle regioni HII se i dati di letteratura non fossero sufficienti.

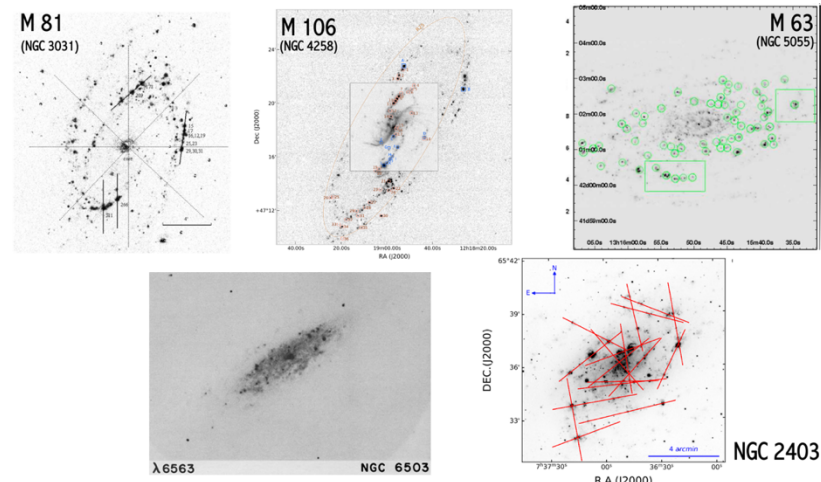


Figura 6 Le cinque galassie scelte per la proposta osservativa con le regioni HII in evidenza

- **FOV:** DOLORES ha un campo di $8.6' \times 8.6'$. Il FOV non deve essere troppo esteso rispetto all'oggetto osservato per non avere problemi di risoluzione delle regioni HII. La scelta di oggetti angularmente estesi come M81, tuttavia, porterà ad aver bisogno di più esposizioni per coprire interamente le regioni HII selezionate (aumentando il tempo di posa totale).
- **Magnitudine apparente:** non deve superare valori oltre la 20 per avere tempi di posa compatibili col bando. Come discusso nel paragrafo 8, la riga H-alpha aiuta ad avere condizioni più favorevoli, in quanto le regioni HII risultano spesso molto brillanti (paragonabili al nucleo, Fig.6). Il setup permette di concentrarsi quasi esclusivamente sulla riga di interesse, aumentando la risoluzione spettrale.

c. Restituzione come “good-practice” scolastica

Pensiamo sia fondamentale dare al progetto una ricaduta più ampia a livello didattico. La materia oscura è spesso vista come un argomento lontano dai programmi scolastici ministeriali italiani. Invece la nostra idea è quella di confutare questo preconcetto ed elaborare un'UDA accessibile che possa essere replicata in altri contesti scolastici, non necessariamente liceali. Inoltre desideriamo riportare l'esperienza osservativa e la sua rielaborazione in un articolo sottoposto a peer-review che possa mostrare quanto fatto ad una platea internazionale attenta alla didattica della fisica come AJP (*American Journal of Physics*).

d. Restituzione ad un pubblico più generale

Molti argomenti della fisica sono spesso confinati ad un pubblico di soli esperti. Tuttavia la storia dietro la materia oscura ed il mistero delle rotazioni galattiche avrebbe un ampio potere narrativo che potrebbe andare oltre la sfera didattica e sfociare in un'azione divulgativa accattivante. Il percorso storico contiene tante chiavi di lettura coinvolgenti per una platea generale: la teoria della gravitazione e la sua possibile confutazione (Kuhn), il ruolo dell'osservazione sperimentale (Zwicky), le difficoltà legate alle differenze di

genere nella ricerca (Vera Cooper Rubin). Per diffondere questa narrazione ci proponiamo di: a) Realizzare un podcast per le principali piattaforme; b) Realizzare un monologo multidisciplinare e teatrale.

Bibliografia

Banhatti D. G. *Disk galaxy rotation curves and dark matter distribution*, Current Science 94(8), (2008)

Bresolin, F. *Revisiting the Abundance Gradient in the Maser Host Galaxy NGC 4258*. Apj, 729(1), 56, (2011)

Gouliermis, D. *Hierarchical star formation across the ring galaxy NGC 6503*, MNRAS, 452(4), 3508-3528, (2015)

Halliday et al. *La fisica di Halliday: Meccanica*. Zanichelli editore. (2024)

Li Y. et al, *Star formation rates in resolved galaxies: calibrations with near and far infrared data for NGC5055 and NGC6946*, ApJ 768 180, (2013)

Lin W. et al, *H α + [N II] Observations of the HII regions in M81*, AJ 126 1286, (2003)

Marchesini et al., *H α Rotation Curves: The Soft Core Question*. The Astrophysical Journal, 575(2), 801, (2002)

Rossi E. *The Newtonian gravity of irregular shapes using STL files and 3D printing*. Am. J. Phys. 1, 89 (11): 993–1001, (2021)

Wu Q. et al, *Spectroscopic Observations and Emission-Line Diagnoses for H II Regions in the Late-Type Spiral Galaxy NGC 2403*. Universe, 11, 280, (2025)

Rubin V. C., *The Rotation of Spiral Galaxies*. Science, 220, 1339-1344 (1983)

Rubin V. C., Ford W. K., *Rotation of the Andromeda Nebula from a Spectroscopic Survey of Emission Regions*, Astrophys. J. 159, 379 (1970)

Zwicky, F. *On the Masses of Nebulae and of Clusters of Nebulae*. APJ, 86, 217, (1937)

Sitografia

[a] <https://ned.ipac.caltech.edu/level5/Sept16/Bertone/Bertone4.html>

[b] “Rotation curves and dark matter”
<https://icc.dur.ac.uk/~tt/Lectures/Galaxies/TeX/lec/node44.html>

[c] “How are galactic rotation curves determined from radial velocity measurements?”
<https://astronomy.stackexchange.com/questions/34253/how-are-galactic-rotation-curves-determined-from-radial-velocity-measurements>

[d] Galaxy Rotation Curves and Dark Matter
<https://www.youtube.com/watch?v=xOT3mpzIUmA>

[e] “Il Telescopio Nazionale Galileo”

<https://edu.inaf.it/wp-content/uploads/2025/04/Webinar-TNG-strumenti-2025-1.pdf>
https://www.tng.iac.es/instruments/harps/#instrument_description

[f] “Galassie e cosmologia” <https://www.youtube.com/watch?v=kUz-1PYxvXU>

6. Vincoli sulle osservazioni (massimo 800 caratteri, spazi inclusi):

[assumendo che le osservazioni verranno fatte tra maggio e giugno 2026, indicare un intervallo di date in cui fare l’osservazione e la fase lunare ideale per il buon esito delle osservazioni, in accordo con lo schema sottostante]

Prima scelta:

- Intervallo date: settimana che va dall’11 al 17 maggio con preferenza per le date del **14 e 15 maggio 2026**, a seguire le date dell’11 e 12 maggio 2026
- Fase lunare: calante/nuova con illuminazione del disco tra l’5% e il 1%

Seconda scelta:

- Intervallo date: settimana che va dal 4 al 10 maggio con preferenza per le date del **7 e 8 maggio 2026**.
- Fase lunare: calante con illuminazione del disco attorno al 40-50%

Note: le date sono state scelte in base alle altezze degli oggetti (vedi figura 4), la fase lunare ed il calendario scolastico. Purtroppo non è stato possibile utilizzare la finestra di giugno per motivi legati alla programmazione scolastica e gli esami di maturità.

7. Lista dei target e tempi di esposizione

[indicare il nome dei target, le coordinate e i tempi di esposizione richiesti su singolo target, compilando una tabella con la seguente struttura - è possibile aggiungere righe senza però modificare il format della tabella]

Nome	α	δ	Epoca	Magnitudine	Tempo di esposizione	Setup strumentale (filtro, grism, ecc)	Note
M81 - A (NGC 3031)	09h 55m 41.1s	68° 59' 44.7	J2000	18	713 s	FWHM: 1 arcsec Grism: VHR-R Air mass: 1.2 Slit width: 1 arcsec Filter band: R SNR. 10	Per noi i target sono le sorgenti H-alpha. Le coordinate indicano queste regioni. Tuttavia una unica slit può coprire più sorgenti. Tutti i campi contrassegnati con la stessa lettera

							dell'alfabeto nel nome appartengono ad una unica esposizione. (Es.M81-A). Per aumentare il SNR, laddove possibile, le pose potranno essere ripetute (vedi dopo)
M81 - A	09h 55m 33.2s	69° 03' 55.6	J2000	18	713 s		=
M81 - B	09h 55m 53.2s	68° 59' 04.2	J2000	18	713 s		Posa B e fondo cielo
M81 - C	09h 55m 16.7s	69° 08' 56.6	J2000	18	713 s		Posa C
M81 - C	09h 55m 25.0s	69° 08' 16.4	J2000	18	713 s		=
M81 - D	09h 54m 39.3s	69° 05' 26.9	J2000	18	713 s		Posa D
M81 - D	09h 54m 39.6s	69° 04' 47.8	J2000	18	713 s		=
M81 - D	09h 54m 39.8s	69° 05' 02.2	J2000	18	713 s		=
M81 - D	09h 54m 41.4s	69° 04' 07.5	J2000	18	713 s		=
M81 - D	09h 54m 42.6s	69° 03' 36.9	J2000	18	713 s		=
M106 - A (NGC 4258)	12h 18m 53.31s	47° 22' 35.5	J2000	18	713 s	FWHM: 1 arcsec Grism: VHR-R Air mass: 1.2 Slit width: 1 arcsec Filter band: R SNR. 10	Posa A e fondo cielo
M106 - A	12h 18m 55.26s	47° 22' 09.5	J2000	18	713 s		=
M106 - A	12h 18m 55.69s	47° 21' 54.3	J2000	18	713 s		=
M106 - A	12h 18m 48.52s	47° 21' 24.8	J2000	18	713 s		=
M106 - A	12h 18m 49.39s	47° 21' 08.2	J2000	18	713 s		=
M106 - A	12h 18m 51.05s	47° 20' 53.3	J2000	18	713 s		=
M106 - A	12h 18m 54.13s	47° 20' 50.3	J2000	18	713 s		=
M106 - A	12h 18m 55.20s	47° 20' 35.5	J2000	18	713 s		=
M106 - A	12h 18m 55.94s	47° 20' 25.5	J2000	18	713 s		=
M106 - A	12h 18m 56.55s	47° 20' 15.2	J2000	18	713 s		=
M106 - A	12h 18m 57.37s	47° 20' 04.3	J2000	18	713 s		=
M106 - A	12h 18m 58.93s	47° 19' 30.6	J2000	18	713 s		=
M106 - A	12h 18m 49.51s	47° 19' 20.4	J2000	18	713 s		=
M106 - A	12h 18m 58.52s	47° 19' 05.0	J2000	18	713 s		=
M106 - A	12h 18m 55.87s	47° 18' 18.7	J2000	18	713 s		=
M106 - A	12h 18m 56.19s	47° 18' 11.2	J2000	18	713 s		=
M106 - A	12h 18m 43.86s	47° 17' 25.7	J2000	18	713 s		=
M106 - B	12h 19m 03.56s	47° 15' 10.6	J2000	18	713 s		Posa B
M106 - B	12h 19m 05.18s	47° 15' 00.8	J2000	18	713 s		=
M106 - B	12h 18m 59.29s	47° 14' 14.8	J2000	18	713 s		=
M106 - B	12h 18m 56.96s	47° 13' 43.3	J2000	18	713 s		=
M106 - B	12h 19m 03.01s	47° 13' 37.6	J2000	18	713 s		=
M106 - B	12h 18m 59.09s	47° 13' 33.8	J2000	18	713 s		=

M106 - B	12h 19m 23.88s	47° 13' 03.2	J2000	18	713 s		=
M106 - B	12h 19m 24.87s	47° 12' 59.6	J2000	18	713 s		=
M106 - B	12h 19m 07.63s	47° 12' 40.2	J2000	18	713 s		=
M106 - B	12h 19m 09.78s	47° 12' 16.0	J2000	18	713 s		=
M106 - B	12h 19m 13.34s	47° 12' 01.6	J2000	18	713 s		=
M106 - B	12h 19m 02.38s	47° 11' 40.7	J2000	18	713 s		=
M106 - B	12h 19m 12.68s	47° 11' 39.6	J2000	18	713 s		=
M106 - B	12h 19m 17.94s	47° 11' 22.0	J2000	18	713 s		=
M106 - B	12h 19m 21.18s	47° 11' 01.0	J2000	18	713 s		=
M106 - B	12h 19m 19.65s	47° 10' 50.6	J2000	18	713 s		=
M106 - B	12h 19m 11.33s	47° 10' 46.4	J2000	18	713 s		=
M106 - B	12h 19m 19.49s	47° 09' 56.0	J2000	18	713 s		=
M63 - A (NGC 5055)	13h 15m 36.44	42° 02' 96	J2000	19	1900 s	<i>FWHM: 1 arcsec Grism: VHR-R Air mass: 1.2 Slit width: 1 arcsec Filter band: R SNR. 10</i>	Posa A + fondo cielo
M63 - A	13h 15m 39.47	42° 02' 82	J2000	19	1900 s		=
M63 - A	13h 15m 40.85	42° 02' 61	J2000	19	1900 s		=
M63 - A	13h 15m 39.78	42° 02' 43	J2000	19	1900 s		=
M63 - A	13h 15m 40.10	42° 02' 21	J2000	19	1900 s		=
M63 - A	13h 15m 43.25	42° 02' 24	J2000	19	1900 s		=
M63 - A	13h 15m 45.83	42° 02' 24	J2000	19	1900 s		=
M63 - A	13h 15m 46.46	42° 02' 48	J2000	19	1900 s		=
M63 - A	13h 15m 43.94	42° 02' 03	J2000	19	1900 s		=
M63 - A	13h 15m 45.39	42° 01' 89	J2000	19	1900 s		=
M63 - A	13h 15m 48.22	42° 02' 02	J2000	19	1900 s		=
M63 - A	13h 15m 49.80	42° 01' 71	J2000	19	1900 s		=
M63 - B	13h 15m 51.69	42° 01' 43	J2000	19	1900 s		Posa B + fondo cielo
M63 - B	13h 15m 53.01	42° 01' 28	J2000	19	1900 s		=
M63 - B	13h 15m 52.57	42° 01' 01	J2000	19	1900 s		=
M63 - B	13h 15m 54.39	42° 01' 11	J2000	19	1900 s		=
M63 - B	13h 15m 55.34	42° 01' 14	J2000	19	1900 s		=
M63 - B	13h 15m 53.82	42° 01' 65	J2000	19	1900 s		=
M63 - B	13h 15m 54.21	42° 01' 51	J2000	19	1900 s		=
M63 - B	13h 15m 58.36	42° 01' 91	J2000	19	1900 s		=
M63 - B	13h 15m 59.87	42° 01' 22	J2000	19	1900 s		=
M63 - B	13h 15m 57.73	42° 00' 81	J2000	19	1900 s		=
M63 - B	13h 15m 55.15	42° 00' 29	J2000	19	1900 s		=
M63 - B	13h 15m 48.79	42° 00' 94	J2000	19	1900 s		=
M63 - B	13h 15m 59.24	42° 00' 46	J2000	19	1900 s		=
M63 - B	13h 16m 05.35	42° 00' 56	J2000	19	1900 s		=
M63 - B	13h 16m 01.95	42° 00' 66	J2000	19	1900 s		=
M63 - B	13h 16m 03.40	42° 01' 37	J2000	19	1900 s		=
M63 - B	13h 16m 05.54	42° 01' 11	J2000	19	1900 s		=

NGC6503 - A	267.366870	70.139878	J2000	19	1900 s	<i>FWHM: 1 arcsec Grism: VHR-R Air mass: 1.2 Slit width: 1 arcsec Filter band: R SNR. 10</i>	Posa unica per tutte le slit
NGC6503 - A	267.360523	70.146816	J2000	19	1900 s		=
NGC6503 - A	267.399790	70.138429	J2000	19	1900 s		=
NGC6503 - A	267.324116	70.151839	J2000	19	1900 s		=
NGC6503 - A	267.315085	70.150455	J2000	19	1900 s		=
NGC6503 - A	267.360586	70.148180	J2000	19	1900 s		=
NGC6503 - A	267.317336	70.151773	J2000	19	1900 s		=
NGC6503 - A	267.325148	70.143415	J2000	19	1900 s		=
NGC6503 - A	267.392443	70.135681	J2000	19	1900 s		=
NGC6503 - A	267.349994	70.141340	J2000	19	1900 s		=
NGC6503 - A	267.399997	70.138375	J2000	19	1900 s		=
NGC6503 - A	267.345413	70.149136	J2000	19	1900 s		=
NGC6503 - A	267.365176	70.140677	J2000	19	1900 s		=
NGC6503 - A	267.376002	70.145055	J2000	19	1900 s		=
NGC6503 - A	267.333935	70.151913	J2000	19	1900 s		=
NGC 2403 -A	07h 37m 09	+65° 38' 02	J2000	20	5480 s	<i>FWHM: 1 arcsec Grism: VHR-R Air mass: 1.2 Slit width: 1 arcsec Filter band: R SNR. 10</i>	Posa A + fondo cielo
NGC 2403 - A	07h 36m 52	+65° 36' 11	J2000	20	5480 s	=	=
NGC 2403 - A	07h 37m 07	+65° 36' 39	J2000	20	5480 s	=	=
NGC 2403 - A	07h 36m 21	+65° 38' 01	J2000	20	5480 s	=	=
NGC 2403 - A	07h 36m 32	+65° 39' 09	J2000	20	5480 s	=	=
NGC 2403 - A	07h 36m 41	+65° 39' 06	J2000	20	5480 s	=	=
NGC 2403 - A	07h 36m 23	+65° 36' 19	J2000	20	5480 s	=	=
NGC 2403 - A	07h 36m 51	+65° 36' 45	J2000	20	5480 s	=	=
NGC 2403 - B	07h 36m 51	+65° 36' 09	J2000	20	5480 s	=	Posa B
NGC 2403 - B	07h 36m 42	+65° 36' 02	J2000	20	5480 s	=	=
NGC 2403 - B	07h 37m 00	+65° 36' 08	J2000	20	5480 s	=	=
NGC 2403 - B	07h 36m 48	+65° 33' 25	J2000	20	5480 s	=	=
NGC 2403 - B	07h 36m 50	+65° 35' 01	J2000	20	5480 s	=	=
NGC 2403 - B	07h 37m 17	+65° 32' 42	J2000	20	5480 s	=	=
NGC 2403 - B	07h 37m 03	+65° 34' 02	J2000	20	5480 s	=	=

8. Strategia osservativa e calcolo dei tempi di esposizione

[indicare la strategia osservativa e il calcolo dei tempi di esposizione riportati nella tabella precedente, necessari per portare a termine la proposta]

La strategia scelta è di massimizzare l'osservazione delle regioni HII nelle tre galassie principali: M81, M63, NGC6503. Le emissioni H-alpha saranno poi usate per misurare lo spostamento di riga e in definitiva risalire alle curve di velocità. Abbiamo inoltre aggiunto alle tabelle di osservazione due target secondari (M106, NGC2403) per offrire alternative utili in caso di bisogno.

Premesse osservative:

- a. La tabella riporta le coordinate regioni HII su cui applicare poi le *slit* (per quanto abbiamo trovato in letteratura). Nel caso di riduzione del numero delle *slit*, andranno privilegiate quelle poste sull'asse longitudinale della galassia dove ci aspettiamo un maggiore effetto prospettico della rotazione. Inoltre almeno una *slit* andrà dedicata al fondo cielo. Ogni esposizione è descritta dalla sua specifica lettera e dalla galassia di appartenenza (ad esempio tutte le regioni HII identificate da M81-A è in realtà un'unica posa). La scelta delle lettere è legata al FOV di DOLORES (vedi successivamente nel paragrafo). Il calcolo dei tempi di esposizione si basa sul sito <https://www.tng.iac.es/observing/expcalc/spectro/calculate.html> impostando un SNR di 10.
- b. Nel caso in cui i dati delle regioni HII trovati in letteratura non siano considerati sufficienti, potrà essere necessario usare DOLORES in modalità fotometrica con filtro H-alpha per avere una immagine preliminare delle regioni HII prima della spettroscopia. In questo caso dobbiamo aggiungere il tempo di posa (calcolabile al sito <https://www.tng.iac.es/observing/expcalc/imaging/calculate.html>) che può portare ad una riduzione dei soggetti studiabili. In questo caso le priorità osservative sono M81 e NGC6503.

Il calcolo dei tempi di esposizione è basato dalla *surface-brightness* della galassia (S_{galaxy}), valore legato alla magnitudine integrata apparente m e alla superficie emittente A dell'oggetto esteso (espressa in secondi d'arco) mediante l'equazione:

$$S_{galaxy} = m + 2,5 \log_{10}(A)$$

Il valore di S_{galaxy} è un'integrazione su tutti i pixel della galassia e dipende inoltre dalla banda di osservazione. Nel nostro caso le misure si concentreranno sulla banda R dove cade la linea di emissione cercata. La scelta del GRISM VHR-R in banda R è dovuta proprio a questo. Stando ai dati trovati in letteratura per DOLORES (<https://www.demomeemu.it/index.php/en/telescope-instruments/dolores.html>) questo setup garantisce un intervallo di osservazione tra $\lambda_{min} = 6238 \text{ \AA}$ e $\lambda_{max} = 7717 \text{ \AA}$, con lambda centrale a $\lambda_{max} = 7000 \text{ \AA}$. Per determinare i tempi di posa abbiamo cercato valori della S_{galaxy} nella banda R per i cinque oggetti proposti, usando i valori in banda V a cui è stata tolta indicativamente una magnitudine laddove la ricerca non abbia dato risultati.

Tabella 2 Magnitudini estese della regione del nucleo e magnitudine globale

	M81		M106		M63		NGC6503		NGC2403	
	Nucleo	Global	Nucleo	Global	Nucleo	Global	Nucleo	Global	Nucleo	Global
S_{galaxy} ($\frac{mag}{arcsec^2}$)	18	20.5	18	22	19	23	19	22	20	23

Una considerazione importante nel calcolo dei tempi riguarda l'intensità della riga H-alpha in emissione se paragonata al resto dello spettro. Ad esempio, nel lavoro di Lin et al. (2003) viene mostrato nella loro fig.1 la riga di interesse rispetto alla baseline dello spettro (Fig.7). Si denota un valore 6 volte maggiore del fondo. Chiamando PBR (*Peak to Baseline Ratio*) la differenza tra il picco della riga H-alpha e la baseline della galassia M81, vediamo come la riga stessa possa avere un guadagno di circa 2 magnitudini rispetto alla *surface-brightness* integrata su tutto l'oggetto.

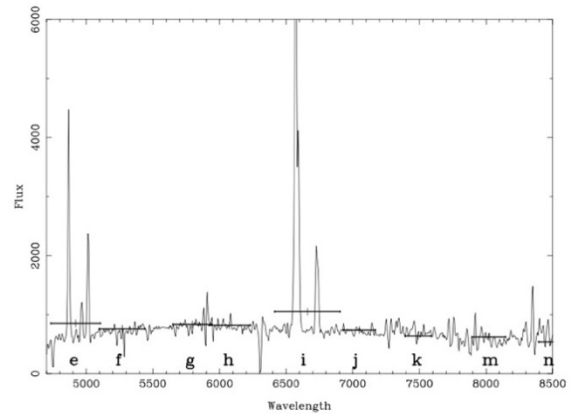


Figura 7 Dettaglio della riga H-alpha nella fig.1 dell'articolo di Lin et al.(2003)

$$S_{H\alpha} = S_{galaxy} - 2.5\log_{10}(PBR) \approx S_{galaxy} - 2$$

In altre parole: le emissioni H-alpha sono molto più luminose del valore medio integrato; tanto luminose da essere paragonabili alle emissioni delle zone centrali delle galassie stesse. Questo è evidente anche dalla Fig.6. I tempi proposti tengono presente questo aspetto e considerano quindi le magnitudini interessate come prossime al nucleo galattico. In alcuni casi, come M81, abbiamo scelto un valore cautelativo delle magnitudini trovate in letteratura, in modo da mettersi nel caso peggiore (il che porta ad una probabile sovrastima del tempo di posa ma anche ad un incremento del SNR).

Infine, nel calcolo dei tempi totali si deve tenere conto del FOV di DOLORES se paragonato a quello dell'oggetto sotto esame. Per stimare questo aspetto abbiamo utilizzato il software “*Cartes du ciel – Sky chart*” ed utilizzato i dati in nostro possesso (FOV 8.6' x 8.6'). La strategia finale sarà quella di ripetere, laddove possibile, le esposizioni proposte per aumentare il SNR.

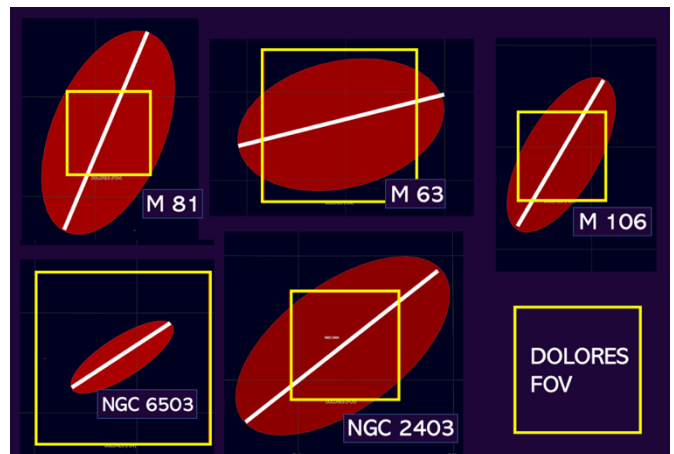


Figura 8 FOV di DOLORES (in giallo) paragonato all'estensione apparente delle galassie campione ricavata da *Cartes du Ciel*

Riepilogando, proponiamo i seguenti tempi di posa totali:

	<i>Tempo singola esposizione</i>	<i>FOV necessari</i>	<i>Ripetizioni</i>	<i>Tempo totale</i>
M 81	713 s	4	3	2.4 h
M 63	1900 s	2	2	2.1 h
NGC 6503	1900 s	1	3	1.6 h
M 106	713 s	3	3	1.2 h
NGC 2403	5480 s	2	1	3 h

Tabella 3 Riepilogo dei tempi totali di esposizione per singolo oggetto

9. Elaborazione e interpretazione dei dati osservativi

[descrivere come si intendono analizzare i dati osservativi raccolti durante la campagna al TNG, eventualmente insieme a quelli d'archivio complementari, e interpretare i risultati]

Gli spettri raccolti con la spettroscopia *long-slit* sono finalizzati a produrre un database di velocità di rotazione per ogni galassia. Questo implica la conversione del dato spettroscopico in velocità. Una volta ottenuta la curva di rotazione per singolo oggetto passeremo all'interpretazione dei dati, andando - dove possibile - a confrontare i dati di letteratura con quelli trovati per valutare la consistenza sperimentale. Un discostamento da un decadimento kepleriano sarà indice di anomalia e possibile presenza di alone di materia oscura. L'interpretazione dei dati si concluderà con l'indagine delle possibili distribuzioni di materia compatibili con le curve di velocità osservate. Questo sarà fatto usando il software discusso nel paragrafo 5 in modalità "inversione". La massa totale della galassia sarà sia stimata dalla velocità periferica misurata (mediante il teorema di Gauss) sia da dati di letteratura. Il parametro libero delle simulazioni è la distribuzione di densità dei punti lungo la coordinata radiale della sfera stessa. Il codice testerà vari valori di distribuzione e confronterà le velocità orbitali stabili con quelle misurate in cerca del best fit sulle velocità.

Di seguito gli step dettagliati della fase di elaborazione dei dati osservativi.

- **Step 1:** calibrazione "pixel- λ " che permetta di interpretare gli spettri in termini di λ . Questo sarà fatto o usando calibrazioni già fatte dai tecnici del TNG o usando lampade di calibrazione e acquisendo gli spettri.
- **Step 2:** misura del red/blueshift delle singole *slit* della riga H-alpha nelle regioni HII.
- **Step 3:** determinazione dello spostamento di riga $z(r) = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_{rest}}$. $\Delta\lambda$ sarà misurato usando software di analisi delle immagini (webplotdigitizer, ImageJ) e/o di analisi dati (Python) a seconda del formato in ingresso. Gli spettri osservati potranno inoltre essere sottoposti a confronto con la calibrazione mediante il pacchetto Specutils di Astropy. Astropy sarà inoltre usato qualora siano necessari fit gaussiani delle righe di emissione.
- **Step 4:** Determinazione delle velocità lungo la linea di vista con l'osservatore: $v_{obs}(r) = z(r) \cdot c$, con $c = 3 \cdot 10^8$ m/s.
- **Step 5:** determinazione dell'angolo di inclinazione della galassia ($\theta = 90^\circ$ per galassie poste di taglio).

- **Step 6:** stima diretta della velocità sistematica di recessione dell'intera galassia v_{sis} dallo spettro di pixel in prossimità del nucleo (dove possibile).
- **Step 7:** determinazione della velocità di rotazione attorno alla galassia invertendo la relazione $v_{obs}(r) = v_{sis} \pm v_{rot}(r) \cdot \sin(\theta)$. Alternativamente, in assenza di una solida misura di v_{sis} , una stima di $v_{rot}(r)$ potrà essere ottenuta valutando pixel simmetrici rispetto al *bulge* centrale $\frac{|v_{rot+}(r) - v_{rot-}(r)|}{2}$.
- **Step 8:** stima delle incertezze primarie (sensibilità strumentale, rumore elettronico, allargamento di riga, inclinazione della galassia) e calcolo delle incertezze derivate mediante propagazione degli errori. Le velocità finali dovranno quindi avere la propria incertezza.

10. Informazioni sui proponenti

[come indicati nella prima fase, Allegato 1]

Scuola: ITI G. Marconi (Pontedera)

Codice meccanografico: PITF030003

Dirigente Scolastico: Luigi Vittipaldi (in reggenza di Pierluigi Mario Robino)

Docente di riferimento: Eduardo Rossi

Indirizzo email del docente di riferimento: eduardo.reds@gmail.com

Partecipante 1: Gabriele Bientinesi, 4ASA

Partecipante 2: Anna Pavolettoni, 4ASA

Partecipante 3: Ludovica Zanolini, 4ASA

Partecipante 4: Gaia Pratali, 4BSA

Partecipante 5: Edoardo Princi, 4BSA

Il mancato rispetto del formato comporterà l'esclusione dal concorso