

The background of the slide is a rich, multi-colored cosmic scene. It features a dense field of stars in various colors (blue, red, orange, white) scattered across a dark space. Several prominent galaxies are visible, including a large, bright, yellowish-white galaxy in the upper right, a blue and purple galaxy in the lower right, and a red and orange galaxy in the lower left. The overall effect is a vibrant and detailed representation of the universe.

# **Il contributo scientifico del RSN2 al Piano Triennale INAF**

**Corrado Trigilio**

**Francesca Bacciotti, Sergio Cristallo, Mariateresa Crosta,  
Emanuele Dalessandro, Davide Elia, Silvia Leurini, Giuseppina  
Micela, Ilaria Musella, Paolo Ventura, Simone Zaggia**

# Principali campi di ricerca in RSN2

La comunità INAF ricopre un ruolo di rilievo a livello internazionale nel campo dell'astrofisica stellare, dal punto di vista teorico, osservativo e sperimentale. Grande è la varietà delle tematiche affrontate, che nel PTA sono state elencate sotto le macrovoci:

- **Formazione Stellare**
- **Sistemi Esoplanetari**
- **Evoluzione Stellare**
- **Archeologia Galattica**
- **Cosmologia Locale**
- **Scala delle Distanze**

# Formazione Stellare

**Ampia comunità** molto attiva, in crescita, collaborazioni internazionali, ruoli di leadership.

Tutte le **principali tematiche di FS** sono coperte in INAF. **Studio interdisciplinare.**

Accesso alle **maggiori facility da terra e spazio** con large program e grandi survey spettroscopiche

Eccellente record di **pubblicazione**

Ottenimento di **grant nazionali ed europei** (PRIN, Synergy, ERC, Grants INAF..),

Partecipazione a **team scientifici per strumentazione futura**

**Sinergie** : **RSN1** (formazione stellare extragalattica),

**RSN3** (astrochimica di laboratorio), **RSN4** (raggi cosmici)

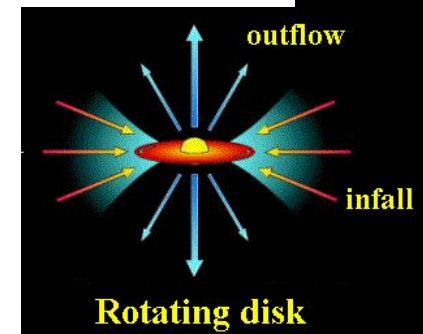
**RSN5** (sviluppo di strumentazione radio e ottico/IR per alta risoluzione)

- **necessita' di supporto** per prepararsi all'utilizzo delle grandi facilities future (e.g. SKA, EELT)

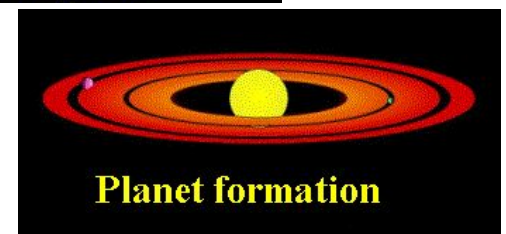
- **necessita' di nuove posizioni di TI** per i campi in espansione



**Cloud collapse**



**Rotating disk**



**Planet formation**



# Tematiche di Formazione Stellare (1)

## Proprietà globali su scala galattica:

### Si studiano :

- distribuzione dei siti di formazione attraverso grandi survey
- distribuzione del mezzo interstellare (gas e polvere)
- proprietà chimiche del mezzo
- morfologia del campo magnetico galattico

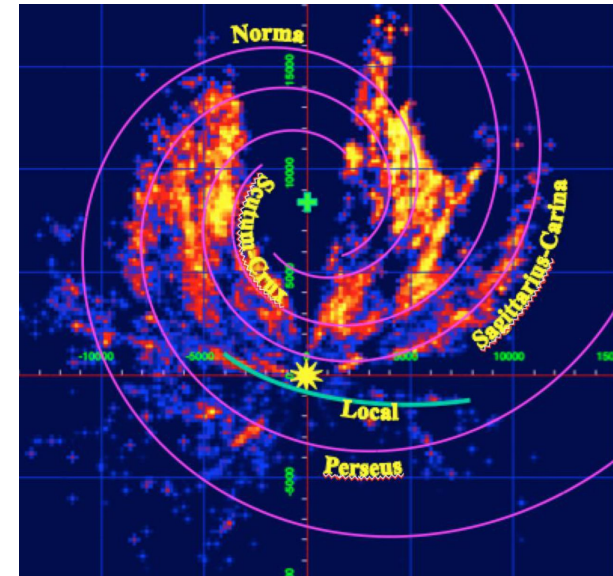
### metodologia:

Acquisizione di dataset multibanda :

*Chandra, XMM/Newton, Gaia, JWST, Rubin-LSST, Herschel, SRT, GBT, IRAM*

### obiettivi:

- ricavare leggi generali sul processo di formazione,  
determinazione dello star formation rate
- studio dell'impatto della formazione stellare sull'evoluzione della Via Lattea
- formulazione di un paradigma valido anche per altre galassie



# Tematiche di Formazione Stellare (2)

## Formazione del singolo oggetto a varie masse:

### Si studiano :

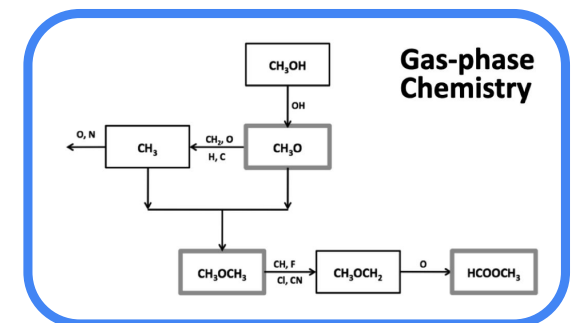
- condizioni ambientali : proprieta' nubi molecolari, frammentazione, filamenti, astrochimica, molecole complesse
- distribuzione campi magnetici nei singoli cores,
- accelerazione e influenza dei raggi cosmici
- outflows molecolari, streamers di accrescimento

### metodologia:

- oss. multibanda (*ALMA, NOEMA, HST, JWST, VLT, LBT, in futuro SKA, ELT*)
- diagnostica spettrale, studi teorici analitici e numerici

### obiettivi : determinare

- condizioni che portano al collasso della nube,
- formazione del disco in ambiente magnetizzato
- evoluzione chimica del sistema
- trasferimento di momento angolare nel processo di formazione



# Tematiche di Formazione Stellare (3)

## Dischi, Jets, Formazione planetaria

### Si studiano :

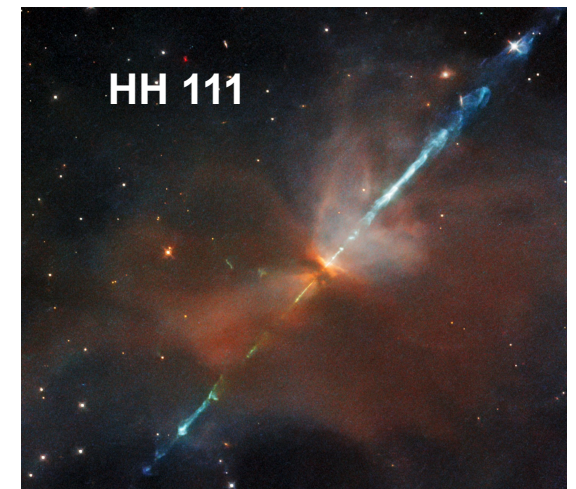
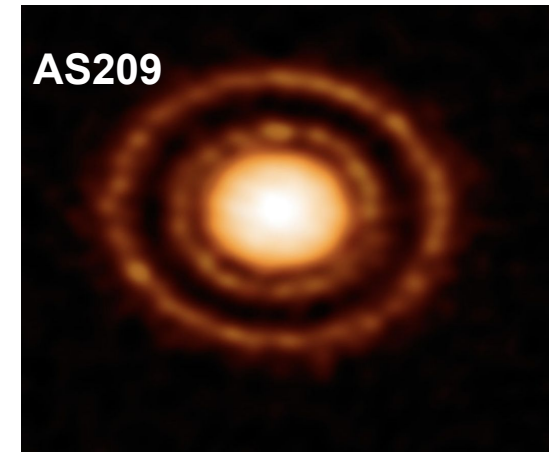
proprietà fisiche del disco	distribuzione di gas e polvere nel disco
accrescimento sulla stella	strutture nel disco (rings, gaps, spirali ...)
jets atomici collimati	masers (acqua, metanolo, OH ..)
campi magnetici	chimica prebiotica, raggi cosmici

### metodologia :

Osservazioni ad alta risoluzione angolare, polarimetria, survey spettroscopiche  
*ALMA, NOEMA, VLA, VLBI, HST, JWST, VLT, LBT, TNG, in futuro SKA , ELT*  
modelli teorici, chimica di laboratorio, simulazioni numeriche

### obiettivi :

- determinazione delle condizioni iniziali per la formazione planetaria:
  - formazione delle strutture e aggregazione della polvere,
  - generazione di venti e jets e loro feedback sul bilancio di mom. angolare
  - generazione di molecole prebiotiche



# Sistemi esoplanetari

**Proprietà individuali e statistiche**  
**Diversità e complessità**

**Tematica interdisciplinare: fisica, astrofisica, geofisica, chimica, biologia,..**

**Osservazioni multi-banda: dal radio ai raggi X**

**Multi-approccio: osservazioni da Terra e dallo spazio, metodi sofisticati di analisi, modeling, esperimenti di laboratorio**

Collegamenti con la **formazione** e **evoluzione stellare**

Sinergie con **RSN3** (sistema solare), **RSN5** (tecniche di analisi dati e nuova strumentazione), **attività di outreach**

# Sistemi esoplanetari: tematiche (1)

**Struttura planetaria**

**Evoluzione**

**Architetture dei sistemi planetari**

**Tassonomia**

**Popolazioni**

Determinazione delle masse dinamiche; Demografia, Ruolo della stella, Impatto dei pianeti massicci, Evoluzione e migrazione, Sistemi stellari giovani, Ambiente stellare.

*Spettroscopia ad alta risoluzione (HARPS, HARPS-N, GIANO, ESPRESSO), fotometria (da terra, Kepler, Cheops, TESS; PLATO), imaging (SPHERE, SHARKs), astrometria (Gaia), modeling*

- Necessità di serie di osservazioni ad alto rapporto segnale rumore su lunghe scale temporali
- Necessità di sviluppo di tecniche di analisi sofisticate per l'estrazione di segnali deboli in presenza di "rumore" stellare
- Necessità di parametri stellari accurati e precisi



# Sistemi esoplanetari: tematiche (2)

## Atmosfere planetarie

Primarie

Secondarie

### Profilo termico, chimica, evoluzione, dipendenza dalle proprietà del pianeta e della stella

Abbondanze chimiche, Struttura termica, Evoluzione, Dinamica (clima e venti), Formazione di molecole complesse, Abitabilità

*Spettroscopia ad alta e bassa risoluzione (HARPS, HARPS-N, GIANO, ESPRESSO, SPHERE, PEPSI, SHARK, HST, JWST, ANDES, Ariel), modeling, esperimenti di laboratorio*

- Necessità di osservazioni durante i transiti e eclissi ad alto rapporto segnale-rumore
- Modeling accurato dell'attività stellare durante i transiti – Osservazioni broad-band o simultanee auspicabili
- Sottrazione accurata delle telluriche per le osservazioni da terra
- Sviluppo di modelli di atmosfere
- Metodi di analisi sofisticati (p.es. reti neurali) e potenza di calcolo.
- Auspicabili osservazioni a alta E a bassa risoluzione, durante i transiti E le eclissi perché ciascuno sonda diversi strati dell'atmosfera.

## Sistemi esoplanetari: tematiche (3)

### Interazione stella pianeta

Riscaldamento

Evaporazione

Effetti chimici sull'atmosfera, LTE vs non-LTE

Interazione fra i campi magnetici stellare e planetario

Effetti sulla stella (rotazione, maggiore attività stellare - flaring)

*Osservazioni di atmosfere (vedi slide precedente), indicatori di attività stellare, fotometria e spettroscopia a raggi X, osservazioni radio, modeling, esperimenti di laboratorio*

- Lunghe serie temporali dal radio ai raggi X
- Spettroscopia di diagnostiche NLTE negli spettri planetari
- Modelli 3-D di interazione stella pianeta (radiazione e particelle) dipendenti dal tempo (flares e CMEs) e identificazione di diagnostiche

# Sistemi esoplanetari

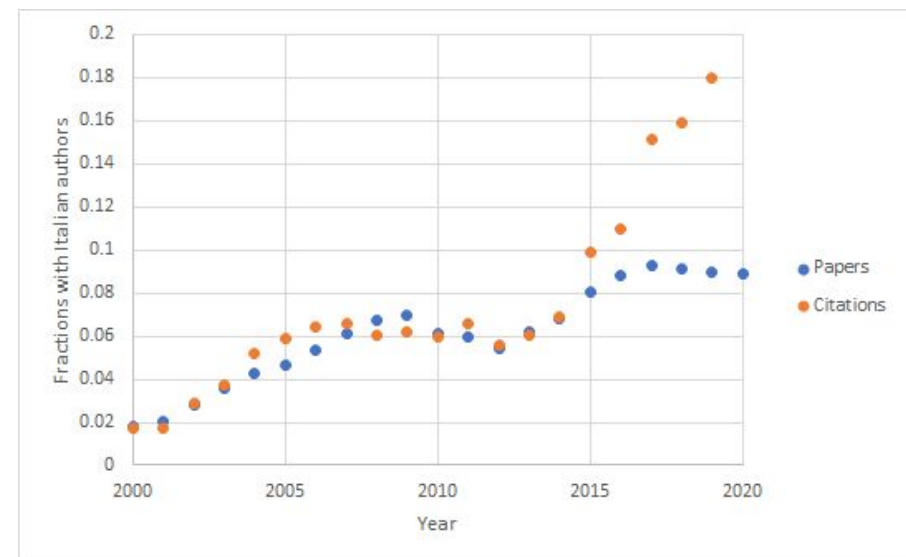
Tematica in espansione, cresciuta molto negli ultimi anni

Comunità nazionale **organizzata** (presente in quasi tutte le strutture INAF)

Partecipazione con **ruoli di leadership** in progetti futuri da terra e dallo spazio

**Comunità giovane** (essendo nata negli ultimi 10-12 anni) → **necessità di consolidamento per non disperdere all'estero le competenze raggiunte**

*Frazione di articoli sugli esopianeti (con referee) e di citazioni con autori italiani sul totale mondiale. La crescita a partire dal 2013 è collegata alla partenza dell'utilizzo massiccio di HARPS-N@TNG e all'entrata in funzione di SPHERE (2015). (Cortesia R: Gratton)*



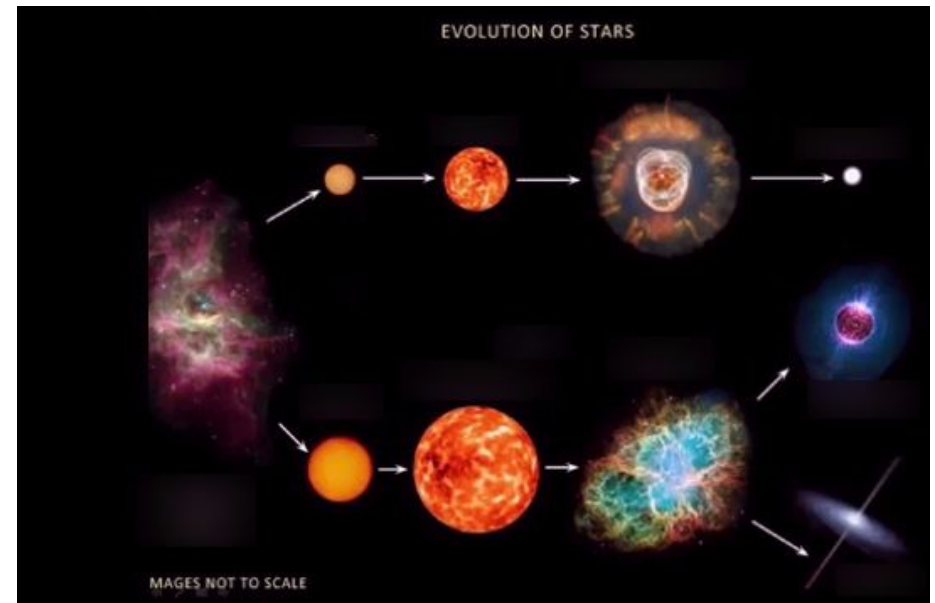
# Struttura ed evoluzione stellare

## Varie tematiche:

- struttura interna e sua evoluzione
- atmosfere, magnetosfere, attività magnetica
- interazione stella mezzo circumstellare e/o pianeti
- rotazione ed evoluzione momento angolare
- perdita di massa, ultime fasi ed arricchimento ISM

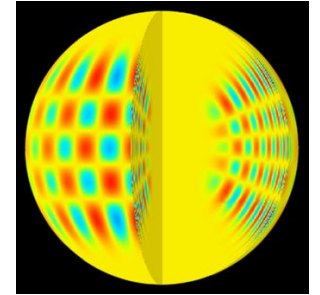
**Collegamenti** con **Formazione stellare, esopianeti, archeologia galattica**

**Sinergie** con **RSN3** (Sole), **RSN4** (evoluzione finale, esplosioni SN, SNR, kilonovae)





# Struttura ed evoluzione stellare



## Struttura interna delle stelle:

Notevole contributo dall'**Astero-sismologia** grazie all'analisi dati *CoRot, Kepler e Tess* e, in futuro, *PLATO*.

→ determinazione di massa, raggio ed età di un campione numericamente consistente di stelle.

Strumento di indagine molto adoperato. Proposte di nuove missioni (es *HYADN@ESA*).

## Evoluzione stellare:

Forti competenze INAF in più sedi su **Modellistica stellare**.

Ruolo di leadership italiana, *database di modelli stellari* molto utilizzati dalla comunità internazionale.

→ necessità di aggiornare costantemente i database per mantenere la leadership.

## Fisica di base:

Esperimenti di **fisica nucleare** (INFN)

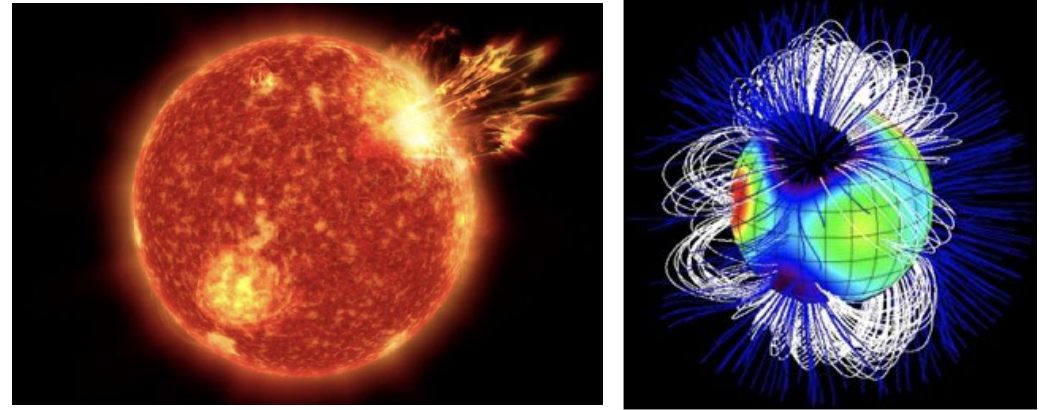
Esperimenti di **fisica atomica** (ENEA)

→ ingredienti fondamentali per modelli di struttura e di atmosfere  
(sezioni d'urto, proprietà ottiche di vari elementi)



# Struttura ed evoluzione stellare

## Atmosfere, Attività magnetica:



Studio delle **atmosfere stellari**, **dell'attività magnetica** (solar-stellar connection), delle **magnetosfere**, delle **abbondanze chimiche**. Modellizzazione di atmosfere, incluso **non-LTE**.

Importanti per lo studio dell'interazione tra stella e CSM, inclusi esopianeti (forte connessione con esopianeti).

Studio di **campi magnetici** nel diagramma HR, **Dinamo stellare**, **Plasmi magneto-attivi**.

Evoluzione della **rotazione** e del **momento angolare**.

# Struttura ed evoluzione stellare

## Fasi finali dell'evoluzione stellare:

instabilità convettive, rotazione e **campo magnetico** → ruolo fondamentale nella **nucleosintesi** e nello studio delle **atmosfere stellari** e nell'interazione con il mezzo circumstellare e interstellare.



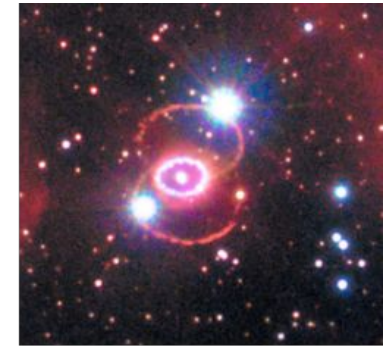
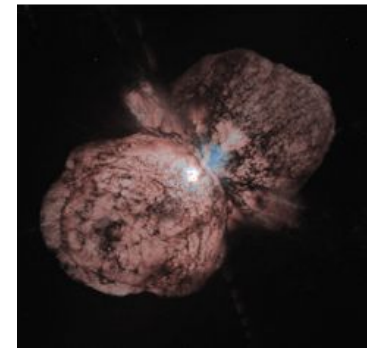
**Stelle di grande massa** fino oltre  $100 M_{\odot}$ .

Caratterizzazione della perdita di massa.

Nucleosintesi esplosiva. Connessione dell'evoluzione stellare con le nuove classi di transienti stellari delle fasi finali di vita delle stelle, le eruzioni pre-supernova (LBV eruption, WR) e i vari tipi di supernovae.

## Stelle di massa piccola e intermedia:

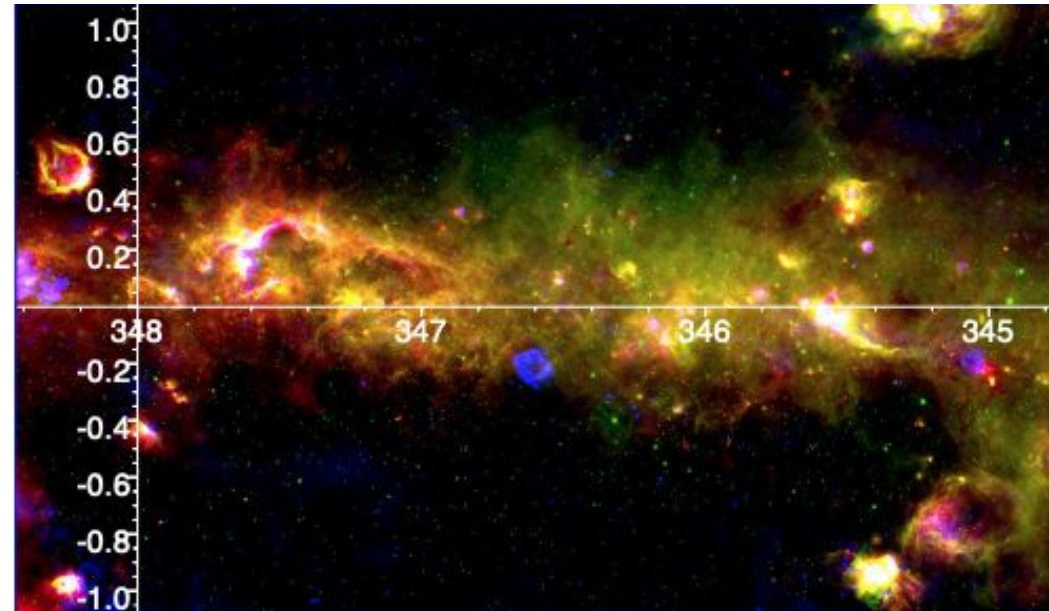
variazione della composizione chimica superficiale, mineralogia delle **polveri** prodotte nei venti e sintesi degli elementi pesanti; fasi AGB, post-AGB, PN.



# Struttura ed evoluzione stellare

## Survey di piano galattico:

Banda radio e IR superano il problema dell'estinzione. Censimento completo di SNR, PN, LBV, WR e SFR, i cui numeri non sono consistenti con quanto previsto dalla teoria.



## Grandi aspettative da:

**PLATO** (astrosismologia), **SOXS** per ESO-NTT (PI INAF) (massloss, B...), Precursori **SKA** (**MeerKAT**, **ASKAP**) (no estinzione), **Centri Nazionali, Tecnopolo** (modellistica, big data)

## Criticità:

La comunità INAF ricopre un ruolo internazionale di rilievo nel campo dell'evoluzione stellare:  
**importante mantenere tale posizione di prevalenza!**



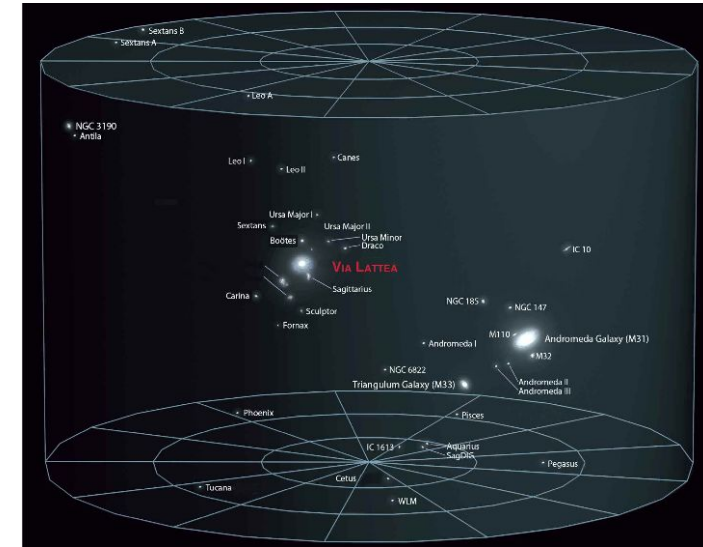
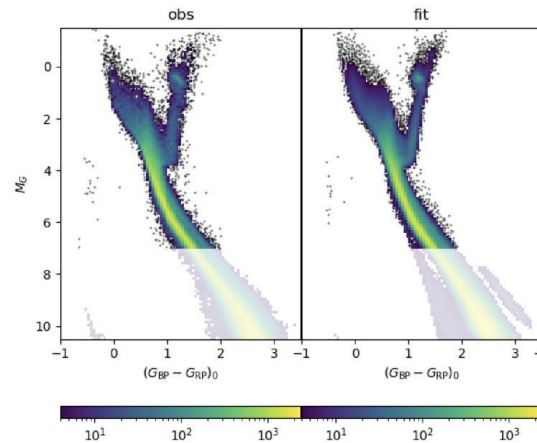
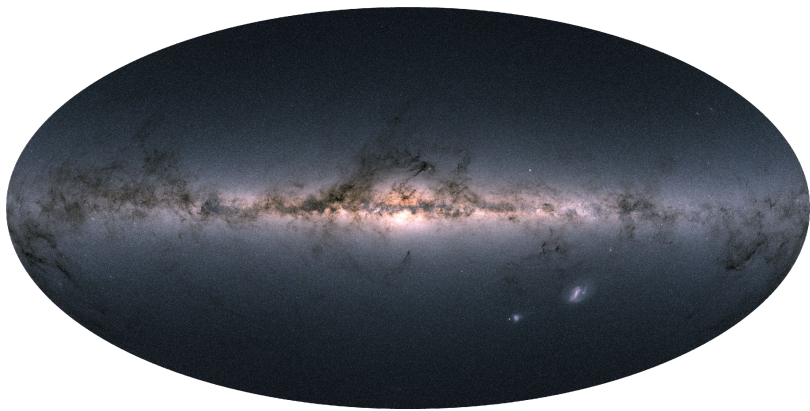
# Archeologia galattica

## Formazione delle galassie studiando le popolazioni stellari risolte

- Le galassie nel Volume Locale (20 Mpc): **ricostruzione della storia gerarchica di formazione**
- Tempi e modi di formazione stellare - **Star Formation Histories**
- Evoluzione della componente barionica dell'Universo (processi di nucleosintesi, feedback ...)

## Storia di formazione della Via Lattea nell'era delle grandi survey

- La **Galassia e i suoi satelliti** (presenti e passati) come prodotto cosmologico
- Formazione delle strutture su scala sub-galattica (alone, bulge, disco, streams)
- **Evoluzione chimico-dinamica** della Via Lattea



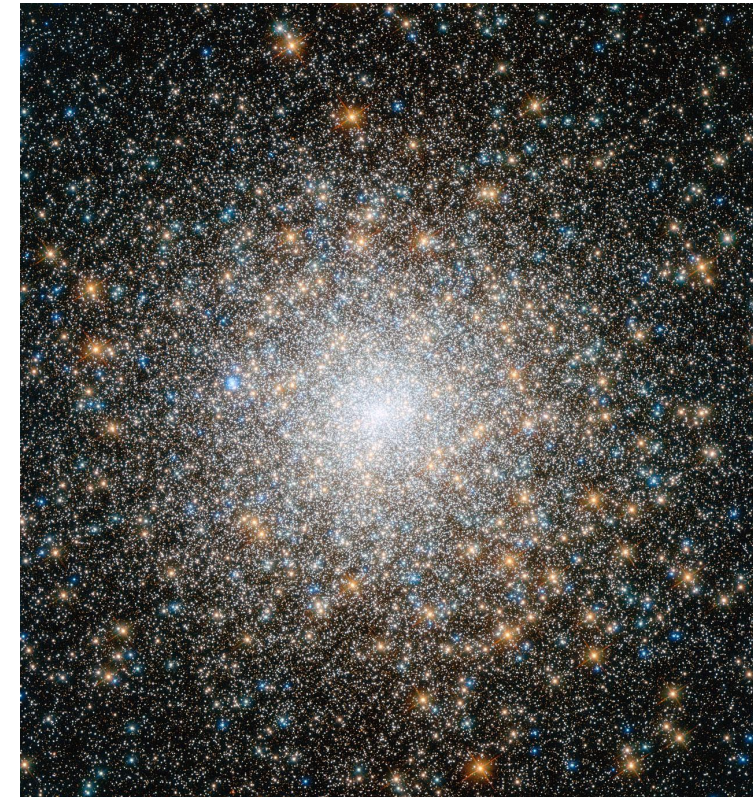
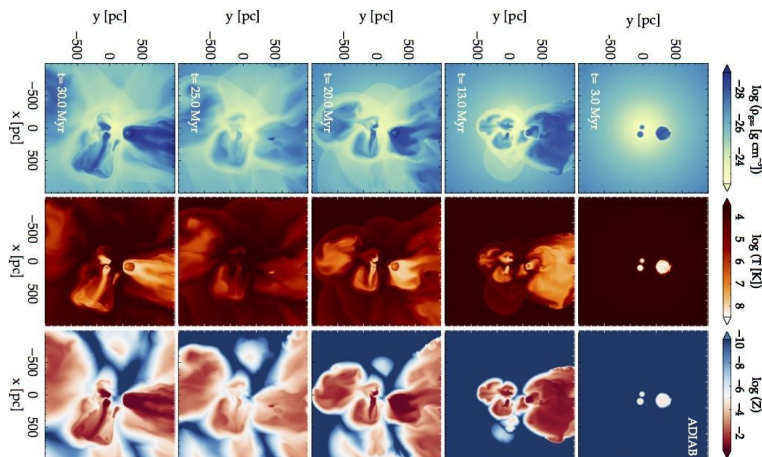
# Archeologia galattica

## Ammassi stellari: tra formazione stellare e galassie

- Formazione degli **ammassi globulari e delle `popolazioni multiple`**
- Ammassi stellari come laboratorio di evoluzione chimica e dinamica stellare
- **Ammassi aperti** e la formazione ed evoluzione della popolazione del disco

## Modelli dinamici e di evoluzione chimica

- Simulazioni di **popolazioni stellari complesse**
- Simulazioni **idro-dinamiche** ambito cosmologico
- Simulazioni dinamiche **N-body e Monte Carlo**





# Cosmologia Locale

## La Galassia come prodotto cosmologico a differenti scale, dal Sistema Solare fino alla sua periferia

Si fonda su due ingredienti:

**ASTROMETRIA RELATIVISTICA:** modelli teorici, analitici e/o numerici, completamente basati sulla Relatività Generale (incluso assetto relativistico di osservatore satellitare o ground based) per il processamento e analisi dei **dati astronomici sempre più accurati**.

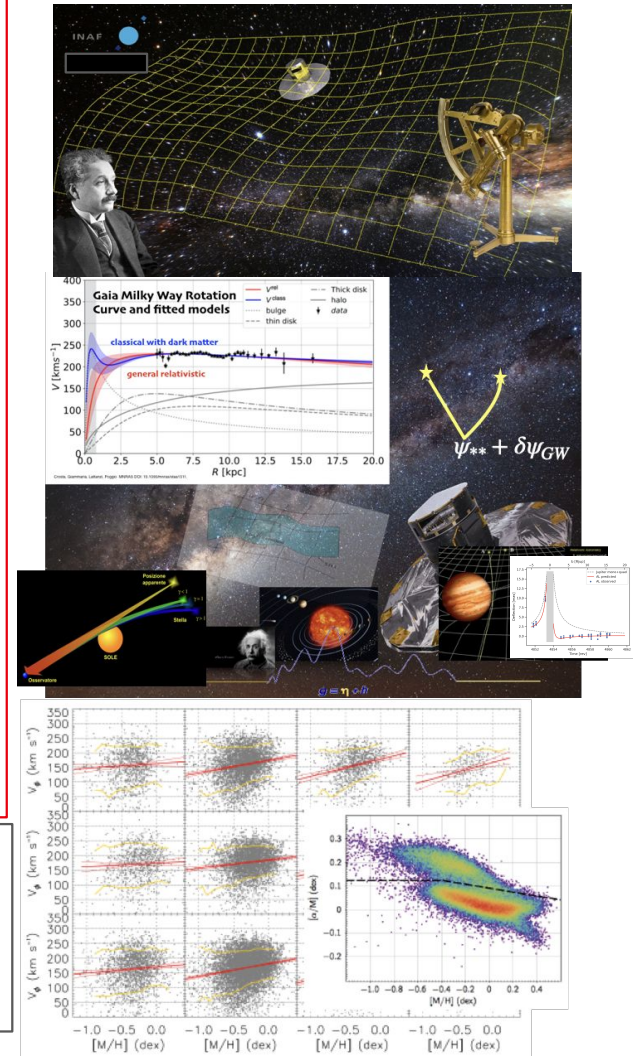
Campo di ricerca inaugurato con l'avvento di Gaia per garantire i suoi prodotti scientifici; **imprescindibile per future missioni che operano nello spazio** (le traiettorie dei fotoni emessi dalle stelle - geodetiche nulle - stanno all'astronomia come i modelli degli interni stellari stanno all'evoluzione stellare).

**ASTRONOMIA GRAVITAZIONALE:** applicazione della Relatività Generale (RG) dalle scale del Sistema Solare a quelle della Via Lattea.

Le osservabili dell'astrometria relativistica attraverso i dati della missione Gaia e in futuro, e.g., Euclid, abbinati alle survey spettroscopiche da Terra (APOGEE, WEAVE, ...) consentono di:

- testare la gravità della teoria standard e quella di teorie alternative, investigare il ruolo e natura della materia e dell'energia oscura, implementare modelli relativistici per la Via Lattea (la "geometria" della Galassia come riferimento per altre galassie, proprio come il Sole per i modelli stellari)
- confrontare simulazioni cosmologiche a  $z=0$  (predizioni locali del modello  $\Lambda$ -CDM) sulla base dei dati locali, rivelare **segnature chimico-cinematiche dell'evoluzione della Via Lattea**

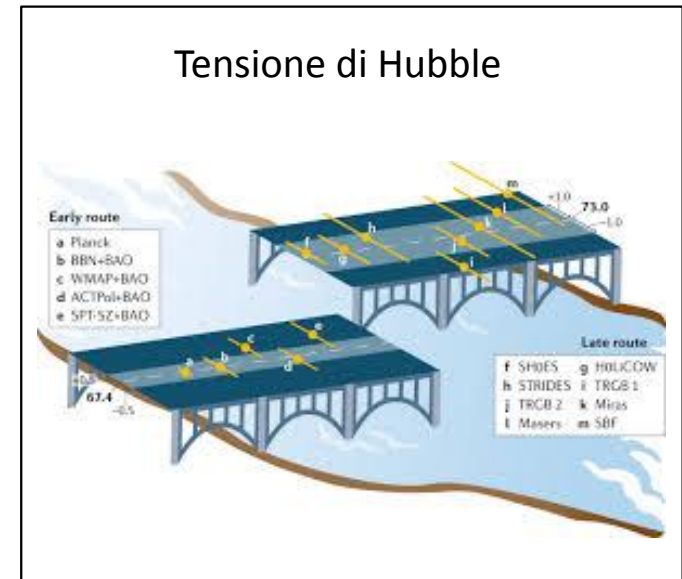
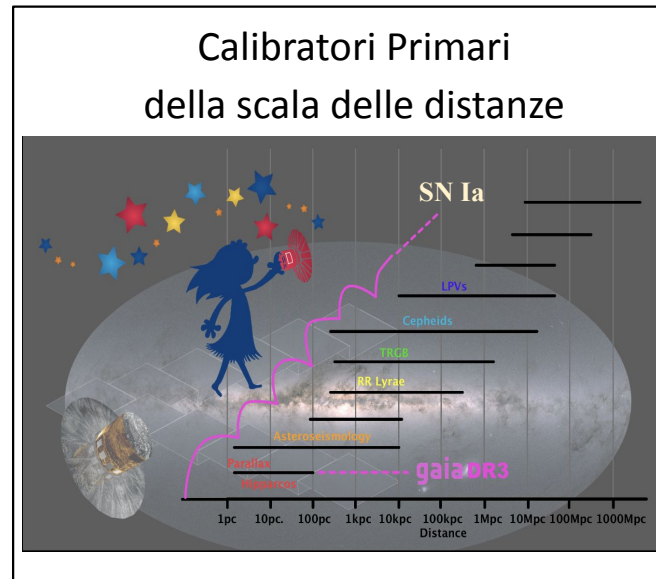
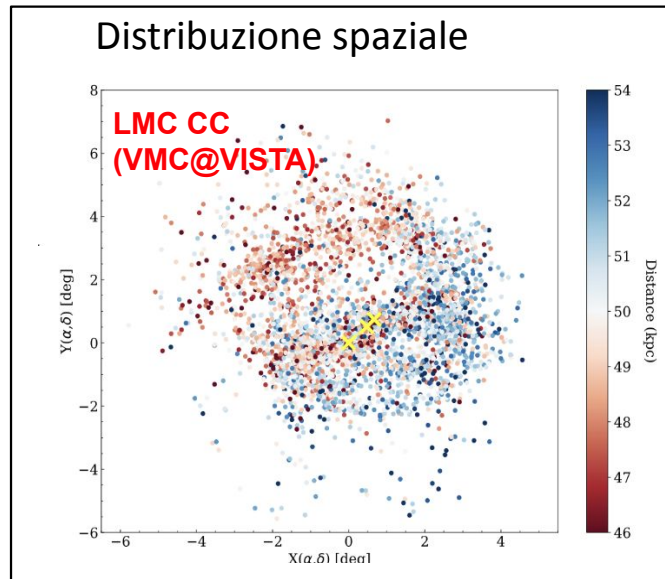
L'avanzamento dei modelli relativistici già utilizzati con successo per l'analisi dei dati della missione Gaia consente metodi innovativi per l'individuazione di onde gravitazionali e la misura della loro direzione di origine entro i sub-arcsec monitorando angoli tra stelle (antenna astrometrica gravitazionale)



# Scala delle Distanze

Stelle come indicatori di distanza: TRGB, variabili pulsanti, SNIa

Le variabili pulsanti svolgono un triplo ruolo: traccianti di popolazione, mappe 3D, calibratori



Individuazione e risoluzione dei possibili errori sistematici attraverso:

- Proprietà e affidabilità come candele standard attraverso modelli teorici pulsazionali (calibrazione delle relazioni note e individuazione di nuove relazioni, dipendenza dalla metallicità)
- Test empirici e teorici basati sia sui modelli che sull'utilizzo di survey fotometriche e spettroscopiche
- utilizzo delle parallassi da **Gaia** DR3
- Grande impatto atteso nel prossimo futuro con la survey **Rubin-LSST** che permetterà di andare 5 magnitudini più profondo di Gaia e estendere al Gruppo Locale i risultati ottenuti e che si stanno ottenendo con Gaia nella Via Lattea e con **JWST** e **ELT**



# Archeologia Galattica, Cosmologia Locale e Scala delle Distanze

- Ampia comunità con molti collegamenti trasversali sia interni al RSN2 che con tutti gli altri Raggruppamenti e con la Terza Missione
- Alta produttività
- Leadership internazionale consolidata in molti sottosectori del campo
- Diversi ruoli di coordinamento sia nei progetti in corso sia in quelli futuri, sia scientifici sia tecnologici
- Competenze teoriche e osservative

## Criticità:

- Necessità di supporto in termini di fondi per mantenere la competitività e il coinvolgimento in progetti e prepararsi all'utilizzo delle grandi facilities future
- Acquisizione di nuovi TI, ma anche di progressioni, per i molteplici progetti presenti e futuri
- Finanziamenti adeguati per il personale staff
- DPCT come infrastruttura INAF, archivio di dati grezzi e sistema informatico per la loro calibrazione e sfruttamento scientifico
- Expertise multidisciplinare da salvaguardare e sviluppare affinché supporti l'avanzamento teorico, l'implementazione osservativa e il trattamento dei dati

**GRAZIE!**