

## 1.3 I risultati scientifici attesi.

---

L'INAF ha conseguito un livello di eccellenza internazionale grazie a progetti scientifici e tecnologici svolti nei campi più moderni e innovativi dell'astrofisica teorica e sperimentale. Nel seguito vengono inquadrare le tematiche, citando alcuni esempi di risultati particolarmente significativi ottenuti dai ricercatori dell'INAF negli ultimi anni e definendo gli obiettivi strategici da conseguire nel prossimo triennio.

### 1.3.1 Cosmologia: una frontiera per comprendere l'Universo primordiale, la fisica fondamentale e la formazione ed evoluzione delle galassie.

La cosmologia moderna copre un vasto insieme di tematiche fondamentali e consente di comprendere le prime fasi dell'Universo, la sua geometria globale e la sua evoluzione, di capire la natura e le proprietà dei suoi costituenti, ovvero delle particelle sia conosciute sia ancora sconosciute, di **collegare l'astrofisica alla fisica delle alte energie e alla fisica fondamentale**, incluse le teorie della gravità e delle altre interazioni fondamentali. Tale conoscenza è strettamente legata sia allo studio del **fondo cosmico di micro-onde** (cosmic micro-wave background, CMB), che fornisce una foto dell'Universo a 380.000 anni dal Big Bang, sia a quello dei fenomeni astrofisici che determinano la **formazione di strutture cosmiche a varie epoche e a varie scale**: dalla formazione delle prime stelle e dei primi buchi neri che hanno prodotto la reionizzazione cosmologica, alla **formazione ed evoluzione delle galassie**, fino alla **formazione ed evoluzione degli ammassi di galassie e della struttura su grande scala dell'Universo**. La materia nell'Universo è infatti organizzata in strutture di varia gerarchia che si dispongono nello spazio in una ragnatela cosmica di filamenti (la cosiddetta *cosmic web*) alla cui intersezione si formano gli ammassi di galassie, le strutture autogravitanti più massicce. La formazione cosmologica di galassie a partire da un Universo altamente isotropo, quale quello osservato nel CMB, richiede che gran parte della materia si trovi in una forma ancora non identificata di **materia oscura** (dark matter, DM), mentre la materia barionica ordinaria ne compone solo una frazione minoritaria. Le galassie si formano quando il gas cosmologico segue la materia oscura nel processo di formazione di aloni per instabilità gravitazionale e collassa fino a formare stelle. Questo processo è iniziato alcune centinaia di migliaia di anni dopo il Big Bang, a partire dall'amplificazione delle piccole fluttuazioni di densità osservate nel CMB. Mentre lo scheletro della **struttura su grande scala** (large scale structure, LSS) è determinato dai parametri cosmologici e dall'interazione gravitazionale della materia oscura dominante, l'assemblaggio e l'evoluzione di strutture su scale tipiche delle galassie, fino a quelle degli ammassi di galassie sono governate da una complessa alchimia di processi astrofisici legati agli effetti indotti sul gas dalla gravità e dall'evoluzione di stelle e buchi neri super-massicci (SMBH).

#### 1.3.1.1 Le domande fondamentali

- 1) **La natura della Materia Oscura**
- 2) **La natura dell'Energia Oscura**
- 3) **La comprensione della gravità su scale cosmologiche**
- 4) **Le condizioni iniziali della Cosmologia**
- 5) **I principi della fisica e le costanti fondamentali**
- 6) **I processi fisici che determinano la formazione e l'evoluzione delle strutture cosmiche.**

Gli ultimi quindici anni hanno visto il consolidamento osservativo dello scenario cosmologico del Big Bang, inclusa la scoperta che l'espansione dell'Universo sta accelerando. I risultati più recenti mostrano come un modello  $\Lambda$ CDM di Universo caratterizzato da soli sei parametri, con DM fredda (cold DM, CDM, con un contributo del 26.0% alla densità di energia totale attuale dell'Universo), un contributo attualmente dominante di **energia oscura** (69.2%), rappresentabile in termini di costante cosmologica ( $\Lambda$ ), e solo una piccola frazione (4.8%) in materia barionica (sotto forma di gas, stelle, polveri, pianeti, ecc.), costituisca un'ottima descrizione dei dati. Restano tuttavia molte domande strettamente correlate alla fisica fondamentale: perché la costante cosmologica misurata ha un valore enormemente più piccolo di quello atteso sulla base delle teorie delle interazioni fondamentali? Se la DM è fatta di particelle, di che nuova/e particella/e si tratta? È possibile risolvere il puzzle della DE ricorrendo a un altro tipo di fisica, ad esempio modificando la gravità su grandi distanze?

Le **osservazioni del CMB** risultano consistenti con la teoria secondo cui l'Universo ha subito un'espansione esponenziale (la cosiddetta *inflazione*) nei primi  $10^{-32}$  secondi dal Big Bang quando la scala dell'Universo che vediamo oggi è cresciuta da un inizio infinitesimale fino a una dimensione di pochi centimetri. Il modello inflazionario fornisce una soluzione "cinematica" sia per alcuni problemi basilari del modello standard (per es. orizzonte, piattezza, monopoli) sia per la generazione di perturbazioni primordiali. Una fase di rapidissima espansione accelerata fa sì che zone dell'Universo che erano in contatto causale prima dell'inflazione, escano una dall'orizzonte dell'altra durante l'inflazione e tali rimangono fino alla superficie dell'ultimo scattering (ricombinazione). Richiedere che l'inflazione risolva in tal modo il problema dell'orizzonte implica che la curvatura dell'universo sia stata stirata a tal punto durante l'inflazione che oggi l'Universo sia quasi indistinguibile dall'esser piatto.

L'Universo fornisce un laboratorio promettente per indagare la fisica fondamentale in particolare la scala di energia delle interazioni, la violazione di leggi di conservazione, le proprietà dei neutrini, la possibile variazione delle costanti fisiche fondamentali. Studi di questo tipo, strettamente interdisciplinari, hanno una profonda sinergia con la ricerca diretta della DM e di altre particelle, condotta con gli esperimenti di astrofisica delle alte energie e di fisica di laboratorio. Le grandi distanze astronomiche ci permettono di indagare effetti molto piccoli che possono diventare rilevabili se accumulati sui corrispondenti tempi lunghi e grandi scale della Cosmologia.

**L'epoca della reionizzazione** (EoR) rappresenta un punto di svolta cruciale nell'evoluzione delle strutture cosmiche, e si colloca alla frontiera delle osservazioni attuali. Determinare quando sia avvenuta la reionizzazione cosmica, nonché i processi fisici coinvolti e la natura delle sorgenti di radiazioni ionizzanti rappresenta uno dei principali obiettivi per i prossimi anni. Anche se esiste un consenso generale che la reionizzazione sia probabilmente prodotta dalla formazione di stelle e/o buchi neri (ma non mancano possibilità più esotiche legate alla fisica fondamentale), il contributo globale di ciascuna di queste classi di oggetti al fondo di radiazione ionizzante è ancora largamente dibattuto. L'esistenza di quasars (QSOs) luminosi a  $z > 6$ , ovvero ad un'epoca in cui l'Universo era più giovane di un miliardo di anni, rappresenta una sfida ancora attuale per l'astrofisica extragalattica. Qual è infatti l'origine dei "semi" che in seguito sono diventati SMBHs? Come è potuto avvenire un accrescimento così efficiente?

**L'origine e l'evoluzione delle galassie** è uno dei capitoli più appassionanti e complessi nella formazione delle strutture cosmiche. In questo contesto è fondamentale la comprensione di come le proprietà delle galassie dipendano da ambiente e tempo cosmico. Molti processi fisici possono essere importanti: il gas (atomico e molecolare), essendo il combustibile grezzo per la formazione di stelle, gioca un ruolo dominante nella crescita delle galassie e, al tempo stesso, viene arricchito dai prodotti stellari espulsi da meccanismi di feedback. L'attività degli AGN contemporaneamente regola ed è regolata dalla formazione stellare. La massa di stelle e l'ambiente governano la soppressione della formazione stellare e l'emergere

di una sequenza di galassie che evolvono passivamente. Inoltre, la formazione delle galassie è certamente collegata alla crescita degli aloni di materia oscura. In breve, le galassie sono sistemi complessi che vivono in ambienti dinamici, ciò nonostante mantenendo caratteristiche strutturali ben precise e comuni. In questo campo la domanda fondamentale è: quali processi fisici guidano la trasformazione delle proprietà delle galassie?

### 1.3.1.2 Gli strumenti di indagine

#### **Materia Oscura**

L'esistenza di una componente oscura dell'Universo è corroborata da una serie di osservazioni astrofisiche, quali le curve di rotazione di un gran numero di galassie a spirale, la massa degli ammassi di galassie determinata con dati X e dal lensing gravitazionale, i moti delle galassie all'interno degli ammassi, i campi di velocità peculiari delle galassie, le anisotropie del CMB, le proprietà statistiche della struttura su grande scala dell'Universo e la loro evoluzione.

#### **Energia Oscura**

Nel 1998, osservazioni di supernovae (SN) di tipo Ia hanno fornito la straordinaria evidenza di un'accelerazione dell'espansione cosmica, che si ritiene essere causata da una nuova componente, denominata "energia oscura" (dark energy, DE), che, nella sua forma più "semplice" è identificata con la Costante Cosmologica.

L'impatto di DM e DE sulla LSS e sul CMB è essenziale per indagare le loro proprietà fisiche, le loro interazioni, la loro evoluzione nel tempo cosmico e per la comprensione della gravità su grandi scale cosmologiche. In questo contesto, lo studio della CMB e LSS deve essere considerato, concettualmente e programmaticamente, come un esperimento unico, dal quale è possibile ottenere informazioni di base sui costituenti dell'Universo e sulle leggi fondamentali che determinano la sua evoluzione.

#### **Fisica delle condizioni iniziali dell'Universo**

Nel modello più semplice di inflazione la forma del potenziale del campo scalare che guida l'inflazione (inflaton) e la sua scala di energia, lasciano la loro impronta sia sulle perturbazioni scalari che su quelle tensoriali. Le predizioni dell'inflazione - curvatura dell'Universo estremamente piccola e spettro quasi auto-simile di perturbazioni pressoché Gaussiane - sono in accordo con le osservazioni disponibili del CMB e della struttura su grande scala dell'Universo. Dovrebbe essere possibile verificare con future osservazioni la scala di energia dell'inflazione, la quantità di onde gravitazionali primordiali generate durante l'inflazione e, allo stesso tempo, lo spettro delle perturbazioni iniziali, sia di tipo scalare che tensoriale.

**La struttura su grande scala** rappresenta lo stadio finale dell'evoluzione cosmica, le cui condizioni iniziali sono date dalle anisotropie del CMB. **Galassie, ammassi di galassie e mezzo intergalattico, effetti di lente gravitazionale** rappresentano ad oggi i traccianti principali della LSS. Lo studio della loro distribuzione ed evoluzione, in particolare tramite misure di power-spectrum, funzione di correlazione, baryonic acoustic oscillations (BAO), redshift-space distortions (RSD), funzione di massa degli aloni di DM a vari redshifts, permette di misurare i parametri cosmologici più rilevanti

La caratterizzazione statistica, attraverso lo studio del CMB, delle perturbazioni primordiali, sia scalari che tensoriali (compresi i limiti superiori al livello dei modi-B primordiali) ha permesso di vincolare in modo significativo diverse classi di modelli inflazionari.

Oltre allo studio del CMB, la missione Planck ha consentito anche l'identificazione dell'effetto di *weak lensing*, dovuta alle deflessioni dei fotoni del CMB nell'attraversare la struttura su larga scala, un altro promettente strumento di indagine cosmologica. Infine, l'ampia copertura in frequenza di *Planck* ha consentito di realizzare mappe accurate a tutto cielo dei segnali astrofisici (di *foreground*) galattici ed extragalattici nel millimetrico e sub-millimetrico, e la produzione del miglior catalogo di sorgenti esistente a quelle lunghezze

d'onda. In particolare, l'analisi dell'effetto Sunyaev-Zeldovich (SZ) ha permesso la creazione del più completo catalogo di ammassi di galassie su tutto cielo, che è stato utilizzato per analisi cosmologiche complementari a quelle ottenute direttamente dal CMB.

Nell'Universo a noi vicino, le galassie contengono nel loro complesso meno del 10% della massa barionica totale dell'Universo. Il resto del budget in barioni dell'Universo si trova sotto forma di mezzo inter-galattico (IGM) che permea le strutture cosmiche a grande scala. Ad alto redshift ( $z \sim 2-5$ ) l'IGM contiene oltre il 90% della massa barionica ed è osservato e studiato in grande dettaglio, soprattutto attraverso la foresta di Lyman. Da un punto di vista cosmologico, lo studio dell'IGM permette di stimare la temperatura della DM a piccole scale (con dati ottenuti da spettrografi ad alta/media risoluzione) e in generale la struttura cosmica a  $z=2-5.5$ , fornendo ulteriori vincoli ai parametri cosmologici in un intervallo di redshift altrimenti difficilmente accessibile. Modelli teorico-numeriche suggeriscono invece che a basso redshift l'IGM si trovi in una fase Warm-Hot, elusivo per le osservazioni in banda X e UV a causa della sua bassa densità e dell'assorbimento da parte del HI galattico.

È da notare che i limiti più stringenti sui parametri cosmologici sono ricavati combinando le informazioni dal CMB e dalla struttura a grande scala, anche attraverso lo studio delle cross-correlazioni (effetto ISW, lensing, studi di gaussianità, masse dei neutrini, etc.).

### **Formazione ed evoluzione delle strutture cosmiche alle varie epoche e a varie scale.**

Per comprendere la fisica di formazione ed evoluzione delle galassie è necessario osservare le proprietà delle galassie vicine in grande dettaglio e allo stesso tempo studiare il lontano Universo per esaminare le proprietà delle galassie a diverse epoche, con confronto continuo tra un quadro fenomenologico variegato e complessi modelli teorico-numeriche. Gli oggetti osservati sono talvolta così lontani che, anche con l'utilizzo della più moderna strumentazione, le nostre conoscenze restano parziali. Passi avanti si stanno compiendo con i dati ottenuti da ALMA a lunghezze d'onda millimetriche, con l'attuale strumentazione del VLT e con LBT.

Misure CMB della profondità ottica del Thomson scattering pongono l'EoR ad un redshift approssimato  $z \sim 9$ , mentre studi delle galassie Ly- $\alpha$  emitting e degli spettri di assorbimento di QSOs a  $z \geq 6$  mostrano che la reionizzazione è sostanzialmente completata ad un redshift  $z \sim 6$ . Il metodo ottimale per studiare l'EoR appare essere lo studio del segnale a 21 centimetri redshiftato, originato dall'interazione tra il CMB e l'idrogeno neutro diffuso, per mezzo di interferometri radio.

L'attuale frontiera è costituita dal censimento delle galassie *star-forming* da  $z \sim 6$  e fino a  $z \sim 11$ . La ricerca delle sorgenti che hanno reionizzato l'universo richiede una profonda caratterizzazione di: (i) la natura delle popolazioni stellari (e/o AGN) e il contenuto di gas e polveri dei primi oggetti; (ii) i meccanismi fisici che permettono alla radiazione ionizzante di uscire dalla galassia in cui viene prodotta e di raggiungere il mezzo intergalattico: questo è legato a processi di feedback, eventualmente collegati all'arricchimento metallico dell'IGM; (iii) il livello di formazione stellare nel regime di bassa luminosità/massa nel primo miliardo di anni dell'Universo, per comprendere i primi episodi di formazione stellare.

Un contributo fondamentale nel campo della **formazione ed evoluzione delle strutture cosmiche** è venuto negli ultimi anni dalle grandi survey fotometriche e spettroscopiche che continueranno ad avere un ruolo importante nel prossimo triennio, in preparazione all'era degli *Extremely Large Telescopes* (ELT). È previsto un ulteriore sviluppo dell'acquisizione di dati spettroscopici "a campo integrale", in cui le galassie vengono mappate ad alta risoluzione spaziale per risolvere le singole regioni costituenti. Questo porterà a progressi significativi nella comprensione della formazione delle diverse componenti delle galassie (dischi e sferoidi), nello studio dei buchi neri al centro delle galassie e del ruolo dei nuclei galattici attivi nell'evoluzione delle galassie che li ospitano. Un progresso decisivo in relazione a

queste problematiche e a quelle della reionizzazione sarà ottenuto con il telescopio spaziale di nuova generazione JWST, in fase di lancio.

Gli **ammassi di galassie** costituiscono le strutture gravitazionalmente legate più grandi e, quindi – in uno scenario di formazione gerarchica - quelle formatesi più di recente nella storia cosmica. Essi costituiscono dei laboratori per studiare come i barioni (nelle galassie - osservate prevalentemente nell'ottico e nell'infrarosso - e nel mezzo intracluster (ICM) – sotto forma di plasma caldo che può essere caratterizzato nei raggi X e attraverso l'effetto Sunyaev-Zeldovich in banda millimetrica) traccino le condizioni iniziali del loro collasso entro alone di materia oscura e come reagiscano agli effetti ambientali che hanno luogo durante la loro storia (ulteriori aggregazioni di materia, formazione stellare, attività di AGNs). Le osservazioni in banda X e sub-mm permettono di caratterizzare questi oggetti e utilizzarli come strumenti per la cosmologia. Allo stesso tempo, la combinazione di osservazioni in banda radio e nei raggi gamma permette di studiare fenomeni energetici legati alle fasi più violente dell'evoluzione degli ammassi di galassie. Gli osservabili chiave sono la temperatura, la densità e la metallicità del gas e consentono di indagare come l'energia gravitazionale plasmi la formazione del cluster e come e in quale frazione sia convertita in componenti termiche e non termiche, producendo turbolenze e moti globali su scale di kpc.

Su scale più grandi, la teoria prevede che la maggior parte dei barioni nell'universo locale risieda in vaste strutture filamentose non legate che collegano gruppi e ammassi di galassie in una fase tiepida-calda ( $10^5$ - $10^7$  K). Anche se sarà estremamente difficile vincolare l'emissione del continuo termico generato da questo **warm-hot intergalactic medium** (WHIM), le righe spettrali dei metalli altamente ionizzati forniranno uno strumento per rilevare e caratterizzare questo gas con strumenti X, mentre le emissioni radio associate possono fornire informazioni sul campo magnetico in tali ambienti.

### **Calcolo Numerico**

Tutti i filoni di ricerca della Cosmologia e astrofisica extra-galattica richiedono anche un'intensa attività di simulazioni numeriche e quindi robuste capacità di calcolo, utilizzando super-computer massivamente paralleli. Lo scopo di tali simulazioni è di descrivere, con tecniche numeriche ad N corpi ed idrodinamiche, la formazione ed evoluzione di galassie, ammassi di galassie e strutture cosmiche su grande scala a partire dalle condizioni iniziali date dal CMB. Le simulazioni cosmologiche forniscono un quadro interpretativo unico grazie alla loro capacità di catturare la complessità dei fenomeni astrofisici e dinamici che guidano la formazione delle strutture cosmiche. Inoltre esse giocano un ruolo chiave per la definizione dei casi scientifici e per il disegno di strumenti da terra e missioni spaziali dedicati ad osservazioni cosmologiche ed extra-galattiche. L'attività di ricerca in astrofisica numerica necessita, come l'astrofisica osservativa, di avere a disposizione infrastrutture hardware ed una strategia di sviluppo di lungo termine, non solo per la costruzione e mantenimento di centri di calcolo, ma anche per lo sviluppo più generale di una "cultura del calcolo".

### **La scala di distanze cosmiche**

La determinazione di molte proprietà fisiche delle strutture nell'Universo (luminosità, massa, tempi-scala dinamici, tasso di formazione stellare, ecc.) si basa sulla conoscenza della distanza. Diverse quantità cosmologiche, come la costante Hubble e i parametri collegati, dipendono fortemente dalla misura delle distanze. Le distanze sono un elemento fondamentale anche per comprendere i moti delle galassie su larga scala, quindi le distribuzioni di massa su larga scala. Le distanze locali sono oggetto della missione Gaia e saranno fondamentali per calibrare la scala di distanza con gli indicatori primari e secondari adottati attualmente, utilizzati per raggiungere distanze cosmologicamente interessanti e quindi atte a misurare la costante Hubble. Le Cefeidi classiche e le RR Lyrae, grazie alle loro relazioni Periodo-Luminosità (PL), sono le candele standard più importanti del Gruppo Locale, associate rispettivamente ai sistemi di Pop I e Pop II, e vengono usate per calibrare



diversi indicatori di distanza secondari (ad esempio la relazione Tully-Fisher, SN Ia, fluttuazioni di luminosità superficiale, Novae, la funzione di luminosità degli ammassi globulari). Le SNe, nonostante gli indiscutibili vantaggi offerti da questi eventi superluminosi, hanno l'inconveniente di esplodere in momenti quasi casuali e in posizioni imprevedibili nelle galassie. Di conseguenza è necessario avere uno o più indicatori extragalattici di distanza per collegare la scala di distanza dell'Universo locale, mappata con Gaia, al regime Universo lontano dove le SNe risultano più utili. Una delle tecniche più promettenti a tal fine è il metodo basato sulle fluttuazioni di luminosità superficiale (SBF). Problemi relativi alla scala di distanze cosmiche sono stati posti recentemente in luce da una sorprendente tensione tra le misure locali di  $H_0$  basate sugli indicatori di distanza e inferenze da studi del CMB. I prossimi studi ci diranno se si tratta di semplici sottovalutazioni degli errori sistematici o se tale tensione ha implicazioni più profonde riguardanti la struttura cosmica su grande scala o persino effetti inaspettati di fisica fondamentale.

### 1.3.1.3 Gli obiettivi strategici

Le osservazioni di strutture cosmiche possono rivelare proprietà fondamentali sulla **natura della DM** (self-interacting, pressione, annichilazione, decadimento etc.) e sui possibili candidati (WIMPS, assioni, neutrini sterili, gravitini...) in particolare studiandone la scala di free streaming e l'effetto sull'espansione dell'Universo:

- Su scale relativamente piccole ( $<1$  Mpc) la dinamica di dwarf galaxies (con un contributo importante dalla missione Gaia), di gruppi e di ammassi di galassie (VLT, LBT); analisi del segnale di strong e weak lensing (HST, VLT, LBT, JWST, E-ELT, Euclid, LSST) e della distribuzione relativa della materia oscura e dei barioni (in prevalenza quelli dell'ICM mappato in banda X ora con Chandra e XMM e nel prossimo futuro con Athena, missione L2 di ESA).
- Su scale medi e grandi (da Mpc fino a  $\sim$ Gpc) di clustering di galassie e weak lensing e tomografia del mezzo intergalattico (VLT, E-ELT, Euclid, DESI, LSST, SKA).
- Ad alte energie (gamma, X-ray) per rivelare l'emissione continua o in riga derivante dal decadimento o annichilazione delle particelle di DM (CTA, FERMI, NuSTAR, Athena, cfr. il paragrafo riguardante l'Astrofisica Relativistica e Particellare).

L'approccio più diretto per la **comprensione della natura della DE** è lo studio di forme parametriche della sua equazione di stato tramite:

- L'espansione dell'Universo tracciata per es. dalle SN Ia o con il Sandage Test. Le infrastrutture e le missioni di interesse INAF che più contribuiranno in questo senso sono TNG, VLT, LBT, E-ELT, Euclid, SKA)
- La misura delle BAO e della crescita delle perturbazioni tramite lo studio delle RSD, del cosmic shear (Euclid, SKA, LSST, CMB), della distribuzione ed evoluzione degli ammassi di galassie (Euclid, LSST, Athena) e della Lyman- $\alpha$  forest (X-Shooter@VLT, ESPRESSO@VLT). Le future osservazioni in banda radio con SKA ed i suoi precursori apriranno la possibilità di tracciare la LSS attraverso osservazioni della riga a 21 cm con la tecnica dell'HI Intensity Mapping.

La comunità scientifica INAF è coinvolta in grandi survey (CLASH, APLAS, BOSS/SDSS-III, XXL), che mirano non solo a misurare i parametri cosmologici nel modello standard ma anche a capire se vi siano deviazioni dalla relatività generale (distorsioni nello spazio dei redshift, clustering di galassie, profili di massa degli ammassi di galassie) e, più in generale, a ricostruire la storia di espansione dell'universo ed il tasso di crescita delle strutture cosmiche in scenari non-standard. La missione spaziale ESA M2 Euclid, in cui l'INAF è tra i promotori iniziali ed è fortemente coinvolto, realizzerà una vasta survey su buona parte del cielo

extragalattico (15.000 gradi quadrati) nel visibile (imaging ad altissima risoluzione), fotometrica (bande Y, J, H) e spettroscopica nel vicino infrarosso.

Per **verificare le predizioni del modello inflazionario** occorre misurare la geometria dell'Universo, la Gaussianità delle perturbazioni e la forma del loro spettro, nonché l'ampiezza e lo spettro delle perturbazioni tensoriali primordiali. Questo è possibile tramite:

- surveys di galassie a grande campo in imaging (VST, VISTA, LSST, Euclid, SKA) o spettroscopia (VIMOS-MOONS@VLT, Euclid, SKA).
- misura dei B-modes primordiali nella polarizzazione del CMB come firma univoca della generazione di onde gravitazionali generate durante l'inflazione. L'ampiezza delle modi-B indotti dalle onde gravitazionali dovrebbe essere  $<1\%$  dell'anisotropia in temperatura. Ciò impone nuovi requisiti impegnativi su strumenti e tecniche di osservazione, con importanti conseguenze sui progressi richiesti sia in ambito di sviluppo tecnologico di detectors che di metodi di analisi dati.

La **variazione delle costanti fondamentali** attraverso studi di altissima precisione di transizioni atomiche a vari redshift è misurabile grazie a spettroscopia ad alta risoluzione (ESPRESSO@VLT, HIRES@E-ELT, SKA).

Varie **estensioni del Modello Standard** delle interazioni fondamentali prevedono sia violazioni dell'invarianza di Lorentz, (LIV), sia propagazioni anomale di fotoni d'alta energia, entrambe verificabili con osservazioni su scala cosmologica (CTA in particolare). In presenza di campi magnetici intergalattici, fotoni d'alta energia possono oscillare tra il modo gamma e una particella axion-like (ALP), riducendo così la profondità ottica dell'interazione fotone-fotone (fotoni TeV da Blazar con fotoni del Extragalactic Background Light, EBL).

Alcune anomalie osservate nelle mappe di CMB, specie a grandi scale angolari, destano particolare interesse: Planck ha dimostrato come, verosimilmente, tali anomalie non siano dovute a effetti strumentali spuri. Comprendere la loro natura (primordiali o causate da foregrounds sconosciuti) ed il livello di significatività all'interno del modello standard sono passi necessari per decidere se siano piuttosto da interpretare come segnali di "nuova fisica".

Gli obiettivi prioritari nel campo della **formazione ed evoluzione delle strutture galattiche** possono essere riassunti in due filoni:

- Lo studio dell'Universo ad alto redshift, e la formazione delle prime stelle e galassie nell'Universo giovane, al fine di comprendere quando e come si siano formate le prime stelle, quali sorgenti abbiano reionizzato l'Universo e come si siano formate le prime galassie e formati i primi buchi neri e quasars.
- La comprensione dei fenomeni che governano le proprietà e l'evoluzione delle galassie sin dalla loro formazione e l'effetto dell'ambiente sui processi evolutivi per chiarire i fenomeni alla base della diversità di forme, masse, storie di formazione stellare nelle popolazioni delle galassie alle diverse epoche cosmiche.

I prossimi anni saranno cruciali per lo **studio dell'EoR**: i primi risultati statistici apriranno la strada alla tomografia a 21cm resa possibile dalla prossima generazione di interferometri radio [SKA]. Verranno ottenute informazioni indipendenti e complementari sulla quantità di idrogeno presente alla EoR tramite: (i) surveys di Ly- $\alpha$  emitters a  $z>6$ : osservazioni sub-mm (ad esempio della riga [CII] $\lambda 158\mu\text{m}$ ) permetteranno di misurare sia il redshift (in assenza di Ly- $\alpha$ ) sia la polvere, il tasso di formazione stellare (SFR) e le proprietà di ionizzazione; osservazioni NIR da terra e dallo spazio permetteranno di identificare galassie star-forming sempre più deboli, utilizzando indicatori di redshift alternativi quali le righe di emissione

nebulari ([CIII], HeII, etc.) [JWST, ELT]; (ii) osservazioni spettroscopiche di quasar a  $z \geq 6$ : varie surveys dedicate identificheranno campioni di quasar relativamente brillanti a  $z \geq 6$ ; osservazioni spettroscopiche VIS-NIR misureranno la quantità di idrogeno neutro nell'IGM e allo stesso tempo rileveranno le tracce degli elementi chimici pesanti formati dai primi oggetti [ELT].

**Come, quando e dove si formano i primi SMBHs?** Il modo migliore per affrontare le questioni chiave nel prossimo triennio sarà i) sfruttando le osservazioni profonde a raggi X [Chandra e XMM] di QSOs ad alto redshift per comprendere la fisica delle accrescimento nei primi SMBHs e se la loro crescita avviene in ambienti ad alta densità popolati da altri BH compagni, più piccoli e forse oscurati ii) ottenendo osservazioni profonde in banda X per scoprire la popolazione tipica di BHs in accrescimento [Athena, che studierà la formazione delle prime strutture collassate, come queste si arricchiscano di metalli ed energia e l'interazione tra galassie, BHs e ICM].

Il ruolo dell'Italia nello **studio delle galassie e delle strutture cosmiche** è di primo piano. Ricercatori dell'INAF sono alla guida di grandi survey spettroscopiche – condotte principalmente con telescopi ESO quali VLT – e fotometriche – grazie allo sfruttamento del VST e all'utilizzo del LBT. L'eccellenza italiana si evidenzia sia sul fronte osservativo, con l'utilizzo di strumentazione che copre tutto lo spettro elettromagnetico dalle lunghezze d'onda X e gamma al radio, sia sul fronte teorico (simulazioni numeriche, modellistica semi-analitica di formazione delle galassie, modelli di evoluzione spettrofotometrica e chimica di avanguardia) che nella progettazione e realizzazione di strumentazione avanzata per tali studi. In particolare osservazioni condotte da ricercatori INAF attorno a redshift 7 hanno confermato che questa è un'epoca in cui la frazione di idrogeno neutro varia velocemente e mostrato che il processo di reionizzazione avviene in modo non uniforme (survey CANDELS: VLT, HST). A redshift più basso sono stati caratterizzati gli effetti di feedback sia negativo che positivo sulla formazione stellare, dovuto a potenti “venti” indotti dall'esplosione di SNe e/o da quasars.

Le survey che vedranno impegnati i ricercatori dell'INAF nel prossimo triennio permetteranno di ottenere risultati in vari settori:

- La cinematica stellare e del gas (multi-fase), inflows e outflows di gas in galassie di redshift alto e intermedio e relative connessioni con il mezzo circumgalattico e intergalattico, osservabili anche grazie a spettroscopia integral field (ottica/IR/radio) [ALMA, MUSE@VLT, WEAVE, ELT, SKA e suoi precursori].
- Il gas molecolare in galassie “normali”, misurato fino a  $z \sim 2$  e oltre, il contenuto di polvere fino a  $z \sim 6$  e oltre, saranno la chiave per comprendere il ciclo e riciclo dei barioni [ALMA, JVLA, IRAM PdBI & NOEMA].
- Studi statistici del contenuto di HI delle galassie e della sua evoluzione col tempo cosmico diverranno possibili grazie a surveys della riga a 21 cm [SKA e suoi precursori].
- I processi fisici in atto nell'ISM, studiati misurando gli elementi chiave del ciclo dei barioni galattici, tramite spettroscopia ad alta sensibilità, in particolare nel mid- e far-Infrared, dato che una parte significativa dell'energia emessa da stelle e SMBH viene assorbita e riemessa dalla polvere [JWST, SPICA?].
- Le prossime generazioni di survey radio avranno una sensibilità tale da permettere un censimento completo della formazione stellare e degli AGN fino ai redshifts più alti, senza problemi di assorbimento [SKA e precursori].
- Le regioni centrali di galassie massicce early-type diventeranno osservabili a  $z > 0.8$  grazie ai miglioramenti della risoluzione spaziale, testando la connessione con la dimensione/crescita delle galassie [JWST, ELT].



- I parametri strutturali e la morfologia (inclusi gli effetti di merging) diverranno disponibili su grandi campioni e in una varietà di ambienti su un arco di tempo cosmico di 10 miliardi di anni, permettendo di collegare gli indicatori di evoluzione delle galassie (dimensione, massa, forma, presenza di instabilità) con i meccanismi che guidano la crescita e la trasformazione delle galassie. [Euclid, LSST, VST, VISTA].
- Studi statistici (ad es. delle funzioni di luminosità, massa e formazione stellare) a epoche differenti ottenuti con survey pancromatiche profonde e su grandi aree di cielo studieranno la storia della formazione dei differenti tipi di galassie in differenti ambienti, raggiungendo un regime di masse stellari in cui le previsioni dei modelli sono in tensione con i dati [Euclid, LSST].
- Si iniziano ad avere campioni consistenti di (proto)clusters al picco cosmico della formazione stellare ( $z \sim 2$ ) e con un dettaglio osservativo sufficiente per studiarne le galassie componenti in una fase critica di formazione di queste strutture [VISTA, LBT, Euclid].
- Osservazioni in banda X (XMM-Newton, Chandra, Swift-XRT, Suzaku) e sub-mm (Planck) di clusters permettono di caratterizzare questi oggetti e utilizzarli come strumenti precisi per la cosmologia. Allo stesso tempo, la combinazione di osservazioni in banda radio (EVLA, GMRT, LOFAR) e nei raggi gamma (Fermi, MAGIC, HESS) permettono di studiare fenomeni energetici che hanno luogo negli ammassi di galassie, legati alle fasi più violente della loro evoluzione.
- Lo studio del contenuto di DM sta diventando possibile grazie a osservazioni spettroscopiche multi-object, al lensing forte e debole e a osservazioni X, permettendo di ricostruire il processo di assemblaggio della massa stellare e oscura dei sistemi galattici e di investigare l'evoluzione della connessione tra i barioni osservati e gli aloni di DM [WEAVE, 4MOST, MOONS].
- Lo studio del WHIM sarà uno degli obiettivi del telescopio X Athena.

Per ottenere progressi significativi in questi campi è necessario accompagnare I risultati delle osservazioni con predizioni ottenute con simulazioni idrodinamiche ad alta risoluzione e grande range dinamico per investigare i processi fisici su scale piccolo e modelli semi-analitici su volumi cosmologici, in entrambi i casi modellando accuratamente l'arricchimento metallico, il background fotoionizzante UV, il feedback stellare e da AGN e il trasporto radiativo. L'enorme quantità di dati e la complessità dello spazio dei parametri, da analizzare nel contesto di questi progetti, determinano l'esigenza di avvalersi delle odierne metodologie di data mining e machine learning, afferenti alle discipline emergenti dell'Astroinformatica e Astrostatistica .

Nel contesto della **cosmologia numerica** i gruppi di ricerca lavoreranno lungo le seguenti direzioni:

- Simulazioni per la formazione di strutture cosmiche, sviluppando modelli di formazione stellare e di feedback che descrivano in modo sempre più realistico la formazione delle galassie in vari ambienti e la loro interazione con il mezzo inter-galattico ed intra-cluster;
- Simulazioni per la formazione delle prime galassie e dei primi buchi neri a  $z > 6$ , finalizzate allo studio della reionizzazione; tali simulazioni forniranno le predizioni teoriche per le osservazioni che in futuro saranno realizzate con telescopi di prossima generazione, quali JWST, E-ELT, SKA, Athena.
- Simulazioni a grande scala di modelli cosmologici alternativi a quello standard  $\Lambda$ CDM, allo scopo di comprendere quali potranno essere le evidenze osservative di nuova fisica, da survey cosmologiche di prossima generazione;

- Sviluppo di codici di simulazioni innovativi che siano in grado di sfruttare appieno la potenza di calcolo ad alte prestazioni disponibili in futuro con infrastrutture di classe “exa-scale”

La comunità coinvolta in tali simulazioni ha accesso, attraverso “call” competitive alle infrastrutture di calcolo presso il centro di calcolo nazionale CINECA o ad infrastrutture europee disponibili attraverso l’iniziativa PRACE.

L’**high performance computing** (HPC) avrà un notevole sviluppo nei prossimi anni in termini di risorse hardware, algoritmi e software, con un aumento in particolare del range dinamico delle simulazioni cosmologiche. Questo miglioramento riguarderà le simulazioni delle prime stelle e BH, l’applicazione del trasporto radiativo e le simulazioni di quei processi fisici complesse che attualmente vengono decritti con ricette sottogriglia o in post-processing (ad es. la formazione stellare e il feedback).

### La scala di distanze cosmiche

I risultati di Gaia per la scala di distanze locali, le surveys di SN Ia (Dolores, SOXS) per la scala cosmologica e i miglioramenti degli indicatori su scale intermedie rappresenteranno un progresso decisivo, permettendo di avvicinarsi al traguardo di una precisione dell’1% sulle grandi scale.

Sulla base degli indicatori attuali il valore della costante di Hubble risulta essere  $H_0 \sim 73$  km/sec/Mpc, in contrasto con la misura di 66 km/sec/Mpc ottenuta dalla missione Planck con i dati CMB. È di fondamentale importanza risolvere questa inconsistenza utilizzando una calibrazione più accurata della scala delle distanze o/e usando degli indicatori che raggiungano direttamente delle distanze cosmologicamente significative (cfr. Cap. 1.3.2).

Strumento	Tecnica/Area	Periodo	Risultati attesi	Partecipazione italiana
<b>Strumenti operanti durante il periodo 2017-2019</b>				
<b>SKA Precursors (ASKAP MeerKAT)</b>	Crescita della LSS Spettroscopia e imaging in riga e continuo nel cm	2017-	Proprietà della DE e DM Formazione ed evoluzione di galassie EoR	Partecipazione INAF ai programmi EMU (ASKAP), MeerGAL e MIGHTEE (MeerKAT)
<b>VLA Low &amp; High frequency</b>	Continuo e righe atomiche e molecolari	2017-	Campo magnetico in stelle, stelle attive, flares, struttura di dischi, proprietà della polvere, trancianti di temperatura e densità, masers	INAF è PI di diverse proposte e collabora in large programmes di EU PI-ship
<b>ALMA</b>	Emissione sub-mm. continuo e righe atomiche e molecolari	2017-	EoR Formazione ed evoluzione di galassie	INAF è PI di diverse proposte e collabora in programmi di US, EA ed EU PI-ship
<b>IRAM-NOEMA-30m</b>	Emissione sub-mm. continuo e righe atomiche e molecolari	2017-	EoR Formazione ed evoluzione di galassie	INAF è PI di diverse proposte e collabora in large programmes di EU PI-ship
<b>APEX</b>	Emissione sub-mm. continuo e righe atomiche e molecolari del mezzo interstellare	2017-	Surveys di struttura, temperatura, dinamica e chimica di regioni di formazione stellare. Calibrazione di diagnostica evolutiva.	INAF è PI di diverse proposte e collabora in large programmes di EU PI-ship
<b>VLT</b> <b>UVES</b> <b>X-shooter</b> <b>FORS</b> <b>MUSE</b> <b>VIMOS</b>	Dinamica di galassie, gruppi e ammassi Segnale di strong e weak lensing Tomografia IGM Surveys di galassie	2017-	Proprietà della DM e DE Parametri cosmologici Calibrazione delle SNe come candele standard EoR Formazione ed evoluzione delle galassie	Osservazioni GO INAF è PI di vari Large programme per questi strumenti

<b>VST</b>	Surveys di galassie Imaging	2017-	Parametri cosmologici Condizioni iniziali dell'Universo	ESO/INAF. PI-ships
<b>VISTA</b>	Surveys di galassie Imaging IR	2017-	Parametri cosmologici Condizioni iniziali dell'Universo	ESO
<b>SDSS</b>	Surveys di galassie e QSOs BAO RSD	2017-	Parametri cosmologici Condizioni iniziali dell'Universo	SDSS collaboration
<b>LBT</b> <b>LBC</b> <b>MODS LUCI</b>	Dinamica di galassie, gruppi e ammassi Segnale di strong e weak lensing Surveys di galassie	2017-	Natura della DM DE EoR Condizioni iniziali dell'Universo	INAF con contributi altri partner LBT
<b>NTT</b> <b>Dolores</b> <b>NICS</b>	SNe come candele standard, osservazioni di galassie e QSO Imaging, spettri	2017-	Parametri cosmologici Natura della DE Formazione ed evoluzione di galassie	Infrastruttura INAF
<b>Planck</b>	Fluttuazioni e polarizzazione del CMB e delle emissioni astrofisiche mm. Gravitational lensing	2017	Condizioni iniziali dell'Universo Test della fisica fondamentale EoR	ESA. Forte impegno italiano
<b>HST</b>	Immagini-Spettroscopia NUV, ottico e NIR ad alta risoluzione spaziale/ Segnale di strong e weak lensing	2017-	Natura della DM DE EoR	Collaborazione INAF con esponenti EU e US
<b>Gaia</b>	Dinamica delle Dwarf galaxies Scala delle distanze /Astrometria	2017- 2020 (+2)	Natura della DM. Calibrazione, tramite parallassi, dei principali indicatori di distanza primari (Cefeidi, RR Lyrae, LPV), misura di moti propri	ESA. Forte impegno italiano
<b>Chandra</b>	Distribuzione dei barioni ICM vs DM Sorgenti X	2017-	Natura della DM (SM)BH primordiali	NASA PI e co-I INAF di numerosi proposals
<b>XMM</b>	Distribuzione dei barioni ICM vs DM Sorgenti X	2017-	Natura della DM (SM)BH primordiali	ESA Contributo INAF:Co-I EPIC, Calibrazioni, PI e co-I di numerosi proposals
<b>FERMI</b>	Emissione da annichilazione di DM	2017-	Natura della DM	NASA-INAF-INFN Contributo INAF: analisi ed interpretazione dati, software
<b>HPC</b>	Tecniche numeriche N- corpi e idrodinamiche	2017-	Formazione ed evoluzione di galassie, clusters di galassie e LSS Galassie e BH primordiali, EoR Modelli cosmologici Predizioni per strumentazione e surveys future	Call competitive presso CINECA Infrastrutture EU PRACE
<b>Strumenti futuri</b>				
<b>SKA</b>	Crescita delle perturbazioni Survey di galassie a grande campo Sandage Test Spettroscopia e imaging in riga e continuo nel cm. HI intensity mapping	2020-	Proprietà della DE e DM, EoR Parametri cosmologici Condizioni iniziali dell'Universo Variazioni delle costanti fondamentali Formazione ed evoluzione di galassie	Partecipazione INAF ai WG Cosmology, EoR, galaxies/AGN, galaxy clusters, cosmic magnetism
<b>VLT</b> <b>ESPRESSO</b>	Assorbitori QSO Tomografia IGM/ Spettroscopia alta risoluzione.	2018-	Natura della DM e DE Parametri cosmologici Variazioni costanti fondamentali Evoluzione delle galassie Ciclo dei barioni	ESO. CoI-ship italiana

<b>VLT MOONS</b>	Crescita della LSS Spettroscopia multi-object	2019-	Proprietà della DM e DE, EoR Condizioni iniziali dell'Universo	Forte coinvolgimento INAF
<b>E-ELT MAORY MICADO</b>	Segnale di strong e weak lensing/ Immagini	2024-	Proprietà della DE Formazione ed evoluzione di galassie	ESO. PI-ship italiana MAORY
<b>E-ELT – HIRES</b>	Spettroscopia IGM Sandage Test/ Spettroscopia alta risoluzione.	2026-	Natura della DM e DE Parametri cosmologici Variazioni costanti fondamentali EoR, formazione ed evoluzione delle galassie	ESO. PI-ship italiana
<b>NTT SOXS</b>	Immagini/spettri	2019-	Studio SNe: caratterizzazione fisica del fenomeno e del progenitore.	INAF/ESO
<b>WHT WEAVE</b>	Galactic Archaeology; Stellar, Circumstellar and Interstellar Physics; Stellar populations; Galaxy clusters; QSOs 1000 spettri per FOV	2019-	Formazione ed evoluzione di galassie e clusters di galassie Reionization BAO	Forte coinvolgimento INAF
<b>LSST</b>	Segnale di strong e weak lensing / Immagini	2021-	Proprietà della DM e DE Condizioni iniziali dell'Universo	NSF-DOE- LSST Corp. INAF partecipa con 15 PI/progetti
<b>CTA</b>	Emissione da annichilazione di DM, LIV, propagazione anomala di fotoni Imaging gamma/TeV	2019	Proprietà della DM Test della fisica fondamentale	Forte impegno italiano INAF-INFN
<b>JWST</b>	Immagini, Spettri nel NIR e MIR ad alta risoluzione/ Segnale di strong e weak lensing	2019-	Proprietà della DM Formazione ed evoluzione di galassie EoR	Collaborazione INAF con NASA-ESA.
<b>Euclid</b>	Segnale di strong e weak lensing Crescita delle perturbazioni BAO RSD	2020-	Proprietà della DE e DM, EoR Condizioni iniziali dell'Universo Formazione ed evoluzione di galassie	ESA. Forte impegno italiano
<b>Athena</b>	Distribuzione barioni ICM Distribuzione dei clusters Emissione da annichilazione di DM Sorgenti X	2028-	Natura della DM e DE (SM)BH primordiali	ESA. Forte impegno italiano

## LE PROFESSIONALITÀ RICHIESTE

Esperti in

- cosmologia teorica e numerica per lo studio di formazione delle strutture cosmiche, in un framework teorico/interpretativo per la progettazione e lo sfruttamento dei dati osservativi di infrastrutture presenti e future (per es. VLT, LBT, XMM, Euclid, SKA, E-ELT, Athena)
- ricerca di oggetti primordiali (in particolare per la futura strumentazione)
- evoluzione delle galassie sin dalla loro formazione ed effetto dell'ambiente sui processi evolutivi, anche attraverso analisi e interpretazione sia di dati spettroscopici ad alta risoluzione e S/N che di integral field spectroscopy
- meccanismi di interazione tra le diverse componenti delle galassie (gas, metalli, stelle, dark matter, ecc.)
- osservazioni e processi di emissione di galassie e AGN nell'infrarosso
- sfruttamento scientifico di ALMA, dei precursori di SKA e in preparazione di SKA
- modelli di fotoionizzazione e fisica del mezzo interstellare
- evoluzione dinamica, chimica e termodinamica degli ammassi di galassie
- lensing gravitazionale
- analisi della LSS/CMB da survey di prossima generazione ed inferenze cosmologiche

- preparazione e sviluppo di software scientifico di analisi dati per strumenti di prossima generazione; progettazione, sviluppo e ottimizzazione di tecniche e modelli di Astroinformatica e Astrostatistica.



### 1.3.2 La formazione, l'evoluzione e la fine delle stelle. Le popolazioni stellari come traccianti della storia dell'Universo.

Nel campo dell'astrofisica stellare e dei sistemi esoplanetari l'INAF ha consolidato il suo ruolo di leadership internazionale conducendo ricerche di eccellenza con metodologie innovative e ottenendo risultati di grande impatto. I ricercatori dell'Istituto hanno sviluppato un'invidiabile network di collaborazioni europee e internazionali e sono presenti nelle principali "joint venture" scientifiche da terra e dallo spazio, sia attuali che programmate per il prossimo futuro.

#### 1.3.2.1 Le domande fondamentali

Le principali problematiche a cui si vuol rispondere nei prossimi anni, formulate in termini dei temi rilevanti dell'astrofisica stellare e dei sistemi planetari extrasolari, sono le seguenti:

##### 1) EVOLUZIONE STELLARE:

**a) *Comprensione della reale efficienza di processi fisici "non-canonici".*** Determinare la connessione tra convezione, rotazione e campo magnetico, e l'efficienza dei processi diffusivi - anche attraverso studi asterosismologici- è di fondamentale importanza per il ruolo che questi processi fisici svolgono nell'ambito del trasporto del momento angolare e degli elementi chimici durante le fasi dell'evoluzione stellare.

**b) *Comprendere il destino finale delle stelle e la natura dei loro resti.*** Le stelle sono i maggiori responsabili dell'arricchimento chimico del mezzo interstellare, di gas e polvere, attraverso i venti stellari e/o le esplosioni di supernova, e possono contribuire in modo rilevante alla materia oscura barionica dell'universo, lasciando resti più o meno compatti. Lo studio approfondito dell'evoluzione e del destino finale delle stelle al variare dei parametri iniziali è quindi cruciale per comprendere l'evoluzione della nostra Galassia e dell'universo in generale.

**c) *Sviluppare una nuova generazione di modelli stellari.*** La possibilità di calcolare modelli di atmosfere ed involucri stellari sempre più complessi ed accurati – sia dal punto di vista del calcolo 3D sia di quello di un trattamento più dettagliato dei processi convettivi -, permette di "trasferire" i risultati ottenuti attraverso queste simulazioni anche nel calcolo di modelli stellari. È altresì necessario sperimentare la reale fattibilità ed applicabilità al confronto con dati osservativi, di calcoli di modelli stellari multi-dimensionali.

##### 2) ASTROARCHEOLOGIA:

**a) *Capire la formazione delle strutture su scala sub-galattica sia nella Via Lattea che nel Volume Locale (includendo la mappatura della materia oscura).*** A tale fine è necessario stabilire se le galassie si formano come conseguenza della fusione di "building blocks" di tipo primordiale o in cui la formazione di stelle ha già avuto inizio, comprendere la natura e l'origine di alone, bulge, disco, stabilire la natura della materia oscura e come essa si mappa nelle sotto-strutture galattiche.

**b) *Ricostruire l'evoluzione chimico-dinamica su varie scale, dagli ammassi stellari alle galassie.*** La determinazione delle proprietà chimico-cinematiche delle popolazioni stellari (particolarmente quelle risolte quali gli ammassi) della nostra Galassia e la loro evoluzione temporale è elemento cruciale per la comprensione della formazione ed evoluzione chimico-dinamica della Via Lattea.

*c) Ricostruire la storia della formazione stellare dei sistemi studiati (sia per popolazioni risolte che non risolte).* La comprensione della storia evolutiva della Via Lattea e del Gruppo Locale richiede come elemento imprescindibile la ricostruzione della storia di formazione stellare, per stabilire se essa costituisca un processo continuo e spazialmente uniforme o, piuttosto, altamente episodico nel tempo e spazialmente disomogeneo.

### **3) SCALA DELLE DISTANZE E TRANSIENTI:**

*a) Ottenere distanze accurate, mappe 3D e la caratterizzazione delle popolazioni stellari nelle galassie, sia tramite lo studio di stelle pulsanti sia con l'analisi di popolazioni stellari non risolte (ad esempio il metodo SBF).* La determinazione accurata delle distanze, con precisione significativamente migliore del 5%, a partire dal Gruppo Locale fino a ~200 Mpc è elemento essenziale per caratterizzare le proprietà fisiche di stelle e galassie.

*b) Capire il ruolo come indicatori di distanza delle supernovae ed in particolare dei nuovi tipi di esplosione stellare recentemente scoperti (ad esempio le supernovae super luminose).* Le Supernovae (SNe) sono strumenti fondamentali per conoscere le distanze cosmiche e per indagare sulla natura fisica dell' Energia Oscura ma l'ampia diversità delle SNe sempre più visibile nei dati osservativi richiede di estendere lo schema di classificazione e di migliorare la comprensione di questi eventi.

*c) Riconciliare le stime della costante di Hubble ottenute dalla misura delle distanze (indicatori primari e secondari) con quelle basate sulla misura della radiazione cosmica di fondo.* Le Cefeidi classiche (pop. I) e le RR Lyrae (pop. II) rappresentano il primo gradino della scala delle distanze cosmiche ma le stime della costante di Hubble ottenute sulla base di queste variabili non sono consistenti entro gli errori con la recente stima dai dati di Planck.

### **4) FORMAZIONE STELLARE:**

*a) Come si distribuisce globalmente la formazione stellare nella Galassia, che è il "template" a  $z=0$ .* Le leggi generali che si deducono dalla mappatura multi-wavelength di massa, tasso di formazione, distribuzione dei filamenti, e specie chimiche, congiuntamente alla comprensione del ruolo dei campi magnetici e della turbolenza, sono informazioni cruciali riguardo all'evoluzione della Via Lattea.

*b) Quale fisica guida la formazione del singolo oggetto alle varie masse.* Dato lo stretto legame tra evoluzione fisica e chimica durante la formazione delle stelle, è di fondamentale importanza capire l'evoluzione chimica (in regioni di formazione stellare partendo dalle condizioni iniziali, sia nei "pre-stellar cores" (bassa massa) che e nelle "infrared-dark clouds" (alta massa e clusters).

*c) Quali fattori determinano le condizioni iniziali della formazione planetaria.* Il disco circumstellare, generato dalla conservazione del momento angolare durante il collasso della nube protostellare, è il luogo di nascita dei pianeti. È quindi cruciale studiarne proprietà (struttura e morfologia, meccanismi di interazione con la stella centrale) ed evoluzione (chimica di gas e polveri, accrescimenti e formazione di planetesimi) per determinare la configurazione iniziale della formazione planetaria e quindi il possibile emergere della vita.

### **5) SISTEMI PLANETARI EXTRASOLARI:**

*a) Determinare l'architettura e la dinamica dei sistemi esoplanetari sulle varie scale di massa, raggio e separazione.* Le architetture dei pianeti extrasolari costituiscono la prima e fondamentale evidenza osservativa fossile dei complessi processi di formazione planetaria in

dischi circumstellari. La combinazione di queste informazioni con la varietà di interazioni gravitazionali in sistemi multipli osservate oggi permette inoltre di ricostruire la storia di migrazione orbitale e l'evoluzione dinamica.

*b) Misurare le proprietà strutturali, la chimica e la dinamica delle atmosfere degli esopianeti sulle stesse scale.* La misura delle densità media e l'identificazione di molecole nelle atmosfere dei pianeti extrasolari sono elementi cruciali per comprendere i processi di formazione ed evoluzione planetaria, che danno origine ad una straordinaria varietà di composizioni interne, chimica e dinamica atmosferiche, con interazione tra proprietà strutturali e atmosferiche e ripercussioni cruciali anche sulle potenziale abitabilità.

*c) Comprendere la dipendenza delle proprietà fisiche e dinamiche dei pianeti dalle caratteristiche delle stelle ospiti (età, massa, metallicità) e dall'ambiente stellare.* Per capire i complessi meccanismi di formazione, evoluzione fisica e dinamica è necessario comprendere in dettaglio il ruolo di massa e composizione chimica stellare nell'efficienza di formazione dei sistemi di data massa e separazione orbitale, l'impatto di effetti 'ambientali' (binarietà e densità stellare, ma anche attività, formazione ed evoluzione stellare) su frequenze e proprietà fisiche e dinamiche dei sistemi esoplanetari così come le conseguenze in termini di abitabilità.

### 1.3.2.2 Gli strumenti di indagine

#### 1) EVOLUZIONE STELLARE

La comunità INAF ha storicamente un **ruolo di leadership**, a livello mondiale, per quanto riguarda la **modellistica stellare** in un ampio spettro di fasi evolutive, incluse quelle caratterizzate dalle pulsazioni stellari, dagli indicatori di distanza e dai progenitori di Supernova. I risultati di questo scenario teorico, insieme all'ampio quadro osservativo fornito dai ricercatori dell'INAF, stanno consentendo di realizzare progressi importanti nella conoscenza della fisica delle stelle e nella descrizione del processo di formazione di polvere nel vento stellare. Lo studio delle **pulsazioni stellari** permette da un lato di verificare le assunzioni fisiche e numeriche adottate nella teoria dell'evoluzione stellare, dall'altro di vincolare la storia di formazione stellare dei sistemi studiati e di fornire una calibrazione teorica della scala delle distanze extragalattiche. Questi risultati teorici, costituiscono strumenti insostituibili per la comprensione della storia dell'Universo in tutte le sue componenti. Tuttavia restano ancora delle **criticità** che limitano il potere predittivo dei modelli: il trattamento della convezione, la perdita di massa, il ruolo di rotazione e campi magnetici. Un salto di qualità si potrà avere solo progredendo in modo significativo nella trattazione di tutti questi processi.

Gli **studi asterosismologici** hanno acquistato un ruolo cruciale grazie ai dati dei satelliti **CoRoT e Kepler**, i cui spettri di frequenza permettono – attraverso il confronto con accurati modelli di evoluzione stellare - di stimare i parametri intrinseci stellari (masse, raggi, età) di stelle distanti isolate e di sondare la loro struttura interna, lo stato evolutivo delle giganti, la rotazione del nucleo, il rimescolamento al bordo del nucleo convettivo, ecc. La possibilità di avere a disposizione dati di questo tipo per migliaia di stelle lontane ha aperto la strada alla cosiddetta **ensemble asteroseismology delle popolazioni stellari** con importanti implicazioni per il campo in rapido sviluppo dell'Archeologia Galattica.

#### 2) ASTROARCHEOLOGIA:

Le componenti risolte della Via Lattea e delle galassie vicine rappresentano la "stele di Rosetta" a  $z=0$  per comprendere la formazione ed evoluzione chimica e dinamica delle

galassie. La combinazione di **astrometria, fotometria e spettroscopia** fornisce una valida base ai **modelli teorici/interpretativi**. Per capire la formazione delle strutture su scala sub-galattica, occorre: i) determinare la natura e quantità della materia oscura, ii) capire quale sia la gravità corretta e iii) ridefinire i modelli dinamici della Galassia in contesto relativistico, per un'appropriata interpretazione del catalogo di Gaia e delle future missioni. Occorre **aggiornare i sistemi di riferimento celesti relativistici** definiti dall'IAU, per una determinazione più accurata del moto del Sole e dei Quasi Stellar Objects e per valutare l'impatto sullo studio della cinematica delle popolazioni stellari della Via Lattea e delle galassie vicine. Le proprietà chimico-cinematiche delle popolazioni stellari del disco della Galassia sono ragionevolmente consistenti con uno scenario di formazione "inside-out", anche se rimangono da comprendere fattori come il ruolo della migrazione radiale, la definizione del processo di formazione delle stelle più vecchie appartenenti al disco spesso, il processo di formazione dell'alone e le caratteristiche del bulge.

Gli **ammassi stellari** sono ottimi strumenti di studio della formazione ed evoluzione delle stelle e delle sotto-strutture (disco, bulge, alone). Per gli **ammassi aperti** vanno definiti: ruolo di turbolenza, campo magnetico e "feedback" di stelle massicce nel processo di formazione; disgregazione e popolamento del campo della Via Lattea; posizione attuale rispetto a quella di nascita, importante per modellizzare l'evoluzione chemo-dinamica; ruolo di popolazioni cinematiche multiple in ammassi giovani; relazione inversa età-metallicità nel disco interno. Servono simulazioni N-body, modelli chemo-dinamici, e un solido scenario osservativo. Rimangono da definire quali sono gli eventi che hanno portato alla **formazione degli ammassi globulari e delle loro popolazioni stellari multiple**. Sono da appurare i meccanismi di auto-arricchimento, la massa iniziale e la successiva evoluzione chemo-dinamica e occorre capire il contributo degli ammassi globulari alla **formazione dell'alone** della Galassia e la frazione di sottostrutture cinematiche ("streams") prodotta da accrescimento di satelliti. Le grandi survey in corso dallo spazio (es. Gaia: astrometria, fotometria e spettroscopia) e da terra, (es. Gaia-ESO: spettroscopia) e di prossimo avvio da terra (es. LSST: astrometria e fotometria; WEAVE: spettroscopia), 4MOST, WFIRST daranno un contributo sostanziale allo sviluppo dell' archeologia galattica, aiutando l'identificazione dei numerosi residui dispersi nell'alone, rideterminando la massa della Via Lattea e definendo le proprietà del disco e del bulge

### 3) SCALA DELLE DISTANZE E TRANSIENTI:

Per ottenere **mappe 3D delle popolazioni stellari nelle galassie risolte in stelle** e caratterizzarne le proprietà intrinseche (età, composizione chimica) è di **cruciale importanza lo studio dei diversi tipi di stelle pulsanti ospitate**. Se lo sviluppo di uno scenario teorico per le variabili pulsanti, basato su modelli idrodinamici non lineari e convettivi, consente di riprodurre le proprietà osservate e di vincolare sia parametri intrinseci stellari che le distanze, le nuove parallassi di altissima precisione (errori < 10 microarcsec) che Gaia otterrà per un altissimo numero di Cefeidi ed RR Lyrae della Via Lattea consentirà una nuova calibrazione, su campioni statisticamente significativi, delle relazioni che rendono queste variabili candele standard.

Per conoscere la distanza e studiare le popolazioni stellari delle galassie distanti dove le stelle non sono risolte, uno dei metodi più efficaci è la tecnica delle **fluttuazioni di brillantezza superficiale (SBF)**. L'accuratezza intrinseca di questo metodo è del ~3% sulle distanze, con un ulteriore contributo (~8%) proveniente dal punto zero della calibrazione. Per definizione, il segnale SBF è dominato dal flusso emesso dalle stelle più brillanti e per questo le SBF multi-banda sono traccianti delle proprietà delle popolazioni stellari nelle galassie.

Per quanto riguarda invece il **ruolo delle supernovae, e dei nuovi tipi di esplosione stellare, come indicatori di distanza**, gli esperimenti DES, Euclid, LSST, WFIRST abatteranno

drasticamente sia gli errori statistici sia quelli sistematici. D'altra parte, per la calibrazione assoluta della scala di distanza e per la verifica e controllo della possibile evoluzione cosmica resta cruciale espandere le osservazioni spettrofotometriche dettagliate di SNe vicine. Occorre ampliare e perfezionare lo schema di classificazione e verificare la possibile calibrazione delle SNe super-luminose per estendere la scala di distanza delle SN a redshift  $z \sim 3-4$ . Questo richiede campionamento temporale frequente, ampio range spettroscopico e buona risoluzione spettrale.

Per **riconciare le stime della costante di Hubble** (distanze versus radiazione cosmica di fondo), un contributo essenziale verrà dalle missioni astrometriche Gaia ed LSST.

#### 4) FORMAZIONE STELLARE:

Le misure di Herschel, combinate con i conteggi stellari nel NIR hanno consentito i primi tentativi di tomografia 3D della polvere nell'ISM diffuso e nelle nubi molecolari. Gaia permetterà la prima ricostruzione 3D del materiale Galattico diffuso. Se il follow-up con single-dish millimetrici dei dati Herschel nel piano Galattico consente la caratterizzazione chimica, fisica e dinamica dei "clumps" progenitori di ammassi e dei filamenti, l'interferometria consente di studiare la frammentazione dei "clumps" e l'evoluzione dell'accrescimento, della dinamica e della chimica dei "cores". **Osservazioni nel MIR e la spettroscopia ad alta sensibilità nel lontano IR** saranno fondamentali per investigare le proprietà del gas caldo nel sistema disco/jet di protostelle. I vari scenari proposti per il meccanismo e la scala spaziale e temporale del disaccoppiamento del gas dal campo magnetico sono verificabili tramite misure della cinematica del gas e dell'emissione termica dai grani di polvere. Le proprietà fisiche del gas nei jet così come l'evoluzione e la dissipazione dei dischi gassosi, potranno essere sondate dalle grandi survey spettroscopiche di sorgenti giovani mentre le osservazioni ottiche/IR da terra ad alta risoluzione spaziale con ottica adattiva avanzata esplorano le regioni interne dei jet e dei dischi. Per rilevare molecole complesse fondamentali nella catena pre-biotica si richiede alta risoluzione spaziale e la più estesa banda spettrale possibile (esistono progetti a forte partecipazione INAF come ad es. **SOLIS: Seeds Of Life In Space**). L'imaging ad alta risoluzione spaziale nell'ottico e nell'IR è fondamentale per identificare pianeti all'interno del disco, oppure strutture come spirali o gaps visibili in luce polarizzata, e per investigare le regioni di accelerazione dei jets. La spettroscopia VIS/NIR consente studi di cinematica come la rotazione nei jets o diagnostica spettrale avanzata per derivare i parametri del gas attraverso l'emissione da shocks. **Simulazioni numeriche di alto livello** modelleranno l'effetto di pianeti già formati nel disco, dei meccanismi di lancio del jet, di trasporto di momento angolare, e di migrazione della polvere.

#### 4) SISTEMI PLANETARI EXTRASOLARI:

Risposte alle domande fondamentali nello studio dei sistemi esoplanetari richiedono certamente ulteriori sforzi dal punto di vista sia teorico che osservativo. **Scoperte di nuovi sistemi e caratterizzazioni sempre più dettagliate** di quelli già noti permetteranno una maggiore esplorazione dello spazio dei parametri (planetari e stellari) e consentiranno di effettuare analisi statistiche e individuali sempre più accurate della straordinaria diversità delle proprietà dei sistemi planetari. Queste forniscono l'essenziale banco di prova per i modelli di formazione ed evoluzione planetarie, ad esempio per confrontare le osservazioni con popolazioni planetarie sintetiche.

**Lo spettro degli strumenti disponibili o in corso di realizzazione per lo studio dei pianeti extrasolari è ampio ed utilizza tecniche molto diverse tra loro;** ciascuna di queste tecniche è particolarmente adatta a rispondere ad alcune delle domande di cui sopra. L'INAF è impegnato in modo importante in diversi di questi strumenti.



La seguente tabella dà un quadro degli strumenti principali di riferimento e descrive qual è l'impegno della comunità italiana di MA2 nella loro realizzazione e utilizzo.

Strumento	Tecnica/Area	Periodo	Risultati attesi	Partecipazione italiana
<b>Strumenti operanti durante il periodo 2017-2019</b>				
<b>Kepler 2</b>	asterosismologia	2017-19	Caratterizzazione di stelle brillanti	NASA
<b>VLT – SPHERE/ X-Shooter</b>	Immagini,Spettri/Caratterizzazione	2017-	Statistica e caratterizzazione esopianeti, protopianeti, dischi protoplanetari., Jets/outflows. YSOs, supernovae/transienti, progenitori.	ESO. INAF nel GTO di Sphere, ha PI-ship GTO di X-Shooter +survey GO
<b>VLT-FLAMES/ MOONS</b>	Spettri / velocità radiali/ abbondanze chimiche	2017-	Chimica Galattica. Gaia Follow-up di stelle Galattiche, ammassi, Cefeidi ed RR Lyrae, popolazioni stellari risolte.	ESO, Partecipazione Italiana. INAF PI-ship di Gaia-ESO
<b>VLT – CRIRES+ ESPRESSO</b>	Alta ris. spettrale Vel. Radiali/ Atmosfere	2018-	Statistica Terre e super-Terre. Caratterizzazione di: atmosfere pianeti giganti in transito, YSOs, jets, outflows	ESO e INAF INAF partecipa al GTO di Espresso
<b>VISTA e VST</b>	Immagini VIS/NIR	2017-	Pop stellari risolte e stelle variabili.	ESO/INAF. PI-ships
<b>WHT-WEAVE</b>	Spettroscopia	2018-	Gaia Follow-up di stelle nella Galassia: velocità radiali, abbondanze chimiche	Consorzio Europeo, contributo INAF
<b>LBT –LBTI /LUCI / SHARK/PEPSI</b>	Immagini,Spettri/Caratterizzazione	2017-	Statistica e caratterizzazione esopianeti, protopianeti, dischi protoplanetari, Jets/outflows,YSOs stelle Galattiche,	INAF con contributi altri partner LBT
<b>LBT-LBC</b>	Immagini	2017-	Popolazioni stellari e variabili pulsanti	INAF, partner LBT
<b>Asiago-AFOSC / Loiano-BFOSC</b>	Immagini/Spettri	2017-	SNe/transienti: caratterizzazione e progenitori. Follow-up Gaia (alerts)	INAF
<b>GTC-OSIRIS</b>	Spettri	2017-	SNe/transienti e progenitori	INAF
<b>TNG – HARPS-N e GIARPS</b>	Vel. Radiali/ Alta ris. spettrale/ VIS-NIR	2017-	Caratterizzazione e statistica pianeti extrasolari, YSOs , jets/outflows. Caratterizzazione chimica di stelle.	INAF
<b>TNG-LRS e NICS</b>	Immagini/spettri	2017-	SNe/transienti e progenitori	INAF
<b>Swift</b>	Immagini/spettri	2017-	SNe/transienti e progenitori	NASA-ASI
<b>NTT-EFOSC/SOFI</b>	Immagini/spettri	2017-	SNe/transienti e progenitori	INAF
<b>NTT-SOXS NOT-NTE</b>	Immagini/spettri	2019-	Studio supernovae/transienti: caratterizzazione e progenitori.	INAF/ESO
<b>CHEOPS</b>	Transiti/Proprietà	2018-	Caratterizzazione pianeti in transito	ESA-CH-ASI
<b>TESS</b>	Transiti/Detezione	2018-	Pianeti di stelle vicine. Asterosismol.	NASA. Dati pubbl
<b>HST</b>	Immagini/Spettroscopia NUV, ottico e NIR ad alta ris.	2017-	Caratterizzazione di: popolazioni e ammassi stellari, stelle variabili, Jets da stelle giovani. Scala distanze.	NASA.Collaborazione INAF con esponenti EU e US
<b>ALMA low &amp; high – frequency long baselines &amp; compact array polarizzazione/ VLBI/ Single Dish</b>	Emissione sub-mm. continuo e righe atomiche e molecolari di nubi e filamenti molecolari, clumps, protostelle e dischi circumstellari	2017-	Evoluzione polvere, massa dischi gassosi in YSOs, brown dwarfs. Formazione pianeti. Struttura e chimica dischi circumstellari, crescita grani di polvere, frammentazione nubi molecolari. Dinamica accrescimento. Campo magnetico in dischi e jets. Interazione disco-stella-jet. Mapping a grande scala di filamenti. Masers e outflow.	INAF è PI di diverse proposte e collabora in programmi di US, EA ed EU PI-ship
<b>IRAM-NOEMA-30m</b>	Emissione sub-mm. continuo e righe atomiche e molecolari	2017-	Formazione di molecole prebiotiche in regioni di formazione stellare. Surveys di jets molecolari protostellari e dischi circumstellari.	INAF è PI di diverse proposte e collabora in large programmes di EU PI-ship
<b>VLA Low &amp; High frequency</b>	Continuo e righe atomiche e molecolari	2017-	Campo magnetico in stelle, stelle attive, flares, struttura di dischi, proprietà della polvere, trancianti di temperatura e densità, masers	INAF è PI di diverse proposte e collabora in large programmes di EU
<b>APEX</b>	Emissione sub-mm. dei continuo, righe atomiche e molec, mezzo interstellare	2017-	Surveys di struttura, temperatura, dinamica e chimica di regioni di formazione stellare. Calibrazione di diagnostica evolutiva.	INAF è PI di diverse proposte e collabora in large programmes di EU

<b>Herschel</b>	Continuo e righe atomiche/molecolari nel far-IR	2017-	Formazione stellare globale nella Galassia (template $z=0$ ). Energetica e dinamica outflows molecolari.	INAF è PI di diverse proposte e large programmes
<b>Gaia</b>	Astrometria/ Rivelazione/ Fotometria/ Spettroscopia.	2017- 2020 (+2)	Scala distanz. Struttura 3D Via Lattea. Formazione ed evoluzione pop. stellari Galattiche e Gruppo Locale. Transienti. Scoperta e statistica pianeti giganti. Membership, moto 3D stelle. Tomografia 3D polvere in ISM diffuso, nubi.	ESA. Forte impegno italiano
<b>JWST</b>	Immagini, Spettri nel NIR e MIR ad alta risoluzione/ Caratterizzazione	2019-	Caratterizzazione di: atmosfere pianeti in transito, gas caldo in sistema disco/jet, protoclusters Galattici, shock e outflows, popolazioni stellari, stelle pulsanti, transienti. Scala distanze	Collaborazione INAF con NASA-ESA. Programmi ERS e GO
<b>SKA Precursors (ASKAP/MeerKAT)</b>	Spettroscopia e imaging in riga e continuo nel cm	2016-	Surveys Galattiche a grande scala in continuo e riga per studio dell'ISM ionizzato diffuso e in SFRs	INAF coinvolta nelle Surveys EMU e MeerGAL
<b>Nu-Star, XMM-Newton</b>	Osservazioni X	2017-	Studio della fisica dei brillamenti in young stellar objects	INAF coinvolta con ruoli di PI o co-PI
<b>Chandra</b>	Osservazioni X	2017-	Effetti dell' emissione ad alta energia nei processi di formazione di stelle e sistemi planetari con specifica attenzione al caso degli ammassi aperti	INAF coinvolta con ruoli di PI o co-PI
<b>Strumenti futuri</b>				
<b>PLATO / ARIEL</b>	Transiti/ Spettri/ Atmosfere	2025-	Pianeti in transito attorno a stelle brillanti. Caratterizzazione atmosfere pianeti e stelle, archeologia Galattica.	ESA. Forte impegno italiano
<b>WFIRST-AFTA</b>	Immagini/ Caratterizzazione	2025-	Scoperta e caratterizzazione pianeti. Pop. stellari nel bulge Galattico e in regioni di formazione stellare, funzione di luminosità, cinematica di stream stellari nel Gruppo Locale.	NASA Possibile partecipazione ESA
<b>VLT-ERIS</b>	Immagini	2020-	Indicatori distanza stellari secondari fino ~300 Mpc. Formazione stellare, dischi e jets	ESO. PI-ship italiana per AO
<b>E-ELT – HIRES/MOS</b>	Vel. Radiali/ Atmosfere. Spettroscopia alta risoluzione.	2026-	Atmosfere di esopianeti terrestri. Caratterizzazione e statistica accrescimento e dinamica di jets e outflows in oggetti sub-stellari. Popolazioni stellari nel Gruppo Locale e oltre.	ESO. PI-ship e partecipazione italiana
<b>E-ELT – EPICS</b>	Immagini, Spettri/ Caratterizzazione	2028-	Scoperta e caratterizzazione pianeti fino a super-Terre	ESO. Forte impegno INAF
<b>E-ELT - MICADO/ MAORY</b>	Imaging ad alta risoluzione	2024-	Indicatori distanza secondari fino a $z \sim 0.3$ e calibrazione diretta scala distanze con Cefeidi. Storia formazione stellare galassie vicine; astrometria in regioni affollate. Detezione di pianeti in dischi protoplanetari, jets vicino a stelle giovani e connessione con accrescimento. IMF e frazione di dischi in regioni a bassa metallicità	ESO. PI-ship italiana MAORY. Partecipazione INAF al consorzio MAORY e preparazione di casi scientifici per White Book.
<b>LSST</b>	Immagini	2021-	Struttura 3D Via Lattea e Universo fino alto redshift. Indicatori distanza geometrici primari/secondari. Transienti	NSF-DOE- LSST Corporation INAF partecipa con 15 PI/progetti
<b>4MOST</b>	spettri	2021	Gaia follow-up, caratterizzazione di stelle Galattiche	ESO+consorzio Europeo
<b>SKA</b>	emissione radio/ X. Spettroscopia e imaging in riga e continuo nel cm.	2020-	Origine campi magnetici e legame con "attività" stellare. Molecole prebiotiche, dischi/jets in regioni di formazione stellare. Grandi surveys Galattiche (in continuo e riga).	Partecipazione INAF anche ai WP – SKAOur Galaxy' e 'Cradle of Life' e alla preparazione casi scientifici.

CTA	Imaging gamma		Caratterizzazione del "dark gas" in ISM e relazione fra flusso di raggi cosmici e <i>star formation rate</i> .	
Athena	Spettroscopia ad alta risoluzione ed imaging nei raggi X		Fenomeni magnetosferici in YSOs e nelle UCDs. Studi delle interazioni mediate dal campo magnetico fra stella e pianeta ospite.	INAF partecipa allo sviluppo della strumentazione e a vari WGs scientifici.

### 1.3.2.3 Gli obiettivi generali e strategici da conseguire nel triennio

#### 1) EVOLUZIONE STELLARE:

Nel triennio ci proponiamo di: **i) Determinare il destino finale delle stelle ed i loro resti e il loro ruolo come agenti inquinanti.** I resti compatti delle loro esplosioni delle stelle massicce hanno ricevuto, recentemente, un forte interesse nell'ambito della cosiddetta "astronomia multimessenger". Le rilevazioni dirette di onde gravitazionali (GW150914 e GW151226), infatti, sono state associate alla coalescenza di due buchi neri, presumibilmente di origine stellare, di masse  $\sim 36-29 M_{\odot}$  e  $\sim 14-7 M_{\odot}$ , rispettivamente. Quali stelle formano buchi neri di questo tipo? Con che masse, metallicità iniziali e frequenza? Qual è l'impatto della rotazione? Lo **sviluppo di un quadro teorico completo di riferimento** è necessario per una **corretta interpretazione delle prossime campagne osservative** della seconda generazione di interferometri da terra e quelle della nuova generazione di interferometri nello spazio (operativi a partire dai prossimi anni 30); **ii) Comprendere la reale efficienza di processi fisici "non canonici"**, primo tra tutti la perdita di massa. Le interazioni tra materiale eiettato da un'esplosione stellare e materiale circumstellare pre-esistente (rilevabili come emissione X, UV e radio) sono cruciali per tracciare la storia recente di perdita di massa stellare. Tra le stelle di grande massa, assumono particolare importanza le Luminous Blue Variables il cui numero è atteso aumentare in modo esponenziale grazie alle surveys a grande campo con elevata cadenza temporale (LSST). Nell'ambito delle stelle di massa piccola e intermedia, la perdita di massa e la sua evoluzione temporale in stelle di RGB e AGB saranno caratterizzate da osservazioni spetro-fotometriche nelle bande infrarosse, sub-millimetriche e millimetriche dello spettro elettromagnetico. Dal lato teorico, per quanto riguarda la struttura termodinamica degli involucri circumstellari e i processi di produzione di polvere in stelle AGB, i modelli che descrivono lo status chimico-dinamico del vento così come la determinazione degli yields devono essere migliorati; **iii) Sviluppare lo studio dell'asterosismologia di nane bianche**, grazie alla maggiore risoluzione temporale e al maggiore campo di vista di PLATO rispetto a Kepler. Queste osservazioni potranno fornire importanti informazioni sull'efficienza del trasporto del momento angolare ed sul ruolo della rotazione; **iv) Capire l'origine e la natura delle popolazioni stellari multiple negli ammassi globulari galattici e nei sistemi stellari del Gruppo Locale.** Le popolazioni stellari multiple sono state scoperte negli ammassi globulari galattici, rivoluzionando l'idea che le stelle di questi sistemi abbiano avuto origine da un unico episodio di formazione stellare. Come e quando si sono formate queste popolazioni multiple? Come e chi ha prodotto il gas necessario a formarle? Quale era la massa iniziale dei proto-ammassi? E se, come sembra, dovevano essere molto più massivi all'inizio, in che modo la massa da essi persa sotto forma di stelle ha contribuito alla formazione dell'alone e del nucleo Galattico? Quali sono le conseguenze nella comprensione dei sistemi stellari esterni alla nostra Galassia? Per rispondere a queste domande è necessario studiare in dettaglio non solo l'evoluzione/nucleosintesi dei possibili candidati "polluters", ma è anche le proprietà osservabili delle stelle di piccola massa che – in virtù dei loro tempi di vita estremamente lunghi – si stanno evolvendo attualmente negli ammassi globulari Galattici.

## 2) ASTROARCHEOLOGIA:

Nel triennio ci proponiamo di: **i) Rafforzare il ruolo dei modelli teorici (di evoluzione stellare, idrodinamici, N-body e Tree-SPH) per ricostruire l'evoluzione chimico-dinamica dei sistemi stellari su un'ampia scala.** Oltre alle nuove strutture di calcolo (ASDC, Trieste, Cineca), servono risorse per l'interpretazione, adeguate all'eccezionale qualità dei dati osservativi, non solo di Gaia ma anche delle missioni future; **ii) effettuare uno studio in 3D della Via Lattea tramite Gaia e survey da terra.** Gaia produrrà, assieme alle survey spettroscopiche e fotometriche da terra, una rivoluzione nella nostra comprensione della Via Lattea. Si misureranno orbite, distanze, cinematica e dinamica interna negli ammassi stellari, chimica, con una caratterizzazione chemo-dinamica completa sia degli ammassi che delle stelle di campo. Si calibreranno (e applicheranno) modelli evolutivi stellari e diversi traccianti di età, permettendo di mantenere la leadership internazionale nelle teorie di evoluzione e pulsazione stellare. Si prevede un sempre maggior coinvolgimento della comunità scientifica INAF per lo sfruttamento ottimale dei dati che, nel caso di Gaia, si renderanno disponibili nel triennio tramite una serie di data release intermedie di cui la prima si è verificata nel settembre 2016 e la prossima avverrà nell'Aprile 2018; **iii) Implementare l'Astrometria relativistica,** necessaria per il pieno sfruttamento dei risultati di Gaia, per i fenomeni astrofisici legati alle interazioni fondamentali, inclusi quelli causati dalle onde gravitazionali. Saranno studiati: il legame tra propagazione elettromagnetica e spazio-tempo/gravità; la modellizzazione del segnale gravitazionale in connessione con la controparte ottica; la definizione sempre più accurata della metrica (e quindi, dinamica) del Sistema Solare; **iv) Capire i meccanismi di formazione degli ammassi globulari e delle loro popolazioni stellari multiple e il contributo degli ammassi alla formazione dell'alone,** combinando l'uso innovativo della strumentazione attuale con la teoria. Lo scopo è capire come e quando si sono formate le popolazioni multiple, chi ha prodotto il gas per formarle, quali sono le conseguenze di questa rivoluzionaria scoperta nella comprensione dei sistemi stellari esterni alla nostra Galassia, e quanto importanti sono le stelle nate in questi sistemi e successivamente disperse nel campo durante la costituzione dell'alone Galattico; **v) Modellare la tipologia e quantità di polvere prodotta da stelle di AGB di varie masse e composizioni.** Questo è fondamentale per l'interpretazione di future osservazioni di popolazioni stellari nel vicino e medio infrarosso. Si mira a caratterizzare le sorgenti osservate e a ricostruire la storia di formazione stellare e l'evoluzione della relazione massa-metallicità delle galassie ospiti; **vi) Comprendere la natura e l'efficienza di processi di quenching della formazione stellare.** Lo studio della SFH e dell'efficienza della formazione stellare in galassie nane del gruppo locale permetterà di valutare l'effetto della reionizzazione (radiazione UV di "background") e il ruolo dello "shielding". Codici di analisi numerica e modelli evolutivi stellari aggiornati permetteranno di ricostruire la SFH "reale" in galassie nane di tutti i tipi morfologici.

## 3) SCALA DELLE DISTANZE E TRANSIENTI:

Nel triennio ci proponiamo di: **i) Determinare accurate stime di distanza per le stelle della Via Lattea grazie alla missione Gaia,** nella quale i ricercatori dell'INAF rivestono ruoli di primaria importanza. La comunità ha partecipato, nell'ambito delle unità di coordinamento CU3 (astrometria), CU5 (fotometria) e CU7 (stelle variabili), alla pubblicazione dei dati della prima release nel Settembre 2016 ed è fortemente coinvolta anche per le prossime release. Gaia produrrà una "fotografia" senza precedenti della Via Lattea con informazioni uniche sulle sue dimensioni spaziali e sul suo stato evolutivo e dinamico, fornendo un banco di prova ineguagliabile per verificare, a un livello di precisione mai raggiunto, la validità delle moderne teorie di formazione galattica. Inoltre, questi risultati forniranno calibrazioni eccezionali degli indicatori di distanza aprendo una nuova era in termini di precisione e accuratezza della scala di distanza extragalattica e dunque nella conoscenza delle reali

dimensioni spaziali dell'Universo; **ii) Ottenere misure molto accurate dell'energia emessa da ciascuna stella per un campione enorme ( $> 10^7$ ) di stelle della Galassia.** I ricercatori dell'INAF, che già detengono la leadership internazionale nel campo delle teorie di evoluzione e pulsazione stellare, saranno in grado di confrontare i loro modelli con i dati di Gaia, rendendo possibile un vero salto di qualità nella conoscenza della fisica stellare; **iii) Estendere i risultati ottenuti con Gaia alle altre galassie del Gruppo Locale e a quelle esterne** con la partecipazione alla survey LSST, 5 magnitudini più profonda di Gaia. LSST permetterà anche, con metodi come le SBF o la GCLF, di studiare la distribuzione spaziale 3D di galassie entro un intervallo fra i 50Mpc (per le galassie meno luminose) ed i ~150Mpc (per le galassie brillanti), con incertezze prevedibilmente migliori del 5% in distanza; **iv) Estendere le osservazioni delle Cefeidi Classiche anche in campi affollati fino all'ammasso di Coma e delle RR Lyrae anche nelle galassie ellittiche e nelle spirali giganti fino a circa 6 Mpc,** utilizzando MICADO@E-ELT. Per indicatori come le SBF e la GCLF, si potrà estendere il limite di distanza raggiungibile da 150 a oltre i 300 Mpc; **v) Riconciliare i valori della costante di Hubble stimati dalla scala delle distanze cosmiche con quelli ottenuti dallo studio della radiazione cosmica di fondo** mediante una sempre più accurata calibrazione dei vari gradini della scala delle distanze e/o l'uso di indicatori di distanza che coprano direttamente distanze sempre maggiori in modo da ridurre la propagazione degli errori. Grazie alle missioni astrometriche presenti e future e ai telescopi della nuova generazione potranno essere significativamente ridotti gli errori sistematici dovuti agli indicatori primari, verificando la compatibilità tra la scala delle distanze di pop I e pop II.

---

#### **4) FORMAZIONE STELLARE:**

Nel triennio ci proponiamo di: **i) Migliorare la nostra comprensione del ruolo del campo magnetico** nei processi di collasso nelle varie fasi dell'ISM e scale spaziali nella Via Lattea attraverso misure di polarizzazione e tomografia Faraday; **ii) Tracciare i tempi scala evolutivi della formazione globale dai primi filamenti alle stelle massicce tracciate nel radio** grazie alla caratterizzazione chimica dei clumps da surveys millimetriche single-dish su molte migliaia di oggetti; **iii) Seguire in dettaglio la fisica, la dinamica e la chimica della frammentazione e dell'accrescimento iniziale così come le fasi intermedie e finali della formazione stellare** con surveys di centinaia o migliaia di siti Galattici nel MIR per tracciare i tempi-scala dell'emersione di nuove generazioni stellari giovani, e nel radio per tracciare il primo segno di emissione radio da jets o da free-free termico; **iv) Ottenere relazioni calibrate a  $z=0$  da usare in galassie esterne;** **v) Produrre una tomografia 3D del mezzo diffuso senza precedenti** dal confronto tra le distanze Gaia di milioni di oggetti stellari giovani e la distribuzione della polvere dell'ISM diffuso e delle nubi molecolari; **vi) Evidenziare eventuali gradienti evolutivi e il ruolo dei bracci come "triggering" attivo della formazione o semplici accumulatori di materia,** combinando le proprietà fotometriche di questi oggetti con la posizione rispetto alle braccia a spirale Galattiche; **vii) Misurare i tassi di accrescimento e perdita di massa e i loro effetti sull'evoluzione dei dischi protoplanetari** per ampi intervalli di massa ed età stellari e per oggetti sub-stellari dalle survey spettroscopiche; **viii) Ottenere uno schema unificato e robusto dell'evoluzione del sistema stella-disco** dalla sinergia X-Shooter-ALMA, inclusi gli effetti della formazione di pianeti; **ix) Determinare il rapporto poco conosciuto tra massa del gas e massa della polvere, la distribuzione della polvere, la cinematica del gas,** attraverso surveys (sub)millimetriche dedicate, per guidare le simulazioni numeriche degli effetti di pianeti in formazione nel disco; **x) Determinare i meccanismi in grado di contrastare la frammentazione e la migrazione** verso la stella dei grani di polvere e consentire il loro aggregarsi nei primi nuclei rocciosi; **xi) Indagare l'avanzamento della complessità molecolare** dalle semplici specie già nell'ISM alle molecole organiche e pre-biotiche nel



disco, l'abbondanza di specie chiave (acqua, metanolo), la posizione dei fronti di condensazione delle varie molecole, la chimica che avviene sui grani di polvere ghiacciati e i meccanismi di trasporto dal disco ai pianeti in formazione; **xii) Vincolare la modellistica della formazione del disco, dell'estrazione di momento angolare via instabilità e jets, e della propagazione all'interno del disco** dei raggi cosmici ionizzanti generati negli shocks del jet con la distribuzione del campo magnetico misurato; **xiii) Determinare rotazione e flusso di massa e momento nel jet**, per testare i modelli di lancio e di feedback jet-disco sviluppati in INAF con le osservazioni VIS/NIR ad alta risoluzione spettrale/spaziale; **xiv) Capire la dispersione finale del disco** ad opera dei venti foto-evaporati.

#### **5) SISTEMI PLANETARI EXTRASOLARI:**

L'astronomia italiana ha acquisito negli ultimi anni la capacità di contribuire in modo decisivo allo studio dei pianeti extrasolari. Secondo Gratton (2012), nell'ultimo quadriennio la produttività scientifica italiana nel campo è quasi raddoppiata, portando l'Italia all'ottavo posto a livello mondiale, con miglioramento significativo di due posizioni rispetto all'ultimo rilevamento. Come indicato in Tabella di Sez. 1.3.2.2, gli **obiettivi generali** nel triennio si concentreranno su: **Programmi di ampio respiro per la ricerca e caratterizzazione (architettura, struttura interna, atmosfere) di pianeti** su grandi range di separazione orbitale e massa attorno a stelle di diversa massa, composizione chimica ed età, utilizzando strumentazione sia da Terra che nello spazio, una varietà di tecniche di alta precisione e risoluzione spettrale e spaziale (fotometria, spettroscopia, astrometria, e imaging diretto), e un importante intervallo di lunghezze d'onda (dal visibile all'infrarosso vicino).

Il recente sforzo per l'unione di competenze e sviluppo di sinergie si è concretizzato in importanti elementi di aggregazione, collaborazione, e coordinamento nazionale di programmi ricerca a sfondo esoplanetario (quali GAPS) che hanno utilizzato importanti risorse (Progetto Premiale WOW) e facilitato il raggiungimento di ruoli di responsabilità e leadership tecnologico/scientifica. Gli **obiettivi strategici** da raggiungere nel triennio riguardano **i) il consolidamento e l'aumento di coordinamento, preparazione, produttività, visibilità e competitività della comunità esoplanetaria nazionale** per poter garantire **ii) la partecipazione e gli adeguati livelli di leadership nei progetti scientifici in corso**. Tali obiettivi richiedono: **a) ulteriori sforzi aggreganti** della comunità di riferimento e sinergie di tipo interdisciplinare con tematiche di formazione, evoluzione ed attività stellare, asterosismologia e astroarcheologia della Via Lattea, tramite studi comparativi del Sistema Solare nel contesto delle possibili realizzazioni dei sistemi extrasolari, e grazie allo sfruttamento di strumenti interpretativi, modellistici e di laboratorio sviluppati nel caso del Sistema Solare per lo studio della formazione planetaria e delle atmosfere; **b) nuovi strumenti interpretativi avanzati**, nonché rilevanti attività di laboratorio particolarmente finalizzate alla comprensione delle proprietà strutturali, atmosferiche e di potenziale abitabilità di pianeti di tipo terrestre di cui non esiste un analogo all'interno nel nostro Sistema Solare; **c) Supporto continuativo al processo di crescita** in termini di risorse finanziarie e di calcolo e di politica di reclutamento. A fronte di un 7% di produzione astronomica mondiale focalizzata sui pianeti extrasolari, meno del 4% dello staff di ricerca INAF è coinvolto per la maggioranza del suo tempo in questo campo. È necessaria la creazione di team scientifici di alto profilo che assicurino una leadership nel campo a livello internazionale, da un lato producendo il massimo ritorno in termini di investimento e dall'altro rafforzando le relazioni con l'Università, l'industria e la società in senso lato.

#### LE PROFESSIONALITÀ RICHIESTE

- **Esperti di calcolo di modelli di atmosfera sia “tradizionali” che “3D”**
- **Esperti di modellistica stellare sia “tradizionali” che “multidimensionali”**
- **Esperti di asterosismologia.**
- **Esperti di analisi d’abbondanza.**
- **Esperti di simulazioni idrodinamiche** (con accesso a cluster istituzionali INAF).
- **Esperti di gestione e uso di grandi quantità di dati.**
- **Esperti di modellizzazione della Galassia.**
- **Teorici della gravitazione** (sia analitici che numerici).
- **Esperti nella ricerca e caratterizzazione di pianeti extrasolari.**
- **Teorici di formazione planetaria e atmosfere planetarie.**
- **Esperti nella ricerca e caratterizzazione di transienti.**
- **Esperti di modellizzazione teorica di dischi e jets protostellari.**
- **Esperti di osservazioni ad alta risoluzione spettrale e angolare nel visibile-NIR.**
- **Esperti di osservazioni ad alta risoluzione angolare nel sub-mm.**
- **Esperti di astrochimica in regioni di formazione stellare.**
- **Esperti di astrostatistica.**

#### LE ESIGENZE STRUTTURALI

- **Arrays di computer** al fine di poter eseguire simultaneamente un numero elevato di simulazioni numeriche di modelli stellari/pulsazionali e modelli di atmosfera per diverse scelte dei parametri iniziali, ma anche di modelli galattici, così come la disponibilità di calcolo distribuito (personal computers potenti) per lo sviluppo dei codici numerici di evoluzione/pulsazione e atmosfere stellari.
- **Strumentazione di calcolo capace di grande data storage** e capacità di gestione di dati pesanti per analisi dati di spectro-imaging ad alta risoluzione spaziale/spettrale nell'ambito della formazione stellare.

### 1.3.3 Il Sole e il Sistema Solare

**Lo studio del Sole e del Sistema Solare ha come obiettivo la comprensione dei processi che ne hanno determinato l'origine e l'evoluzione fino all'epoca attuale, e che determinano le proprietà fisiche e dinamiche e le interazioni reciproche tra i vari corpi che ne fanno parte.**

#### 1.3.3.1 Le domande fondamentali

Lo studio del Sole e del Sistema Solare riguarda due ambiti di ricerca distinti, la fisica solare ed eliofisica e la planetologia, che si avvalgono di dati e metodologie diverse. I corpi che sono oggetto di osservazione, esplorazione e di studio sono il Sole, l'eliosfera e tutti gli oggetti che fanno parte del Sistema Solare. I ricercatori INAF sono impegnati a dare risposta alle seguenti domande fondamentali:

##### **Fisica solare e eliofisica:**

- **In che modo il Sole dà origine all'eliosfera e ne controlla l'evoluzione, e quali processi derivano dall'interazione del Sole/ambiente eliosferico con gli ambienti/corpi planetari?**

Tale conoscenza, che deriva anche da studi interdisciplinari, è strettamente legata alla comprensione dei fenomeni astrofisici che caratterizzano i sistemi planetari e collegano la fisica delle stelle, del mezzo interstellare e dei corpi dei sistemi planetari.

- **Come si origina ed evolve il campo magnetico della stella e quale è il ruolo della magneto-convezione turbolenta del Sole nei meccanismi alla base della dinamica e della variabilità solare?**

La comprensione della natura del campo magnetico e dei processi che portano alla sua amplificazione rivestirà un ruolo cruciale nelle ricerche del prossimo futuro, rappresentando un passo fondamentale per la conoscenza del campo magnetico stellare e dei processi che determinano la variabilità delle stelle.

- **Quali sono i meccanismi fisici che determinano e regolano il riscaldamento e l'accelerazione dei plasmi astrofisici e delle particelle ad alta energia?**

L'eliosfera rappresenta un laboratorio unico dal quale ottenere conoscenze fondamentali sul plasma e i processi che si verificano nell'universo.

##### **Planetologia:**

- **Quali sono stati i processi che hanno determinato la formazione del Sistema Solare e le sue successive fasi evolutive?**

I sistemi planetari sono un fenomeno comune nell'universo. Lo studio dei processi di formazione del Sistema Solare getta luce sui processi di formazione dei sistemi extrasolari e, viceversa, lo studio dei sistemi extrasolari in varie fasi del loro sviluppo ci aiuta a capire meglio i processi che hanno portato alla formazione del sistema in cui viviamo.

- **Quali sono i processi che determinano l'aspetto e le proprietà dei corpi del Sistema Solare?**

Una grande varietà di situazioni e di processi fisici e dinamici rendono pianeti, satelliti e piccoli corpi incredibilmente diversi tra loro. Questo implica che per comporre le diverse informazioni che abbiamo in uno scenario coerente sono necessari dati accurati e competenze fisiche eterogenee ed approfondite.

- **Quali sono stati i processi evolutivi che hanno permesso l'emergere della vita?**

- La presenza di acqua e materiali organici ha svolto un ruolo fondamentale. Lo studio delle condizioni di abitabilità, passata e presente, nel nostro sistema è importante anche per una migliore comprensione di quanto accade nei sistemi extrasolari.

### 1.3.3.2 Gli strumenti d'indagine – Fisica solare ed eliofisica

La stella a noi più vicina, il Sole, è un laboratorio dove si possono studiare con un livello di risoluzione molto elevato fenomeni fisici che, per la loro scala, non sono accessibili alla sperimentazione terrestre e non possono essere investigati su astri più lontani. Per questo lo studio del Sole ha contribuito e continua a concorrere in modo significativo al miglioramento delle nostre conoscenze dell'Universo e delle leggi fisiche che lo regolano. Infatti, a causa della sua vicinanza, il Sole permette **l'osservazione diretta con elevata risoluzione di processi** che sono di estremo interesse per l'astrofisica e la fisica dei plasmi, quali l'amplificazione e diffusione del campo magnetico, il riscaldamento e l'accelerazione del plasma, la riconnessione magnetica, la variabilità stellare. In attesa della futura generazione di telescopi solari da Terra e dallo spazio (*EST, Solar Orbiter*), le sfide dei prossimi anni saranno osservare e studiare tramite la migliore strumentazione esistente i **processi di emersione e interazione del campo magnetico con il plasma solare, i meccanismi di trasferimento e rilascio dell'energia nell'atmosfera e di accelerazione del vento solare**, le cause delle esplosioni osservate e la propagazione dei loro effetti nell'eliosfera. Tali studi non potranno prescindere dallo sviluppo di modelli numerici dei processi MHD e delle strutture osservate, nell'atmosfera e nelle regioni sorgente del vento solare. Tali modelli richiederanno potenti risorse di calcolo.

I ricercatori dell'INAF, supportati dall'Agenzia Spaziale Italiana (ASI) e dal MIUR, partecipano ai principali progetti internazionali di osservazione dedicati allo studio e all'esplorazione del Sole e dell'eliosfera. In particolare, contribuiscono con ruoli di responsabilità a quasi tutte le missioni spaziali internazionali realizzate a tal fine da ESA, NASA e dalle maggiori agenzie spaziali nazionali. Inoltre, partecipano attivamente ai programmi di osservazione del Sole e di vari corpi del sistema solare effettuati con tutti i più importanti telescopi a Terra, e allo sviluppo di nuova strumentazione per telescopi operanti da Terra e dallo spazio. Da parecchi anni i ricercatori INAF contribuiscono altresì a molti progetti relativi allo studio dei processi che caratterizzano il Sole, l'eliosfera, i pianeti del Sistema Solare e lo Space Weather, finanziati da varie agenzie e enti governativi (ASI, MIUR, MiSE, Regioni) e dalla Commissione Europea nei programmi quadro FP7 e H2020.

Negli ultimi anni sono state acquisite osservazioni da Terra e dallo spazio che hanno rivoluzionato la nostra conoscenza della struttura e dinamica dell'atmosfera solare, dalla base della fotosfera alla corona esterna. Il Sole è certamente anche la stella che conosciamo meglio e l'unica che permette lo **studio dell'interazione tra stella, ambiente circumstellare e pianeti in grande dettaglio**, paradigma per la ricerca di esopianeti in cui sia possibile o presente la vita. La comunità nazionale è anche impegnata nello studio della **variabilità solare e degli effetti sul clima terrestre**. Molte missioni spaziali includono strumentazione per lo studio degli ambienti planetari e quindi hanno evidenziato **l'effetto della variabilità solare sui climi planetari**. Le conoscenze acquisite in questo ambito, oltre a migliorare la nostra comprensione delle relazioni Sole-Terra e del riscaldamento globale del nostro pianeta, nel prossimo futuro permetteranno anche di progredire l'indagine degli effetti della **variabilità stellare sul clima dei corpi dei sistemi planetari**.

Negli anni recenti lo studio delle condizioni fisiche nelle regioni utilizzate per l'esplorazione satellitare ed umana dello spazio (**Space Weather e Space Climate**) ha riscontrato sempre maggiore interesse. Infatti, la crescente esposizione d'innomerevoli infrastrutture critiche (reti per telecomunicazioni satellitari, navigazione aerea e marittima) agli effetti dell'attività solare sulla Terra e nello spazio ha reso l'osservazione continua e lo studio dei processi solari e eliofisici asset strategici per la mitigazione degli effetti socio-economici della variabilità della nostra stella.

La comunità italiana ha una tradizione notevole nell'ambito della ricerca teorica in vari settori, in particolare quelli che riguardano la modellistica delle strutture magnetiche della corona solare e delle regioni sorgente del vento solare.

Studio della corona solare. Tale filone fa ricorso a strumenti di calcolo sempre più potenti per lo sviluppo della modellistica delle strutture magnetiche coronali e delle regioni sorgente del vento solare. I fenomeni di riscaldamento impulsivo oggetto di indagine, ad esempio, richiedono l'utilizzo di codici numerici avanzati con griglie spaziali adattive, necessarie per seguire propriamente l'evoluzione del plasma soggetto a riscaldamento e i fenomeni di trasporto di energia ad esso correlati.

Studio delle proprietà del mezzo interplanetario e del vento solare e loro interazione con gli ambienti planetari e circumplanetari. Tale studio si avvale di diversi strumenti di indagine. In primo luogo si utilizzano sia osservazioni dallo spazio dell'ambiente elettromagnetico e particellare dei diversi corpi, sia osservazioni da terra della variabilità delle esosfere planetarie (per esempio l'emissione del sodio) in relazione alla variabilità solare. Inoltre, si sviluppano modelli di dinamica magnetosferica, del plasma ed esosferica in diversi ambienti planetari (come Marte, Mercurio e le lune di Giove), al fine di sviluppare dei modelli interpretativi e predittivi della risposta di tali ambienti alle condizioni del vento solare e all'azione del mezzo interplanetario (ad esempio impatti di meteoriti). Tali studi sono anche un utile strumento per valutare gli effetti della radiazione particellare sulla strumentazione spaziale (Planetary Space Weather). Infine, ci si avvale anche dei risultati di esperimenti di laboratorio di simulazione di interazioni dei plasmi con analoghi planetari.

## Gli strumenti di indagine – Planetologia

### Le missioni spaziali

La risposta alle domande fondamentali e lo studio delle tematiche ad esse collegate è basata su una adeguata conoscenza di tutti i corpi che fanno parte del nostro sistema planetario, e per questo i ricercatori dell'INAF, supportati dall'Agenzia Spaziale Italiana (ASI) e dall'ESA, partecipano ai principali progetti internazionali dedicati all'esplorazione del Sistema Solare e contribuiscono con ruoli di responsabilità a quasi tutte le missioni spaziali internazionali realizzate a tal fine da ESA, NASA e dalle maggiori agenzie spaziali nazionali.

I piccoli corpi del Sistema Solare sono fondamentali per rispondere alle domande relative all'origine ed evoluzione del sistema, perché possono essere considerati come **materiale residuo, quindi spesso minimamente processato, della formazione del Sistema Solare**. Le missioni che hanno fornito dati preziosi sui corpi minori, e di conseguenza hanno gettato nuova luce sui processi di formazione del Sistema Solare, sono *Rosetta* e *Dawn*. La missione *Rosetta* ha rivoluzionato la scienza delle comete, e sta di conseguenza modificando anche il paradigma di formazione del Sistema Solare. La missione NASA *Dawn* ha già visitato Vesta, raccogliendo dati per oltre un anno, ed ha raggiunto Cerere, intorno a cui è tuttora in orbita, nel gennaio del 2015. I dati forniti da questa missione stanno anch'essi contribuendo a rispondere ad alcune questioni fondamentali che riguardano la formazione del nostro Sistema Solare e la composizione originale del disco protoplanetario.

Lo studio dei pianeti di tipo terrestre, cioè Mercurio, Marte e Venere, con le loro differenze e somiglianze rispetto alla Terra, è fondamentale per capire **come e perché corpi probabilmente simili in origine abbiano poi preso strade evolutive così diverse nella loro evoluzione ed è quindi rilevante per le tematiche collegate alle prime due domande**. Marte è l'unico pianeta per il quale al momento si prevede una futura visita e un'eventuale colonizzazione da parte dell'uomo; inoltre, per la passata presenza di acqua liquida sulla sua superficie, è di fondamentale importanza per le implicazioni astrobiologiche ed è quindi



rilevante per le tematiche collegate alla terza domanda. A Mercurio è dedicata la missione ESA *BepiColombo*, il cui lancio è previsto nel 2018, con l'obiettivo di studiare, caso estremo nel nostro sistema solare, la formazione e l'evoluzione di un pianeta così vicino alla sua stella. Al momento tre missioni stanno fornendo dati su Marte: *Mars Reconnaissance Orbiter*, *Mars Express* (che ha collezionato notevoli risultati scientifici come la scoperta del metano su Marte, della presenza di minerali idrati in superficie, e del solar wind scavenging come responsabile della perdita del vapor d'acqua nell'atmosfera marziana) e *ExoMars TGO*.

I pianeti esterni del Sistema Solare sono importanti, oltre che per la storia dei processi di formazione sia del nostro che di altri sistemi solari (**i pianeti giganti possono essere considerati un analogo di molti degli esopianeti** che vengono via via scoperti), per l'interesse astrobiologico che alcuni dei satelliti hanno. A Giove è dedicata la missione NASA *Juno*, che, "parafrasando" la mitologia greca, come Giunone si pone l'obiettivo di svelare Giove al di sotto del suo strato di nubi: il suo interno, il suo campo magnetico, ma anche la sua magnetosfera, la più grande del sistema solare. La missione europea *Juice*, il cui lancio è previsto nel 2022, ha come obiettivo Ganimede.

### Osservazioni da Terra

La comunità INAF è tradizionalmente molto attiva anche nelle osservazioni da Terra dei piccoli corpi (asteroidi, comete e oggetti trans-nettuniani) e di pianeti, pianeti nani e satelliti. INAF è stata ed è coinvolta (come PI-ship e CoI-ship) in numerosi programmi di osservazione con telescopi di classe media e grande per l'osservazione delle caratteristiche e proprietà fisiche e dinamiche di un grande numero di piccoli corpi. Gruppi INAF, in autonomia e anche riuniti in consorzi e collaborazioni, hanno avuto e hanno regolare accesso a tempo osservativo per attività scientifiche che spaziano dall'analisi di eventi "time-critical" e transienti al ripetuto monitoraggio su lunghi tempi scala di fenomeni intimamente legati alle proprietà delle varie popolazioni dinamiche dei piccoli corpi del Sistema Solare. Tali misure per una grande varietà di oggetti, impossibili da ottenere se non con osservazioni da Terra, sono importanti per ricostruire la visione generale ed evolutiva di queste numerose famiglie e gruppi dinamici di piccoli corpi, e dei possibili legami tra di loro (si pensi ad esempio a una scoperta importante nel campo della polarimetria degli asteroidi come quella dei cosiddetti asteroidi *Barbarians*).

### Ricerca teorica

La comunità italiana ha una tradizione notevole nell'ambito della ricerca teorica in vari settori, in particolare quelli che riguardano la **formazione del Sistema Solare** e la **fisica e dinamica dei corpi minori**; recentemente si sono aggiunte tematiche nuove come la **modellizzazione del clima e dell'abitabilità di pianeti di tipo terrestre**.

Evoluzione del disco protoplanetario e formazione di pianeti. Questo tipo di studi si concentra in particolare sulla formazione e evoluzione del disco protoplanetario, sugli effetti dell'accrescimento sequenziale e competitivo dei quattro pianeti giganti e sul trasferimento dinamico e collisionale di acqua e volatili nel Sistema Solare interno. Data la natura generale dei processi studiati, i risultati e gli strumenti teorici e numerici sviluppati per questi studi trovano diretta applicazione anche allo studio della formazione dei pianeti extrasolari.

Modellistica geofisica e termofisica di piccoli corpi, sia rocciosi che ghiacciati. Questo tipo di studi si occupa di asteroidi e nuclei cometari. Sono in particolare oggetto di studio la differenziazione chimico-fisica e la distribuzione delle temperature interne, la sublimazione di ghiacci e l'emissione di specie volatili e polvere e, per i corpi rocciosi più grandi, la stabilità della crosta e l'eventuale subduzione, il fenomeno della core dynamo e la generazione di campi magnetici.

Dinamica e fisica collisionale. Questi studi si concentrano sull'evoluzione collisionale della fascia degli asteroidi indagata sia dal punto di vista della popolazione asteroidale nel suo complesso che da quello dei singoli corpi. Oltre al loro immediato impatto scientifico, queste attività permettono di verificare gli strumenti teorici e numerici utilizzati per lo studio della formazione planetaria

### Attività di laboratorio

**L'attività di laboratorio è di fondamentale supporto alla ricerca nel campo della planetologia.** L'INAF ha una ben radicata esperienza in questo tipo di attività che varia da esperimenti di simulazione a studio di analoghi, dalle analisi di materiale extraterrestre, alla caratterizzazione delle proprietà chimico-fisiche di materiali terrestri.

In laboratorio è possibile studiare e caratterizzare meteoriti e minerali simili a quelli che si trovano in ambienti extraterrestri, riprodurre le condizioni di vuoto e di temperatura che si riscontrano, per esempio, sulle superfici degli asteroidi, sulle comete, su Mercurio e nelle regioni di formazione stellare e simulare le atmosfere di pianeti e satelliti. Inoltre è possibile studiare gli effetti indotti dalla radiazione elettromagnetica e dai raggi cosmici su materiali analoghi a quelli osservati.

Attraverso le indagini condotte in laboratorio è possibile, inoltre, comprendere i principi di base dell'astrobiologia ovvero la ricerca di segni di vita nello spazio e lo studio dei processi prebiotici responsabili dell'origine della vita.

**Questo tipo di studi arricchisce la nostra conoscenza e contribuisce all'interpretazione dei dati acquisiti dai telescopi e dalle missioni spaziali** o perché permette un confronto diretto fra le osservazioni astronomiche e i dati di laboratorio o perché ci consente di definire l'evoluzione chimico-fisica di diversi materiali in diversi ambienti astrofisici. **L'analisi di dati di laboratorio ci permette anche di capire quali sono le misure più opportune e quindi gli strumenti (e il loro sviluppo) necessari per rispondere alle domande scientifiche che si pongono le missioni.** La maggior parte dei piccoli corpi del Sistema Solare non sarà mai raggiunta da una missione spaziale ed è quindi fondamentale condurre osservazioni da Terra, esperimenti di laboratorio che ci permettano di modellizzare la composizione della superficie di oggetti privi di atmosfera e gli effetti dei processi fisici che vi avvengono, utilizzando anche *materiali considerati analoghi*, oltre all'utilizzo diretto dei frammenti di corpi planetari rappresentati dalle meteoriti. Gli esperimenti condotti in ambienti e su *terreni ritenuti analoghi* di ambienti extraterrestri sono utili non solo per l'interpretazione dei dati ottenuti da osservazioni remote, ma anche per lo studio di nuovi strumenti.

Missione/Strumento	Tecnica/Area (partecipazione INAF)	Periodo	Risultati attesi	Partecipazione italiana
<b>Missioni e strumenti operanti durante il periodo 2017-2019</b>				
<b>Cassini (NASA)</b>	Spettrometria a immagine	1997-2017	Caratterizzazione sistema di Saturno	Strumento VIMS
<b>CLUSTER (ESA)</b>	Misura della componente ionica del plasma	2000-2018	Caratterizzazione delle strutture tridimensionali del plasma spaziale	
<b>Mars Express</b>	Immagini, Spettri, radar/	2004-	Studio di Marte	PI-ship INAF (PFS, MARSIS)
<b>Mars Reconnaissance Orbiter</b>	Radar	2005-	Studio di Marte	Partecipazione INAF (SHARAD)
<b>DUSTER</b>	Piattaforma stratosferica	2004-	Raccolta materiale extraterrestre	Realizzazione italiana

<b>Dawn (NASA)</b>	Spettrometria a immagine	2007-2017	Composizione superficie di Cerere	PI-ship INAF (VIR)
<b>Juno (NASA)</b>	Spettrometria a immagine	2011-2019	Studio aurore e atmosfera di Giove	PI-ship INAF (JIRAM)
<b>GAIA (ESA)</b>	Astrometria, fotometria e spettroscopia nel visibile	2013-2020	Proprietà fisiche degli asteroidi	Partecipazione INAF nel processamento e analisi dati (DPAC)
<b>ExoMars (ESA)</b>	Immagini, spettrometria	2016-2022	Studio di Marte	Co-PIship INAF (CASSIS, NOMAD, Dust Complex); PI-ship INAF (DREAMS, MaMISS)
<b>OSIRIS-REX (NASA)</b>	Immagini, Spettri	2016-2023	Caratterizzazione della superficie di un asteroide	Partecipazione all'analisi dei dati e dei campioni
<b>IBIS</b>	Immagini, Spettri/polarimetria.	2017-2019	Emersione ed evoluzione delle regioni magnetiche solari in fotosfera e cromosfera. Diagnostica eventi esplosivi.	INAF con contributi altri partner universitari
<b>SOHO-UVCS</b>	Spettro-coronografia UV di regioni sorgente del vento solare	2017-2019 analisi dati in corso	Diagnostica dei processi di riscaldamento ed accelerazione del vento solare. Indagine sui processi energetici che caratterizzano i CME	INAF con contributi altri partner universitari
<b>Hayabusa 2 (JAXA)</b>	Immagini Spettroscopia IR Analisi Sample Return	2017-2024	Caratterizzazione Asteroide NEA Ryugu e landing + sampling site Analisi campioni riportati a Terra	INAF Co-I-ship
<b>Missioni e strumenti futuri</b>				
<b>BepiColombo (ESA-JAXA)</b>	Immagini, Spettri, accelerometria, misurazione di particelle neutre	2018	Caratterizzazione superficie e esosfera di Mercurio	PI-ship INAF (SIMBIOSYS, SERENA, ISA) e italiana (MORE)
<b>SCORE – Herschel</b>	Imaging coronografico VL, UV e EUV (programma sub-orbitale)	2018	Proprietà fisiche corona esterna. Abbondanza elio coronale.	NASA. Impegno ricercatori INAF in collaborazione con NRL-USA.
<b>Solar Orbiter (ESA)</b>	Imaging coronografico VL e UV Indagine in-situ del plasma del vento solare	2019	Proprietà delle regioni sorgente del vento solare. Origine, evoluzione e propagazione dei CME. Cinetica del plasma	ESA. Forte impegno italiano: PI-ship (METIS) e CoPI-ship (SWA)
<b>ASPIICS – Proba3</b>	Coronografia ad altissima risoluzione con satellite in formazione	2020	Spettropolarimetria della corona solare e estesa e prime misure dei campi magnetici coronali mediante effetto Hanle.	ESA. Impegno ricercatori INAF
<b>JUICE (ESA)</b>	Immagini, Spettrometria a immagine	2022	Studio del sistema di Giove. Caratterizzazione superfici ed esosfere dei satelliti galileiani e della atmosfera di Giove.	Co PI-ship INAF (JANUS, MAJIS)
<b>EST</b>	Osservazioni spettropolarimetriche e dal vicino IR al vicino UV	2026	Conoscenza dettagliata delle proprietà termiche, dinamiche e magnetiche del plasma della nostra stella, dalla base della fotosfera all'alta cromosfera.	Consorzio europeo EAST, con partecipazione italiana

### 1.3.3.3 Obiettivi generali e strategici da conseguire nel triennio – Fisica solare ed eliofisica

Lo strumento INAF **IBIS** (Interferometric Bidimensional Spectrometer), attualmente presso il DST/NSO Sunspot (NM, USA), mantiene una leadership mondiale nel campo della spettro-

polarimetria solare dedicata allo studio della dinamica e dei processi MHD della fotosfera e cromosfera del Sole. IBIS, prototipo di strumentazione che sarà installata ai telescopi solari di nuova generazione e a telescopio solare europeo EST (European Solar Telescope), permette di effettuare osservazioni spettropolarimetriche e sviluppare tecniche di studio che saranno necessarie anche per l'analisi dei dati prodotti in futuro dalle infrastrutture utilizzate per osservazioni notturne. A seguito dei cambiamenti previsti presso DST/NSO, il triennio di riferimento potrà contemplare lo spostamento di IBIS presso un altro telescopio che possa garantire le migliori condizioni di utilizzo dello strumento nel futuro.

I processi MHD responsabili dell'emersione e diffusione del plasma, della propagazione di onde e dell'evoluzione delle regioni magnetiche, contribuiscono anche al riscaldamento degli strati più esterni dell'atmosfera solare e all'accelerazione del vento stellare. Lo studio della struttura, dinamica, espansione e riscaldamento della corona, riscaldata a temperature di milioni di gradi e sede di processi stazionari e transienti che modificano le condizioni fisiche nell'eliosfera, continuerà ad avere un ruolo importante nelle ricerche svolte nel prossimo triennio.

Il contributo a livello di Co-PI alla realizzazione dello spettrocoronografo ultravioletto UVCS per la missione ESA-NASA *SOHO*, supportato dall'ASI e con un'importante partecipazione dell'industria aerospaziale nazionale, e il conseguente impegno nella conduzione delle operazioni scientifiche e nell'analisi dei dati raccolti, ha infatti posto la comunità nazionale **in una posizione di leadership mondiale nell'ambito della coronografia ultravioletta.**

L'esperienza tecnologica e scientifica acquisita con UVCS/*SOHO* è stata recentemente consolidata anche con la rilevante partecipazione alla definizione e realizzazione dei nuovi coronografi METIS, SCORE e ASPIICS, per le missioni ESA *Solar Orbiter*, *Herschel* NASA/US Naval Research Lab e ESA *Proba3* che saranno lanciate nell'arco del prossimo triennio. La comunità eliofisica guida infatti la partecipazione italiana al coronografo **ASPIICS** per la missione ESA *Proba3*. Tali attività sono condotte con il supporto dell'ASI. Nel triennio di riferimento, lo spettropolarimetro elettroottico originariamente sviluppato per il coronografo **ASPIICS**, che è stato già collaudato durante osservazioni di eclissi naturali, verrà anche integrato nel coronografo ESCAPE-CorMag e installato presso la base italo-francese Concordia in Antartide. L'obiettivo scientifico è la diagnostica dei campi magnetici coronali. Questo progetto, finanziato dal Piano Nazionale Ricerche Antartide, è supportato dall' Azione COST MP 1104 (Polarization as a tool to study the Solar System and beyond). Negli ultimi anni la comunità nazionale ha contribuito a molti progetti nazionali e internazionali volti allo studio e interpretazione dei processi osservati sul Sole e nell'eliosfera. La collaborazione tra INAF e industria ha portato recentemente al finanziamento della realizzazione di un telescopio robotico con filtri magneto-ottici per l'osservazione e il monitoraggio tomografico dell'atmosfera solare (SAMM Solar Activity MOF Monitor). Un cenno a parte merita la radiofisica del Sole, potentissimo strumento diagnostico per la fisica della corona solare. Si prevede che nel triennio L'INAF si doterà a Trieste di un nuovo sistema, interamente dedicato allo Space Weather ed in particolare al monitoraggio delle interferenze radio ai GNSS. La comunità INAF è anche attivamente impegnata negli studi relativi all'interazione del vento solare e del mezzo interplanetario con gli ambienti planetari. La missione *Cluster* dell'ESA, che vede attivamente coinvolta la comunità nazionale a livello di Co-I, ha permesso di ottenere nel corso dell'ultimo decennio un grande avanzamento nella comprensione dell'interazione tra il vento solare e la magnetosfera terrestre, con particolare attenzione al ruolo che processi come la riconnessione magnetica svolgono nel trasferimento di energia, massa e momento dal vento solare alla magnetosfera.

Il triennio di riferimento vedrà la messa a punto finale e il lancio delle missioni spaziali *BepiColombo* e *Solar Orbiter* del programma ESA Cosmic Vision 2015-2025 (lanci previsti nel 2018). Per *Solar Orbiter*, la definizione dei requisiti scientifici e tecnici e la realizzazione del coronografo **METIS** (PI INAF) è sotto la responsabilità italiana, con il supporto dell'ASI e un notevole coinvolgimento dell'industria aerospaziale nazionale. **METIS otterrà per la prima volta immagini della corona solare simultaneamente nelle bande del visibile e UV e studierà origine ed evoluzione dell'eliosfera, osservando l'accelerazione del vento solare e la propagazione iniziale delle sue perturbazioni in corona.** Nello stesso contesto, a breve sarà anche lanciato il coronografo SCORE, progettato e realizzato dalla comunità INAF come prototipo di METIS. SCORE volerà per la seconda volta con un razzo suborbitale nel quadro del programma Herschel della NASA, in collaborazione con il Naval Research Laboratory.

La comunità eliofisica partecipa inoltre (Co-PIship INAF) alla realizzazione della suite di plasma **SWA**, collaborando al disegno dei 4 sensori, alla definizione dei loro requisiti scientifici e fornendo il Data Processing Unit ed il S/W di bordo. **SWA fornirà misure in situ di protoni, elettroni, particelle alfa e ioni minori a risoluzioni temporali mai raggiunte nell'eliosfera interna, fondamentali per individuare i meccanismi fisici alla base del riscaldamento e accelerazione del vento solare.**

Infine, la comunità fornirà anche un importante contributo all'elaborazione delle tecniche di ricostruzione di immagini per lo strumento STIX dedicato all'acquisizione di immagini della corona solare nei raggi X.

Per *BepiColombo* (vedi anche sez. ...), la suite internazionale di 4 strumenti **SERENA**, con PI-ship italiana, fornirà importanti informazioni su flussi e densità di particelle cariche e neutre nell'ambiente di Mercurio. L'Italia ha la responsabilità del coordinamento del Hermean Environment Working Group (**HEWG**), all'interno del quale tali problematiche e le relative strategie osservative sono esaminate. Inoltre, l'Italia coordina anche le attività del Venus Fly-by Working Group (**VFBWG**), inerente alle osservazioni di Venere in concomitanza dei due passaggi previsti durante il viaggio. Altre due Co-I ships italiane riguardano l'esperimento PHEBUS (segnale UV esosferico) e SIXS (monitor della radiazione e particelle solari).

I risultati degli studi osservativi e teorici condotti nell'ultimo decennio mostrano che i processi fisici rilevanti per la comprensione del bilancio di energia nelle atmosfere stellari avvengono a scale spaziali e temporali, e in regioni della stella, non osservate con la strumentazione ora disponibile, motivando lo sviluppo di tecniche di studio e la realizzazione di telescopi di futura generazione operanti da Terra e dallo spazio. In questo contesto, la comunità nazionale negli ultimi anni ha attivamente partecipato allo studio di fattibilità del telescopio **Telescopio Solare Europeo EST**, promosso dalla comunità astrofisica solare europea raccolta in EAST (European Association for Solar Telescopes) e incluso nella Roadmap 2016 ESFRI (European Strategy Forum for Reserch Infrastructures). **EST effettuerà osservazioni spettropolarimetriche di elevata precisione dal vicino ultravioletto al vicino infrarosso migliorando significativamente la nostra comprensione del campo magnetico solare e delle sue relazioni con l'eliosfera e la Terra.**

Spostando l'attenzione dal Sole agli effetti dell'attività solare e del vento solare sullo spazio circumterrestre, è bene menzionare che il radar ionosferico a guida italiana, installato nel 2013 presso la base Concordia in Antartide, continuerà a fornire regolarmente osservazioni. Questo radar fa parte della catena internazionale **SuperDARN** (Super Dual Auroral Radar Network), dedicata allo studio della ionosfera ad alta latitudine, per la comprensione dei processi dello spazio circumterrestre e nel contesto dello Space Weather. E' in corso di installazione un secondo radar a guida italiana, sempre presso la base di Concordia, che andrà a completare la catena SuperDARN facendo coppia con quello della base cinese di



Zhongshang. Questa attività è finanziata dal Programma Nazionale di Ricerche in Antartide (PNRA). Sempre in quest'ambito, l'osservatorio **S.V.I.R.CO** (Studio Variazioni Intensità Raggi Cosmici) continuerà ad effettuare misure della componente secondaria nucleonica del flusso di raggi cosmici. Nel triennio di riferimento continueranno altresì **le osservazioni solari sinottiche a disco intero a varie bande spettrali** effettuate presso gli Osservatori di Catania e Roma, con la finalità di acquisire informazioni necessarie per gli studi sulla variabilità solare e sui processi di innesco dei fenomeni che determinano lo Space Weather. Tali osservazioni saranno anche estese con l'uso del nuovo telescopio robotico SAMM in avanzata fase di realizzazione.

Al fianco della suddetta attività si deve menzionare la partecipazione della comunità INAF interessata allo studio delle proprietà dei plasmi spaziali alle attività scientifiche relative alla missione cinese **CSES** nell'ambito della collaborazione Limadou (CNSA-ASI). Il lancio del satellite **CSES** è previsto nel luglio/agosto 2017. Il crescente impegno dell'INAF nella programmazione strumentale e scientifica della costellazione CSES permetterà l'accesso a dati di plasma e campi magnetici ed elettrici per studi di accoppiamento magnetosfero-ionosfera e per integrare le osservazioni relative alla penetrazione dei raggi cosmici nell'ambiente terrestre con misure in una regione poco esplorata.

I ricercatori dell'INAF sono anche coinvolti in proposte per missioni di esplorazione del Sistema Solare in fase di approvazione che includono strumentazione per lo Space Weather Planetario, come le missioni sottomesse all'ESA nel 2016 in seguito alla call M5, ESCAPE e Alfvén. I ricercatori dell'INAF partecipano alla missione THOR (Turbulent Heating Observer), candidata nell'ambito della selezione per la futura missione M4 dell'ESA. Si è poi partecipato sia ad una proposta (LUCIANUS) in risposta alla call ESA SysNova per una missione dedicata allo studio dell'ambiente Lunare, sia ad una proposta NASA di uno spettrometro di massa per la missione Coreana KPLO.

Continueranno le osservazioni da Terra dell'emissione esosferica di sodio in diversi ambienti planetari come Mercurio e le lune gioviane con telescopi Solari (THEMIS) e notturni. Continuerà e si intensificherà l'attività di modellistica teorica, in previsione di nuovi dati osservativi dalle prossime missioni (BepiColombo e Solar Orbiter), e si potenzieranno le attività di simulazione in laboratorio per studiare l'effetto dell'impatto di plasmi energetici su analoghi planetari.

## Obiettivi generali e strategici da conseguire nel triennio – Planetologia

### Le missioni di esplorazione

Nel prossimo triennio la comunità continuerà a essere fortemente impegnata nelle attività relative a missioni in fase operativa (*Dawn, Cassini, Juno, Gaia, Mars Reconnaissance Orbiter, Mars Express, ExoMars, Hayabusa 2*) e in preparazione (*BepiColombo e Juice*).

La missione NASA *Dawn* ha già visitato Vesta ed è in orbita intorno a Cerere dal gennaio 2015. L' INAF partecipa alla missione a livello di Co-I e con la responsabilità di uno dei tre strumenti scientifici di bordo (lo spettrometro VIR), con finanziamenti importanti da parte dell'ASI. La NASA ha esteso la missione almeno per altri due anni, dedicati all'osservazione di Cerere.

Anche la sonda *Cassini* ha ricevuto un'ulteriore estensione fino a settembre 2017, quando terminerà la sua vita operativa penetrando nell'atmosfera di Saturno. Per quel che riguarda la missione *Cassini*, l'INAF fa parte dei team scientifici di alcuni strumenti (RADAR, Radio Science, VIMS), ha inoltre il coordinamento scientifico per la parte italiana (stabilito a Roma) ed ha contribuito alla strumentazione a bordo della sonda (canale visibile strumento VIMS).

Nel luglio 2016 la missione NASA *JUNO* è entrata nell'orbita di Giove. In accordo con l'attuale piano di missione le osservazioni del pianeta si protrarranno fino al 2019. L'INAF partecipa con uno strumento a PI-ship Italiana, JIRAM (uno spettrometro a immagine nel vicino e medio infrarosso), i cui obiettivi primari sono lo studio delle aurore e dell'atmosfera gioviana.

*Gaia*, lanciata nel 2013, migliorerà di un fattore 100 la nostra conoscenza delle orbite degli asteroidi, ivi compresi quelli su orbite a rischio di impatto col nostro pianeta, e fornirà dati fisici fondamentali (proprietà rotazionali, composizione) e le prime misure accurate di massa e densità per un campione importante della popolazione. L'INAF riveste un ruolo fondamentale nel Data Processing and Analysis Consortium (DPAC), il consorzio europeo che si occupa della riduzione dei dati della missione.

Tre missioni spaziali stanno fornendo dati su Marte: *Mars Reconnaissance Orbiter*, *Mars Express* e *ExoMars TGO*. *Mars Reconnaissance Orbiter*, missione NASA operativa dal 2005, vede una partecipazione scientifica INAF nell'esperimento a guida italiana SHARAD. La missione ESA *Mars Express* è operativa a Marte dal 2004 e continua tutt'ora a raccogliere preziose informazioni sul pianeta rosso; gli obiettivi scientifici della missione sono lo studio dell'atmosfera, della superficie e del sottosuolo del pianeta. Due dei sette esperimenti a bordo (OMEGA e ASPERA3) vedono un'importante partecipazione INAF, e altri due (PFS e MARSIS) hanno PI dell'INAF. È in fase operativa/realizzativa il programma per l'esplorazione di Marte *ExoMars*, che è strutturato in due sonde: la prima, lanciata nel 2016, composta da un orbiter (TGO - Trace Gas Orbiter) attualmente operativo ed un lander denominato Schiaparelli, e la seconda che verrà lanciata nel 2020 contenente come elementi primari di missione un Rover, con strumenti dedicati all'esobiologia, ed una stazione fissa al suolo. In entrambe le missioni è rilevante il contributo di diversi gruppi di ricercatori dell'INAF con ruoli di responsabilità in tutti gli elementi di missione: la stereocamera (CASSIS) e lo spettrometro (NOMAD) a bordo del TGO sono entrambi con Co-PIship INAF, così come il Dust Complex a bordo della stazione fissa di ExoMars 2020. La stazione meteo DREAMS, a bordo di Schiaparelli e lo spettrometro miniaturizzato MaMISS, strumento completamente italiano inserito nel trapano, a bordo del rover di *ExoMars* 2020 hanno la PI-ship in INAF.

Nel 2018 è previsto il lancio di *BepiColombo*, missione "cornerstone" ESA e JAXA per lo studio di Mercurio, con due satelliti che orbiteranno intorno al pianeta. La missione è progettata per studiare la composizione, la geofisica, l'atmosfera, la magnetosfera e la storia di Mercurio ed infine anche fornire un test della teoria della relatività con una accuratezza mai raggiunta in precedenza. Il contributo dell'INAF è rilevante attraverso gli esperimenti a guida INAF: oltre a SERENA (vedi sez. ...), **SIMBIOSYS** (una suite di strumenti che combina una camera ad alta risoluzione, una stereocamera e uno spettrometro ad immagine per lo studio della superficie del pianeta dal punto di vista della sua composizione e geologia), e **ISA** (un accelerometro per rilevare le accelerazioni di origine non gravitazionale agenti sul satellite). A guida italiana è anche **MORE**, lo strumento di radio scienza dedicato allo studio del campo gravitazionale di Mercurio e alle verifiche della relatività generale.

Nel prossimo triennio, inoltre, sono previste due missioni di sample return da asteroidi primitivi, la missione NASA *OSIRIS-Rex* e la missione JAXA *Hayabusa 2*. Entrambe le missioni raggiungeranno i loro targets, i NEO Bennu e Ryugu (rispettivamente per *Osiris Rex* e *Hayabusa 2*) nell'estate del 2018. È previsto un grande coinvolgimento della comunità INAF, che ha attivamente partecipato alla definizione degli obiettivi scientifici e della strumentazione di bordo, nella fase di global mapping e local mapping per lo studio delle caratteristiche a grande scala degli oggetti e per la scelta dei siti da cui prelevare i campioni da riportare a Terra.

Il lancio di **JUICE**, missione ESA che esplorerà il sistema di Giove, è invece previsto per il 2022. Lo scopo principale di **JUICE** è quello di studiare Giove e le sue lune ghiacciate, con particolare enfasi per Ganimede, Callisto ed Europa, dove potenzialmente esistono strati sottosuperficiali di acqua mantenuta allo stato liquido su tempi geologici. A bordo di **JUICE** vi saranno anche due strumenti con forte partecipazione di ricercatori dell'ente, la camera JANUS e lo spettrometro a immagine MAJIS (a co-pi-ship INAF).

Quanto alle attività legate a **missioni future non ancora approvate**, i ricercatori dell'INAF sono coinvolti in un ampio spettro di proposte con le maggiori agenzie internazionali (NASA, ESA e JAXA) per missioni di esplorazione del Sistema Solare, come le missioni NASA di Comet Sample Return, di esplorazione di Venere (VERITAS) e ARM (Asteroid Redirect Mission), le missioni JAXA dedicata alla caratterizzazione e sample return sia del satellite di Marte Phobos (Martian Moon eXplorer) sia di un asteroide Troiano (Solar Power Sail Mission) o le missioni sottomesse all'ESA nel 2016 in seguito alla call M5, come Castalia. L'INAF partecipa inoltre allo studio NASA per future missioni a Urano e Nettuno con uno dei due rappresentanti europei nominati da ESA, mentre in parallelo ricercatori INAF sono impegnati a più livelli nella proposta per un analogo studio europeo in risposta al bando ESA del 2016 per nuove idee scientifiche per future missioni spaziali. Infine, i ricercatori INAF stanno collaborando sinergicamente con le comunità esoplanetarie italiana ed europea coinvolte nella missione ARIEL (Atmospheric Remote-sensing Exoplanet Large-survey), candidata nell'ambito della selezione per la futura missione M4 dell'ESA, contribuendo alla definizione della missione sia dal punto di vista strumentale-tecnologico che da quello scientifico (studio delle atmosfere e della formazione planetaria) grazie al know-how derivato dallo studio del Sistema Solare.

### Le osservazioni da Terra

Per quanto riguarda le **osservazioni da Terra**, proseguiranno le osservazioni e la modellizzazione di piccoli corpi, pianeti e satelliti del Sistema Solare. A partire da osservazioni con telescopi di medie e grandi dimensioni (TNG, LBT, VLT, etc) verranno monitorati e analizzati eventi "time-critical" e transienti, e proseguirà lo studio delle caratteristiche fisiche e dinamiche e dei processi che le modificano.

Proseguiranno anche le osservazioni di pianeti e satelliti, analoghe a quelle effettuate tramite gli osservatori NASA-IRTF e Subaru a Mauna Kea (Saturno e Urano nel vicino infrarosso, Vesta nell'infrarosso termico, occultazioni stellari di Ganimede nel visibile e vicino infrarosso).

**La planetologia italiana fornisce poi un contributo fondamentale allo studio degli oggetti con orbite molto vicine alla terra** (Near Earth objects, NEO): in particolare va citato il progetto **NeoDys** (Università di Pisa, IAPS Roma), finanziato in parte dall'ESA nell'ambito del programma SSA (Space Situational Awareness), che si occupa del monitoraggio delle orbite degli asteroidi che possono passare vicino al nostro pianeta, e il progetto **NEOShield-2** (2015-2017) finanziato nell'ambito del programma EU Horizon 2020 al fine di studiare tecnologie e strumenti per sviluppare missioni spaziali a NEO potenzialmente pericolosi per il nostro pianeta.

**Ricercatori dell'INAF sono anche attivi nel campo dell'osservazione di meteore**, che possono portare anche al ricupero di meteoriti appena cadute, e il prossimo triennio vedrà sicuramente un incremento di questo tipo di studi. L'interesse si è concretizzato di recente nella partecipazione al progetto nazionale in contesto internazionale **PRISMA** (Prima Rete Italiana per la Sorveglianza sistematica di Meteore e Atmosfera), a cui partecipano, oltre a varie strutture INAF, università ed altre entità didattico/divulgative sul territorio. Esiste poi una collaborazione con l'INFN che riguarda lo sviluppo di rivelatori di fenomeni transienti in atmosfera nell'UV, da installare sulla Stazione Spaziale Internazionale (ISS). Nel 2017

dovrebbe poi essere collocato uno strumento, che si chiama Mini-EUSO, sul modulo russo dell'ISS, come precursore di una possibile missione molto più ambiziosa (un telescopio da 2 metri da piazzare sul modulo giapponese).

### Ricerca teorica e astrofisica di laboratorio

**Nel prossimo triennio prevediamo che i filoni di ricerca teorica già attivi riceveranno un ulteriore forte impulso grazie anche alla quantità di nuovi dati arrivati soprattutto con le missioni di esplorazione. Gli esperimenti a bordo delle missioni di esplorazione del Sistema Solare producono una grande quantità di dati che richiedono, per il loro sfruttamento, uno sforzo che si prolunga ben oltre la fine della fase operativa della missione.** La fase di interpretazione dei dati, che viene dopo la fase di prima analisi degli stessi, è quella in cui si cerca di fornire risposte alle domande fondamentali, ed è fondamentale per sfruttare appieno le potenzialità di una missione, in particolare per l'analisi ed interpretazione dei dati ottenuti dagli strumenti che vedono ricercatori INAF con ruoli di responsabilità. Questa fase richiede anche attività di laboratorio e di modellistica, e normalmente vede occupata la comunità per alcuni anni dopo la fine di una missione. Nel dicembre 2014 e nel settembre 2016 hanno avuto termine rispettivamente le fasi operative della missione Venus Express e di Rosetta, ma l'impegno dei ricercatori INAF non è terminato con la fine delle missioni, in quanto l'ESA ha richiesto il contributo per una attività di *enhanced archiving* che prevede la consegna di prodotti di ordine superiore al semplice dato calibrato. Questa attività è in corso per quanto riguarda Venus Express ed è prevista per un triennio dopo la fine della missione nominale di Rosetta (settembre 2016 – settembre 2019). A complemento ed estensione di queste attività, i filoni di ricerca teorica continueranno a fornire un contributo chiave alla identificazione delle misure mancanti per il pieno sfruttamento scientifico dei dati già acquisiti o in corso di acquisizione, alla definizione degli obiettivi scientifici di future missioni e alla creazione di metodi, know-how e strumenti applicabili allo studio dei pianeti extrasolari.

L'interpretazione dei dati ottenuti da osservazioni da Terra nello studio delle popolazioni dei piccoli corpi si avvale invece di metodi statistici e di modellizzazione dei possibili processi fisici che hanno modificato la popolazione iniziale. Gruppi INAF sono attivi nel portare avanti studi teorici che riguardano principalmente la simulazione della formazione del Sistema Solare e dell'evoluzione dinamica delle varie popolazioni dei piccoli corpi e la modellizzazione delle strutture, delle densità e del comportamento fisico dei piccoli corpi alle diverse distanze dal Sole in seguito a collisioni o passaggi ravvicinati al Sole o ai pianeti. **Per far fronte al sempre crescente livello di dettaglio dei modelli numerici e alla complessità e dimensione dei dati cui sono applicati, nell'arco del prossimo triennio per queste attività teoriche è previsto un crescente impegno nell'ambito dell'astrofisica computazionale e del calcolo avanzato**, in modo da aggiornare gli strumenti utilizzati alle potenzialità delle infrastrutture messe a disposizione da INAF.

**Anche per l'attività di laboratorio, come per la ricerca teorica, prevediamo nei prossimi anni, oltre alla continuazione delle attività già in corso, un forte impulso e l'apertura di nuovi filoni.**

Molte delle future missioni di esplorazione prevedono la raccolta e il rientro a Terra di materiale extraterrestre. L'Italia ha acquisito un'ottima esperienza nell'ambito dell'analisi in laboratorio di materiale cometario ed è coinvolta in missioni e proposte di missioni sample return (ad esempio MMX/JAXA, *Osiris-REX*/NASA, *Hayabusa 2*/JAXA, Solar Power Sail/JAXA, Comet Sample Return/NASA). La *raccolta di materiale extraterrestre* può avvenire, con costi molto ridotti, anche in stratosfera terrestre con piattaforme stratosferiche, come lo strumento DUSTER, progettato per la raccolta di polvere in alta stratosfera. Diversi gruppi di ricerca italiani partecipano con collaborazioni internazionali di alto livello ai

programmi di raccolta e analisi di materiale extraterrestre, DUSTER, Stardust/NASA, IDPs/NASA, Hayabusa/JAXA e micro-meteoriti in Antartide/PNRA. Per mantenere elevata la rappresentatività che l'Italia ha conquistato nell'ambito della raccolta, manipolazione, cura, e analisi in laboratorio di materiale extraterrestre, è importante sostenere l'operatività di strumentazione di laboratori all'avanguardia, con prestazioni molto superiori a quelle degli strumenti per l'analisi in situ. Gli sviluppi tecnologici associati alla produzione di strumenti quali DUSTER potranno anche essere sfruttati per future esplorazioni in situ di pianeti e di satelliti di tipo terrestre.

### Professionalità necessarie

Alcune professionalità necessarie e spesso indispensabili per lo sviluppo delle tematiche di cui ci occupiamo possono essere considerate carenti nella nostra comunità, in quanto tipicamente presenti solo come personale non permanente e legato a uno specifico progetto. Naturalmente, anche professionalità attualmente ben rappresentate possono avere bisogno di un ricambio generazionale oppure di un potenziamento numerico. L'elenco che segue si riferisce alle sole professionalità mancanti.

### Settore fisica solare ed eliofisica

- Esperti di modellistica e interpretazione dei processi HD e MHD (convezione ed emersione campi magnetici, struttura delle regioni magnetiche chiuse e aperte dell'atmosfera solare, eventi dinamici ad alta energia)
- esperti di tecniche osservative da terra e dallo spazio
- esperti di tecniche di analisi di dati acquisiti da terra e dallo spazio
- esperti di progettazione e integrazione di strumentazione, per sviluppo di nuova strumentazione e test di laboratorio.

### Settore planetologia

- Teorici ed esperti di modellistica
  - o fisica delle atmosfere
  - o formazione ed evoluzione planetaria
  - o dinamica del Sistema Solare
  - o trasferimento radiativo in aerosol atmosferici e chiome cometarie
- Geologi planetari dedicati allo studio dei processi esogeni ed endogeni agenti sui pianeti e corpi minori del Sistema Solare
- esperti di laboratorio per:
  - o sviluppo di nuova strumentazione e test
  - o simulazione di ambienti planetari
- tecnologi per la gestione del P/L di missioni planetarie: pianificazione operazioni, controllo dello strumento in volo, gestione dati di telemetria (HouseKeeping e dati scientifici)
- esperti nel campo delle tecnologie informatiche per la gestione e lo sfruttamento delle grandi basi di dati generate dalle missioni spaziali.



## 1.3.4 Astrofisica Relativistica e Particellare

### 1.3.4.1 Le domande fondamentali

#### **La fisica dell'accrescimento**

Le stelle compatte (nane bianche, stelle di neutroni e buchi neri) sono alla base di gran parte delle sorgenti celesti studiate nell'astrofisica relativistica e delle alte energie. Sebbene sia ben noto da decenni che l'accrescimento di materia costituisce uno dei processi più rilevanti per la produzione dell'emissione osservata da questi oggetti su diverse scale di luminosità, energia, e tempi scala caratteristici, la fisica dell'accrescimento costituisce ancora un importante oggetto di studio. I dettagli dell'interazione tra flusso di materia e l'oggetto compatto, spesso dotato di un campo magnetico dinamicamente importante, i processi radiativi termici e non termici, il feedback tra emissione ed accrescimento, l'evoluzione dei sistemi binari di massa stellare e dei nuclei galattici attivi sono oggetto di approfonditi studi da parte di diversi gruppi di ricercatori INAF, sia dal punto di vista teorico che osservativo.

#### **Accelerazione di particelle, produzione di getti relativistici e origine dei raggi cosmici**

Uno dei principali campi di attività riguarda lo studio dell'accelerazione di particelle in sorgenti astrofisiche di varia natura e dimensione. Getti relativistici sono emessi da buchi neri di massa stellare in sistemi binari e da buchi neri con masse fino a  $10^9$  masse solari al centro di galassie attive, ed in sorgenti transienti come i lampi gamma. La natura dei getti ed i meccanismi di accelerazione in buchi neri e stelle di neutroni non sono ancora compresi pienamente. Pulsar giovani ed energetiche emettono un vento relativistico che è inizialmente dominato dall'energia magnetica e non è ancora stato chiarito come, a distanze maggiori, questa sia trasformata in energia cinetica delle particelle. Lo studio degli acceleratori di particelle è ovviamente legato alla comprensione dell'origine dei raggi cosmici. Uno dei principali campi di attività riguarda lo studio dell'accelerazione di particelle in resti di supernovae e la loro connessione con l'origine dei raggi cosmici.

L'origine dei raggi cosmici viene indagata anche alle energie estreme ( $>10^{17}$  eV) esplorando il loro spettro di energia, composizione ed in particolare la loro anisotropia, sia su larga scala che da sorgenti.

#### **Comportamento della materia in regime di gravità forte**

La materia in accrescimento intorno a stelle di neutroni e buchi neri raggiunge regioni dello spazio molto vicine all'oggetto compatto e quindi costituisce uno strumento potente per rivelare effetti di Relatività Generale (GR) in regime di campo forte. Il vantaggio di poter arrivare a pochi chilometri dalla superficie di una stella di neutroni o dall'orizzonte degli eventi di un buco nero è controbilanciato dalla difficoltà di separare gli effetti dell'accrescimento da quelli di GR. Due approcci principali al problema vengono seguiti: lo studio dello spettro di emissione, che viene modificato in modo complesso da effetti gravitazionali e lo studio della variabilità rapida, che produce segnali quasi-coerenti che possono essere associati a frequenze caratteristiche in un campo gravitazionale.

#### **Ricerca delle controparti elettromagnetiche delle sorgenti di onde gravitazionali e di neutrini**

Nella primavera del 2016 è stata annunciata da parte del consorzio LIGO-VIRGO la prima rivelazione diretta di onde gravitazionali emesse dalla coalescenza di due buchi neri. Questa scoperta, che apre un canale completamente nuovo di informazione astrofisica, ha un'enorme rilevanza per i nostri studi dell'Universo. Inoltre grandi progressi sono stati compiuti negli ultimi anni dai rivelatori per neutrini come IceCube ed AMANDA, che hanno portato alla

scoperta di neutrini al PeV di origine cosmica le cui sorgenti astrofisiche (acceleratori di raggi cosmici di altissima energia) non sono ancora identificate. La ricerca e lo studio delle controparti elettromagnetiche associate alle sorgenti di onde gravitazionali e di neutrini è un campo in rapidissimo sviluppo e in cui INAF sta svolgendo un ruolo di rilievo in primo luogo dal punto di vista osservativo, ma anche mediante la modellizzazione ed interpretazione astrofisica. L'INAF ha firmato un Memorandum of Understanding (MoU) con il consorzio LIGO-VIRGO per poter utilizzare tutte le facilities osservative a cui ha accesso per la ricerca di controparti elettromagnetiche dei segnali di onde gravitazionali nella fase in cui i relativi dati non sono ancora distribuiti pubblicamente. Analoghi MoU con il consorzio LIGO-VIRGO sono stati firmati da ricercatori INAF per l'utilizzo dei satelliti AGILE, INTEGRAL e Swift. In questo contesto sono state già eseguite importanti campagne osservative per i primi segnali rivelati da LIGO che hanno portato a numerose pubblicazioni e dimostrano come la comunità INAF sarà in prima linea nei prossimi anni in questo nuovo campo di ricerca. Inoltre, ricercatori dell'INAF sono impegnati nell'esperimento Pierre Auger, che può osservare neutrini di alta energia prodotti in merger di buchi neri in sistemi binari. Dalla loro mancata rivelazione sono già stati derivati i primi limiti alla quantità di energia irradiata in neutrini.

### **Le sorgenti di alta energia come laboratori per la fisica fondamentale**

Lo studio dei buchi neri e delle stelle di neutroni magnetizzate (pulsar e magnetar) ha anche una grande rilevanza per alcuni degli argomenti più caldi della fisica fondamentale. Ad esempio la determinazione dell'equazione di stato a densità super nucleari che governa la struttura delle stelle di neutroni, i test di teorie alternative della gravità, e lo studio della fisica dei plasmi in condizioni estreme di densità e magnetizzazione. Lo studio degli oggetti compatti è quindi uno strumento unico per indagare su problematiche di fisica fondamentale che non possono essere riprodotte in laboratorio, e si basa spesso su osservazioni effettuate in più bande dello spettro elettromagnetico (dal radio all'infrarosso, all'ottico, alla banda X e Gamma), ed alla loro interpretazione teorica. Inoltre osservazioni alle alte energie (X e gamma) permettono di studiare sperimentalmente le previsioni di alcune estensioni dell'attuale modello standard delle particelle, come l'esistenza delle particelle simili all'assione o la rottura dell'invarianza di Lorentz, legata alla gravità quantistica.

#### **1.3.4.2 Gli strumenti di indagine**

**Studi multi-banda di oggetti compatti galattici ed extragalattici.** Questi studi sono principalmente basati su osservazioni ottenute con in principali satelliti per astronomia X attualmente operativi, quali XMM-Newton, Chandra, NuSTAR, Swift, ed INTEGRAL a cui si aggiungono molto spesso dati acquisiti in altre bande dello spettro elettromagnetico (dal radio all'infrarosso, all'ottico e ultravioletto, e ai raggi gamma).

La problematica dell'accrescimento su oggetti compatti e la espulsione di getti relativistici coinvolge fenomenologie estremamente differenti dal punto di vista osservativo. Basti pensare alle sorgenti blazar, in cui il getto domina il sistema, o alle binarie X e agli AGN in generale, in cui le proprietà di accrescimento e getto sono strettamente legate, anche se su scale spaziali molto differenti; oppure al comportamento della materia nelle vicinanze di buchi neri di taglia intermedia o, per finire, all'ampia fenomenologia legata ai GRB ed alle supernove ad essi a volte associati. Caratteristica comune di questo settore di ricerca è l'estrema dinamicità temporale dei fenomeni studiati, che ha generato lo sviluppo e l'applicazione di specifiche tecniche osservative e strumentali.

Tra le classi con proprietà fisiche estreme sono di particolare interesse le Magnetar, le pulsar, i candidati buchi neri di massa stellare, e le numerose sorgenti X ultraluminose (ULX) osservate in galassie dell'universo locale. La recente scoperta di alcune stelle di neutroni con periodi di rotazione di qualche millisecondo, che compiono transizioni tra stati di pulsar X e radio in risposta a variazioni del tasso di accrescimento di materia, ha provato lo stretto legame evolutivo esistente tra queste classi di sorgenti, aprendo un nuovo canale osservativo dei fenomeni di accrescimento ed eiezione di materia. Alcune pulsar di alto campo magnetico sono state identificate in sorgenti ultraluminose (ULX), estendendo i limiti di luminosità possibili per tali oggetti. Tra le classi di oggetti compatti identificate negli ultimi anni grazie soprattutto al satellite INTEGRAL e oggetto di studi approfonditi da parte di ricercatori INAF spiccano anche i Transienti X veloci con compagna super-gigante (SFXT) e i Transienti X estremamente deboli (VFXT).

**Gamma-ray bursts ed altri fenomeni transienti.** Lo studio dei GRB permette di affrontare una varietà di fenomeni rilevanti per la fisica, l'astrofisica e la cosmologia e vede impegnata una rilevante parte della comunità INAF. Un ruolo fondamentale in questo contesto è svolto dalla missione Swift, che, a diversi anni dal lancio continua a fornire un elevato contributo scientifico nel campo della fisica delle alte energie in generale. L'INAF è direttamente coinvolto nella gestione della missione, che prosegue con la continua attività di rivelazione e caratterizzazione di circa un centinaio di GRB per anno. Inoltre, proseguono le attività di supporto alle missioni INTEGRAL, AGILE e Fermi, soprattutto relative all'analisi in real time di GRB ed altri transienti. In particolare i risultati di queste missioni hanno condotto a studi dettagliati sulla definizione delle varie categorie di eventi di questa natura ed al loro possibile uso come indicatori cosmologici. Negli ultimi anni sono anche state scoperte e studiate sorgenti transienti di diversa natura, come ad esempio quelle dovute alla distruzione mareale di oggetti di varia taglia, da asteroidi a stelle. Gli strumenti Fermi-LAT ed AGILE-GRID hanno rivelato numerosi GRB con emissione fino a decine di GeV. Di grande rilievo per il ruolo dell'INAF nell'ambito dell'ESO sono poi le attività osservative in corso con lo strumento ESO X-shooter dedicate ai GRB, alle SN ed alle galassie ospiti di questi oggetti.

**Accelerazione di particelle in astrofisica e fenomeni non termici.** Importanti risultati sono stati ottenuti nello studio dell'accelerazione "non-lineare" di particelle da shock e delle sue implicazioni sull'amplificazione di campi magnetici agli shock e alla massima energia accelerabile. Altre ricerche sono state orientate, negli ultimi anni, allo studio dell'accelerazione di particelle negli shock delle PWN mediante uso di simulazioni numeriche di tipo magneto-idrodinamico (MHD). Su più grandi scale, negli ammassi di galassie e filamenti, risultati importanti sono stati ottenuti nella fisica dell'accelerazione di particelle e dei fenomeni non termici. Uno dei campi di attività principali riguarda lo studio dell'interazione non lineare fra particelle e turbolenza MHD e l'accelerazione di particelle da shock cosmologici. In questo campo, i dati derivano principalmente da osservazioni in banda radio di ammassi e filamenti (VLA, GMRT, WSRT). Sono stati sviluppati codici per la soluzione delle equazioni della idrodinamica classica e relativistica e della magnetoidrodinamica classica e relativistica sia su griglia statica che su griglia adattiva. Questi hanno permesso di svolgere simulazioni numeriche di flussi relativistici magnetizzati, dinamica a grande scala di getti, processi di dissipazione: instabilità, shocks, riconnessione magnetica, nonché di studiare il trasporto di momento angolare in dischi di accrescimento, la turbolenza magnetorotazionale ed i processi di dinamo connessi.

**Astronomia Gamma dallo spazio.** I risultati ottenuti negli ultimi anni dalle missioni spaziali INTEGRAL, *Fermi* ed AGILE hanno rappresentato una vera rivoluzione nel campo

dell'astronomia gamma. INTEGRAL è una missione ESA con grande coinvolgimento di ricercatori INAF (PI-ship dello strumento IBIS, e co-I-ship in SPI e centro dati scientifici), AGILE è una missione interamente italiana mentre *Fermi* è una missione guidata dalla NASA, ma con un grande partecipazione italiano. INTEGRAL ha dato importanti contributi in diversi campi, come lo studio delle popolazioni di sorgenti di raggi X duri galattiche (con la scoperta di nuove classi di sorgenti) ed extragalattiche, nella mappatura delle righe gamma prodotte nel mezzo interstellare, in resti di supernovae, in buchi neri, e nello studio della polarizzazione dei GRB. Fra i più importanti risultati di AGILE menzioniamo: la scoperta di variabilità dalla Crab Nebula, con importanti ripercussioni per la fisica dell'accelerazione di particelle; la scoperta e la caratterizzazione di processi di emissione adronica in diversi resti di SN; la rivelazione e l'annuncio rapido del super-flare del blazar 3C454.3, che ha permesso di effettuare una campagna a multifrequenza di grande precisione; la scoperta di emissione a energie fino a 100 MeV da parte dei Flash Gamma Terrestri che ha avuto un grande impatto sugli studi di fisica dell'atmosfera. L'ultimo catalogo di sorgenti gamma rivelate da *Fermi*, che comprende circa 3000 sorgenti, ha permesso di aprire il campo allo studio delle proprietà statistiche in banda gamma di diverse popolazioni di oggetti astrofisici. I più rilevanti risultati di *Fermi* sono: i limiti alla Dark Matter (DM, sia da emissione isotropa diffusa che da emissione della galassia); la conferma dell'eccesso positrone/elettrone con rilevanti conseguenze sulla sua origine; la scoperta delle "Fermi Bubbles", emissioni gamma probabilmente connesse con l'attività del nucleo della nostra galassia; l'identificazione e lo studio di più di 100 pulsar nuove; la rivelazione di emissione gamma dalle novae, l'osservazione dell'emissione GeV dai Gamma-Ray Burst.

**Astronomia Gamma da terra.** Osservazioni ad energie maggiori di 100 GeV vengono effettuate mediante telescopi a terra (HESS, MAGIC, VERITAS) che sfruttano la luce Cherenkov prodotta nell'atmosfera dagli sciami di particelle iniziati da fotoni gamma di alta energia. Ricercatori INAF sono coinvolti nell'esperimento MAGIC e nella costruzione della grande facility internazionale di nuova generazione CTA. Fra i risultati più rilevanti ottenuti recentemente nell'astronomia gamma di alta energia spiccano: la scoperta di pulsazioni della Crab Nebula ad energie fino a 25 GeV; la definizione di importanti limiti osservativi sulla presenza di materia oscura in galassie vicine; lo studio delle Spectral Energy Distribution di molti Nuclei Galattici Attivi e, infine, la possibilità di verificare sperimentalmente le proprietà degli assioni, particelle previste dal modello standard e da diverse sue estensioni. L'astronomia Gamma da terra è realizzabile anche tramite schiere di rivelatori di particelle, tecnica complementare alla rivelazione della luce Cherenkov e che ha visto coinvolti ricercatori INAF nell'esperimento ARGO-YBJ in Tibet e ora nel progetto LHAASO in Cina, la cui presa dati è prevista iniziare nel 2018. La rivelazione delle particelle secondarie delle cascate (principalmente elettroni e muoni) consente un grande campo di vista (circa 2 sr, limitato unicamente dall'assorbimento atmosferico) e un duty cycle teorico del 100%. Nonostante la minore sensibilità e risoluzione angolare, questo costituisce un indubbio vantaggio rispetto alla tecnica Cherenkov nello studio delle sorgenti estese, variabili, sconosciute e nell'all-sky survey.

### 1.3.4.3 Obiettivi strategici

In un discorso ad ampio respiro, proiettato negli anni futuri, lo studio degli oggetti compatti galattici ed extragalattici trarrà notevole giovamento dall'attuale sviluppo, con forte coinvolgimento dell'INAF, di missioni e strumenti dedicati alle diverse bande energetiche. Tra questi, vi sono certamente ASTRI e mini-arrays (come passi preliminari e fondamentali del progetto internazionale CTA) nella banda TeV, SRT e SKA nel radio e, con prospettiva

molto più lunga, Athena nella banda X, con lo sviluppo di microcalorimetri capaci di garantire una risoluzione spettrale mai raggiunta a queste energie.

Rilevante sarà, inoltre, il contributo della missione eXTP, che ha come obiettivo primario il timing ad alta sensibilità, e dei telescopi Cherenkov (come MAGIC, con ampia partecipazione dell'INAF) di attuale generazione, che consentiranno di proseguire gli studi dei fenomeni di accrescimento e di accelerazione di particelle fino ad altissime energie in varie sorgenti astrofisiche, da binarie X e pulsar ad AGN. La missione Swift, con il suo ricco parco strumenti, sebbene attiva da più di 10 anni, rappresenterà ancora uno strumento insostituibile per la ricerca nel campo dei GRB ma anche per il crescente interesse nei confronti dei transienti di alta energia. Ricercatori dell'INAF sono inoltre coinvolti come Principal Investigators in progetti *in progress* per l'astrofisica delle alte energie quali XIPE, eASTROGAM e THESEUS.

Di particolare interesse ed attualità è la possibilità, tramite osservazioni ad alte energie, di ottenere importanti informazioni sulla natura della materia oscura andando a studiarne i possibili decadimenti in ambienti ad elevato rapporto massa/luminosità. In tal senso, la disponibilità di missioni come NuSTAR, con sensibilità ad energie più alte degli attuali telescopi X, permetterà di ottenere informazioni spettrali più complete per un'ampia gamma di sorgenti. L'osservazione di raggi cosmici nell'ambiente circum-terrestre, con strumenti tipo ISS/AMS, cercherà tracce di questi decadimenti in eventuali eccessi di anti-materia, positroni e anti-protoni. L'osservazione di eccessi di neutrini o assioni (IceCube + osservatori neutrinici, IAXO) dal centro di oggetti massivi opachi ai raggi gamma (il centro del Sole) forniranno ulteriori vincoli.

I ricercatori dell'INAF stanno dando un notevole contributo all'identificazione e ottimizzazione dei progetti primari e secondari di **questi nuovi strumenti e nuove missioni in varie bande dello spettro elettromagnetico** e con varie tecniche osservative (polarimetria X, focalizzazione e rivelazione di raggi X ad energie  $>50$  keV, ottica adattiva per alte risoluzioni angolari da Terra, osservazioni a largo campo tramite innovativi rivelatori al silicio, rivelatori per raggi gamma di bassa energia a grande area, ecc.) e dedicate a classi specifiche di sorgenti (GRB, ecc.). Gruppi di ricerca dell'INAF sono anche coinvolti in LOFAR che sta aprendo una nuova finestra all'osservazione dell'universo, alle bassissime frequenze radio, e che dovrebbe portare ad una rivoluzione della nostra comprensione dei fenomeni non termici in diversi ambiti astrofisici.

A partire dalla metà del 2018 inizierà ad essere operativo LHAASO, un esperimento multicomponente di nuova generazione che vede la partecipazione di ricercatori INAF nel monitoraggio continuo del cielo Gamma alla ricerca di sorgenti continue e transienti da 100 GeV ai PeV, aprendo per la prima volta l'intervallo di energia tra 100 e 1000 TeV all'osservazione diretta delle sorgenti di raggi cosmici di alta energia. Inoltre LHAASO consentirà lo studio dell'origine, accelerazione e propagazione dei raggi cosmici attraverso la misura dello spettro di energia, composizione chimica e anisotropia della loro componente carica.

L'INAF è altresì coinvolto nella rete EVN, nel progetto di VLBI spaziale con il satellite Radioastron, e nella preparazione per l'Event Horizon Telescope (EHT) con osservazioni radio ad altissima risoluzione spaziale e nella banda millimetrica, nonché nei progetti LAGEOS e LAGEOS II e nella collaborazione internazionale LIGO/Virgo per lo studio delle Onde Gravitazionali.



L'analisi delle Onde Gravitazionali e dei neutrini di alta energia sta entrando nella piena maturità aprendo prospettive di studio della fisica fondamentale estremamente stimolanti. La cosiddetta astronomia a "multi-messenger", dove informazioni di tipo elettromagnetico e non convergeranno nella caratterizzazione astrofisica degli oggetti studiati, appare essere uno dei settori di più promettente sviluppo nei prossimi anni e nel quale un'ampia partecipazione di scienziati del nostro ente è presente sia nel lato strumentale (NTE, VST, e LSST nel prossimo futuro) che di modellizzazione ed interpretazione teorica. In questo contesto, la flessibilità operativa di Swift, così come la continua copertura di quasi tutto il cielo a energie gamma con INTEGRAL ed AGILE, rappresentano ancora un contributo irrinunciabile.

Infine, Gaia ha inaugurato il campo d'indagine dell'Astrometria Relativistica che apre nuovi scenari epistemologici di ricerca e che necessita, parallelamente, di risorse adeguate e complementari a quelle già esistenti o previste. Ad esempio, andrà valutata tutta una nuova gamma di fenomeni astrofisici legati alla natura delle interazioni fondamentali e alla propagazione elettromagnetica nello spazio-tempo (da coniugare a quella locale, alla sorgente e all'osservatore), nonché la modellizzazione ed individuazione del segnale gravitazionale in connessione con il tracciamento inverso della controparte ottica. Ciò prevede potenziali applicazioni anche alla cosmologia.

La regione energetica più estrema ( $>10^{17}$  eV) fornisce importantissime informazioni sia nell'ambito della fisica fondamentale che dell'astrofisica particellare. L'Osservatorio Pierre Auger, con la sua tecnica osservativa ibrida, è attivo da più di 10 anni in questo ambito e con il suo upgrade, in fase di costruzione, sarà un apparato insostituibile per la ricerca nello studio delle sorgenti e della propagazione diffusiva dei raggi cosmici di altissima energia, consentendo di valutare e discriminare i diversi modelli di origine della radiazione non termica. INAF è coinvolto, tramite la sua partecipazione all'Osservatorio Pierre Auger, in collaborazioni con LIGO/Virgo (onde gravitazionali), IceCube (neutrini), Telescope Array (raggi cosmici ultra-energetici) che porteranno ulteriori contributi agli studi multi-messenger. Alle energie estreme, lo studio delle interazioni adroniche è fattibile solo attraverso misure indirette (sciame estesi atmosferici). Sono di sempre maggiore interesse gli studi su processi non standard, come l'esistenza di monopoli o la violazione dell'invarianza di Lorentz ad altissimi  $\gamma$ L (modifica delle relazioni di dispersione, modifiche alla QED, ecc.), cui scienziati INAF partecipano attivamente attraverso il loro coinvolgimento nell'Osservatorio Pierre Auger ed in particolare nel suo upgrade, previsto per i prossimi 10 anni. Infine, lo sviluppo delle tecniche radio si estende anche ad energie superiori a  $10^{17}$  eV con l'esperimento Auger-AERA, che sfrutta un sistema di antenne per misurare brevi impulsi radio emessi dagli sciame prodotti dai raggi cosmici nel range di frequenza da 30 a 80 MHz.

Strumento	Tecnica/Area	Periodo	Risultati attesi	Partecipazione italiana
<b>Strumenti operanti durante il periodo 2017-2019</b>				
<b>SRT</b>	Radio	2018-	Pulsars, radio-galassie, blazars, FRBs, GWs, transienti radio, XRBs	INAF
<b>ALMA</b>	millimetric	2017-	GRB mm afterglows e galassie ospiti; radio-galassie	ESO
<b>HST</b>	Ottico, UV, IR	2017-	Follow-up accurato di sorgenti transienti deboli e loro galassie ospiti	NASA-ESA
<b>REM</b>	Tele. robotico – imaging ottico/NIR	2017-	Follow-up transienti, monitoraggio di sorgenti	INAF

<b>VLT – FORS e XS</b>	Immagini,Spettri/ Caratterizzazione	2017-	Identificazione di sorgenti di alta energia, controparti di GRB e GW	ESO Partecipazione INAF al GTO
<b>LBT</b>	Immagini,Spettri/ Caratterizzazione	2017-	Identificazione di sorgenti di alta energia, controparti di GRB e GW	INAF con contributi altri partner LBT
<b>TNG+NOT</b>	Immagini,Spettri/ Caratterizzazione	2017-	Identificazione di sorgenti di alta energia, controparti di GRB e GW	INAF
<b>JWST</b>	Immagini,Spettri/ Caratterizzazione	2017-	Ricerca di Supernovae, galassie ospiti di GRB, statistica di AGN	NASA-ESA
<b>Chandra</b>	X-rays	2017-	Osservazioni ad alta sensibilità di sorgenti X deboli, studio di getti, surveys; Ricerca e follow-up di transienti X	NASA PI e co-I INAF di numerosi proposals
<b>XMM</b>	X-rays, UV-opt	2017-	Osservazioni ad alta sensibilità di sorgenti X deboli, studi spazialmente e temporalmente risolti, surveys; Ricerca e follow-up di transienti X	ESA Contributo INAF:Co-I EPIC, Calibrazioni, PI e co-I di numerosi proposals
<b>Swift</b>	X-rays, UV-opt	2017-	Ricerca e follow-up di transienti X e controparti ottico-UV;	NASA-UK-ASI Contributo INAF: XRT–BAT software e data analisi
<b>NuSTAR</b>	Hard X-rays	2017-	Osservazioni accurate in hard X di sorgenti di alta energia e righe di emissione nucleari in novae, SNe	NASA Partecipazione INAF a calibrazioni e data analysis SW
<b>ASTROSAT</b>	Timing e spettroscopia X	2017-	Analisi temporale e spettrale a larga banda di sorgenti galattiche ed extragalattiche	India Partecipazione INAF: analisi dati
<b>INTEGRAL</b>	Imaging e spettroscopia hard X	2017-	Ricerca, caratterizzazione e studio di sorgenti di alta energia, incluse GW e GRB	ESA Partecipazione INAF:PI IBIS e co-I di ISDC e SPI, PI e co-I INAF di numerosi proposals
<b>AGILE</b>	Astronomia gamma MeV-GeV e hard X-rays	2017-	Monitoraggio di blazars e sorgenti galattiche, TGF, GRBs, controparti e.m. GW	ASI-INAF-INFN
<b>FERMI</b>	Astronomia MeV-GeV	2017-	Studio sorgenti galattiche ed extragalattiche, studio di popolazioni, funzioni di luminosità. GRB, ricerca di dark matter	NASA-INAF-INFN Contributo INAF: analisi ed interpretazione dati, software
<b>MAGIC</b>	Astronomia TeV	2017-	Rivelazione e follow-up di sorgenti TeV, ricerca di controparti TeV di GRB e GW	INFN-INAF come parte del consorzio
<b>Strumenti futuri</b>				
<b>SKA</b>	radio	2025-	Osservazioni profonde di radiosorgenti deboli a grandissimo campo; controparti radio di transienti; pulsars	INAF come parte del consorzio
<b>ATHENA</b>	Spettroscopia X	2025-	Spettri di sorgenti di alta energia, riga del ferro, BHs, cosmologia	ESA. Partecipazione INAF:Co-I di X-IFU, working group scientifici
<b>SVOM</b>	Imaging hard X	2020-	GRB e sorgenti di alta energia	CAS (Cina)-CNES(Francia). Contributo INAF: follow-up di GRB
<b>CTA</b>	Astronomia TeV	2025-	Rivelazione e follow-up di sorgenti TeV, ricerca di controparti TeV di GRB e GW	INAF (è parte del consorzio)

<b>IXPE</b>	Satelliti per polarimetria X	2020-	Polarimetria X di sorgenti non termiche, temporalmente e spazialmente risolta	NASA, INAF
<b>EUCLID</b>	Ottico-IR	2025-	Determinazione del redshift di una quantità enorme di transienti dal radio all'X fino a $z = 2$	ESA Coinvolgimento INAF: Co-I
<b>HXMT</b>	X-ray	2017-2020	Analisi temporale e spettroscopia di sorgenti X tra 0.1-250 keV. Survey ( $E > 20$ keV)	Cina. Coinvolgimento INAF: calibrazioni, partecipazione come Co-I a diverse proposte scientifiche

### 1.3.5 Ricerca di Base nel campo delle Tecnologie Astronomiche

La ricerca in campo astronomico è stata storicamente ed è tuttora sostanzialmente ricerca di base, con essenziali ricadute culturali. Non fa eccezione la ricerca sulle tecnologie dedicate all'Astronomia, su cui INAF sin dalla sua nascita ha investito riguardevoli risorse come dimostrato dalle numerose partecipazioni, spesso con ruoli di leadership, agli strumenti citati nei paragrafi precedenti che sono fondamentali per il raggiungimento degli obiettivi scientifici e, in ultima analisi, della missione istituzionale di INAF. Tale investimento ha portato alla formazione in INAF di alte professionalità in tutti i settori della strumentazione astronomica, dalla progettazione alla realizzazione fino all'integrazione, l'ottimizzazione ed il supporto alle osservazioni astronomiche e loro analisi. La continua evoluzione nel campo dell'astronomia osservativa, sia da terra che dallo spazio, ha determinato, e determina, la necessità di costruire strumenti sempre più complessi per soddisfare le esigenze dei nuovi esperimenti, che richiedono lo sviluppo di tecnologie e materiali spesso ex novo. Grazie alla presenza di numerosi gruppi operanti nel settore tecnologico all'interno della comunità, INAF partecipa a queste nuove sfide ricoprendo il ruolo di partner fondamentale all'interno di ogni consorzio internazionale. Tali partecipazioni, non solo permettono la realizzazione di nuovi strumenti, ma in molti casi garantiscono successivamente alla comunità INAF di avere accesso al tempo osservativo garantito, fondamentale per il compimento di programmi astronomici di ampio respiro.

Ciò non di meno, l'importanza della ricerca in campo tecnologico è cresciuta anche dal punto di vista dei suoi aspetti applicativi diretti: alcuni esempi immediati sono la tempestiva osservazione di eventi di attività solare potenzialmente pericolosi per le telecomunicazioni, il monitoraggio sistematico e continuo del cielo per l'identificazione di asteroidi su orbite a rischio di collisione con la Terra, lo studio della possibilità di monitorare l'attività dei vulcani con i muoni, e lo sviluppo di metodi computazionali sofisticati, riutilizzati anche in ambiti diversi dalla ricerca astronomica.

Per queste ragioni, l'INAF porta avanti progetti di ricerca di base ed applicata nel settore delle tecnologie astronomiche, sia nei propri laboratori che in collaborazione con l'Industria Nazionale ed altri Enti di Ricerca. Questi progetti, pur orientati alla strumentazione astronomica, hanno risvolti applicativi diretti anche in altri settori, al punto che l'Istituto statutariamente ne promuove attivamente la diffusione e la valorizzazione, tramite attività volte al supporto del trasferimento tecnologico. La linea di ricerca tecnologica dell'INAF abbraccia attività estremamente multidisciplinari che spaziano dalla scienza ed ingegneria dei materiali, ai modelli matematici per il processo di immagine, allo studio della turbolenza atmosferica e la correzione dei suoi effetti nelle immagini, alla concentrazione, rivelazione ed analisi della radiazione a tutte le lunghezze d'onda.

Nel campo della Ricerca Tecnologica Applicata lo sviluppo è normalmente temperato dall'esigenza di abbattere i rischi connessi all'utilizzo di tecnologie non sufficientemente mature nella realizzazione di strumentazione astronomica innovativa. Per questa ragione, si investe in programmi di R&D, paralleli alla costruzione della strumentazione, finalizzati all'innovazione e allo sviluppo di nuove tecnologie, da sottoporre poi a collaudo per la verifica delle prestazioni e dell'affidabilità, che possano essere implementate in progetti internazionali di punta. In questo contesto è essenziale la collaborazione con l'Industria Nazionale, anche attraverso le opportunità di partnership di reti pubblico-private finanziate dalla Comunità Europea e/o dal Governo Italiano, quali la partecipazione a Distretti Tecnologici e Clusters fra Università e altri Enti di Ricerca, PMI e grandi imprese.

Nel campo della Ricerca Tecnologica di Base gli studi si concentrano sulle tecnologie, sui dispositivi e sui processi in embrione d'interesse per la strumentazione astronomica futura ma ancora non esistenti, neppure a livello prototipale. Questa ricerca si sviluppa internamente nei laboratori dell'INAF e, in molti casi, viene poi proposta all'Industria Nazionale per

l'ingegnerizzazione. Per questa attività è importante sottolineare il fondamentale ruolo della interdisciplinarietà e della collaborazione con altri Enti di Ricerca (e.g. INFN, INGV e CNR) ed Università, che permettono di mettere a fattore comune competenze, tecnologie, risorse ed infrastrutture, elementi essenziali per lo sviluppo e che, talvolta, porta fino all'invenzione di nuovi dispositivi. La Ricerca di Base (e l'attività R&D in particolare) è intrinsecamente un'attività che non "garantisce" risultati, soprattutto immediati, ma è la linfa vitale del progresso scientifico e tecnologico. La possibilità di raggiungere risultati scientifici di "breakthrough" è nella gran parte dei casi legata allo sviluppo di tecnologie che permettono di realizzare strumentazione innovativa. L'INAF investe da sempre in questo settore, in taluni casi raggiungendo l'eccellenza e la leadership europea o mondiale.

### 1.3.5.1 Strumentazione Astronomica

La produzione di risultati scientifici di eccellenza è sempre più strettamente legata alla qualità e versatilità della strumentazione astronomica, a disposizione della comunità INAF, montata su telescopi da terra e dallo spazio. Numerosi gruppi di ricercatori e tecnologi INAF collaborano a consorzi internazionali per la progettazione, la costruzione e l'integrazione di strumentazione innovativa, ricoprendo al contempo anche ruoli di management ed eventualmente di supporto all'industria italiana.

Di seguito è riportata una lista non esaustiva di strumentazione in fase di costruzione, o recentemente completata, per telescopi ottici/infrarossi ground-based:

- **HARPS-N e GIANO** (e a breve **GIARPS**), spettrografi ad alta risoluzione rispettivamente ottico e infrarosso installati al TNG;
- **SPHERE**, spettropolarimetro ad alta risoluzione operante a ESO-VLT;
- **ESPRESSO**, spettrografo ad alta risoluzione per ESO-VLT in fase di integrazione finale;
- **MOONS**, spettrografo multi oggetto per ESO-VLT in fase di costruzione;
- **FLAO**, il sistema di ottica adattiva singolo-coniugata operante a LBT;
- **ARGOS**, il sistema adattivo per la correzione del ground-layer di LBT basato su laser Rayleigh, attualmente in fase di commissioning;
- **NIRVANA**, l'imager ad alta risoluzione per il vicino infrarosso con modalità interferometrica di LBT, attualmente in fase di commissioning;
- **SHARK**, imager con capacità coronografiche per il visibile ed il vicino infrarosso di LBT in fase avanzata di design;
- **WEAVE**, spettrografo multi-oggetto per WHT (la Palma) in corso di costruzione;
- **NTE**, imager-spectrograph per il NOT (la Palma) in corso di costruzione;
- **ERIS**, imager e integral field spectrograph ad alta risoluzione spaziale per l'ESO-VLT in corso di disegno avanzato;
- **SOXS**, spettrografo per ESO-NTT recentemente selezionato da ESO per la fase A ed attualmente in fase avanzata di design;
- **ESCAPE-CorMag** (INAF istituto PI) per la base Concordia in Antartide: coronografo solare con spettropolarimetro elettro-ottico per il visibile e vicino infrarosso in corso di sviluppo.

A quanto sopra si deve aggiungere la selezione di INAF per gli studi e la realizzazione dei seguenti strumenti e componenti per **E-ELT**:

- **MAORY** (INAF istituto PI), modulo di ottica adattiva multi-coniugata di prima luce, attualmente in fase realizzativa (fase B);



- **HIRES** (INAF istituto PI), spettrografo multibanda ad alta risoluzione spettrale;
- **MICADO**, l'imager vicino infrarosso ad alta risoluzione di prima luce;
- Test ottici dello specchio adattivo **M4** del telescopio;

Nell'ambito del progetto **CTA** ovvero la realizzazione di un grande osservatorio da terra nella banda delle altissime energie (TeV), l'Italia sta dando un importante contributo attraverso il progetto **ASTRI**. Iniziato come progetto bandiera MIUR, **ASTRI** ha realizzato un prototipo end to end di telescopio della classe SST di **CTA** che in questo momento è in fase di test all'osservatorio di Serra La Nave. Grazie ai nuovi fondi "Astronomia Industriale" ottenuti dal **MISE** il progetto è entrato in una nuova fase che porterà all'installazione al sito sud di **CTA** di un array di 15 telescopi che costituiranno il primo seme dell'osservatorio **CTA**.

**INAF** ha partecipato allo sviluppo tecnologico di **SKA** fin dall'inizio del progetto con la partecipazione al programma **SKADS** (Square Kilometer Array Design Study) nell'ambito del programma quadro FP6. La Commissione europea ha riconosciuto al progetto Square Kilometer Array lo status di "Landmark Project": uno dei più importanti su cui puntare nel prossimo futuro. Lo ha inserito nella Roadmap 2016 pubblicata nell'ambito dello European Strategy Forum on Research Infrastructures (ESFRI). Attualmente **INAF** è membro di vari consorzi **SKA** (central signal processing, dish, low frequency aperture array, telescope manager). **INAF** sta realizzando dimostratori di small aperture arrays, Medicina Array Demonstrator (**MAD**) e Sardinia Array Demonstrator (**SAD**) basati su antenne Vivaldi, per poter acquisire esperienza e tecnologie per una possibile applicazione al low frequency aperture array della parte a bassa frequenza di **SKA** (**SKA-LOW1**). Inoltre **INAF** è fortemente coinvolta nel dimostratore **AAVS1** situato nel deserto Australiano del Murchison Radio Observatory (**MRO**), sito selezionato che ospiterà **SKA-LOW**. Per la verifica di questi radiotelescopi, **INAF** ha sviluppato un sistema basato su un drone (**UAV**) dedicato alle misure per la caratterizzazione e la calibrazione in situ.

Inoltre **INAF** ha partecipato attivamente alle fasi di progettazione e sviluppo tecnologico del progetto European Solar Telescope (**EST**), la più grande facility europea dedicata allo studio ed al monitoraggio del Sole. Con l'inserimento nella Roadmap di ESFRI, **EST** è stato riconosciuto come infrastruttura strategica per la ricerca solare europea dei prossimi decenni. Il contributo **INAF** ha riguardato il sistema di **MCAO** e wavefront sensing, strumenti di piano focale (interferometri Fabry-Perot, broad-band imager), controllo, gestione dati, sistemi di controllo termico.

La partecipazione alla prosecuzione del progetto è al momento al vaglio da parte dell'Ente. Di seguito è riportata una lista non esaustiva di satelliti e strumentazione per missioni spaziali recentemente lanciate, o prossime al lancio:

- Il satellite **GAIA** lanciato nel dicembre 2013;
- Gli strumenti **SERENA**, **SIMBIO-SYS** e **ISA** (**INAF** istituto PI) per il satellite **BEPICOLOMBO** (lancio 2018);
- Lo strumento **METIS** (**INAF** istituto PI) per il satellite **SOLAR ORBITER** (lancio 2018);
- Gli strumenti **DREAMS** e **MA\_MISS** (**INAF** istituto PI), **CASSIS** e **NOMAD** (**INAF** istituto co-PI) a bordo delle missioni del programma **EXOMARS** (lancio 2016 e 2020);
- Il satellite **CHEOPS**, prima missione di classe "S" dell'ESA (lancio 2018);
- Lo strumento **SCORE** per la missione sub-orbitale **HERSCHEL** della NASA (lancio 2017);

- Lo strumento ASPIICS per la missione ESA**Proba-3** (lancio 2019).
- Lo strumento SWIPE e il telescopio STRIP per la missione LSPE di ASI (lancio 2018).

A queste vanno aggiunte le future missioni spaziali già selezionate definitivamente da ESA o NASA:

- I sistemi di controllo e acquisizione dei dati per gli strumenti VIS e NISP a bordo del satellite **EUCLID**, seconda missione ESA di classe M (lancio 2020);
- I Gas Pixel Detectors al piano focale del satellite **IXPE**, Small Explorer NASA (lancio 2020), e tutta la catena di acquisizione e calibrazione dei dati;
- Gli strumenti JANUS e MAJIS a bordo del satellite **JUICE** (2022), prima missione ESA di classe L;
- I 26 telescopi e il sistema di controllo di tutto il payload del satellite **PLATO**, terza missione ESA di classe M (lancio 2025);
- Il sistema criogenico di controllo attivo del background per lo strumento X-IFU a bordo del satellite **ATHENA**, seconda missione ESA di classe L (lancio 2028), e la elettronica di controllo e acquisizione dati dello strumento.

### 1.3.5.2 Sviluppo di tecnologie abilitanti

Tra i progetti di ricerca di base ed applicata nelle tecnologie astronomiche, affermatasi a livello internazionale o con la prospettiva di trasformarsi, in breve, in dispositivi o processi rilevanti per la futura strumentazione astronomica, si elencano i seguenti:

**Ottiche Attive ed Adattive:** Nel campo delle Ottiche Adattive INAF, insieme all'industria italiana, ricopre da molti anni una posizione di chiara leadership mondiale. I sistemi di ottica adattiva basati su specchi deformabili ad attuazione elettro-magnetica di grandi dimensioni, correntemente installati nei più grandi telescopi al mondo, sono stati tutti derivati dallo sviluppo iniziale di INAF per il Large Binocular Telescope (LBT) e prodotti dall'industria italiana in collaborazione con INAF.

Anche nel settore dei sensori di fronte d'onda (sensori "a piramide") e nelle applicazioni più innovative dell'Ottica Adattiva quali quella multi-coniugata (MCAO) INAF e l'industria italiana sono in una posizione di assoluta preminenza a livello mondiale. Tale posizione di preminenza è stata senza dubbio resa possibile dalla partecipazione Italiana al Large Binocular Telescope (LBT), che ha fornito un formidabile laboratorio per lo sviluppo e messa a punto di queste tecnologie.

INAF e l'Industria italiana affrontano le nuove sfide europee quali EELT contribuendo allo specchio deformabile M4 ed al modulo post-focale di MCAO (MAORY) e continuando a contribuire con la propria tecnologia proprietaria alle grandi facility americane come GMT.

INAF sviluppa e collabora a sistemi adattivi singolo coniugati (SCAO) ed estremi XAO sia nel vicino infrarosso che nel visibile basati su sensori di fronte d'onda a piramide per VLT, E-ELT e TMT.

Gran parte della comunità INAF operante nel campo, recentemente riunitasi sotto il Laboratorio Nazionale di Ottica Adattiva (ADONI), continua a sviluppare e a promuovere tecniche e tecnologie innovative come ad esempio:

- l'ottica adattiva multi-coniugata (MCAO) nell'intervallo spettrale visibile per telescopi di classe 8m;
- l'ottica adattiva multi-coniugata globale (GMCAO) indirizzata ai grandi telescopi del prossimo futuro;

- lo studio dei parametri della turbolenza atmosferica e loro previsione finalizzati all'ottimizzazione delle osservazioni;
- l'implementazione di rivelatori di ultima generazione ad alta velocità di lettura ed alta efficienza;
- Ottiche adattive per polarimetria ad alta sensibilità e accuratezza.
- Wavefront sensing a grande campo.

ed applicazioni della tecnologia anche ad ambiti non convenzionali di concerto con l'industria italiana, come ad esempio la spazializzazione di sistemi adattivi e ingegnerizzazione degli stessi in ambito medico-industriale).

Nel campo dell'Ottica Attiva INAF ha parimenti un eccellente posizionamento a livello internazionale, grazie alla realizzazione dei sistemi per VST e TNG e alla partecipazione a LBT, sempre in stretta collaborazione con l'industria italiana di opto-meccanica di precisione.

**Tecnologie per le Alte Energie:** lo sviluppo di tecnologie e strumentazione per l'Astrofisica delle Alte Energie costituisce da sempre uno dei campi di eccellenza degli istituti INAF. Le linee lungo le quali, negli ultimi anni, si sono concentrati prevalentemente gli interessi della comunità tecnologica dell'INAF sono:

- Microcalorimetri a transizione di fase superconduttiva Transition Edge Sensor (TES) e relative tecnologie criogeniche;
- polarimetri ad effetto fotoelettrico basato su tecnologia Gas Pixel Detector (GPD) e polarimetri Compton nella banda X duri/gamma molli;
- Single Photon Avalanche Diode (SPAD) e SiPM sia per la rivelazione di fotoni X e gamma che per la rivelazione di luce Cherenkov;
- Large-area e multi-pixel Silicon Drift Detectors (SDD) per timing, imaging e spettroscopia nella banda 0.5-50 keV;
- calorimetri basati su nuovi cristalli scintillatori di nuova generazione come il LaBr<sub>3</sub>[Ce];
- lenti di Laue a larga banda per la focalizzazione di raggi X e gamma;
- sensori 3D di CZT/CdTe per spettroscopia, imaging e polarimetria a scattering in raggi X duri/gamma molli;
- sviluppo di ottiche multilayer per raggi X molli e duri;
- segmenti di specchi di vetro sottili (0.4 mm) formati a caldo;
- specchi con formatura a freddo;
- sviluppo di specchi polinomiali sottili (2 mm, 50 cm diametro) con risposta piatta su grande campo (1 deg).

A tali attività, prettamente legate allo sviluppo di rivelatori ed ottiche per l'Astrofisica delle Alte Energie, viene affiancato un significativo sviluppo dell'elettronica analogica e digitale (e.g. ASIC e FPGA) e dell'elettronica criogenica (e.g. SQUID), tecnologie fondamentali e complementi essenziali per un pieno sfruttamento di rivelatori innovativi.

Nel loro complesso, le linee di sviluppo perseguite hanno permesso alla comunità INAF delle Alte Energie di partecipare con ruoli importanti e spesso di primo piano alle Call for Missions dell'ESA nell'ambito del programma Cosmic Vision. In particolare, l'INAF riveste un ruolo di primo piano (co-PI-ship dello strumento principale) nella missione ATHENA, selezionata dall'ESA per lo slot L2 (lancio previsto nel 2028), con strumentazione basata sulla tecnologia dei microcalorimetri a transazione di fase superconduttiva per raggi X.

Nell'ambito delle missioni di classe media (M), l'INAF ha rivestito un ruolo di primo piano (PI-ship di missione) nella missione per raggi X studiata dall'ESA come candidata M3,

LOFT, nata dallo sviluppo tecnologico INAF-INFN delle SDD di grande area ed ora evoluta in eXTP (con la Cina) e STROBE-X (con la NASA). Anche per la call M4 l'ESA ha selezionato una missione candidata concepita nell'INAF e basata sugli sviluppi tecnologici per i polarimetri X fotoelettrici realizzati in INAF-INFN. La missione, XIPE, a PI-ship INAF, è in fase di studio presso l'ESA come candidata M4 (lancio 2025-26). La stessa tecnologia è anche alla base della missione IXPE, approvata dalla NASA come missione SMEX (lancio 2020). In questo caso l'INAF ha la responsabilità dell'intero del piano focale.

**Ottiche per Telescopi Cherenkov:** La partecipazione di INAF a CTA ed in particolare alla realizzazione degli SST (small size telescope) ha dato un particolare impulso alla ricerca nel campo delle tecnologie replicanti per la realizzazione di specchi leggeri ed a basso costo. Le tecniche di riproduzione di specchi ad alta e bassa qualità superficiale mediante replica a freddo (cold slumping) e replica a caldo (warm slumping), sviluppate nel corso di un progetto bandiera MIUR, sono oggi di punta per INAF che condivide una diversificata proprietà intellettuale con il sistema industriale italiano per avviarla anche ad applicazioni non astronomiche. Specchi prodotti con queste tecnologie sono correntemente installati in infrastrutture esistenti (MAGIC2, prototipo ASTRI) o in via di realizzazione per infrastrutture future (CTA).

**Elementi Ottici Olografici:** Gli elementi ottici olografici (HOE) si sono affermati negli ultimi anni come una tecnologia di grande valore sia per la caratterizzazione delle ottiche di forma complessa, tipiche della strumentazione astronomica, durante la fase di produzione sia come elementi disperdenti (VPHGS, Volume Phase Holographic Gratings) degli spettrografi per astronomia. INAF ha sviluppato nell'ultima decade un ruolo di assoluta leadership mondiale nel settore proponendosi con successo in percorsi innovativi quali la realizzazione di HOEs riscrivibili a base polimericafotocromica e di VPHGs a base fotopolimerica (già in uso al NOT e al Telescopio Copernico di Asiago).

I ricercatori dell'INAF, di concerto con una delle maggiori industrie aerospaziali operanti in Italia, hanno sviluppato la tecnologia denominata "Fly-Eye" che prevede una ripartizione del campo in numerosi sotto-settori ciascuno monitorato con una camera a campo largo di ottica opportuna. La tecnologia "Fly-Eye" è un programma di valore tecnologico particolarmente promettente e dalle possibili applicazioni in diverse aree strategiche del paese quali la difesa, la protezione civile oltre, naturalmente, all'osservazione astronomica.

**Sensori piezoelettrici per la misura di polveri, composti volatili e di contaminazione nello spazio.** Le microbilance a cristalli piezoelettrici utilizzate fino ad ora per tali scopi sono sempre state di produzione US, anche in caso di missioni europee. L'Agenzia Spaziale Europea ha come obiettivo la realizzazione di questi sensori con prestazioni migliorate (e.g. migliore accuratezza in temperatura) con un know - how interamente e delle facility interamente europee. Il consorzio è guidato da INAF (composto inoltre da CNR, Politecnico di Milano e Kayser Italia) ed ha la leadership europea per lo sviluppo di questo tipo di sensori.

**Sistemi di acquisizione ad alta prestazioni/canali multipli:** Nell'ambito del progetto SKA-LFAA è stato realizzato un sistema di acquisizione e back-end digitale ad alta integrazione. Il funzionamento di tali array presuppone la sintetizzazione di un beam il quale può essere 'orientato elettricamente'; A questo scopo è stata sviluppata una scheda (iTPM) ad alte prestazioni in grado di processare 32 segnali analogici nella banda 50-650 MHz provenienti

da un gruppo di 16 antenne in doppia polarizzazione e trasmetterlo tramite fibra ottica su una rete Ethernet a 40Gb/sec.

**Sistemi per misure di performances di antenne sul campo mediante l'uso di UAV:**

La caratterizzazione del diagramma d'irradiazione di antenne a bassa frequenza posizionate in configurazione schiera, direttamente sul terreno, risulta essere difficilmente praticabile con le comuni tecniche di misura. Per questo motivo si è pensato di utilizzare un Unmanned Aerial Vehicle (UAV) equipaggiato con un trasmettitore ad onda sinusoidale come sorgente di riferimento per caratterizzare le antenne nella loro reale condizione di lavoro. Il sistema di misura con UAV sarà prossimamente utilizzato per caratterizzare anche altre antenne progettate per l'utilizzo in ambito SKA dai collaboratori internazionali.

**Produzione ricevitori basati su tecnologie RF over Fiber (RFoF):**

Nel campo delle tecnologie a Radio Frequenza per SKA-LFAA, INAF ha sviluppato in collaborazione con la grande Industria Italiana una architettura ottimizzata (Design for Manufacturing) che ha portato alla progettazione di un ricevitore integrato, ad alte prestazioni e a basso costo. Sono state incluse tecnologie innovative quali il trasporto del segnale RF su fibra ottica monomodale trasmettendo due segnali RF a larga banda su un'unica fibra, con la tecnica Wavelength Division Multiplexing.

**Mitigazione interferenze radio:** i segnali radio di natura antropica disturbano pesantemente le misure radio astronomiche; con lo studio di tali fonti di disturbo e la mitigazione dei loro effetti si concorre al miglioramento delle prestazioni dei radio telescopi, soprattutto a quelle frequenze che ne sono maggiormente influenzate. Un esempio in questo settore è costituito dai filtri a microonde basati su tecnologia "high temperature superconductor" (HTS), sviluppati da INAF.

**Attuatori meccanici piezo-attuati e a base di leghe a memoria di forma:** sviluppati da INAF in collaborazione con il CNR e con alcune università Italiane, questi attuatori non motorizzati, ora in fase pre-prototipale, sono molto promettenti per applicazioni sia dallo spazio (dispositivi non motorizzati di sgancio) che da terra (compensatori di flessione termo-meccaniche).

**Tecniche di nanotecnologia applicate alla costruzione di grism al silicio, per spettroscopia ad alta risoluzione:** Nell'ambito del progetto per lo studio dell'alta risoluzione spettroscopica, INAF ha realizzato in collaborazione con l'Istituto di Fotonica e Nanotecnologie - CNR (Roma, ex IESS-CNR), un prototipo di grism al silicio, attualmente in dotazione della camera-spettrografo NICS al TNG. Lo sviluppo dei grism al silicio, per la natura stessa del materiale che ne impedisce il semplice ruling meccanico, coinvolge procedure utilizzate nella nanotecnologia, quali e-beam lithography, anisotropic wet etching.

**Tecnologie per array di piano focale e ricevitori criogenici nelle microonde:** in questa area di attività, principalmente guidata dallo studio e sviluppo di esperimenti per CMB e ricevitori a bassissimo rumore alle microonde ed onde millimetriche, gli sviluppi sono concentrati principalmente nei seguenti punti:

- Sviluppo di componenti passivi (feed, OMT, guide d'onda, polarizzatori) a larga banda e performanti ed ottimizzazione delle tecniche di fabbricazione (platelet ed elettro-formatura per le quali si stanno sviluppando con l'industria italiana competenze specifiche applicabili anche in altri campi). Per questo l'expertise



in INAF e' di eccellenza grazie soprattutto all'esperienza su Planck/LFI (30, 44, 70 GHz), ed allo sviluppo del ricevitore in Banda 2+3 per ALMA (67-116 GHz).

- Sviluppo di calibratori criogenici e tecniche di fabbricazione sulla base delle necessità scientifiche di calibrazione. Ne è un esempio il coinvolgimento nel progetto SPE/STRIP per il quale INAF ha il compito di sviluppare i calibratori per la campagna di test di strumento integrato. Inoltre nell'arco del 2017, si procederà a sviluppare un sistema automatico di calibrazione criogenico (fino a 4K) per il ricevitore in banda 2+3 di ALMA ma che potrà essere utilizzato anche per altre strumentazioni.
- Criogenia, intesa più in generale come sviluppo di tecnologie e tecniche per garantire il necessario ambiente per il raffreddamento dei ricevitori e piani focali. INAF ha la responsabilità di sviluppare, costruire ed operare il criostato di LSPE/STRIP ed è dotato di un laboratorio (Cryowaves lab) con facility criogeniche allo stato dell'arte.
- Studio, sviluppo, ottimizzazione e caratterizzazione di ottiche per l'osservazione della CMB grazie anche all'utilizzo di software avanzati e di riferimento (GRASP).
- Sviluppo di tecniche di calibrazione e testing di ricevitori criogenici a bassissimo rumore.

**Tecnologie informatiche:** Per sfruttare pienamente il ritorno scientifico delle nuove facility astronomiche (E-ELT, SKA, CTA, ALMA), è necessario che la comunità scientifica sia in grado di elaborare enormi moli di dati (i.e. centinaia di Petabyte). Le simulazioni numeriche, inoltre possono produrre un flusso di dati superiori a quelle degli strumenti. Questi aspetti fanno sì che dati prodotti dall'astrofisica ricadano nella tipologia dei Big Data. Tali Big Data sono gestibili solamente tramite una opportuna infrastruttura informatica ed un opportuno know-how all'interno della comunità INAF. In generale, nelle grandi infrastrutture osservative esiste un continuo di attività gestite da sistemi informatici: dal controllo degli strumenti alla gestione delle osservazioni, all'acquisizione, gestione, elaborazione, analisi, archiviazione, retrieval di grandi quantità di dati, generati sia da terra che dallo spazio che da modelli numerici.

- Controllo della strumentazione: in INAF è presente una importante expertise riconosciuta a livello internazionale in tecnologie informatiche relative al controllo di strumentazione, che ha permesso di ricoprire ruoli di responsabilità nei sistemi di controllo e nelle pipeline di riduzione dati per numerosi strumenti sia per osservazioni da terra che dallo spazio, tra cui: VLT (strumenti X-SHOOTER, SPHERE, FLAMES, VIMOS, ESPRESSO e MOONS), LBT (LBC), VST (OMEGACAM), TNG (GIANO), WHT, SRT, CTA, E-ELT e SKA; PLANK (strumento LFI), HRSCHHEL (SPIRE, PACS e HIFI), GAIA (ground segment), VIRTIS/Rosetta, EUCLID (VIS, NISP, ground segment), PLATO (sistema di controllo dell'intero payload), ATHENA (X-IFU), ARIEL (sistema di controllo dell'intero payload), SPICA (SAFARI) e NASA/OST (eterodina). La decisione strategica di diventare membri della collaborazione TANGO, ha posto le basi per lo sviluppo futuro di sistemi di controllo object-oriented.
- Calcolo ed elaborazione dati: INAF ricopre un ruolo chiave relativamente alle pipeline di riduzione e analisi dati provenienti di strumentazione da terra e dallo spazio, grazie alle competenze specifiche di tipo informatico sulle tecnologie per la distribuzione del calcolo e della gestione dati. INAF partecipa a tre progetti H2020 nel campo: EOSCpilot che definisce l'infrastruttura di cloud per la ricerca europea, ASTERICS che si occupa dell'infrastruttura informatica comune per i telescopi ESFRI, ed AENEAS che definisce lo sviluppo di futuri European Science Data Center per le esigenze di SKA.

- **Calcolo ad alte prestazioni:** per venire incontro alla necessità di calcolo della comunità astronomica è stato siglato l'accordo quadro INAF/CINECA per necessità di HPC di classe Tier-0 ed è stato ideato il progetto pilota CHIPP per esigenze di classe Tier-2. Tramite i progetti H2020 ExaNeSt e EuroExa, INAF sta ricoprendo un ruolo di primo piano per quanto riguarda i progetti FET-HPC, in particolare per quanto riguarda la prototipizzazione di hardware e software e lo sviluppo di codice in ambito astrofisico, per essere in grado di sfruttare le capacità fornite dall'exascale computing.
- **Gestione dati:** La comunità astronomica INAF è senz'altro all'avanguardia dell'adozione del paradigma FAIR (Findable, Accessible, Interoperable, Resuable) grazie all'uso comune degli standard dell'Osservatorio Virtuale definiti dall'IVOA (International Virtual Observatory Alliance), cui INAF dà il suo attivo contributo da una quindicina d'anni con compiti di coordinamento.
- **Astroinformatica:** L'Astroinformatica è una disciplina che lega l'astrofisica alle tecnologie informatiche e al data mining. In questo campo c'è un'importante esperienza in INAF, basata su gruppi che svolgono ricerca su data mining e statistica, e che hanno messo a disposizione della comunità i relativi strumenti e servizi. Questi servizi si possono utilizzare in un'ampia varietà di contesti scientifici, soprattutto quando metodi più tradizionali risultano meno efficienti.

### 1.3.5.2 Gli obiettivi generali e strategici da conseguire nel triennio

I progetti e la strumentazione in ambito astronomico in fase di realizzazione a conduzione e/o partecipazione INAF in fase design, sviluppo o di realizzazione per il triennio 2017-2019 sono riportati nelle seguenti tabelle.

Strumento/ Progetto	Area Scientifica/ Tecnica Osservativa	Facility di Riferimento	Ruolo INAF	Partner Industriale	Milestones 2017-2019
<b>ESPRESSO</b>	Spettroscopia VIS/NIR ad alta risoluzione	ESO-VLT	Istituto CoPI	ALCA TECHNOLOGY S.r.l., LABORATORIO OTTICO COLOMBO, DELL'ORO MAURO S.r.L.	Commissioning 2017 Delivery 2018
<b>ERIS</b>	Imaging NIR/ MIR ad alta risoluzione spaziale	ESO-VLT	Istituto CoI		FDR 2017
<b>MOONS</b>	Spettroscopia multi-oggetto VIS/NIR a media/alta risoluzione	ESO-VLT			
<b>SOXS</b>	Spettroscopia VIS/NIR a media risoluzione	ESO-NTT	Istituto PI		2017 PDR
<b>MAORY</b>	Modulo adattivo MCAO di prima luce	ESO-EELT	Istituto PI		Fase B 2018 PDR
<b>MICADO</b>	Imaging NIR ad alta risoluzione spaziale di prima luce	ESO-EELT	Istituto CoI		Fase B
<b>HIRES</b>	Spettroscopia VIS/NIR ad alta risoluzione	ESO-EELT	Istituto PI		Fase A
<b>M4 E-ELT</b>	Specchio adattivo del treno ottico di E-ELT	ESO-EELT	Subcontractor	MICROGATE S.p.A.	2018 FDR
<b>ARGOS</b>	Correzione adattiva per il ground layer basato su laser Rayleigh	LBT	Istituto CoI		Commissioning
<b>LINC-NIRVANA</b>	Imaging NIR ad alta risoluzione spaziale con potenziale capacità interferometrica	LBT	Istituto CoI		Commissioning
<b>SHARK VIS</b>	Imaging coronografico VIS ad	LBT	Istituto PI		FDR

	alta risoluzione spaziale				
<b>SHARK NIR</b>	Imaging coronografico NIR ad alta risoluzione spaziale	LBT	Istituto PI		FDR
<b>GIARPS</b>	Spettroscopia VIS/NIR ad alta risoluzione	TNG	Istituto PI	N/A	Commissioning
<b>ALTA</b>	Previsione di turbolenza atmosferica e parametri atmosferici per astronomia dal suolo	LBT	Istituto PI	N/A	Durata progetto 2015-2020
<b>WEAVE</b>	Spettroscopia multi-oggetto VIS a media/alta risoluzione	WHT			Commissioning 03/2018 Prima Luce
<b>NTE</b>	Imaging/ Spettroscopia VIS/NIR	NOT			
<b>LSPE/STRIP</b>	Osservazione del fondo cosmico e foregrounds alle microonde e onde millimetriche	TEIDE	System Engineer, AIV manager, WP leader		Installazione 2018 Campagna Osservativa 2018-2019
<b>Q band Multifeed</b>	Ricevitore Multibeam banda Q	SRT			Commissioning 2019
<b>S band Multifeed</b>	Ricevitore Multibeam banda S	SRT			Commissioning 2018 Installazione 2018/19
<b>C band Monofeed</b>	Ricevitore monofeed banda C (4.2-5.6 GHz)	SRT			Commissioning 2019
<b>SARDARA</b>	Spettroscopia radio larga banda multi beam	SRT			Commissioning modalità multi beam
<b>ESCAPE- CorMag</b>	Coronografo solare VIS/NIR spettro polarimetrico	Dome C	Istituto PI		
<b>Ku band receiver</b>	Ricevitore 12 – 18 GHz	Medicina RT			commissioning 2019
<b>SXL receiver</b>	Ricevitore bande L , S e X per VLBI	Noto RT			Commissioning 2018
<b>CTA</b>	Telescopi della classe SST per il sito sud. Fornitura specchi telescopi della classe MST. Software di controllo dell'Array CTA.Data Management.	CTA	Istituto PI Partecipazione WP leader	MEDIALARIO FLABEG FE EIE GALBIATI	Produzione di un mini-array di 9 precursori SST per il sito sud di CTA
<b>SKA-DC</b>	Consorzio Dish (SKADC)	SKA	Leader per Local Monitor and Control (LMC)		
<b>SKA - CSP</b>	Consorzio Central Signal Processor	SKA	Attività di Correlator and Central Beam Former, Non-Imaging processor e Local Monitor and Control.		
<b>SKA-TMC</b>	Consorzio Telescope Manager	SKA	Local Monitoring and Control. System Engineering e Observation Management.		
<b>SKA-AADC</b>	Consorzio Aperture Array Design	SKA	Leader per il Receiver		
<b>EST</b>	Osservatorio Solare	EST	Partecipazione	N/A	Installazione 2026

Strumento/ Progetto	Area Scientifica/ Tecnica Osservativa	Agenzia Missione	Ruolo INAF	Partner Industriale	Milestones 2017-2019
<b>SERENA</b>	Sensore per atomi neutri e ioni	ESA BEPI COLOMBO	Istituto PI		Lancio 2018
<b>SIMBIO-SYS</b>	Immagini alta risoluzione, immagini stereo, spettroscopia Vis-NIR	ESA BEPI COLOMBO	Istituto PI	LEONARDO S.p.A.	Lancio 2018
<b>ISA</b>	Misura del campo gravitazionale di Mercurio,	ESA BEPI COLOMBO	Istituto PI	THALES ALENIA SPACE	Lancio 2018

	accelerazioni non gravitazionali, Accelerometro a tre assi ad elevata sensibilità				
<b>METIS</b>	Coronografo	ESA SOLAR ORBITER	Istituto PI		Lancio 2018
<b>MA MISS</b>	Spettrometro IR miniaturizzato studi sotto la superficie	ESA EXOMARS	Istituto PI	LEONARDO S.p.A.	Lancio 2020
<b>SCORE</b>		NASA HERSCHEL			
<b>CHEOPS</b>	Fotometria di altissima precisione per caratterizzazione di pianeti extrasolari	ESA	Responsabile progettazione realizzazione installazione elementi ottici	LEONARDO S.p.A.	Lancio 2018
<b>ASPIICS</b>		ESA PROBA-3			Lancio 2019
<b>EUCLID</b>	Cosmologia, studio materia ed energia oscura/Imaging a grande campo di vista nel visibile (strumento VIS); spettro-fotometria nel vicino IR (strumento NISP)	ESA	Progettazione e realizzazione dei sistemi di controllo e di acquisizione dati di VIS e NISP. Responsabilità dello Science Ground Segment	OHB Italia	Lancio 2020
<b>IXPE</b>	Studio della polarizzazione lineare nella banda X in Astronomia	NASA	Istituto italiano PI Tecnologia abilitante e Responsabilità Piano Focale	OHB CGS	Lancio 2020
<b>PLATO</b>	Fotometria di altissima precisione a grande campo di vista per la scoperta e caratterizzazione di pianeti extrasolari	ESA	Responsabile progettazione realizzazione delle 26 TOUs e P/L ICU	LEONARDO S.p.A., MEDIALARIO THALES ALENIA SPACE KAYSER ITALIA	Lancio 2025 PDR 2018
<b>JANUS</b>	Imager VIS per la mappatura dei satelliti di Giove	ESA JUICE	Istituto PI	LEONARDO S.p.A.	Lancio 2022
<b>MAJIS</b>	Spettrometro IR	ESA JUICE	Istituto CoPI	LEONARDO S.p.A.	Lancio 2022
<b>X-IFU/ATHENA</b>	Alte energie/Anticoincidenza Criogenica basata su TES e relativa elettronica di readout; Filtri termici criogenici per raggi-X	ESA	Istituto CoPI	N/A	Adozione 2020 Lancio 2028
<b>WFI/ATHENA</b>	Alte energie / X-ray-Optical filters	ESA	Istituto CoI	N/A	Adozione 2020 Lancio 2028
<b>TOMOX</b>	Planetologia: tomografia a raggi X per determinare composizione ed eta' in situ.	ASI	WP leader		

Le attività di ricerca e sviluppo in ambito tecnologico a conduzione e/o partecipazione INAF per il triennio 2017-2019 sono riportate nella seguente tabella.

Attività R&D	Obiettivi	Ente finanziatore / Progetto di riferimento	Ruolo INAF	Milestones 2017-2019
<b>LCI Range finder</b>	Sviluppo range finder in interferometria a bassa coerenza per applicazioni in metrologia per telescopi (sia nel radio che nel visibile) e strumentazione astronomica	INAF- UIT	PI	Sviluppo prototipo dimostratore entro il 2019
<b>Space debris</b>	Sviluppo telescopio per monitoraggio space-debris	TELESPAZIO / ESA	Consulente	Sviluppo prototipo dimostratore entro il 2018
<b>PixDD</b>	Prototipo 4x4 Multi-pixel (500 µm pitch), single-	TECNO-INAF /	PI	Ottobre 2017:

	photon, Silicon Drift Detector per raggi X di bassa energia (0.5-10 keV) per spectral-timing ad alto throughput	eXTP (CNSA)		Relazione e rendicontazione finale
<b>COMPASS</b>	Prototipo di polarimetro Compton basato su cristalli scintillatori di nuova generazione e lettura SiPM, per la banda hard X	TECNO-INAF	PI	Ottobre 2017: Relazione e rendicontazione finale
<b>XGS</b>	Prototipo rivelatore a larga banda (1 keV – 10 MeV) basato su cristalli scintillatori e lettura con SDD per la rivelazione e misura spettrale di gamma-ray bursts e transienti di alta energia.	TECNO-INAF / THESEUS (ESA)	PI	Ottobre 2017: Relazione e rendicontazione finale
<b>HERMES</b>	Prototipo rivelatore hard X / gamma (20 keV-10 MeV) per micro e mini satelliti: studio ad alta risoluzione della struttura temporale di gamma ray bursts per localizzazione e studi di quantum-gravity. Rivelatori a scintillazione con lettura basata su SDD e/o SiPM.	TECNO-ASI / HERMES	CoI, Responsabilità sviluppo detector	Maggio 2017-18: Riunioni Avanzamento Febbraio 2019: Riunione Finale
<b>PIXDD</b>	Sistema integrato 32x32 Multi-pixel (300 µm pitch), single-photon, Silicon Drift Detector per raggi X di bassa energia (0.5-10 keV) – read-out ASIC per per spectral-timing ad alto throughput	TECNO-ASI / eXTP (CNSA), EP (CAS)	PI	Marzo 2017: Riunione Avanzamento Marzo 2018: Riunione Finale
<b>Space Debris</b>	Tecniche radar per monitoraggio detriti spaziali	ASI/Horizon2020	PI	Kickoff 2017
<b>PHAROS2</b>	Upgrade del Phased Array Feed criogenico PHAROS operante in banda C (4-8 GHz) con 24 antenne attive a singola polarizzazione.	SKA Italia SKA	CoI	Review 2017 Installazione/Test 2018
<b>SAD</b>	Sardinia aperture Array demonstrator (SKA-LOW)	LR7/2007 Sardegna /TECNO	PI	Commissioning Test calibrazione. Basic Science.
<b>IALMA</b>	Ricevitore ALMA 67-116 GHz	Premiale MIUR 2013	PI	Relizzazione ricevitore 2+3 ALAMA
<b>Geant4</b>	Sviluppo di un simulatore user-friendly basato su Geant4	ESA CTP/AREMBES	PI	Presentazione finale risultati 2018
<b>Micro calorimetri TES</b>	Analisi criticita' su sviluppo anticoincidenza criogenica basata su TES	ESA CTP/optimization of european TES array	WP leader	Presentazione finale risultati 2019
<b>Micro calorimetri TES</b>	Soluzioni per lo sviluppo di anticoincidenza criogenica basata su TES oltre la baseline di ATHENA	UE H-2020/AHEAD	PI	Presentazione finale risultati 2019
<b>NTD Ge Micro-calorimeter Detectors</b>	Test di rivelatore di raggi X a microcalorimetro per lancio su pallone stratosferico	ASI	PI	
<b>High performance 3D Cadmium-Zinc-Telluride Spectro-imager for X and gamma-ray applications</b>	Prototipo innovativo di rivelatore segmentato 3D basato su CdZnTe orientato a rivelatore di piano focale per lenti di Laue.	INFN		Termine 2019
<b>Athena: large area high-performance optical filter for X-ray instrumentation</b>	Sviluppo e caratterizzazione di prototipi di filtri sottili di grande area per gli strumenti scientifici a bordo della missione ATHENA	ESA, HS FOILS	Subcontrattore con Università degli Studi di Palermo	Termine 2019
<b>OPTICON</b>	Sviluppo di VPHG di grandi dimensioni e loro produzione a livello industriale; sviluppo di specchi deformabili a controllo ottico (PCDM)	EU Horizon 2020	PI JRA7	Standardizzazione della produzione di VPHG; definizione di nuovi materiali per olografia; specchi PCDM
<b>Innovative tools for high res spectroscopy based on VPHGs</b>	Sviluppo di nuove potenzialità della tecnologia VPHG	TECNO INAF	PI	Ottobre 2017: Relazione finale
<b>IRIDE</b>	Sviluppo di elementi disperdenti di tipo VPHG , da	Regione Lombardia	Co-PI (progetto)	Prototipo di VPHG



	integrare in payload di analisi Multi ed Iperspettrale		a partecipazione industriale)	multispettrale; test e qualifica (termine:2017)
<b>COSMITO</b>	Sviluppo di sistemi di osservazione multi spettrali di nuova generazione con tecnologia compressive sampling	Regione Lombardia	Co-PI (progetto a partecipazione industriale)	Realizzazione di prototipo per VIS-NIR imaging multispettrale.

Al fine di mantenere lo stato di eccellenza in ambito strumentale e di incrementare la capacità di competere a livello internazionale, le professionalità all'interno di INAF devono essere supportate tramite percorsi formativi adeguati e/o assunzioni mirate, adeguamento delle infrastrutture e strumentazione di supporto e acquisizione di licenze relative a software specialistico. In particolare, le professionalità necessarie sono figure multidisciplinari nell'ambito di: progettazione e analisi ottica, meccanica e termica; esperti di ottica in ambiente spaziale; elettronici orientati ai rivelatori; esperti in rivelatori criogenici, esperti di integrazione di strumentazione e di verifica delle prestazioni, anche in ambiente criogenico; esperti di software con competenze specifiche sulle tecnologie per la distribuzione del calcolo e della gestione dati, sulle tecnologie real time per controllo strumentazione, sulle architetture di calcolo ad alte prestazioni e sui sistemi informativi, anche orientati ai big data. Non ultimo, visto l'incremento delle complessità dei recenti progetti, figure professionali per i ruoli di Project Managers, System Engineers, Project Controllers e Product Assurance Managers ed un adeguato supporto amministrativo e giuridico per l'acquisizione di beni e servizi.