

Visione strategica dell'INAF

introduzione

L'astronomia è probabilmente la più antica delle scienze naturali.

Nel corso della civiltà umana, il cielo ha fornito i mezzi per misurare il tempo e il susseguirsi delle stagioni, per guidare il viaggiatore, per comprendere il nostro posto nell'Universo.

La conoscenza astronomica fu notevolmente avanzata a Babilonia, Egitto e Cina migliaia di anni fa e si sviluppò attraverso i secoli con Aristarco e Tolomeo in Grecia e Copernico, Keplero e Galileo in Europa. Fu in Italia con Galileo Galilei all'inizio del XVII secolo che Astronomia e Fisica si unirono, ricavando predizioni matematiche dei moti celesti da presunte cause fisiche.

L'astronomia ha guidato la rivoluzione scientifica, che continua ancora oggi e ha rivelato che il cielo visibile ad occhio nudo è in realtà solo un accenno di un cosmo vasto e complesso, all'interno del quale il nostro pianeta natale è solo un punto azzurro pallido.

La nostra attuale conoscenza dell'Universo si estende da uno stato di densità e temperatura estremamente elevate, il cosiddetto *Big Bang*, 13,7 miliardi di anni fa, all'attuale stato di espansione accelerata, spinta da una forza oscura chiamata *energia oscura*. Sappiamo che la maggior parte della materia nell'Universo è "oscura" e non fatta di barioni (protoni e neutroni) che compongono la materia ordinaria.

Abbiamo esplorato il cosmo, non solo osservando attraverso la minuscola finestra visibile utilizzata dai nostri occhi, ma anche sfruttando quattro canali indipendenti di informazione: lo spettro elettromagnetico, dalle onde radio con lunghezze d'onda superiori a decine di metri ai raggi gamma con lunghezze d'onda 1.000 volte più piccolo di un protone, raggi cosmici, neutrini e onde gravitazionali.

Le informazioni sui costituenti del mezzo interstellare e interplanetario ambientale sono state ottenute raccogliendo e analizzando chimicamente granelli di polvere interstellare che penetrano nel Sistema Solare e campioni restituiti sulla Terra da asteroidi e meteoriti.

Scoperte drammatiche sono avvenute grazie all'applicazione della tecnologia moderna e dell'ingegno umano all'antico mestiere di osservare il cielo. Nel prossimo decennio si profilano grandi sfide che richiedono lo sviluppo di nuove teorie fondamentali. Le osservazioni e le simulazioni al computer sono componenti necessarie, ma per completare il percorso dalla scoperta alla comprensione, i teorici dovranno esercitare liberamente la loro immaginazione.

Per ottimizzare lo sfruttamento delle limitate risorse disponibili è imperativo che la comunità italiana sviluppi una visione unitaria dell'Astrofisica, ne identifichi la probabile evoluzione e stabilisca delle priorità.

A tal fine, l'Istituto Nazionale di Astrofisica (INAF), che ha il compito di promuovere e coordinare le attività di ricerca astrofisica in collaborazione con le Università e altri Istituti nazionali e internazionali, ha elaborato la sua Visione Strategica (SV) per il prossimo decennio 2020 -2029. La predisposizione di tale piano è stata affidata al Consiglio Scientifico (CS) dell'INAF, che ha redatto la SV tra maggio 2016 e maggio 2019, sulla base di un'ampia e intensiva interazione con la comunità astronomica italiana, mediata dalle Macroaree Scientifiche (MA , Macroaree Scientifiche).

Sintesi

L'Istituto Nazionale di Astrofisica (INAF) ha il compito di promuovere e coordinare le attività di ricerca astrofisica in collaborazione con le Università e altri Istituti nazionali e internazionali. In questo Documento di Visione Strategica, il Consiglio Scientifico dell'INAF, in stretta collaborazione con l'intera comunità astronomica italiana attraverso i Comitati Scientifici delle "Macro-aree", ha individuato gli ambiti scientifici e tecnologici più promettenti nei quali l'INAF ha e/o dovrebbe avere un ruolo di primo piano posizione nel prossimo decennio 2020-2029.

Ciò è stato fatto identificando innanzitutto le principali "domande chiave" attuali in astrofisica, nonché i metodi migliori per affrontarle. Questioni e modalità sono state poi riorganizzate in funzione dei progetti esistenti e futuri, sintetizzati nell'Appendice 1.1, fornendo un elenco non esaustivo delle attività, comprese le tecnologie abilitanti, in cui l'INAF è o dovrebbe essere coinvolta. Dall'analisi di questo materiale sono emersi alcuni impegni ad alta priorità e alcune importanti raccomandazioni ritenute particolarmente importanti per lo sviluppo futuro dell'Astrofisica italiana.

Questi non sono intesi come gli unici obiettivi che l'INAF dovrebbe perseguire in futuro, ma come obiettivi di particolare rilevanza e da non perdere, insieme ad altre importanti attività, progetti di piccola scala estremamente innovativi ad alto rischio ad alto guadagno e incessanti scoperte impreviste che fanno della scienza una disciplina sorprendente ed emozionante.

Impegni prioritari

Partecipazione alle grandi strutture internazionali del futuro

Alcune delle maggiori strutture internazionali del futuro, che hanno già una significativa partecipazione italiana, sono considerate prioritarie per l'investimento scientifico e tecnologico dell'INAF. Sono: SKA, ELT, Euclide, Atena e CTA.

Al fine di garantire un adeguato ritorno scientifico, è obbligatorio supportare e ampliare le comunità coinvolte in tutti gli aspetti rilevanti, dallo sviluppo tecnologico, all'analisi/archiviazione dei dati e all'interpretazione teorica (comprese le simulazioni al computer).

Ciò richiede una forte partecipazione a programmi/strutture "precursori", con l'obiettivo specifico e mirato di sviluppare le competenze e raccogliere i dati accessori necessari per massimizzare il ritorno scientifico delle strutture prioritarie.

In particolare, per quanto riguarda l'ELT, è necessario sostenere fortemente ed ampliare il ruolo dell'INAF in ESO, puntando ad un ruolo di leadership paragonabile ad altre grandi nazioni europee, con un focus particolare per lo sviluppo di strumentazione avanzata.

L'esplorazione del Sistema Solare

Gli ultimi anni hanno visto un incredibile balzo in avanti nella nostra conoscenza dei corpi che formano il nostro sistema e dell'interazione tra questi corpi, il Sole e lo spazio interplanetario, e l'elenco dei prossimi decenni dei bersagli da esplorare (Urano, Nettuno, ...) sarà probabilmente completato. In un futuro più prossimo vedremo invece un'esplorazione in profondità di corpi come Mercurio, Marte, i satelliti di Giove e il Sole, effettuata dalle missioni BepiColombo, Exomars, Juice e Solar Orbiter. Molti dei ricercatori italiani coinvolti in queste missioni, spesso con ruoli chiave e di leadership, appartengono all'INAF. L'INAF dovrebbe incoraggiare e supportare questi ricercatori nei loro sforzi per assumere un ruolo di leadership sia nelle fasi pre-lancio che in quelle post-lancio

fasi, fornendo adeguate risorse al laboratorio e attività teoriche necessarie per uno sfruttamento ottimale dei dati.

La vita oltre il nostro sistema solare

L'astrofisica esoplanetaria è oggi una priorità chiave al centro delle agende scientifiche (e degli esercizi di roadmapping) di tutte le principali istituzioni astronomiche e delle agenzie spaziali, con un ampio portafoglio multi-tecnico di programmi terrestri e spaziali in un'ampia gamma di lunghezze d'onda.

L'INAF solo di recente è diventato un attore importante nell'arena degli esopianeti, grazie a una scelta strategica di investimenti, alla formazione dei ricercatori all'inizio della carriera e al coinvolgimento scientifico e tecnologico in importanti programmi terrestri e spaziali.

La frontiera del campo nei prossimi 10-15 anni sarà incentrata sulla caratterizzazione completa (tassi di occorrenza, composizione interna e atmosferica) di esopianeti nel vicinato solare, con l'obiettivo finale di identificare biomarcatori nelle atmosfere di pianeti temperati di tipo terrestre intorno a stelle simili al Sole.

È della massima priorità per l'INAF non solo consolidare la sua partecipazione, ma produrre sforzi crescenti (a tutti i livelli) per garantire ruoli chiave e di leadership nei progetti all'avanguardia nelle scienze esoplanetarie volti al raggiungimento di obiettivi con una profonda conoscenza scientifica, intellettuale, e rilevanza culturale.

Astrofisica multimessaggero

Grazie all'eredità della comunità italiana che lavora sui GRB e sulle missioni ad alta energia, INAF sta giocando un ruolo di primo piano in questo campo che diventerà sempre più importante nel prossimo decennio.

Mantenere un ruolo internazionale di alto profilo nell'astrofisica multi-messaggero è una priorità assoluta che richiede un livello crescente di sforzi e risorse.

Ciò deve essere fatto, in particolare, supportando gli aspetti più rilevanti per l'esperienza degli scienziati INAF (es. follow-up elettromagnetico, astrofisica teorica, sviluppo di nuove strutture/satelliti per le osservazioni em) in stretta collaborazione con altri importanti attori a livello nazionale (INFN, ASI, Gruppi Universitari) e internazionale (ESA, ESO).

Adeguate risorse devono essere destinate a supportare le attività tecnologiche, osservative e teoriche dei gruppi più promettenti al fine di mantenere una presenza rilevante in un campo così competitivo.

Fisica (astro) fondamentale

Si prevede che nel prossimo decennio verranno compiuti progressi decisivi verso la risoluzione dei problemi della Materia Oscura e dell'Energia Oscura. L'astrofisica è nella posizione unica di raccogliere informazioni con molti tipi di sonde cosmologiche su un'ampia gamma di scale e tempi cosmici, il che è obbligatorio per separare in modo netto le vere proprietà dell'Universo dalle imperfezioni nelle nostre osservazioni. La sfida ora è trasformare le nostre conoscenze in misurazioni di precisione, ad esempio determinando "l'equazione di stato" per l'energia oscura e la sua variazione nel tempo con una precisione migliore di qualche punto percentuale.

Le osservazioni astrofisiche forniranno indizi fondamentali su possibili estensioni oltre il Modello Standard (es. le proprietà dei neutrini, l'eventuale violazione delle leggi e delle simmetrie della fisica fondamentale, la variazione delle costanti fisiche, la scala energetica delle interazioni fondamentali). Questi studi, strettamente interdisciplinari, hanno una profonda sinergia con la ricerca diretta della materia oscura e di altre particelle effettuata nei laboratori a terra, e necessitano di risorse adeguate e di grandi partnership (vedi anche sotto: la quarta Raccomandazione Generale).

Raccomandazioni generali

Supporto all'Astrofisica Teorica

Il ruolo dei teorici è fondamentale per estrarre la conoscenza definitiva dalle strutture più avanzate, per progettarne di nuove e per interconnettere campi diversi. I teorici sono diventati sempre più coinvolti con gli attuali set di dati, progettando nuove strutture, missioni e approcci computazionali per simulare fenomeni astrofisici. Ogni partecipazione a un nuovo progetto o struttura dovrebbe coinvolgere un numero commisurato di teorici e astrofisici interpretativi per garantire un adeguato ritorno scientifico alla comunità italiana.

L'INAF dovrebbe istituire un programma specifico a sostegno dell'Astrofisica Teorica.

Incoraggiare il coordinamento e la creazione di grandi gruppi

L'INAF dovrebbe promuovere il coordinamento dei singoli ricercatori e delle comunità che operano in campi simili/omogenei in cui la nostra comunità svolge un ruolo già consolidato a livello internazionale al fine di ottimizzare le risorse e formare gruppi di "massa critica".

Considerati i tempi di sviluppo/costruzione molto lunghi, dovrebbero essere definite adeguate "roadmap" per mantenere le competenze scientifiche dei gruppi già affermati a livello internazionale per periodi così lunghi e per formare/formare gli scienziati che progetteranno, costruire e sfruttare le grandi strutture/missioni del futuro. Ciò richiede un equilibrio adeguato e attentamente calibrato tra progetti a lungo e breve termine.

Sostieni i progetti di "Ricerca di base".

Oltre ai grandi progetti sopra descritti, è fondamentale sostenere progetti scientifici e tecnologici di piccole dimensioni ma con un importante ritorno scientifico, così come la ricerca guidata dalla curiosità. Ciò deve avvenire con l'emissione regolare (cioè con una tempistica ben definita e nota, oltre che con regole consolidate) di bandi competitivi per progetti di ricerca scientifica e tecnologica.

Promuovere collaborazioni interdisciplinari

Diverse attività importanti (come, ad esempio, la ricerca sul sistema solare e l'astrofisica dei sistemi planetari) hanno uno straordinario potenziale per promuovere attività interdisciplinari all'interno dell'Istituto e per promuovere l'interdipendenza tra l'astronomia e altre discipline, come chimica, geologia, biologia e informatica scienza.

È importante promuovere e sviluppare sforzi congiunti volti a migliorare la ricerca interdisciplinare e convergente in astronomia e astrofisica sia all'interno dell'INAF (ovvero tra i diversi Gruppi di ricerca nazionali) che con i colleghi di altre organizzazioni e laboratori.

Migliorare la collaborazione con l'ASI

Le missioni spaziali sono una componente fondamentale della moderna ricerca in astrofisica e molti ricercatori INAF sono coinvolti a vari livelli nella maggior parte delle missioni spaziali di interesse astrofisico. I ricercatori dell'INAF beneficerebbero di una più stretta collaborazione tra l'INAF e l'Agenzia Spaziale Italiana, basata sulle rispettive specificità/complementarietà e seguendo regole chiare e trasparenti. L'INAF dovrebbe essere coinvolta in tutte le fasi della partecipazione dei suoi ricercatori ad una missione spaziale e partecipare al processo di approvazione di una proposta per la partecipazione scientifica ad un team di missione e/o alla costruzione di uno strumento, per poi contribuire con l'ASI in dare supporto al team coinvolto.

Dare un ruolo efficace ai “Comitati Scientifici Nazionali”

Per il raggiungimento dei suddetti obiettivi l'azione dei nuovi “Comitati Scientifici Nazionali” sarà strumentale e dovrà essere sostenuta con ogni mezzo possibile, favorendo un dibattito scientifico e tecnologico di alto livello e investendoli di reali poteri di programmazione e monitoraggio , avvalendosi delle migliori pratiche di altre istituzioni come l'INFN, con l'obiettivo di sviluppare ulteriormente il livello culturale astrofisico nella comunità italiana.

Sommario

introduzione	1
Executive Summary	2
Acronimi Le principali	10
sfide dell'astrofisica nel prossimo decennio 1. Fisica solare, interplanetaria e magnetosferica 1.1 Generazione di campi magnetici e ruolo nell'atmosfera solare	12
1.2 Il vento solare in espansione e il mezzo interplanetario 1.3 Scienze meteorologiche spaziali	12
1.4 Attività scientifiche per il prossimo decennio	14
2. Il sistema solare	15
2.1 La formazione e l'evoluzione del Sistema Solare 2.2 Studio del campo gravitazionale dei corpi planetari 2.3	17
Mercurio, Venere, Marte e la Luna 2.4 I pianeti esterni e loro satelliti 2.5 I corpi primitivi: comete, asteroidi, TNO e meteoroidi 2.6 Astrobiologia: il Solare Sistema come laboratorio per studiare le condizioni che danno origine all'emergere della vita 31	22
2.7 Attività scientifiche per il prossimo decennio	22
3. Sistemi planetari extrasolari	23
3.1 Architettura e dinamica dei sistemi planetari in funzione di massa, raggio e separazione orbitale 34	24
3.2 Chimica e dinamica delle atmosfere esoplanetarie 3.3	26
Dipendenza dalle stelle ospiti e dalle proprietà dell'ambiente stellare 3.4	28
Astrobiologia: condizioni e processi evolutivi che danno origine all'emergere della vita 42	31
4. Formazione stellare (locale e globale)	32
4.1 Proprietà globali di formazione stellare nella Via Lattea 4.2	34
Fisica dei singoli eventi di formazione stellare 4.3 Dischi protoplanetari: condizioni iniziali per la formazione dei pianeti	37
5. Evoluzione stellare	39
5.1 Portare modelli stellari alla potenza successiva	42
6. Astrofisica relativistica e astroparticelle 6.1	45
Probing Buchi neri e oggetti compatti 6.2 Oggetti compatti binari 6.3 Onde gravitazionali da oggetti compatti binari	45

6.4 Materia in condizioni estreme	64
6.5 Fisica dell'accrescimento e dell'espulsione	65
6.6 Esplosioni radio veloci	69
6.7 Gamma Ray Burst e supernove luminose 6.8 L'origine dei raggi cosmici 7 La Via Lattea e il Gruppo Locale	69
	72
	80
7.1 La formazione e l'evoluzione delle strutture subgalattiche nella Via Lattea e nel Volume Locale.	80
8.1 L'Epoca della Reionizzazione	91
8.2 L'origine e l'evoluzione delle galassie 8.3 Censimento e distribuzione di massa/energia nelle strutture di grandi dimensioni	92
	94
9 Cosmologia e Fisica Fondamentale	98
9.1 La natura della materia oscura	99
9.2 La natura dell'Energia Oscura 9.3 Comprendere la gravità su grandi scale cosmologiche 9.4 Condizioni iniziali della Cosmologia 9.5 Interazioni e costanti fondamentali della Fisica	100
	100
	101
9.6 La scala della distanza cosmica e il dibattito costante di Hubble	101
10 Tecnologie abilitanti	105
10.1 Sistema optomeccanico per l'astronomia VIS/NIR 10.1.1 Spettrometri e dispersori ad alta efficienza 10.1.2 Sistemi optomeccanici ad ampio campo 10.1.3 Produzione e test di ottiche asferiche a forma libera e fuori asse 10.1.4 Sviluppo e ottimizzazione di sistemi coronagrafici	105
	105
	106
	107
	107
10.1.5 Tecnologie di reiezione del calore	108
10.1.6 Spettro-polarimetri	108
10.1.7 Sistemi di optomeccanica meteorologica spaziale	109
10.2 Ottica attiva e adattiva 10.2.1 Ottica attiva 10.2.2 Sistema MAORY di ottica adattiva 10.2.3 Caratterizzazione e previsione della turbolenza ottica 10.2.4 Ottica attiva per antenne radio 10.2.5 Sistemi AO privi di polarizzazione	110
	110
	111
	111
	112
	113
10.2.6 Applicazioni spaziali	113
10.3 Sistema opto-meccanico UV, X, gamma, TeV	115

10.3.1 Tecnologia dei segmenti di vetro	115
10.3.2 Tecnologie basate sui segmenti di silicio	116
10.3.3 Guscio monolitico sottile	117
10.3.4 Spin-off degli sviluppi in corso nell'ottica a raggi X in altre applicazioni scientifiche e tecnologiche	117
10.3.5 Lenti Laue a banda larga per raggi X duri e raggi gamma morbidi	117
Filtri sottili ad ampia area per rivelatori di raggi X nello spazio	117
10.4 IR Rivelatori /VIS/UV/X/	119
gamma/TeV ed elettronica di lettura	120
10.4.1 Fotomoltiplicatore al silicio (SiPM)	120
10.4.2 Moltiplicatore di foto al carburo di silicio (SiCPM) per l'applicazione di tende solari UV	120
10.4.3 Rivelatori ottici	121
10.4.4 Rivelatori IR	121
10.4.5 Rilevatori di deriva al silicio (SDD) ad ampia area	122
10.4.6 Diodo a valanga a fotone singolo (SPAD)	123
10.4.7 Rivelatori spettro-imager 3D CZT/CdTe	123
10.4.8 Microcalorimetri a raggi X al germanio NTD	124
10.4.9 Rivelatori per microcalorimetri TES e criogenia	124
10.4.10 Rivelatori di pixel di gas e polarimetria Compton	124
10.4.11 Elettronica di lettura	125
10.5 Ottiche, ricevitori ed elettronica di back end per strumentazioni radio e microonde	125
10.5.1 Attività Pre-SKA e SKA	126
10.5.2 Tecnologie strumentali CMB	127
10.5.3 Sistemi di antenne e tecnologie di beamforming.	128
10.5.4 Elettronica di acquisizione e back end di elaborazione del segnale	128
10.5.5 Sistemi multi-beam e multi-frequenza	129
10.5.6 Trasporto di segnali analogici RF e di potenza su fibre ottiche	130
10.5.7 Criogenica e ingegneria termica	130
10.6 Tecnologie specifiche per strumentazioni Planetology, Space Weather e Gravitation oriented	130
10.6.1 Laboratori e strumentazioni di prova, caratterizzazione, emulatore di ambiente planetario	131
10.6.2 Sistema di misura della contaminazione e Microbalance	131
10.6.3 Sistemi di rivelazione di atomi neutri	132
10.6.4 Stereo-telecamere	133
10.6.5 Coronagrafi	133

10.6.6 Tecnologie e strumentazioni per la gravitazione sperimentale	134
10.6.7 Camera al plasma SIM.PL.EX	135
10.6.8 Strutture (criogenia, calibrazione e test, metrologia)	136
10.7 Software, informatica e gestione dei dati	136
11 La matrice progetto-domanda-metodo	141

Acronimi

AGN: Nucleo Galattico Attivo
ALMA: Array di grandi millimetri di Atacama
ARIEL: grande indagine sull'esopianeta a infrarossi con telerilevamento atmosferico
BAO: Oscillazioni acustiche barioniche
BH: Buco nero
CHEOPS: caratterizzante ExOPlanet Satellite
CMB: Sfondo cosmico a microonde
CTA: Cherenkov Telescope Array
DE: Energia Oscura
DM: Materia oscura
ELT: telescopio estremamente grande
EoR: Epoca della Reionizzazione
ESPRESSO: spettrografo Echelle per esopianeti rocciosi e spettroscopico stabile Osservazioni
EST: Telescopio solare europeo
EVLA: Array molto grande ampliato
GIARPS: GIANO-B + HARPS-N
GR: Relatività Generale
HARPS-N: Cercatore di pianeti a velocità radiale ad alta precisione - Nord
HPC: calcolo ad alte prestazioni
HST: telescopio spaziale Hubble
HUDF: Hubble Ultra-Deep Field
ICM: Inter-cluster Medium
IGM: mezzo intergalattico
ISM: mezzo interstellare
IRAM: Institut de Radioastronomie Millimétrique
SUCCO: JUpiter ICy lune su Explorer
JWST: telescopio spaziale James Webb
LOFAR: array a bassa frequenza
LSS: struttura su larga scala
LSST: grande telescopio sinottico per rilievi
NIR: Vicino infrarosso
NOEMA: Northern Extended Millimeter Array
NS: Stella di neutroni
NTD: drogato per trasmutazione di neutroni
PdBI: Interferometro Plateau de Bure
PLATO: Transiti PLANetari e Oscillazioni di stelle
Ricerca e sviluppo: ricerca e sviluppo
RSD: spostamento verso il rosso-distorsione spaziale
SFR: tasso di formazione stellare
SDD: rilevatori di deriva al silicio
SiPM: fotomoltiplicatore al silicio
SKA: Array di chilometri quadrati
SMBH: buco nero super-massiccio
SN: Supernovae
SPAD: diodo a valanga a fotone singolo

SPICA: telescopio spaziale a infrarossi per la cosmologia e l'astrofisica

SQUID: dispositivo di interferenza quantistica superconduttore

SZ: Sunyaev-Zeldovich

TES: sensore del bordo di transizione

TESS: Satellite di indagine sugli esopianeti in transito

TNO: Oggetto transnettuniano

UVCS: spettrometro coronografico a raggi ultravioletti

VISTA: Telescopio per rilevamento nel visibile e nell'infrarosso per l'astronomia

VLA: Jansky Very Large Array

VLT: telescopio molto grande

VST: telescopio di rilevamento VLT

WFIRST: Telescopio per rilievi a infrarossi ad ampio campo

WIMP: Particella massiccia che interagisce debolmente

Le principali sfide in astrofisica nel prossimo decennio

1. Fisica solare, interplanetaria e magnetosferica

Parole chiave: Sole, struttura solare, eliosfera, magnetosfere e ambienti planetari, raggi cosmici, interazione di campo magnetico e plasma.

Domande chiave:

1. In che modo il Sole dà origine all'eliosfera e ne controlla l'evoluzione? Come si evolve il Sistema Solare in relazione alla stella madre e al mezzo interplanetario?

- *Come viene prodotto il campo magnetico solare? Qual è il ruolo della magnetoconvezione turbolenta nei meccanismi che danno origine alla dinamica e variabilità solare?*
- *Quali sono i meccanismi fisici che regolano il riscaldamento dei plasmi astrofisici e l'accelerazione delle particelle ad alta energia? • Quali processi sono attivi oggi nell'interazione tra il mezzo interplanetario e la superficie dei corpi e l'ambiente, e/o hanno avuto un ruolo nella prima storia del Sistema Solare?*

2. Qual è l'influenza del Sole e degli ambienti di radiazione sulle attività umane e sulla vita?

- *Quali sono le dinamiche della radiazione delle particelle e dei campi elettromagnetici nell'ambiente planetario (con focus sulla Terra)? E come sono guidati da agenti esterni (tempo spaziale)?*
- *Come si può monitorare e prevedere il tempo spaziale?*

Il campo magnetico generato all'interno del Sole attraversa l'atmosfera solare, l'eliosfera e le magnetosfere dei pianeti; d'altra parte, l'intero Sole, il vento solare, l'eliosfera e le atmosfere esterne di diversi pianeti sono allo stato plasma.

Gli studi relativi alle interazioni del mezzo solare e interplanetario con le magnetosfere, le atmosfere superiori e la superficie dei corpi del sistema solare sono fondamentali per la comprensione dell'evoluzione del Sistema Solare e anche come paradigma per i sistemi planetari extrasolari.

Gli studi relativi alla fisica solare, interplanetaria e magnetosferica forniscono informazioni uniche sulla fisica di base, ad esempio, del plasma magnetizzato, della turbolenza e dell'accelerazione delle particelle con onde d'urto senza collisioni. I plasmi sono onnipresenti nell'Universo e la loro dinamica è alla base di numerosi processi che si verificano negli ambienti stellari e planetari. Lo studio della dinamica del plasma solare ed eliosferico e delle sue relazioni con i processi di riscaldamento e accelerazione, nonché l'interazione con gli ambienti planetari, sono quindi questioni centrali per svelare i meccanismi fisici che sono responsabili di molti processi di emissione negli oggetti astrofisici.

1.1 Generazione di campi magnetici e ruolo nell'atmosfera solare

La comprensione dei processi di generazione dei campi magnetici e della loro comparsa, evoluzione e variabilità periodica nell'atmosfera stellare è ancora una sfida importante per la fisica solare.

La dinamo solare opera nelle profondità della zona di convezione, dove un campo magnetico oscillante è mantenuto dai movimenti del plasma. La struttura e la dinamica della zona di convezione polare non sono state ancora studiate tramite l'eliosismologia. Per rispondere alle domande "Com'è il magnetico

flusso trasportato e rielaborato ad alta latitudine solare?, Perché l'attività magnetica cambia nel tempo?", è importante rilevare i flussi più importanti in corrispondenza e al di sotto della superficie solare, in particolare alle alte latitudini. Essi sono: rotazione differenziale, circolazione meridionale, oscillazioni torsionali. Si noti che una circolazione meridionale a due livelli è stata recentemente rilevata dallo strumento spaziale HMI a bordo del Solar Dynamics Observatory. Tutto ciò richiede l'uscita dall'eclittica per osservare i flussi e i campi polari solari. Una missione polare, in volo sopra i poli del Sole, potrebbe essere effettivamente adatta a questo scopo.

Il riscaldamento dell'atmosfera solare esterna è ancora uno dei maggiori enigmi della fisica solare e (stellare) e della fisica di base del plasma: ci manca un quadro generale del meccanismo(i) al lavoro.

La maggior parte degli scenari proposti si basano su un campo magnetico dinamico radicato nella bassa atmosfera, continuamente agitato, mescolato e concentrato dal movimento del plasma fotosferico e organizzato in fasci di scale spaziali trasversali sub-arcsec. Il riscaldamento è quindi generato dalla turbolenta dissipazione di campi magnetici twistati ed è una manifestazione evidente dell'accoppiamento magnetico che si verifica in tutta l'atmosfera solare. Le osservazioni spettroscopiche EUV e UV del disco solare hanno dimostrato che un sistema altamente dinamico e complesso di strutture magnetiche costituisce la base della corona. È attraverso queste strutture che l'energia creata all'interno del Sole deve essere trasportata e dissipata per riscaldare la corona e accelerare il vento solare. Sono anche probabili canali per il trasporto di massa nell'atmosfera superiore. Quindi, per svelare il mistero del riscaldamento coronale bisogna comprendere (nelle bande ottiche e infrarosse) le proprietà dei campi magnetici nell'atmosfera solare inferiore e la sua interazione con il moto del plasma e, allo stesso tempo, studiare i processi di dissipazione di energia nella corona solare attraverso osservazioni UV, EUV e raggi X. Il supporto complementare della modellazione MHD con il calcolo ad alte prestazioni è un ingrediente cruciale per un progresso significativo nella comprensione della dinamica coronale e del riscaldamento.

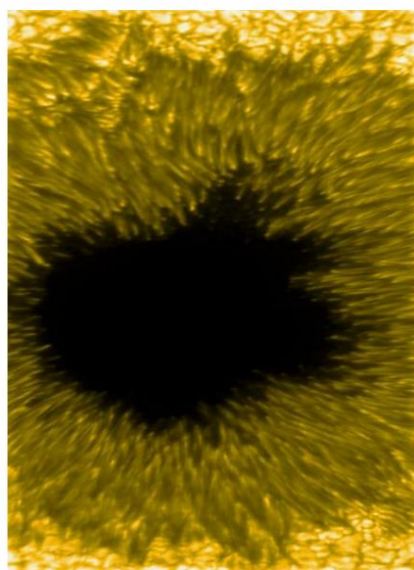


Fig. 1.1 Immagine della fotosfera solare ottenuta da IBIS nel continuum della linea Fe I a 617,3 nm.

Il problema del riscaldamento coronale (simile) è fondamentale anche in molti altri oggetti astrofisici e la comprensione del riscaldamento degli archi magnetici coronali solari apparentemente stabili è importante per gli studi sul plasma di fusione, insieme al problema del confinamento del plasma caldo in configurazioni stabili.

Eventi simili a bagliori e bagliori riscaldano in modo esplosivo grandi quantità di plasma solare fino a 107 K, le espulsioni di massa coronale (CME) lanciano 10¹⁶ g di plasma solare nello spazio interplanetario. Questi sono gli eventi solari più energetici ed esplosivi, dovuti all'improvviso rilascio di energia immagazzinata

campi magnetici, fornendo fino a 1032 erg in pochi minuti. I bagliori e le CME sono in qualche modo correlati e spesso si verificano insieme. Si manifestano sull'intero spettro elettromagnetico; espellono anche plasma e particelle ad alta velocità, che esplodono attraverso l'intero sistema solare. Uno dei migliori candidati per i meccanismi del plasma al lavoro è il riarrangiamento e la "riconnessione" delle linee del campo magnetico. Questi fenomeni forniscono un indizio sui fenomeni più energetici che si verificano nelle atmosfere stellari e in altri plasmi magnetizzati astrofisici. Problemi chiave in questo campo sono la comprensione dei meccanismi attraverso i quali l'energia viene progressivamente immagazzinata nel campo magnetico, le instabilità che innescano l'insorgenza dei fenomeni, i vari fenomeni del plasma che convertono l'energia in calore, il movimento delle particelle accelerate e molto altro.

Nonostante la sua importanza, abbiamo ancora pochissime misurazioni dell'intensità dei campi magnetici coronali. Tipicamente la nostra conoscenza si basa sull'estrapolazione alla corona, mediante equazioni di Maxwell, di campi magnetici fotosferici ottenuti tramite magnetografie.

Le misure dirette dei campi magnetici coronali sono possibili mediante tecniche spettro-polarimetriche coronografiche nell'ottica/IR e nell'ultravioletto (quindi dallo spazio), poiché la polarizzazione per risonanza delle righe spettrali è modificata dal campo magnetico (l'effetto Hanle).

Questo effetto è stato recentemente applicato in astrofisica alla determinazione del campo magnetico vettoriale nelle protuberanze solari e in altri oggetti astrofisici.

1.2 Il vento solare in espansione e il mezzo interplanetario

La Terra e l'intero Sistema Solare sono immersi nell'eliosfera solare, l'estensione dell'atmosfera solare che scorre come un vento nello spazio interplanetario e interstellare. Studi del vento solare, della sua composizione chimica (nota per essere diversa da quella fotosferica), delle sue strutture nel piano dell'eclittica e al di fuori di esso, dei suoi cambiamenti con le fasi del ciclo solare, della sua evoluzione nell'eliosfera esterna, la fisica dell'accelerazione del vento solare, sono importanti problemi scientifici. Il vento solare diventa rapidamente senza collisioni allontanandosi dal Sole e mostra fenomeni peculiari; ad esempio, è un laboratorio unico dove studiare i fenomeni di turbolenza. Le osservazioni da strumenti spaziali sono di vitale importanza in questo contesto e le misurazioni in situ forniscono una diagnostica unica delle caratteristiche del plasma, della composizione e delle funzioni di distribuzione.

La missione SOHO di grande successo con i suoi coronografi a luce visibile ad alta sensibilità (LASCO C1, C2 e C3) che coprono ininterrottamente la corona esterna/l'eliosfera interna ad ampio angolo ci ha permesso di comprendere appieno l'importanza delle espulsioni di massa coronale nell'influenzare l'eliosfera e la Terra -sistema magnetosferico. Con il primo spettrometro coronografico a raggi ultravioletti (UVCS), pilotato su SOHO, siamo stati in grado di identificare e studiare il vento solare a livello coronale, tramite tecniche di attenuazione Doppler. Il vento solare veloce (800 km/s) e quello lento (pochi 100 km/s) provengono da parti diverse (rispettivamente regioni di campo magnetico aperte e stelle filanti coronali) della corona solare e molto probabilmente subiscono meccanismi di accelerazione differenti. Il vento veloce è piuttosto accelerato dalle onde in uscita che preferenzialmente "spingono ioni pesanti" come suggeriscono le osservazioni SOHO/UVCS; il vento lento è meno compreso.

Comprendere i venti solari, la loro accelerazione e la loro relazione con le regioni solari originarie e la struttura magnetica può aiutarci a comprendere la generazione di altri flussi di plasma astrofisico. Ad esempio, poiché le stelle perdono il loro momento angolare a causa dei venti, il vento solare permetterebbe di approfondire il problema della perdita di momento angolare delle stelle.

Nonostante i numerosi e continui miglioramenti nella nostra comprensione dei meccanismi che governano la corona solare e la sua dinamica, nessuna delle precedenti missioni è stata in grado di esplorare completamente la regione di interfaccia dove ha origine il vento solare e le strutture eliosferiche

sono formati con capacità di osservazione sufficienti per collegare le strutture del vento solare alle loro regioni sorgenti al Sole.

Per rispondere alla domanda: "In che modo il Sole e il suo campo magnetico creano e controllano l'eliosfera?" è essenziale eseguire misurazioni in situ del plasma del vento solare, dei campi, delle onde e delle particelle energetiche abbastanza vicine al Sole da prevenire qualsiasi modifica delle proprietà osservate a causa dei successivi processi di trasporto e propagazione. L'imaging simultaneo ad alta risoluzione e le osservazioni spettroscopiche del Sole e della corona interna dentro e fuori il piano dell'eclittica consentiranno di mettere in relazione le misurazioni in situ con le loro regioni e strutture di origine sul Sole e di caratterizzare la dinamica e la composizione del plasma principale componenti nei siti di accelerazione della corona e del vento solare. La vicinanza al Sole darà anche il vantaggio di volare con una velocità angolare significativamente più vicina a quella di rotazione del Sole rispetto alla velocità angolare della Terra a 1 UA. Ciò consente le osservazioni sia della corona interna che del disco per un intervallo temporale significativamente più lungo rispetto a quello visto da 1 UA, che può essere utilizzato per districare l'evoluzione delle strutture coronali e l'effetto di rotazione solare su scale temporali a medio termine. Ad esempio, è consentita una copertura continua della pre-eruzione, eruzione e riconfigurazione della corona solare in risposta a un CME, con un effetto significativamente ridotto della rotazione solare.

È stato ampiamente documentato che i plasmi astrofisici si trovano in uno stato turbolento sin dalle prime missioni spaziali interplanetarie della fine degli anni '60. È anche riconosciuto che la dissipazione delle fluttuazioni turbolente gioca un ruolo rilevante nell'energizzazione del plasma nelle galassie, negli ambienti stellari, nei mezzi interplanetari e interstellari, nelle onde d'urto, nelle magnetosfere planetarie e nella propagazione dei raggi cosmici. In questo quadro, l'eliosfera e le magnetosfere planetarie sono luoghi unici in cui questi processi possono essere studiati e studiati, essendo possibile in queste regioni misurare direttamente diverse grandezze fisiche tramite missioni in situ. Per quanto riguarda gli studi *in situ* dei plasmi eliosferici e magnetosferici, l'Europa è leader nello scenario mondiale, avendo finanziato missioni come ESA-Ulysses ed ESA-Cluster (*Cornerstone Mission ESA*) negli ultimi 20 anni. Queste missioni spaziali hanno permesso di indagare le caratteristiche dei plasmi eliosferici in regioni, non esplorate in precedenza, e di effettuare studi sulla dinamica del plasma in tre dimensioni. In particolare, la missione ESA-Cluster ha consentito di compiere grandi progressi nella comprensione dell'energizzazione del plasma durante la riconnessione magnetica, nonché delle caratteristiche di turbolenza del plasma nelle regioni vicine alla Terra e nel vento solare, consentendo per la prima volta di ottenere misurazioni multipunto di parametri plasmatici e campi magnetici.

1.3 Scienze meteorologiche spaziali

La dinamica del Sole è il motore di un ampio numero di processi che hanno luogo nell'eliosfera e che interessano i corpi planetari e i loro ambienti. Infatti, la dinamica solare è responsabile del verificarsi di tempeste e sottotempeste magnetosferiche, nonché del clima terrestre e planetario. Lo studio di tali processi e di come l'espansione dell'atmosfera solare, che è il motore del vento solare, interagisce con le magnetosfere, le ionosfere e le atmosfere planetarie, è diventato uno dei principali temi scientifici in tutto il mondo, che viene generalmente affrontato con il termine "Meteo spaziale". Tuttavia, grazie alle recenti osservazioni, questo termine ha acquisito un significato più ampio, essendo, infatti, correlato allo stato fisico e fenomenologico dell'insieme degli ambienti spaziali naturali in tutto il Sistema Solare, così come di qualsiasi altro sistema planetario. La disciplina associata mira a monitorare, analizzare e modellare le interazioni del vento solare con lo spazio vicino al pianeta, a comprendere e prevedere lo stato del Sole, gli ambienti interplanetari e planetari e le perturbazioni solari/non solari che influenzano loro. Chiaramente, tutte queste analisi sono anche finalizzate a prevedere e ora lanciare il possibile

impatti sui sistemi biologici e tecnologici e antropici. Sebbene focalizzati sul Sole come principale motore dei fenomeni correlati, anche altri agenti, (come il plasma magnetosferico, i raggi cosmici, le polveri spaziali...) possono agire come motori del tempo spaziale. Nella comunità delle scienze spaziali, Space Weather è diventato un argomento centrale ed è precedentemente incluso nei programmi decennali delle agenzie spaziali, come, ad esempio, la NASA e l'ESA.

Dal lato degli studi scientifici relativi allo Space Weather, uno dei fenomeni più cruciali è la riconnessione magnetica, che è alla base del trasferimento di energia, massa e quantità di moto dal vento solare alle magnetosfere planetarie e terrestri. La comprensione del trasferimento di energia alla magnetopausa terrestre, attraverso processi di riconnessione magnetica e/o eventi di trasferimento di flusso, è, infatti, la questione centrale per sviluppare codici numerici per gli strumenti di previsione. Grandi progressi sono stati fatti per mezzo della missione ESA-Cluster, che ha permesso per la prima volta di studiare il trasferimento di energia e plasma alla magnetopausa terrestre e il ruolo che i processi di riconnessione magnetica svolgono sul lato tridimensionale, fino alle scale di lunghezza inerziale. Altri problemi principali sono legati alla comprensione dei processi magnetosferici interni responsabili dello sviluppo di tempeste magnetiche e sottotempeste. Negli ultimi cinque anni, alcune missioni spaziali (vedi ad esempio la missione NASA-THEMIS) sono state dedicate allo studio dei meccanismi fisici che agiscono nelle regioni di coda geomagnetiche della Terra, che causano sottotempeste e tempeste magnetosferiche. Inoltre, il ruolo e l'impatto sull'ambiente planetario e terrestre degli eventi di particella energetica solare (SEP) (definiti come quegli eventi che, a energie >10 MeV, superano la soglia di flusso di $10 \text{ pr cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$) e i raggi cosmici galattici sono altri argomenti centrali degli studi relativi alla meteorologia spaziale. Ad esempio, i SEP e i raggi cosmici galattici inducono effetti nell'atmosfera terrestre, come precipitazioni di particelle, disturbi radio, minaccia di radiazioni per gli astronauti, l'equipaggio e i passeggeri dell'aeromobile, riduzione dell'ozono atmosferico e variabilità di componenti minori, formazione di nubi, cambiamenti climatici. Pertanto, la comprensione e la capacità di prevedere eventi SEP e lo studio della variabilità dei raggi cosmici galattici sono di importanza cruciale per il grande impatto che questi fenomeni hanno sui sistemi naturali e antropogenici. L'INAF ha una lunga tradizione nelle osservazioni solari, eliosferiche, magnetosferiche e geosferiche attraverso una serie di strumenti, la maggior parte dei quali ha raccolto per decenni dati dell'ambiente solare-terrestre. In questo quadro, all'inizio del 2019, l'INAF ha avviato la realizzazione di una rete nazionale di servizi meteorologici spaziali (INAF NSWSN) che si basa sulle risorse di osservazione e simulazione dislocate presso diversi osservatori e istituti di ricerca INAF. Ogni struttura di ricerca copre uno o più aspetti del tempo operativo solare, interplanetario, magnetosferico e ionosferico rilevando emissioni di fotoni e particelle extragalattiche, galattiche e solari, perturbazioni interplanetarie, magnetosferiche e ionosferiche, principalmente mediante strumentazione dedicata a parte la grande antenna radiofonica singola telescopi, il cui uso è in condivisione con altri compiti scientifici. Nel frattempo sono stati acquisiti nuovi strumenti come, ad esempio, i radiotelescopi ad antenne di grandi dimensioni, i radiomonitor dedicati, i radar HF in Antartide, ecc., e sta partecipando al LOFAR le cui applicazioni per Space Weather sono allo studio e saranno implementate nei prossimi anni. La ricchezza degli asset e delle competenze INAF è unica e consente una copertura completa per scopi di nowcasting e forecasting.

Nella cornice di altri corpi del sistema solare, Mercurio è uno dei pianeti più interessanti dal punto di vista del tempo spaziale, avendo un debole campo magnetico interno in una regione molto vicina alla stella madre. Condizioni estreme di vento solare, flusso UV e temperatura superficiale, in combinazione con un'elevata velocità di riconnessione, determinano una configurazione dell'esosfera dinamica, correnti superficiali ed effetti di induzione. Anche dopo la missione MESSENGER, molte vecchie e nuove questioni rimangono irrisolte, come l'attuale chiusura del sistema data l'assenza di una ionosfera, o il ruolo del plasma che impatta sulla superficie nell'evoluzione di Mercurio. Inoltre, Marte

e l'interazione di Venere con il vento solare mostra il caso di corpi non magnetizzati che producono magnetosfera indotta. Le missioni passate (MEX e VEX) hanno fornito informazioni importanti, ma in mancanza del magnetometro, i dettagli dell'interazione sono ancora sconosciuti. L'interazione della Luna con il vento solare, specie nelle vicinanze sulle anomalie magnetiche, rappresenta un altro interessante esempio di interazione del plasma con una mini-magnetosfera, di particolare interesse anche in vista di una possibile colonizzazione umana. Eventi solari come gli eventi CME e/o SEP attivano fenomeni macroscopici del tempo meteorologico spaziale planetario, specialmente in questi ambienti planetari interni. Nell'ultimo decennio, la nostra comprensione del tempo spaziale nella magnetosfera di Saturno e di Giove e dei processi di interazione con le loro lune ghiacciate è stata sostanzialmente migliorata (grazie alla missione Cassini della NASA/ESA/ASI e agli sforzi di modellazione). Le osservazioni di Giunone hanno permesso l'imaging delle aurore settentrionali e meridionali di Giove con una risoluzione spaziale e temporale senza precedenti, migliorando notevolmente la nostra conoscenza dell'interazione di Giove con il vento solare e della dinamica della magnetosfera di Giove. Altri ambienti unici di particolare interesse per l'interazione magnetosferica sono le peculiari magnetosfere di Urano e Nettuno ad angolo di taglio insolito con il campo magnetico interplanetario che dovrebbe determinare caratteristiche specifiche di riconnessione e dinamiche del plasma durante le diverse stagioni e periodi di attività solare. Infine, la comprensione dell'erosione spaziale dei corpi minori, come gli asteroidi e le comete, le pietre miliari del nostro Sistema Solare, è fondamentale per rappresentare la loro evoluzione.

1.4 Attività scientifiche per il prossimo decennio

Nel prossimo futuro l'Europa continuerà a supportare gli studi sui plasmi solari, eliosferici, magnetosferici e planetari delle prossime missioni ESA/JAXA-Bepi Colombo (*ESA Cornerstone Mission*), ESA-Solar Orbiter ed ESA-JUICE. Queste missioni, che fanno parte dell'*ESA-Cosmic Vision 2015-2025*, consentiranno di indagare i meccanismi fisici responsabili dell'emergere di campi magnetici, dell'accelerazione e del riscaldamento del vento solare, nonché dell'accelerazione di CME e SEP, e la loro interazione con l'ermeo magnetosfera e ambiente.

Il ruolo svolto dalla turbolenza nell'accelerazione, energizzazione e dissipazione di plasmi senza collisioni sarà un argomento centrale nel prossimo decennio. In particolare, l'indagine delle scale cinetiche, sarà determinante per svelare i suddetti meccanismi. Questi studi sono di importanza universale in astrofisica, essendo, infatti, plasmi astrofisici non collisionali. In questo quadro, l'eliosfera e l'ambiente vicino alla Terra possono essere considerati un laboratorio privilegiato dove sfruttare misure dirette *in situ* delle grandezze fisiche fino alle scale cinetiche. A questo proposito sarà estremamente rilevante la partecipazione degli scienziati INAF alle future missioni del programma *ESA Cosmic Vision 2015-2025*.

Inoltre, nel prossimo decennio è prevista la prima luce di due rivoluzionari telescopi con apertura di 4 metri progettati per studiare il nostro Sole attivo con una risoluzione senza precedenti dal vicino ultravioletto al vicino infrarosso, il DKIST americano e l'EST europeo.

Dotati di strumentazione all'avanguardia, questi telescopi aiuteranno gli scienziati a comprendere più in dettaglio l'accoppiamento magnetico dell'atmosfera solare. Gli scienziati dell'INAF parteciperanno alle attività e alle osservazioni di entrambi i telescopi.

Gli studi dei processi fisici responsabili delle interazioni Sole-Terra e Sole-pianeti saranno di fondamentale importanza per comprendere sia le complesse dinamiche degli ambienti terrestri e planetario sia l'influenza del Sole e degli ambienti di radiazione sulle attività umane sulla Terra e sull'esplorazione spaziale nei prossimi decenni.

Altri studi di interesse nel prossimo decennio si concentrano su un ampio insieme di argomenti interdisciplinari, tra cui:

1. la variabilità dell'irraggiamento solare e i suoi effetti nell'eliosfera e su quella terrestre ambiente;
2. l'emergere e/o la propagazione dell'attività coronale solare nell'eliosfera;
3. il ruolo della turbolenza in diversi processi, ad esempio la riconnessione magnetica, la propagazione dei raggi cosmici e dei SEP, gli shock interplanetari.
4. la variabilità delle regioni magnetosferiche terrestri e planetarie in differenti condizioni di plasma del vento solare;
5. la modulazione dei raggi cosmici galattici (a breve, medio e lungo termine);
6. l'interazione del vento solare e/o dei plasmi magnetosferici con superfici planetarie/satellitari, nonché con atmosfere (spesse o tenui) e ionosfere;
7. i processi alla base delle asimmetrie interemisferiche nella magnetosferica processi di accoppiamento ionosferico;
8. processi di generazione dell'esosfera;
9. le interazioni delle fasce di radiazione terrestre e planetaria con atmosfere, satelliti e anelli;
10. l'impatto di SEP e/o raggi cosmici sullo spazio circumterrestre e circumplanetario;
11. agenti atmosferici dello spazio (alterazione che si verifica agli oggetti esposti all'ambiente ostile di spazio);
12. superficie planetaria o lunare che carica corpi con atmosfere tenui;
13. effetti di SEP, GCR, radiazioni e deposizione di cariche su veicoli spaziali e spaziali strumentazioni, sulle telecomunicazioni e sulle applicazioni terrestri.

Le suddette argomentazioni rappresenteranno alcuni degli obiettivi fondamentali delle future ricerche in cui saranno direttamente coinvolti i ricercatori dell'INAF. Il metodo di indagine comprenderà

- osservazione in situ di campi elettromagnetici e particelle cariche e neutre vicine al Sole, negli ambienti planetari e nello spazio interplanetario;
- osservazioni telerilevate dallo spazio e dal suolo terrestre in lunghezze d'onda diverse da radio, IR, visibili fino a UV, EUV e raggi X del Sole e le emissioni aurorali;
- osservazioni a terra di particelle ad alta energia e circolazione del plasma;
- Modellazione MHD di strutture magnetiche e simulazioni di idrodinamica radiativa;
- Modellazione Monte Carlo dell'ambiente planetario, la sua interazione con le particelle energetiche e il vento solare, la circolazione del plasma e i processi di generazione esosferica;
- esperimenti di laboratorio sulle condizioni ionosferiche per l'interazione del plasma con il planetario analoghi.

Domanda chiave	Metodo(i)	Progetto(i)
<p>1. In che modo il Sole dà origine all'eliosfera e ne controlla l'evoluzione?</p> <p>Come si evolve il Sistema Solare in relazione alla stella madre e al mezzo interplanetario?</p>		
<p><i>1a. Come viene prodotto il campo magnetico solare? Qual è il ruolo della magnetoconvezione turbolenta nei meccanismi che danno origine alla dinamica e variabilità solare?</i></p>	<p>Studia il campo magnetico ad alta risoluzione spaziale e capacità spettro-polarimetriche più sensibili su un'ampia gamma di altezze atmosferiche, comprese le regioni coronali (coronagrafia).</p> <p>Nuove osservazioni dei flussi polari solari e dei campi fuori dall'eclittica.</p> <p>Modellazione MHD di strutture magnetiche e simulazioni di idrodinamica radiativa con calcolo ad alte prestazioni</p>	<p><u>Esistente:</u> Ora legale/IBIS, SST, Gregorio, HINODE, SDO, IRIS</p> <p><u>Futuro:</u> DKIST Orbiter solare est</p>
<p><i>1b. Quali sono i meccanismi fisici che regolano il riscaldamento dei plasmi astrofisici e l'accelerazione delle particelle ad alta energia?</i></p>	<p>Osservazioni ottiche e IR della bassa atmosfera solare.</p> <p>Osservazione della corona solare attraverso UV, EUV e raggi X.</p> <p>Eseguire misurazioni in situ del plasma del vento solare, dei campi, delle onde e delle particelle energetiche a diverse distanze dal Sole per studiare il ruolo della turbolenza nell'accelerazione, energizzazione e dissipazione</p> <p>Imaging simultaneo ad alta risoluzione e osservazioni spettroscopiche del Sole e della corona interna dentro e fuori il piano dell'eclittica.</p> <p>Modellazione MHD di strutture coronali</p>	<p><u>Esistente:</u> Ora legale/IBIS, SST, Gregorio, HINODE, SDO, STEREO, IRIS, GRAPPOLO, SVIRCO</p> <p><u>Futuro:</u> DKIST Orbiter solare Sonda solare Parker Bepi Colombo est Proba-3</p>
<p><i>1c. Quali processi sono attivi oggi nell'interazione tra il mezzo interplanetario e la superficie dei corpi e l'ambiente, e/o giocato a</i></p>	<p>Osservazione in situ di campi elettromagnetici e particelle cariche e neutre negli ambienti dei corpi e nel mezzo interplanetario a energie che vanno dal termico ai MeV</p>	<p><u>Esistente:</u> MEX GIUNONE GRAPPOLO SVIRCO SUPERDARN</p>

<p><i>ruolo nella storia antica del Sistema Solare?</i></p>	<p>Osservazioni telerilevate dallo spazio delle emissioni auroreali (IR, visibile e UV), dell'interazione del plasma con l'esosfera e la superficie (Atomi Neutri Energetici), delle esosfere (UV) e simultanea osservazione del Sole (radio, visibile, UV e Raggi X).</p>	<p>ITACA Telescopio solare THEMIS</p> <p><u>Futuro:</u> Bepi Colombo Orbiter solare SUCCO Proba-3</p>
	<p>Osservazioni a terra di aurore ed emissioni esosferiche di pianeti e lune (visibili).</p> <p>Osservazioni a terra di particelle ad alta energia.</p>	
	<p>Modellazione MHD del magnetico strutture.</p> <p>Modellazione Monte Carlo dell'ambiente planetario, della circolazione del plasma e dei processi di generazione esosferica.</p>	
	<p>Esperimenti di laboratorio sulle condizioni ionosferiche e sull'interazione del plasma con l'analogo planetario</p>	
<p>2. Qual è l'influenza del sole e gli ambienti di radiazione sulle attività umane e sulla vita?</p>		
<p><i>2a. Quali sono le dinamiche della radiazione delle particelle e dei campi elettromagnetici nell'ambiente planetario (con focus sulla Terra)? E come è guidato da agenti esterni (tempo spaziale)?</i></p>	<p>Osservazione simultanea in situ di campi elettromagnetici e particelle cariche e neutre negli ambienti dei corpi e nel mezzo interplanetario ad energie che vanno dal termico ai MeV</p>	<p><u>Esistente:</u> Ora legale/IBIS, SST, Gregorio, HINODE, SDO, STEREO, IRIS, GRAPPOLO SVIRCO SUPERDARN ITACA</p> <p><u>Futuro:</u> Bepi Colombo SUCCO Orbiter solare Sonda solare Parker est Proba-3</p>
	<p>Osservazioni telerilevate dallo spazio delle emissioni aurore (IR, visibile e UV), dell'interazione del plasma con l'esosfera e la superficie (Energetic Neutral Atoms, ENA) e osservazione simultanea del Sole (visibile, UV e raggi X) e terra osservazioni basate su particelle ad alta energia.</p>	
	<p>Osservazioni coordinate da terra e misurazioni spaziali di aurore e</p>	

	emissioni esosferiche di pianeti e lune (visibili).	
	Modelli numerici globali di espulsione del plasma dal Sole, trasporto e circolazione del plasma e processi di generazione esosferica.	
<i>2b. Come si può monitorare e prevedere il tempo spaziale?</i>	<p>Monitoraggio dell'attività solare</p> <p>Monitoraggio CGR e SEP</p> <p>Monitoraggio del vento solare a diverse distanze dal Sole</p> <p>Monitoraggio dell'attività geomagnetica o magnetosferica di altri pianeti tramite osservazioni di campi magnetici, aurore, plasma e ENA</p> <p>Sviluppo di strumenti di previsione</p>	<p><u>Esistente:</u></p> <p>SUPERDARN</p> <p>SVIRCO</p> <p>ITACA</p> <p>DOLCE</p> <p>Ora legale/IBIS</p> <p>SST</p> <p>Gregorio</p> <p>INODO</p> <p>SDO</p> <p>STEREO</p> <p>IRIS</p> <p>SRT</p> <p>LOFAR</p> <p><u>Futuro:</u></p> <p><u>Orbiter solare</u></p> <p>est</p> <p>MAGLIONI</p>

2. Il sistema solare

Parole chiave: pianeti, satelliti, piccoli corpi, formazione del Sistema Solare, astrobiologia

Studiamo il Sistema Solare perché vogliamo comprendere i processi che hanno portato alla sua formazione e successiva evoluzione, nonché i principali meccanismi che ancora controllano l'aspetto, il comportamento e le proprietà del Sole e di tutti i corpi che orbitano attorno ad esso.

Un altro motivo è che oggi sappiamo che i sistemi planetari sono un fenomeno comune nella galassia e osserviamo una sorprendente varietà di possibili esiti dei processi responsabili della formazione di questi sistemi. Lo studio del nostro Sistema Solare è di fondamentale importanza per comprendere il ruolo svolto dai processi fisici che possono essere stati responsabili anche della formazione di una così ampia varietà di sistemi extrasolari. Allo stesso tempo, lo studio dei sistemi extrasolari, osservati nelle diverse fasi della loro evoluzione, è utile per comprendere molti aspetti della possibile storia del nostro stesso sistema, soprattutto durante le prime fasi della sua formazione.

La nostra conoscenza del Sistema Solare è cresciuta enormemente nell'ultimo decennio grazie a missioni spaziali di grande successo e attività di osservazione da terra che hanno fornito nuove informazioni, spesso con un dettaglio senza precedenti, su pianeti e sistemi satellitari, nonché su molti dei piccoli corpi che orbitano attorno al Sole a diverse distanze eliocentriche. Questa ricchezza di nuovi dati ha stimolato molte nuove idee e lavoro sperimentale, portando allo sviluppo di nuove teorie per spiegare l'estrema complessità e diversità dei fenomeni che osserviamo. Stiamo comunque ancora esplorando il nostro sistema, poiché anche i corpi più noti, come Marte e la Luna, conservano ancora fenomeni e caratteristiche inspiegabili, e esistono classi di corpi non ancora visitate da una navicella spaziale o scarsamente osservate con un telescopio: gli oggetti transnettuniani (TNO), ad esempio, le elusive comete della cintura principale e le nuove comete dinamicamente, la cui superficie non è mai stata osservata. La raccolta di maggiori informazioni, da realizzare mediante missioni spaziali e osservazioni a terra, è fondamentale per sviluppare teorie migliori e rispondere alle domande chiave:

- **Quali processi hanno determinato la formazione e l'evoluzione del Sistema Solare?**
- **Quali sono i processi che determinano l'aspetto e le proprietà dei corpi del Sistema Solare?**
- **Quali sono i processi evolutivi che danno origine all'emergere della vita?**

2.1 La formazione e l'evoluzione del Sistema Solare Un importante passo avanti nello studio della formazione del Sistema Solare negli ultimi anni è stato il passaggio dallo studio della formazione dei singoli corpi, e di specifiche famiglie di corpi, a quello dell'evoluzione del Sistema Solare come entità globale. Questa trasformazione è stata innescata dallo studio degli esopianeti, che ha rivelato che la migrazione planetaria è un processo abbastanza comune al di fuori dei confini del Sistema Solare, specialmente quando si tratta di pianeti giganti.

Abbiamo sempre saputo che il sistema attuale è il risultato della complessa interazione di processi fisici, chimici, geologici e dinamici che hanno plasmato i pianeti e gli altri corpi. Quello che abbiamo realizzato negli ultimi anni, sulla base di prove crescenti provenienti da osservazioni e modelli teorici, è invece il ruolo cruciale svolto dalle prime migrazioni di Giove e Saturno nel plasmare il giovane Sistema Solare. Questa prima fase di complesse migrazioni planetarie ha dato origine a un importante episodio di collisioni reciproche e collisioni con i pianeti, durante la cosiddetta epoca del tardo bombardamento pesante che si è verificato circa 3,8-3,9 Gyrs fa. Questa fase caotica potrebbe anche essere stata responsabile della fornitura di acqua al nostro pianeta.

Tra i principali problemi aperti con cui si confrontano questi studi globali possiamo elencare:

- *identificare il meccanismo responsabile della formazione dei planetesimi, e il tempi su cui agisce;*
- *identificare le regioni di formazione dei pianeti giganti del Sistema Solare e i meccanismi responsabili degli eventi migratori che hanno modificato le loro orbite;*
- *comprendere l'origine dell'acqua nel Sistema Solare interno e il/i meccanismo/i e tempistica della sua consegna;*
- *capire perché le super-Terre non si sono formate nel Sistema Solare, dato che sono la classe di corpi planetari attualmente stimata come la più abbondante tra gli esopianeti;*
- *capire se il Sistema Solare è un sistema planetario "tipico", o se rappresenta invece un esito non comune del processo di formazione.*

In questo contesto, la raccolta di nuovi dati dallo spazio e dal suolo ci consente di utilizzare i corpi del Sistema Solare come laboratori naturali per studiare il funzionamento dei diversi processi fisici rilevanti per la formazione dei pianeti. Un esempio eccezionale è stato recentemente fornito dalle scoperte fatte dalla missione della NASA Dawn durante la sua esplorazione dell'asteroide Vesta.

Poiché negli ultimi 30 anni Vesta ha rappresentato uno dei principali vincoli osservativi per lo studio dell'evoluzione dinamica e collisionale del Sistema Solare interno, queste scoperte mettono in discussione molte delle nostre idee pre-alba e i modelli teorici basati su di esse.

Parallelamente a questo cambiamento nel nostro approccio allo studio della formazione del Sistema Solare, anche lo studio della formazione planetaria nel suo insieme ha subito un'importante trasformazione. Fino a pochi anni fa, infatti, lo studio degli esopianeti, dei dischi circumstellari e del Sistema Solare procedeva più o meno indipendentemente l'uno dall'altro, e ogni campo di studio possedeva una propria natura individuale. Con l'aumento della complessità dei modelli teorici e la necessità di parametri osservativi su cui testarli, tuttavia, questi ambiti di studio si sono intrecciati sempre più interdisciplinari. Sebbene il Sistema Solare rimanga un laboratorio naturale senza precedenti, lo studio dinamico e statistico degli esopianeti ha consentito di colmare le principali lacune nella nostra comprensione della formazione planetaria e dei suoi possibili risultati (ad esempio la diffusa evidenza della migrazione planetaria e la scoperta di super-Terre e sub -Pianeti Nettuniani, classi di corpi planetari non rappresentati nel nostro sistema). Lo studio dei dischi circumstellari ha consentito, da un lato, la caratterizzazione dell'ambiente all'interno del quale si formano i pianeti e, quindi, la raccolta di informazioni indirette sul disco circumsolare ormai disperso. D'altra parte, il dettaglio sempre crescente delle osservazioni astronomiche consente ora di osservare direttamente le prime fasi della nascita di pianeti giganti nei dischi circumstellari, fornendo così una validazione osservativa a processi che il Sistema Solare ha permesso di ricostruire solo a livello teorico.

2.2 Studio del campo gravitazionale dei corpi planetari

Lo studio della struttura interna di un pianeta o di una luna (ma anche di un corpo minore) richiede un insieme di esperimenti dedicati, comunemente noti come esperimenti di Radioscienza, in cui un ruolo essenziale è soddisfatto (oltre al tracciamento) dalla determinazione dell'orbita di precisione e dalle misurazioni di accelerometri/gradiometri. In caso di determinazione dell'orbita, un compito speciale e rilevante viene svolto dagli accelerometri. Questi strumenti hanno come obiettivo principale la misura delle accelerazioni non gravitazionali che deviano la traiettoria di un veicolo spaziale dal suo moto lungo una geodetica, cioè dal moto di una particella ideale di prova. Queste informazioni, unite ai dati di tracciamento e ad altre misure, permettono di recuperare importanti informazioni sui coefficienti del campo gravitazionale del pianeta o della luna, da cui possiamo ricavare il momento di inerzia e la struttura degli interni. In realtà, mappare la gravitazionale

campo di un corpo celeste permette di raccogliere informazioni importanti sulla sua struttura interna e sulla distribuzione della massa locale. Tutti questi dati sono fondamentali per aiutare a comprendere i processi geofisici e geologici sul corpo planetario e, infine, sulla dinamica e l'evoluzione globale del pianeta. Inoltre, la gradiometria permette di produrre una misura diretta delle componenti del tensore di gravità e quindi del campo gravitazionale, attraverso la misura differenziale dell'accelerazione tra due punti relativamente vicini, superando alcuni degli svantaggi degli attuali metodi di misura. Tale misura può essere eseguita per mezzo di un gradiometro o per differenza tra due misure con accelerometri.

2.3 Mercurio, Venere, Marte e la Luna I pianeti interni

offrono un'opportunità unica per studiare i processi che portano ai mondi abitabili. Venere, Mercurio, Marte e la Luna contengono indizi su diversi aspetti dell'origine dei pianeti e degli ambienti abitabili nel sistema solare interno. Hanno subito una sostanziale lavorazione della loro superficie dopo la loro formazione, a causa di processi endogeni per coloro che sono geologicamente attivi, e comunque al continuo bombardamento di asteroidi e comete nelle orbite di attraversamento dei pianeti. La Luna e Mercurio conservano registrazioni di eventi passati le cui tracce sono state in gran parte cancellate sulla Terra e su Venere. In molti modi, Venere è il gemello della Terra nel Sistema Solare e fornisce un laboratorio naturale per comprendere l'evoluzione della Terra come i pianeti e le loro atmosfere, incluso come l'atmosfera terrestre potrebbe cambiare in futuro.

L'esplorazione del Sistema Solare interno è fondamentale per capire come si formano ed evolvono pianeti simili alla Terra e come possono sorgere pianeti abitabili in tutta la galassia. *La comprensione dei processi su scala planetaria - vulcanismo, tettonica, bombardamento da impatto, evoluzione dell'atmosfera e della magnetosfera e sviluppo ed evoluzione della vita - richiede uno studio comparativo dei pianeti più vicini alla Terra per conoscere gli effetti associati alle dimensioni e alla distanza dal pianeta. Sole, composizione e tipo di dissipazione dell'energia interna nel tempo.* Un confronto tra i pianeti interni mostra l'importanza di una grande luna nel rendere la Terra unica e forse unicamente adatta alla vita. Uno dei grandi progressi delle geoscienze è stato riconoscere che la Terra odierna rappresenta solo un passo in una progressione di cambiamenti guidati da un insieme complesso di fattori planetari interconnessi. Insieme a questo riconoscimento c'è la rivelazione che l'atmosfera e la biosfera della Terra sono entità fragili, facilmente perturbabili da processi su scala planetaria.

MESSENGER in quattro anni di orbita attorno a **Mercurio** ha scoperto diverse nuove caratteristiche del pianeta ma ha sollevato molte altre domande, dalla struttura interna all'ambiente e alla superficie. Prima della missione NASA pensavamo che Mercurio fosse un pianeta morto da centinaia di milioni di anni, ma le nuove osservazioni ci hanno mostrato un pianeta ancora vivo, o almeno vivo fino a poche decine di milioni di anni fa. Diversi eventi piroclastici sono stati mappati testimoniando un'attività abbastanza recente e sono state scoperte nuove caratteristiche misteriose, chiamate cavità, in molti siti sulla superficie, molto probabilmente associate a volatili. Ma MESSENGER non è stato in grado di fornire informazioni sulla composizione della superficie; inoltre, il ghiaccio d'acqua sembra essere presente nelle pareti in ombra del cratere sui poli, come nel caso della Luna. *Solo la missione ESA-JAXA BepiColombo, lanciata nel 2018, potrà rispondere a queste importanti domande, come altre legate alla struttura interna e all'esosfera.* Queste domande chiave sono fondamentali per comprendere meglio l'origine e l'evoluzione dei pianeti terrestri, considerando che Mercurio è il membro finale del nostro Sistema Solare.

Nonostante le numerose sonde entrate nell'atmosfera e atterrate sulla superficie di **Venere**, c'è ancora molto lavoro da fare per fare luce nella parte in gran parte inesplorata del pianeta al di sotto degli spessi strati di nubi. Venere è una sorta di laboratorio naturale estremo dove modellazione e dati convivono in perfetta simbiosi. Le osservazioni di Venus Express mostrano che Venere è un

planeta attivo. *Il monitoraggio della superficie per verificare l'esistenza di vulcanismo recente e attivo sul pianeta sarà necessario per identificare possibili colate laviche, e quindi per mappare i segni dell'attività recente. La comprensione della climatologia di Venere è essenziale anche per vincolare lo stato dell'arte della modellizzazione della nostra Terra,* importante per la previsione dei meccanismi di riscaldamento globale a lungo termine. Inoltre, Venere è comunemente considerato il più probabile pianeta simile a un pianeta terrestre da trovare come esopianeta, quindi la validazione della modellazione può beneficiare del supporto di un caso molto più studiato nel nostro Sistema Solare. Oltre all'interesse per la scienza, *Venere è anche un'ottima opportunità per progettare e sviluppare sistemi robotici in un ambiente estremamente ostile,* come quello che si trova nell'atmosfera profonda fino alla superficie del pianeta.

Le proprietà spettroscopiche e compositive delle rocce della crosta lunare sono interessanti perché contribuiranno al background scientifico per i modelli globali di formazione ed evoluzione della crosta lunare. I modelli attuali della composizione della crosta **lunare** si basano infatti sull'integrazione delle composizioni rocciose dei picchi centrali del cratere con i modelli geofisici dello spessore della crosta. Sebbene le caratteristiche di riflettanza spettrale delle rocce lunari e dei loro minerali componenti siano ben studiate, rimangono aperti alcuni problemi relativi all'identificazione spettroscopica e alla determinazione quantitativa delle fasi minerali saldate nelle rocce compatte.

L'obiettivo delle attività in corso e pianificate è quello di sviluppare librerie spettrali di minerali che compongono la roccia che sono assemblati nella fabbricazione delle rocce. Le misurazioni multiscala (di laboratorio, in situ, da remoto) e multitemperatura che simulano le condizioni della superficie lunare contribuiranno all'esplorazione sia in situ che remota della Luna.

Un altro aspetto importante è *lo studio delle deformazioni legate ai crateri da impatto, ai processi di modifica dei bacini e al degrado dei crateri da impatto della Luna.* Un'accurata topografia 3D da ricostruzioni stereo consentirà il rilevamento e la caratterizzazione di strutture relative a crateri da impatto, bacini multi-anello, creste rugose, scarpate lobate e graben.

L'analisi statistica e morfometrica dei semplici crateri lunari da impatto fornirà nuovi metodi per la datazione delle superfici planetarie.

La presenza dell'acqua sulla superficie lunare è un argomento scientifico che ha raccolto un rinnovato interesse, grazie all'osservazione indiretta effettuata dalle missioni Clementine e Lunar Prospector e dalle rinnovate analisi dei campioni lunari dell'Apollo. Due sono i meccanismi più probabili che potrebbero spiegare la presenza di acqua nei crateri delle calotte polari: impatti cometari o asteroidali e impianto di protoni vento solare. *Di particolare interesse sarà studiare gli effetti dell'accoppiamento tra il ghiaccio e la superficie della regolite e le proprietà della massa sul processo di sublimazione rispetto a ghiaccio d'acqua pura e simulanti di regolite.*

L'esplorazione lunare sta diventando sempre più importante, coinvolgendo diverse agenzie e istituti spaziali, e non si concentra solo su scopi scientifici. Sono già iniziate collaborazioni internazionali per discutere di progetti specifici, come il Deep Space Gateway con il coinvolgimento dell'ESA e della comunità europea. C'è anche un'interazione specifica tra l'ESA e l'Agenzia spaziale cinese (CNSA) sull'esplorazione lunare sullo sfruttamento dei dati di Chang'e' 4 e sulla futura collaborazione per le prossime missioni cinesi.

Essendo il corpo più vicino alla Terra, la sua indagine permette di pensare alla sua superficie come un possibile serbatoio di materiale da restituire alla Terra per le analisi di laboratorio. Il pacchetto PROSPECT, proposto all'ESA per l'esplorazione lunare, sarà trasportato in volo nella regione lunare del polo sud con la missione russa Luna-27 nel 2020. PROSPECT misurerà la composizione, l'abbondanza e gli isotopi dei volatili sulla superficie lunare e dimostrerà l'estrazione dell'acqua per utilizzo delle risorse.

Marte, tra i pianeti terrestri quello simile in un certo senso alla Terra, merita un posto speciale. Marte mostra le prove di un passato in cui l'acqua scorreva sulla sua superficie, con

enormi implicazioni sulla possibilità di forme di vita, e di sostanziali cambiamenti climatici, che potrebbero riflettere processi che hanno influenzato tutti i pianeti interni.

Con prove crescenti di un passato umido e caldo su Marte, i programmi delle Agenzie stanno spostando l'attenzione da una strategia generalmente nota come "Segui l'acqua" a una strategia volta a rispondere alla prossima domanda logica, "La vita è mai sorta su Marte?". I successi delle recenti missioni hanno portato a concludere che Marte avrebbe potuto sostenere la vita microbica. Pertanto, i programmi spaziali si stanno evolvendo per concentrarsi sulla determinazione se Marte sia mai stato abitabile e, attraverso una strategia di "Cercare segni di vita", se è possibile identificare prove di vita estinta o esistente: gli obiettivi primari del programma ExoMars sono cercare per tracce di gas e vita.

In futuro sarà importante analizzare la superficie, ricercare sorgenti di metano e utilizzare immagini 3D, studiare gas minori e distribuzioni di polveri, indagare sull'esistenza di biomarcatori sulla superficie di Marte, attraverso l'effetto triboelettrico su polveri e sabbia nell'ambiente marziano. Inoltre, i modelli atmosferici per Marte non sono stati ben convalidati a causa della mancanza di dati osservazionali sufficienti, e quindi la fiducia in essi è limitata.

I dati di densità, pressione, temperatura e vento sono misurazioni essenziali che devono essere eseguite dalla strumentazione futura.

Sebbene i budget limitati non supportino una missione di restituzione di campioni nel prossimo futuro, la raccolta e la restituzione di campioni da Marte rimane una delle massime priorità nel prossimo decennio.

2.4 I pianeti esterni e i loro satelliti | meccanismi

dettagliati di formazione dei pianeti nel Sistema Solare esterno non sono ancora ben compresi, poiché si stanno valutando e analizzando diverse ipotesi. *Lo studio comparativo delle loro atmosfere è uno strumento chiave per ottenere informazioni sulla natura più intima di questi sistemi complessi, dove gli effetti dei fenomeni non lineari (come la turbolenza) diventano spesso dominanti. In particolare, il ruolo delle diverse modalità di trasporto dell'energia e della quantità di moto può essere valutato solo confrontando diversi pianeti in cui questi fattori hanno un'importanza relativa diversa. In termini concreti, la validazione dei Modelli di Circolazione Globale (GCM) rispetto a dati provenienti da diversi pianeti diventa fattibile solo quando ampi dataset sui principali campi atmosferici (velocità del vento, temperatura, composizione) diventano disponibili a diverse scale spaziali e temporali. Allo stesso modo, anche la fisica magnetosferica trova sfide formidabili nella descrizione dei sistemi planetari esterni: intensità di campo estreme, forti interazioni con lune e anelli, varietà di sorgenti ioniche, componenti sostanziali non dipolari sono opportunità uniche per rilevare guasti e migliorare i nostri modelli attuali.*

Il Sistema Solare esterno ospita una notevole quantità di acqua e sostanze volatili. Oltre la "linea della neve" o "linea del gelo" situata a circa 2,7 UA dal Sole, dove la temperatura di equilibrio della radiazione scende al di sotto di ~150 K, il ghiaccio d'acqua è stabile su scale temporali geologiche sulla superficie dei corpi senz'aria. A distanze eliocentriche maggiori, il ghiaccio d'acqua è il principale costituente della superficie e dell'interno dei satelliti che ruotano attorno ai pianeti esterni. *L'esplorazione ravvicinata dei satelliti ghiacciati dei pianeti giganti merita una priorità molto alta. Mentre è noto o si prevede che alcuni satelliti ospiteranno grandi serbatoi sotterranei di acqua liquida, la chimica dei satelliti regolari dei pianeti giganti può essere direttamente correlata a un processo fisico simile a quello che,*

su scala più ampia, ha portato alla formazione dei pianeti stessi.

La complessità del **sistema di Giove**, che comprende più di 60 lune e un ambiente magnetico ben sviluppato, lo rende un *paradigma di sistema planetario, e come tale un buon esempio per studiare le condizioni per la formazione planetaria e l'emergere della vita.*

Recentemente abbiamo avuto una migliore comprensione dell'ambiente di Giove (composizione atmosferica,

magnetosphere, aurorae) grazie alla missione Juno (arrivata su Giove il 4 luglio 2016). In questo rispetto, la comunità è attivamente coinvolta con lo strumento Jupiter Infrared Auroral Mapper (JIRAM) che ha permesso di acquisire informazioni sulle aurore nord e sud, nonché sulla composizione delle nuvole.

Giove e le sue lune maggiori sono tradizionalmente considerate un Sistema Solare in miniatura. I risultati ottenuti dalla missione Galileo della NASA hanno chiarito che strati di acqua liquida di vario spessore interessano gli interni di Europa, Ganimede e Callisto. Quest'acqua è stabile su scale temporali geologiche ed è mescolata con altri materiali non ghiacciati, inclusi sali minerali e possibilmente organici, che potrebbero rendere questi ambienti abitabili. Questa scoperta, insieme all'osservazione diretta dei pennacchi di vapore acqueo che salgono dalla crosta ghiacciata di Europa, ha infatti aperto la strada a una nuova stagione di esplorazione spaziale di queste lune ghiacciate. Le prime due missioni di grande classe esplicitamente dedicate allo studio di **Europa** e **Ganimede** saranno la NASA Europa Clipper e l'ESA JUPiter ICy moons Explorer (JUICE), che arriveranno su Giove rispettivamente entro il 2028 e il 2030. Va notato che JUICE ed Europa Clipper contribuiranno notevolmente allo studio delle altre due lune galileiane Callisto e Io, meno importanti rispetto all'astrobiologia ma non meno interessanti in termini di proprietà e origini geofisiche.

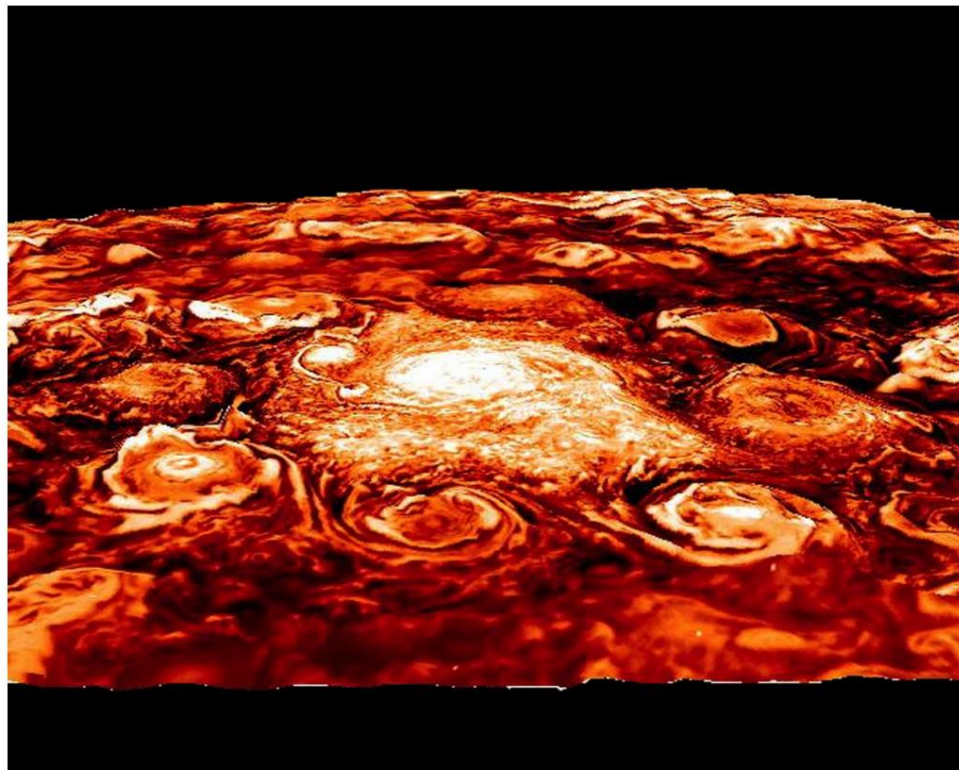


Fig. 2.1 Un'immagine 3D a infrarossi del Polo Nord di Giove, derivata dai dati raccolti dallo strumento Jovian Infrared Auroral Mapper (JIRAM) a bordo della navicella spaziale Juno della NASA.

Il **sistema di Saturno** affascina per la sua complessità e per la presenza di alcuni dei satelliti più interessanti dal punto di vista astrobiologico. Studi importanti da effettuare su Saturno attraverso osservazioni spaziali e terrestri sono l' *indagine sulla struttura atmosferica, l'analisi delle proprietà dell'anello e l'indagine sulla distribuzione del metano.*

Nel corso di un decennio di passaggi ravvicinati e sette passaggi ravvicinati del pennacchio, Cassini ha stabilito che **Encelado** ha un oceano globale di acqua salata, sostanze organiche e un possibile sistema o sistemi idrotermali alla base dell'oceano. Questo rende Encelado un *obiettivo chiave per l'esplorazione futura*, come tale

dei migliori corpi per cercare la vita esistente. Il primo passo per volare di nuovo attraverso i suoi jet con strumenti più avanzati, per effettuare misurazioni in situ o raccogliere un campione per il ritorno sulla Terra, può essere compiuto a breve termine con una missione di classe media.

L'atmosfera densa e densa di **Titano**, la luna più grande di Saturno, nasconde un mondo incredibile fatto di mari e laghi di metano liquido ed etano, dune di sabbia ricche di idrocarburi e possibili caratteristiche criovulcaniche. È probabile che il suo interno ospiti un oceano sotterraneo, dove l'acqua liquida potrebbe essere mescolata con l'ammoniaca. I risultati ottenuti su Titano da Cassini hanno già plasmato le future proposte di missione con una serie di indagini volte a coprire specifiche lacune lasciate alle spalle.

Gli obiettivi chiave sono, tra gli altri: svelare e mappare la composizione della superficie (inventario dei costituenti organici e presenza/assenza di ammoniaca), che forniscono indizi sull'origine della vita; fare luce sul ciclo del metano e sui serbatoi di metano; valutare se il criovulcanismo e il tettonismo sono attivamente in corso o sono relitti di un passato più attivo; chiarire l'esistenza di un campo magnetico e di un oceano sotto la superficie; e fare luce sulla chimica che si verifica nell'alta atmosfera a 400-900 km, che rimane poco esplorata dopo Cassini. Inoltre, i cambiamenti stagionali dell'atmosfera a tutti i livelli e la fuga a lungo termine dei costituenti nello spazio sono stati finora compresi solo marginalmente.

I giganti del ghiaccio **Urano e Nettuno** rappresentano un trampolino di lancio fondamentale nella nostra ricerca per comprendere la formazione e la storia del Sistema Solare esterno. L'importanza di comprendere Urano e Nettuno, inoltre, si estende oltre il nostro Sistema Solare, poiché i giganti del ghiaccio sembrano essere molto più comuni dei giganti gassosi tra gli esopianeti. Nel quadro delle future missioni in via di definizione per l'esplorazione di Urano e Nettuno, *lo studio delle atmosfere di questi "giganti ghiacciati" (che presentano notevoli quantità di C, N e O nei loro involucri gassosi) è il compito principale dell'indagine per questi sistemi*, poiché presentano sotto diversi aspetti fenomenologie uniche. Inoltre, l'indagine sulle composizioni di massa fornirà un vincolo chiave per gli scenari di formazione dei pianeti in queste regioni remote. Uniche sono anche le *opportunità di investigare i meccanismi del meteo spaziale planetario*: forti componenti non dipolari dei campi magnetici, configurazione geometrica unica della rotazione e degli assi magnetici, complessi sistemi aurorali già rilevati dagli osservatori a terra indicano Urano come test chiave da convalidare la nostra attuale visione della fisica della magnetosfera. *Le misurazioni spettroscopiche e geologiche congiunte delle loro maggiori lune ghiacciate saranno invece fondamentali per fornire importanti indizi su quei processi che, a varie scale spaziali, hanno plasmato il loro aspetto attuale, con particolare enfasi sull'identificazione e mappatura dei processi endogeni rispetto a quelli esogeni sulle principali Lune uraniane e attività criovulcanica in corso su Tritone.*

2.5 Corpi primitivi: comete, asteroidi, TNO e meteoroidi I cosiddetti corpi minori

sono bersagli di importanza cruciale per le indagini basate su entrambi telerilevamento ed esplorazione in situ. Sebbene in parte rielaborati dall'interazione con la radiazione solare, dagli impatti e dalla frammentazione nel corso della storia del Sistema Solare, e dai meccanismi gravitazionali e non gravitazionali che causano in molti casi una complessa evoluzione orbitale, i piccoli corpi sono i residui più diretti dei planetesimi originari che si sono accresciuti nei pianeti maggiori. Inoltre, i piccoli corpi comprendono in alcuni casi i materiali organici, che sono i mattoni elementari nella costruzione della vita.

Tra le maggiori scoperte che nell'ultimo decennio hanno cambiato e rimodellato le nostre opinioni, possiamo elencare:

• I miglioramenti negli studi dinamici del sistema solare, che hanno rivelato una storia complessa di mescolamento tra corpi formati in diverse regioni del sistema solare.

• I miglioramenti nella nostra conoscenza delle proprietà fisiche dei corpi primitivi attivi e non attivi che orbitano a diverse distanze eliocentriche.

• La scoperta del ghiaccio d'acqua su asteroidi come 16 Psyche e 24 Themis, e di una nuova classe di oggetti, le comete Main Belt. • Le scoperte della missione Dawn sul 4 Vesta e Cerere, che fanno più luce sui processi di formazione degli asteroidi e del Sistema Solare in generale. • Le scoperte di Rosetta, che hanno rimodellato le nostre opinioni sulla formazione delle comete e

cambiato molti concetti sulla loro attività e composizione.

Gli ultimi anni hanno visto anche importanti cambiamenti nel modo in cui raccogliamo le informazioni sui corpi minori, con la *crescente importanza degli studi geomorfologici e geologici delle superfici resi possibili da immagini incredibilmente dettagliate. Un ulteriore importante miglioramento è ora atteso dalle missioni di restituzione dei campioni.*

Sono in corso studi dettagliati su piccoli corpi primitivi appartenenti alle **popolazioni Near Earth Object, asteroidi, centauri e transnettuniani**. I piccoli corpi "primitivi" si sono formati nelle regioni esterne ricche di acqua e organica del disco protoplanetario e si pensa che includano la fonte più probabile di materiale prebiotico terrestre. Inoltre, gli attuali scenari esobiologici per l'origine della vita invocano la consegna esogena di materia organica alla Terra primordiale. I pianeti del Sistema Solare interno hanno sperimentato un intenso afflusso di materiale ricco di sostanze organiche per diverse centinaia di milioni di anni dopo la loro formazione, e le prime prove di vita sulla Terra coincidono con il declino di questo bombardamento.

L'analisi dei dati di Gaia rappresenterà un importante passo avanti nella scienza degli asteroidi. Anche dopo la fine della missione, il catalogo Gaia delle posizioni stellari e delle orbite degli asteroidi consentirà di estendere enormemente l'uso della tecnica delle *occultazioni stellari per l'accurata determinazione delle dimensioni e delle forme degli asteroidi*. Questa sarà un'importante attività di ricerca nella scienza degli asteroidi per gli anni a venire, a partire dai primi rilasci intermedi di dati di Gaia, ed è importante pianificare sin da ora le attività necessarie, che potrebbero anche essere un ottimo modo per fare buon uso di diversi piccoli telescopi che sono attualmente inattivi o prossimi alla chiusura. Si noti che gli eventi di occultazione stellare danno i migliori risultati quando lo stesso evento viene osservato da diversi osservatori lungo la traccia d'ombra, perché questo porta a una ricostruzione diretta del profilo del corpo occultante. *È quindi altamente auspicabile un buon coordinamento degli osservatori, che includa anche gruppi eventualmente attivi di dilettanti.*

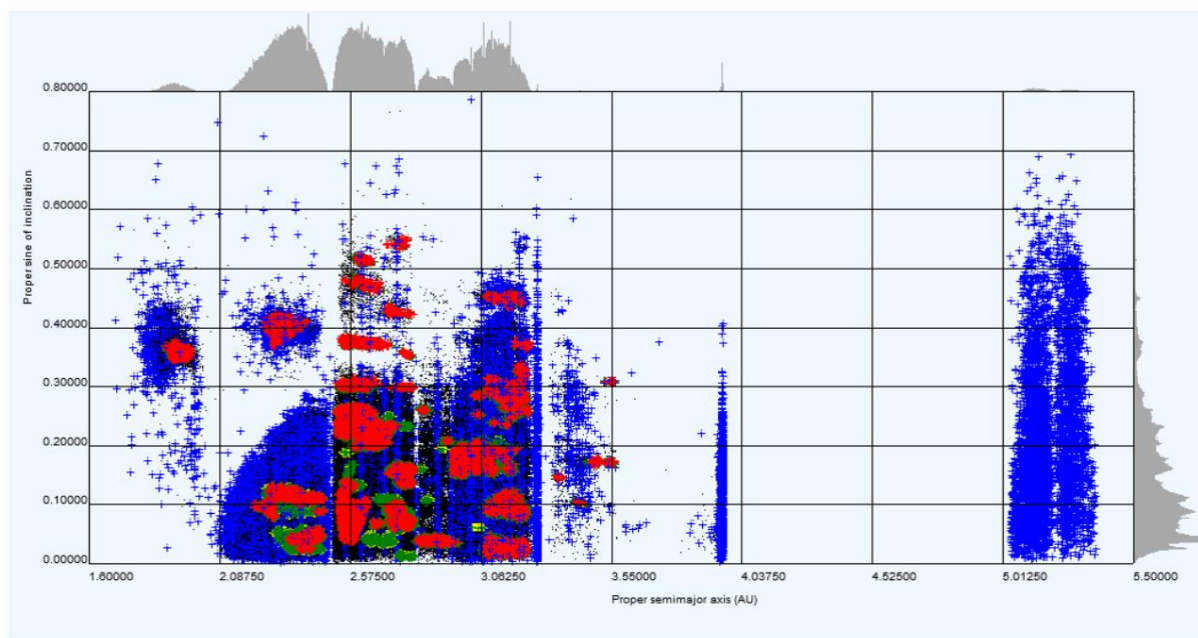


Fig.2.2 Grafico del peccato (corretta inclinazione orbitale) rispetto al semiasse orbitale corretto per gli asteroidi della cintura principale e gli asteroidi troiani di Giove. I punti rossi e verdi indicano i membri di famiglie dinamiche identificate utilizzando i metodi classici del Clustering Gerarchico (Milani et al., 2014).

È noto da decenni che la maggior parte dei planetesimi originariamente accumulati nella regione occupata dall'attuale asteroide Cintura principale sono stati rimossi e persi per sempre durante le prime fasi caotiche dell'evoluzione del nostro sistema planetario. Molto recentemente, tuttavia, la scoperta di una rara classe di oggetti che esibiscono insolite proprietà polarimetriche e spettroscopiche (i cosiddetti **asteroidi "Barbari"**) suggerisce che questi oggetti potrebbero essere i rari sopravvissuti della primissima generazione di planetesimi accresciuti nel Sistema Solare interno. In particolare, *abbiamo bisogno di ulteriori prove per confermare che i Barbari sono estremamente antichi e primitivi*. Se questo sarà vero, questi rari asteroidi saranno i bersagli ideali per le missioni spaziali volte a recuperare campioni dei materiali più primitivi accumulati all'alba del Sistema Solare.

Altri bersagli interessanti per un'esplorazione in situ sarebbero *classi di asteroidi mai esplorate prima, come i cosiddetti asteroidi metallici di cui 16 Psiche è un buon esempio, e il numero crescente di asteroidi su cui sono presenti tracce di acqua ghiacciata sono stati trovati, come 24 Themis*. A questo elenco dobbiamo aggiungere il pianeta nano **Cerere**, recentemente esplorato da Dawn, che meriterebbe un'analisi molto più completa.

Rosetta ha fornito un'incredibile quantità di nuovi dati con dettagli senza precedenti sul nucleo e sulla chioma di una **cometa**; ci vorranno anni prima che la comunità sfrutti appieno tutte le nuove informazioni. Già i dati sulla struttura e la composizione del nucleo di 67P/Churyumov-Gerasimenko hanno cambiato le nostre opinioni sui processi di formazione ed evoluzione delle comete. Allo stesso tempo siamo consapevoli che potrebbero esserci grandi differenze tra le comete dinamicamente nuove (DNC), non ancora esplorate, mai entrate prima nel Sistema Solare interno, e le comete appartenenti alle altre classi dinamiche. *Maggiori ulteriori miglioramenti nella conoscenza delle comete dovrebbero derivare, oltre che da missioni di esplorazione ad altri nuclei cometari, da missioni di ritorno di campioni e, per quanto riguarda i processi di formazione, dallo studio dei processi di formazione di polvere che potrebbero essere effettuati ad esempio con ALMA o SKA.*

La tradizionale distinzione dei piccoli corpi tra asteroidi e comete è diventata molto meno netta negli ultimi anni. A parte il fatto noto che nella popolazione degli asteroidi vicini alla Terra possono essere presenti comete estinte, un'importante scoperta è stata quella dell'esistenza delle cosiddette **comete della Cintura Principale**, piccoli corpi con orbite asteroidali, che hanno trovato esibiscono episodi di attività cometaria. *È necessario ottenere maggiori dati su questi oggetti e studiare come l'attività cometaria osservata possa essere innescata da una varietà di possibili meccanismi, in particolare dalla distanza eliocentrica e dal possibile verificarsi di piccoli impatti rimuovendo parte del materiale superficiale.*

Lo studio delle **meteore** luminose, o "bolle di fuoco", si sta sviluppando rapidamente in Europa, grazie alla disponibilità di una nuova generazione di telecamere all-sky e al ruolo attivo svolto dalla comunità francese. L'Italia rappresenta da tempo una lacuna nella copertura del cielo europeo per quanto riguarda le reti professionali di osservatori meteorici. *Gli eventi Fireball non sono importanti solo in senso statistico, vale a dire per valutare l'inventario e la distribuzione dimensionale dei piccoli corpi planetari oltre il limite di rilevamento per le osservazioni telescopiche. Possono anche essere associati alla caduta effettiva di **meteoriti**, il cui studio è di straordinaria importanza per la nostra comprensione della storia del Sistema Solare. Si sta sviluppando anche una sinergia con i ricercatori dell'INFN, per utilizzare rivelatori a bordo della ISS per osservare nell'UV sia eventi di raggi cosmici ultra energetici, sia meteore di diversa luminosità.*

2.6 Astrobiologia: il Sistema Solare come laboratorio per studiare le condizioni che danno origine all'emergere della vita

L'astrobiologia è lo studio dell'origine, dell'evoluzione e della distribuzione della vita nello spazio. *L'astrobiologia è una disciplina di ricerca che spazia in vaste aree dei campi scientifici e necessita di un elevato livello di know-how multidisciplinare, tra cui astrofisica, biologia, chimica, biofisica e geologia, e richiede uno sforzo congiunto di teoria, osservazioni, simulazioni al computer e esperimenti di laboratorio.* La vita è il risultato della crescita della complessità molecolare e dell'evoluzione strettamente legata agli ambienti planetari. Il numero di molecole organiche scoperte nello spazio è in continuo aumento. Si formano nelle fredde nubi molecolari e nelle prime fasi della formazione stellare. La nostra comprensione dell'evoluzione delle molecole organiche e del loro viaggio dalle nubi molecolari al primo Sistema Solare e alla Terra fornisce importanti vincoli all'emergere della vita sulla Terra e forse altrove. I minerali hanno un ruolo importante nel guidare l'evoluzione prebiotica di sistemi chimici complessi, mediando gli effetti delle radiazioni elettromagnetiche, influenzando la fotostabilità delle molecole organiche, catalizzando importanti reazioni chimiche e/o proteggendo le molecole dalla degradazione. *È quindi necessario studiare in laboratorio la fotostabilità di biomolecole (es. nucleobasi, amminoacidi, acidi carbossilici, acidi grassi, ecc.) in condizioni spaziali in presenza di matrici minerali al fine di indagare sia i processi prebiotici che potrebbero aver avuto un ruolo nello sviluppo dei primi esseri viventi sulla Terra e nei processi fisici e chimici che si verificano negli ambienti extraterrestri.*

Il Sistema Solare può essere considerato un laboratorio per lo studio dell'abitabilità, delle condizioni e dei processi evolutivi che possono dare origine all'emergere della vita. La crescente conoscenza dell'evoluzione del nostro Sistema Solare e la scoperta dei sistemi extrasolari hanno aperto una serie di interrogativi sull'origine della vita e sulle condizioni che possono permetterne l'evoluzione. La determinazione delle condizioni di abitabilità, ad esempio la presenza di acqua liquida e di fonti energetiche in grado di sostenere la vita, che non sono necessariamente associate a un unico ambiente specifico, sarà importante per identificare pianeti potenzialmente abitabili in altri sistemi. Lo stesso Sistema Solare può presentare tali condizioni in siti diversi dalla Terra e i meccanismi di evoluzione degli ambienti abitabili attraverso i sistemi solari devono essere

studiato. *Per rispondere alla domanda fondamentale sull'origine della vita è fondamentale capire in quali condizioni la vita può essere originata, controllata e sostenuta, e in particolare come ciò avvenga se materiale prebiotico viene portato da altrove.* L'influenza di piccoli corpi sull'ambiente planetario primordiale e la radiazione ad alta energia della giovane stella madre possono essere essenziali per l'inizio e la sopravvivenza della vita. *Lo studio dell'evoluzione molecolare delle sostanze organiche abiotiche presenti negli oggetti del sistema solare, inclusa la Terra primordiale, sotto il ruolo combinato di agenti fisici come variazioni termiche, particelle ad alta energia, fotoni e irraggiamento del vento solare è un compito che sarà perseguito nel prossimo decennio.*

Allo stesso tempo, il feedback sulla chimica delle atmosfere planetarie è una questione importante che amplierà la nostra comprensione dei principi generali dell'abitabilità.

2.7 Attività scientifiche per il prossimo decennio

Nei prossimi anni la nostra community sarà impegnata a lavorare sulle operazioni e sui dati delle missioni operative (Gaia, Juno, BepiColombo) e future (JUICE); un grande sforzo sarà dedicato all'interpretazione dell'enorme mole di informazioni ottenute da queste missioni oltre che da quelle concluse di recente (Cassini, Rosetta, Dawn). Ciò contribuirà ad elaborare e perfezionare teorie avanzate per spiegare la formazione e l'evoluzione di questi pianeti e satelliti nel contesto generale della scienza dei sistemi planetari.

Grazie al coinvolgimento della comunità italiana con missioni ancora operative e future (Mars Express, Mars Reconnaissance Orbiter, ExoMars), l'esplorazione di Marte, con lo studio della sua evoluzione e abitabilità passata, e la ricerca di tracce di vita, continuerà ad essere un'attività importante. Uno sfruttamento ottimale dei dati trarrà grandi vantaggi da un lavoro di laboratorio di alta qualità.

· L'esplorazione del nostro Sistema Solare è appena iniziata: ci sono ancora diversi corpi planetari, come i giganti di ghiaccio Urano e Nettuno, grandi satelliti ghiacciati, Main Belt e nuove comete dinamicamente, classi peculiari di Main Belt e asteroidi vicini alla Terra che sono ancora poco conosciuti o addirittura non ancora esplorati da vicino da un veicolo spaziale. Gli sforzi saranno dedicati all'ideazione e alla progettazione di missioni e strumenti per questi nuovi obiettivi, nonché all'esecuzione di campagne dedicate di osservazioni ausiliarie da strutture terrestri e spaziali.

· Nei prossimi anni la comunità scientifica italiana riceverà sicuramente campioni di asteroidi (dalle missioni OSIRIS-REx e Hayabusa 2) e, secondo i piani di diverse agenzie spaziali, anche di comete, della nostra Luna e di Marte. In questo contesto, la nostra comunità parteciperà attivamente agli sforzi internazionali per la preparazione e lo sviluppo di strutture di analisi e per lo sviluppo delle competenze necessarie.

Domanda chiave	Metodo	Progetto
<i>Processi che hanno determinato la formazione e l'evoluzione del Sistema solare</i>	Informazioni dettagliate su corpi primitivi, pianeti e satelliti	Bepi Colombo, SUCCO, ExoMars
	Osservazioni a distanza di corpi primitivi, sistemi esoplanetari (processi di aggregazione delle polveri, processi di formazione)	SKA, ALMA, JWST, altri telescopi terrestri e spaziali
	Simulazioni numeriche (evoluzione dinamica, processi di formazione, evoluzione termofisica e differenziazione...)	HPC
	Esperimenti di laboratorio (aggregazione di polveri, ...)	
<i>Processi che determinano l'aspetto e le proprietà dei corpi del Sistema Solare</i>	Informazioni dettagliate su tutti i corpi del Sistema Solare (superfici e atmosfere)	Bepi Colombo, SUCCO, ExoMars, Gaia
	Osservazioni a distanza di tutti i corpi del Sistema Solare	ALMA, SKA, JWST, altri telescopi
	Simulazioni numeriche (codici termofisici, simulazione di atmosfere, ...)	HPC
	Esperimenti di laboratorio (misure spettroscopiche, ...) Studio di terreni e siti analogici	
<i>Processi evolutivi che danno origine all'emergere della vita</i>	Informazioni dettagliate sui corpi che potrebbero ospitare, o hanno ospitato, forme di vita Informazioni dettagliate sui corpi che potrebbero avere, o aver avuto, acqua allo stato liquido Informazioni dettagliate su materiale organico e ghiacci nel Sistema Solare	ExoMars, SUCCO
	Osservazione a distanza di corpi primitivi (materiale organico e ghiacci)	ALMA, SKA, altri telescopi
	Simulazioni numeriche	HPC
	Esperimenti di laboratorio Studio di terreni e siti analogici	

1. Sistemi planetari extrasolari

Parole chiave: sistemi planetari, stelle ospiti, ambiente stellare

Le proprietà dei pianeti extrasolari, come le caratteristiche dell'orbita, la massa, il raggio, le composizioni strutturali e atmosferiche e i tassi di molteplicità costituiscono la prova fossile osservativa fondamentale di complessi processi di formazione planetaria in dischi circumstellari con diverse proprietà fisiche e morfologiche. La determinazione delle caratteristiche architettoniche, strutturali e atmosferiche di esopianeti combinata con la varietà di interazioni gravitazionali (ad esempio, risonante, secolare) in più sistemi (con Super Terre e miscele di pianeti giganti terrestri e gassosi) osservate attualmente consentono anche noi per ricostruire la storia della migrazione e dell'evoluzione dinamica dei sistemi esoplanetari durante e dopo la formazione. La corretta comprensione dei meccanismi di formazione, evoluzione fisica e dinamica dei sistemi planetari è anche direttamente collegata alle proprietà delle stelle madri (massa, composizione chimica, età) e all'ambiente stellare. Infine, la definizione dell'abitabilità planetaria e l'identificazione degli ambienti abitabili sono passaggi chiave verso l'individuazione della vita oltre la Terra. Le questioni chiave (tutte di uguale priorità) sono così identificate e discusse in dettaglio di seguito.

Le domande chiave: 1) quali sono le architetture e le dinamiche dei sistemi planetari in funzione di massa, raggio e separazione orbitale?; 2) quali sono la chimica e la dinamica delle atmosfere esoplanetarie?; 3) in che modo le architetture planetarie, le strutture interne e le atmosfere dipendono dalle caratteristiche delle stelle ospiti e dal loro ambiente?; 4) quali sono i processi evolutivi che danno origine all'emergere della vita?

3.1 Architettura e dinamica dei sistemi planetari in funzione di massa, raggio e separazione orbitale

La scoperta di migliaia di sistemi esoplanetari grazie principalmente a rilievi di velocità radiale ad alta precisione e programmi di transito sia da terra che nello spazio (vedi Fig. 1) ha rivelato una straordinaria diversità delle loro architetture: i punti salienti includono sistemi compatti di pianeti di piccole dimensioni dimensione/massa attorno a stelle di tipo solare; altri sistemi contenenti Terre e Super Terre isolate con brevi periodi orbitali o singoli Giove caldi; sistemi multipli di giganti gassosi a distanze di poche decine di UA. Questa diversità rappresenta uno stimolo costante per la ricerca teorica sulla formazione e l'evoluzione dei pianeti extrasolari e del nostro sistema solare. La ricerca all'avanguardia del prossimo decennio nel campo affronterà molte delle domande ancora aperte:

- *Quanto è diffuso il sistema solare? Perché non contiene super Terre o Giove caldo?*
- *Qual è l'influenza dei pianeti giganti gassosi e delle interazioni tra di loro sulla formazione e sopravvivenza di pianeti rocciosi (possibilmente abitabili)?*
- *In che misura l'architettura e le proprietà fisiche di un sistema planetario e la possibile esistenza di pianeti abitabili in esso dipendono dalle caratteristiche del disco protoplanetario (massa, composizione chimica, morfologia) rispetto ai processi stocastici legati alle interazioni planetarie?*

- Qual è l'origine della diversità osservata nelle densità dei pianeti, e quindi nella composizione interna dedotta, in particolare per i mini-Nettuni e le Super Terre?
- Esistono davvero mondi d'acqua, cioè piccoli pianeti composti per circa il 50% di acqua (sopra un nucleo di ferro e un mantello di silicato)?
- Qual è il ruolo delle interazioni dinamiche nei processi di migrazione planetaria per i sistemi con massicci pianeti gioviani rispetto ai sistemi compatti della super Terra e del mini-Nettuno?

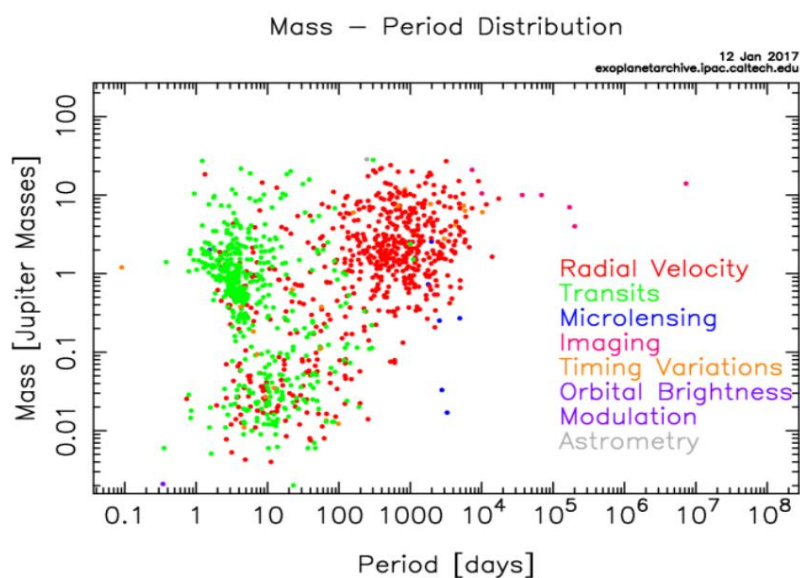


Fig.3.1 - Massa dell'esopianeta - diagramma del periodo (a gennaio 2017).

Le risposte a queste domande fondamentali nello studio dei sistemi esoplanetari richiedono certamente ulteriori sforzi sia dal punto di vista teorico che osservativo.

Scoperte di nuovi esopianeti e caratterizzazioni sempre più dettagliate di sistemi già conosciuti consentiranno una maggiore esplorazione dello spazio parametrico (planetario e stellare) e consentiranno di effettuare analisi individuali e statistiche sempre più accurate.

Questi forniranno un banco di prova cruciale per la formazione planetaria e i modelli di evoluzione, ad esempio per confrontare le osservazioni con le popolazioni planetarie sintetiche.

Le tecniche doppler e fotometriche di transito hanno oggi raggiunto un alto grado di maturità e contribuiranno ancora in modo critico all'avanzamento del campo nel prossimo decennio, in particolare se applicate in combinazione alla classe dei sistemi di esopianeti in transito. L'INAF è recentemente diventata uno dei principali attori del settore. *Il programma a lungo termine dell'Architettura Globale dei Sistemi Planetari (GAPS) con HARPS-N/TNG ha coagulato la comunità degli esopianeti italiani.* GAPS ha consentito ai ricercatori dell'INAF di iniziare ad avere un impatto sul campo con un progetto multiforme e competitivo volto a descrivere le proprietà architettoniche dei sistemi planetari in un'ampia gamma di separazione di massa e orbitale in funzione delle proprietà stellari e dell'ambiente. *L'INAF guida anche il progetto ETAEARTH, finanziato dall'UE, recentemente concluso, che utilizza la spettroscopia HARPS-N GTO, la fotometria Kepler+K2 e l'astrometria Gaia per la determinazione accurata delle proprietà strutturali dei sistemi planetari terrestri in transito.* Oltre il 50% degli oggetti nel diagramma del raggio di massa con

determinazioni di massa accurate mostrate in Fig. 3.2 sono state misurate da HARPS-N nell'ambito del progetto ETAEARTH.

HARPS-N rimarrà altamente competitivo per diversi anni a venire, svolgendo un ruolo importante (con il coinvolgimento diretto dell'INAF) nell'accurata determinazione della massa di piccoli pianeti in transito ravvicinati in transito attorno a stelle luminose rivelate dalle future missioni di transito di esopianeti (che vedono un coinvolgimento strategico dell'INAF). La caratterizzazione strutturale dettagliata di questi sistemi consentirà la ricerca di correlazioni significative tra la composizione interna del pianeta e le abbondanze elementali stellari, oltre a derivare un accurato raggio di massa

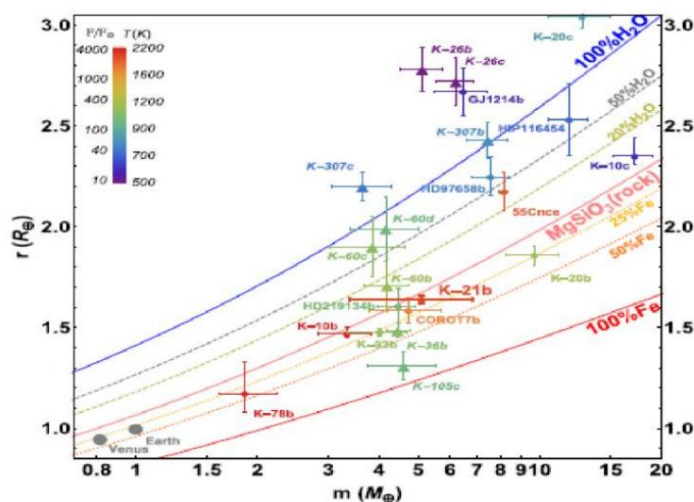


Fig. 3.2 - Diagramma del raggio di massa per pianeti in transito con una precisione di massa del 30% inferiore a 20 masse terrestri Diagramma di massa dell'esopianeta - periodo (a gennaio 2017).

relazioni per stabilire la transizione tra pianeti rocciosi e avvolti da volatili in funzione del flusso irradiato. Alcuni dei sistemi saranno anche bersagli principali per la successiva caratterizzazione atmosferica con ad esempio JWST. *La copertura simultanea della lunghezza d'onda visibile e NIR fornita dalla modalità di osservazione combinata di GIANO+HARPS-N (GIARPS) messa a disposizione dall'INAF al TNG offrirà una nuova opportunità ai ricercatori dell'INAF.* GIARPS sarà sfruttato per il monitoraggio Doppler ad alta precisione e il rilevamento ravvicinato di pianeti (Giove caldo) attorno a stelle molto giovani, fornendo informazioni cruciali sulle scale temporali della migrazione dei pianeti, sui meccanismi che la causano e sull'impatto delle interazioni di marea stella-pianeta. *Su scale temporali simili, lo spettrografo del visibile ad altissima precisione ESPRESSO/ VLT (in cui l'INAF gioca un ruolo rilevante con accesso diretto al programma GTO) avrà la capacità di rilevare pianeti di piccola massa nella zona abitabile di stelle simili a il Sole, utilizzando strategie di osservazione a cadenza molto alta su un numero limitato di stelle per diversi anni.*

Si prevede che l'astrometria ad alta precisione con Gaia fornirà decine di migliaia di nuovi rilevamenti di pianeti giganti a separazione intermedia (fino a diverse AU), rivoluzionando così la nostra comprensione delle frequenze e dell'architettura dei sistemi planetari fino alla regione di transizione di massa tra giganti gassosi e nane brune, in funzione delle varie proprietà dell'ospite stellare (massa, età, composizione chimica e ambiente).

Osservazioni nel vicino infrarosso per immagini ad alto contrasto con strumenti presenti e futuri (con forte partecipazione dell'INAF e nave PI diretta dall'INAF) per la determinazione delle proprietà fisiche di giovani pianeti giganti ad ampia separazione (decine di AU) consentiranno di ottenere inferenze decisive su i meccanismi di formazione (accrescimento del nucleo, instabilità del disco, frammentazione del disco) e i meccanismi di evoluzione orbitale in un regime di separazioni del tutto

complementare all'astrometria, ai RV e alla fotometria di transito. Queste osservazioni forniranno anche approfondimenti sulla varietà di possibili interazioni tra i pianeti e i dischi circumstellari che sono ritenuti responsabili della pleora di diverse morfologie dei dischi osservate. A lungo termine, sarebbe strategico per l'INAF essere coinvolto in WFIRST che è impostato per raggiungere un livello di contrasto della lunghezza d'onda visibile di 10⁻⁹ e un angolo di lavoro interno inferiore a 0,2 secondi d'arco nella sua modalità coronografica, e osserverà esopianeti vicini ed eseguire un'indagine delle stelle più vicine per cercare esopianeti sensibili a Nettuni e Super Terre maturi.

3.2 Chimica e dinamica delle atmosfere esoplanetarie

La misurazione della densità media e l'identificazione di molecole nelle atmosfere di pianeti extrasolari di tipo terrestre in transito e giganti sono cruciali per comprendere i processi di formazione ed evoluzione planetaria, dando origine a una straordinaria varietà di composizione interna, chimica e atmosferica dinamiche (compresa la formazione delle nubi), con meccanismi di interazione (soprattutto per i pianeti rocciosi) tra proprietà strutturali e atmosferiche, e con ricadute cruciali sulle potenziali prospettive di abitabilità. Attualmente, i dati provenienti da strumenti spaziali e terrestri (raccolti principalmente attraverso la fotometria a banda larga e la spettroscopia a bassa risoluzione) stanno già portando a deduzioni nominali di varie proprietà atmosferiche degli esopianeti. I punti salienti dell'analisi degli spettri esoplanetari includono il rilevamento delle caratteristiche spettrali atomiche e molecolari; osservazione dei gradienti di temperatura giorno-notte; e vincoli sulla struttura atmosferica verticale.

Questi risultati a loro volta consentono di porre vincoli precoci su una miriade di processi atmosferici.

I futuri progressi nelle osservazioni atmosferiche e nella teoria faranno avanzare la caratterizzazione esoplanetaria in tre direzioni distinte (vedi Fig. 3). In primo luogo, solide inferenze di proprietà chimiche e termiche miglioreranno la nostra comprensione dei vari processi fisici e chimici nell'atmosfera esoplanetaria gigante. In secondo luogo, migliori vincoli sui rapporti di abbondanza degli elementi in tali atmosfere inizieranno a informarci sui loro ambienti di formazione. Infine, le osservazioni ad alta precisione aiuteranno a determinare le composizioni atmosferiche delle super-Terre, che, a loro volta, limiteranno le loro composizioni interiori e la storia evolutiva dal momento della formazione. La spettroscopia terrestre ad alta dispersione (HDS) nel vicino infrarosso (NIR) è diventata di recente uno strumento molto efficace per lo studio delle atmosfere degli esopianeti. Ad alta risoluzione spettrale le molecole vengono risolte in singole linee, in modo che le specie possano essere identificate in modo robusto mediante corrispondenza di linee con modelli di modelli planetari. L'HDS nel NIR consente di rilevare specie molecolari e attenuazioni dovute a foschie/nuvole, ma anche di stimare le abbondanze (ad es. C/O e O/H) e di scoprire la presenza di venti che fluiscono dal caldo lato diurno all'emisfero notturno più fresco. Contrariamente alle osservazioni a bassa e media risoluzione, fornisce un accesso critico agli studi di spettroscopia di emissione per sistemi ravvicinati non in transito.

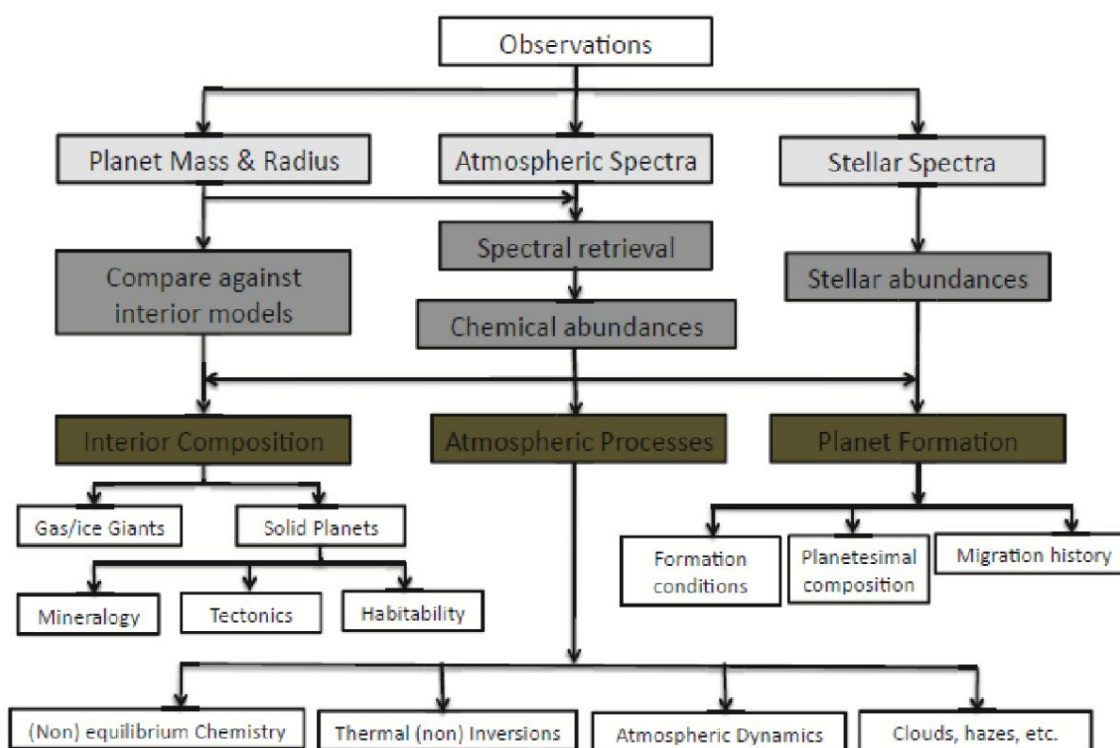


Fig.3.3 - Diagramma schematico del percorso verso la caratterizzazione degli esopianeti (da Madhusudhan et al. 2014, PPVI, UoA Press).

La comunità INAF dovrebbe essere coinvolta profondamente nello studio delle atmosfere esoplanetarie, in particolare con l'accesso alla copertura simultanea e senza precedenti della lunghezza d'onda visibile e NIR fornita dalla modalità di osservazione combinata di GIARPS messa a disposizione dall'INAF al TNG. Soprattutto nel NIR, GIARPS consentirà di studiare le atmosfere di Giove caldi in transito (ma anche non in transito) e possibilmente di pianeti delle dimensioni di Nettuno in orbita attorno a stelle relativamente luminose ($K < 8-9$).

Lo sfruttamento del potenziale di GIARPS per la caratterizzazione delle atmosfere degli esopianeti aprirà la strada, nel prossimo decennio, a nuove opportunità per l'INAF di diventare un leader nel campo degli studi atmosferici dei pianeti tramite HDS nel visibile e NIR, con strumenti progettati per telescopi di maggiore apertura. *Spettacolari successi per la spettroscopia di trasmissione da terra e studi sulla variazione di fase ad alta risoluzione spettrale nel visibile e nel NIR sono attesi con la prossima strumentazione in cui l'INAF ha ruoli di responsabilità o effettiva nave PI (es. HIRES/ELT).* Tali strutture potrebbero anche rendere possibile la caratterizzazione delle atmosfere di esopianeti di dimensioni terrestri. Nello spazio, il James Webb Space Telescope (JWST) offre attualmente le migliori prospettive future per studi dettagliati sulle atmosfere esoplanetarie. Data la sua ampia apertura e copertura spettrale, JWST sarà in grado di ottenere spettri S/N molto alti, a bassa e media risoluzione di un numero selezionato di pianeti giganti caldi in transito, Nettuni caldi e super Terre temperate attorno a stelle di piccola massa, vincolando così rigorosamente loro proprietà chimiche e termiche. In particolare, le capacità spettroscopiche degli strumenti a bordo del JWST forniranno un'ampia copertura della lunghezza d'onda, comprese le caratteristiche spettrali di tutti i principali

molecole in atmosfere giganti gassose. *D'altra parte, missioni di rilevamento spaziale dedicate per la caratterizzazione atmosferica di esopianeti come ARIEL (selezionato dall'ESA come missione M4, con nave coPI INAF) osservano un gran numero (~1000) di pianeti in transito per la comprensione statistica, compresi quelli caldi e giganti gassosi caldi, Nettuno e super Terre calde, fornendo quindi un quadro rappresentativo della natura chimica degli esopianeti e collegandolo direttamente al tipo e all'ambiente chimico della stella ospite.*

Nuovi strumenti specializzati per l'imaging ad alto contrasto (HCI) attualmente o presto disponibili presso i telescopi a terra dietro sistemi di ottica adattiva di nuova concezione forniranno flussi NIR e spettri a bassa risoluzione ad alto SNR per i giovani pianeti giovani su orbite ampie (decine di AU). *Nell'emisfero sud l'INAF ha un coinvolgimento strategico in SPHERE/VLT, mentre nel nord l'Istituto guida la costruzione di SHARK/LBT.* Le prospettive per la caratterizzazione dell'atmosfera sono eccellenti con l'accesso a una così grande quantità di dati spettrali. Anche a bassa risoluzione, le ampie caratteristiche molecolari di H₂O e CH₄ dovrebbero essere misurabili. Se sono presenti nuvole, gli spettri saranno notevolmente più lisci e più rossi. Avere accesso alle bande Y e J aiuterà notevolmente a restringere la gamma preferita di dimensioni e spessori delle particelle di nuvola. Gli spettri delle bande H e K forniranno stime indipendenti della gravità superficiale. Inoltre, avere spettri per molti pianeti con età, masse e luminosità diverse porterà rapidamente a miglioramenti in teoria e aiuterà a districare le degenerazioni del modello come quelle tra temperatura effettiva e gravità superficiale. Gli ELT e la nuova strumentazione nello spazio promettono di aumentare notevolmente il numero di sistemi planetari sottoposti a imaging diretto, con contrasti maggiori e fino a masse inferiori e/o a età più anziane. JWST, con capacità IR e medio-IR, fornirà la capacità di lunghezza d'onda più lunga tanto necessaria per la spettroscopia diretta di pianeti subgiovani. *Infine, la combinazione di HDS e HCI consentirà indagini sistematiche della composizione atmosferica di pianeti terrestri potenzialmente abitabili attorno alle stelle di tipo solare più vicine con l'obiettivo di rilevare possibili gas biogenici (H₂O, O₂, CH₄ e CO₂).*

3.3 Dipendenza dalle stelle ospiti e dalle proprietà dell'ambiente stellare

Un passo fondamentale sarà valutare con precisione il ruolo della massa stellare e della composizione chimica (usati come proxy per quelli dei dischi circumstellari) nell'efficienza della formazione di sistemi attraverso una gamma di masse, raggi e architettura orbitale. L'evoluzione delle proprietà orbitali, strutturali e atmosferiche degli esopianeti può essere studiata in modo efficace solo collegando le osservazioni di "sistemi maturi" con la determinazione dello spettro delle condizioni iniziali nei dischi protoplanetari attorno a giovani stelle. Infine, dovrebbe essere compreso in dettaglio l'impatto degli effetti 'ambientali' come la binarietà e la densità stellare variabile (cluster) sulle frequenze e sulle caratteristiche fisiche e dinamiche dei sistemi esoplanetari. Queste domande fondamentali sono strettamente legate ad altre questioni, come la comprensione di a) come l'attività e l'evoluzione stellare influenzano i sistemi planetari, b) come la formazione stellare potrebbe influenzare lo spettro delle condizioni iniziali e c) come concetti specifici relativi ai sistemi planetari maturi, in particolare l'abitabilità (e la possibilità di sviluppo di biologia complessa), risentono dei vari livelli di interazione tra i suddetti processi.

La comunità di esopianeti INAF attraverso il programma GAPS con HARPS-N a TNG sta conducendo esperimenti fondamentali volti a quantificare le connessioni tra i tassi di occorrenza dei pianeti su ampi intervalli di separazione di massa e orbitale e proprietà stellari e

ambiente, con ricerche RV mirate di Nettuno e Super Terre intorno a stelle di piccola massa e nane povere di metalli, nonché indagini sull'abbondanza di pianeti gioviani attorno alle stelle in ammassi aperti. I dati HARPS-N di alta qualità hanno anche consentito al team GAPS di intraprendere analisi sistematiche degli effetti delle interazioni di marea stella-pianeta sull'architettura orbitale di pianeti giganti in transito ravvicinato, nonché studi sull'estensione della stella magnetica- interazione planetaria (SPI) e suoi effetti rilevabili in sistemi con pianeti vicini a massicci.

La sfida per migliorare la nostra comprensione della connessione tra gli esopianeti e le loro stelle ospiti durante il prossimo decennio sarà affrontata attraverso campioni stellari molto grandi monitorati con strumentazione all'avanguardia, sia da terra che nello spazio. *Misurazioni ad alta precisione con Gaia (in cui l'INAF è fortemente coinvolto) di milioni di stelle di tutte le età, tipo spettrale e composizione chimica, con sufficiente sensibilità astrometrica ai compagni planetari giganti su separazioni intermedie, consentiranno di svelare la struttura fine del comportamento di tassi di occorrenza del pianeta con massa della stella ospite, metallicità e stato evolutivo. In combinazione con i risultati delle indagini di transito e del lavoro RV, i dati astrometrici faranno luce anche sulle architetture e sulle frequenze dei sistemi planetari di tipo S e di tipo P (cioè circumbinari).* La dipendenza delle frequenze, delle proprietà fisiche, delle architetture e dell'evoluzione dei sistemi di esopianeti dall'età e dalla densità delle stelle sarà accuratamente testata dalla combinazione di dati multitecnici terrestri e spaziali di grandi campioni di giovani stelle raccolti con strumentazione visibile e NIR (astrometria, imaging diretto e RV) sensibile a diversi regimi di separazione orbitale e massa planetaria.

Infine, la disponibilità di dati multitecnici ad alta sensibilità su un intervallo di lunghezze d'onda consentirà di perfezionare i metodi esistenti e di sviluppare nuovi metodi per misurare, mitigare e correggere attentamente gli effetti dell'attività stellare nelle misurazioni (spesso visto come il fattore limitante per il rilevamento di pianeti di piccola massa e raggio ridotto). D'altra parte, migliorerà la nostra comprensione dei dettagli dei complessi effetti SPI, che non sono rilevanti solo per i gioviani caldi, ma probabilmente influiscono sull'evoluzione delle condizioni di abitabilità sui pianeti rocciosi, in particolare quelli orbitanti attorno a stelle di piccola massa, ma anche quelli intorno a stelle giovani e attive di tipo solare.

Metodo delle domande chiave	Progetto
Architettura e dinamica dei sistemi planetari in funzione di massa, raggio e separazione orbitale	Determinazione di massa, raggio e parametri orbitali con velocità radiali, fotometria, astrometria e imaging diretto ad alta precisione
Chimica e dinamica delle atmosfere esoplanetarie	ARPE-N, GIARPS, ESPRESSO, TESS, CHEOPE, PLATON, Gaia, SFERA, SQUALO, PZ/ELT, PRIMA
Dipendenza dalle proprietà delle stelle ospiti e dall'ambiente stellare	Osservazioni di grandi campioni di atmosfere di esopianeti con spettroscopia di trasmissione ed emissione a media e alta risoluzione nel visibile e NIR sia da terra che nello spazio, imaging ad alto contrasto da terra
Proprietà del pianeta in funzione delle caratteristiche stellari (massa, composizione chimica, età, binarietà) e dell'ambiente (dischi, ammassi) con velocità radiali, fotometria, astrometria e imaging ad alta precisione	GIARPS, CRIRES+, ESPRESSO, ELT (ASSUNZIONI E METIS), JWST (NIRSpec & MIRI), ARIEL, SPICA, SFERA, SQUALO, PZ/ELT
Proprietà del pianeta in funzione delle caratteristiche stellari (massa, composizione chimica, età, binarietà) e dell'ambiente (dischi, ammassi) con velocità radiali, fotometria, astrometria e imaging ad alta precisione	ARPE-N, GIARPS, ESPRESSO, TESS, CHEOPE, PLATON, Gaia, SFERA, SQUALO, PZ/ELT

3.4 Astrobiologia: condizioni e processi evolutivi che danno origine all'emergere della vita

L'astrobiologia è una disciplina di ricerca ampia che spazia in vaste aree dei campi scientifici e necessita di un elevato livello di conoscenze multidisciplinari, tra cui astrofisica, biologia, chimica, biofisica e geologia, e richiede uno sforzo congiunto di teoria, osservazioni, simulazioni al computer ed esperimenti di laboratorio. L'astrobiologia è quindi lo studio dell'origine, dell'evoluzione e della distribuzione della vita nello spazio. La vita è il risultato della crescita della complessità molecolare e dell'evoluzione strettamente legata agli ambienti planetari. Il numero di molecole organiche scoperte nello spazio è in continuo aumento. Si formano nelle fredde nubi molecolari e nelle prime fasi della formazione stellare. La nostra comprensione dell'evoluzione delle molecole organiche e del loro viaggio dalle nubi molecolari al primo sistema solare e alla Terra fornisce importanti vincoli all'emergere della vita sulla Terra e forse altrove. I minerali hanno un ruolo importante nel guidare l'evoluzione prebiotica di sistemi chimici complessi, mediando gli effetti delle radiazioni elettromagnetiche, influenzando la fotostabilità delle molecole organiche, catalizzando importanti reazioni chimiche e/o proteggendo le molecole dalla degradazione. *È quindi necessario studiare in laboratorio la fotostabilità di biomolecole (es. nucleobasi, amminoacidi, acidi carbossilici, acidi grassi, ecc.) in condizioni spaziali in presenza di matrici minerali* al fine di indagare sia i processi prebiotici che potrebbero aver avuto un ruolo nello sviluppo dei primi esseri viventi sulla Terra e nei processi fisici e chimici che si verificano negli ambienti extraterrestri.

La crescente conoscenza dell'evoluzione del nostro sistema solare e la scoperta dei sistemi extrasolari hanno aperto una serie di interrogativi sull'origine della vita e sulle condizioni che possono permetterne l'evoluzione. La determinazione delle condizioni di abitabilità, ad esempio la presenza di acqua liquida e di fonti energetiche in grado di sostenere la vita, che non sono necessariamente associate a un unico ambiente specifico, sarà importante per identificare potenziali pianeti abitabili nel Sole e in altri sistemi. Il sistema solare stesso può presentare tali condizioni in siti diversi dalla Terra e devono essere studiati i meccanismi di evoluzione degli ambienti abitabili attraverso i sistemi solari. *Per rispondere alla domanda fondamentale sull'origine della vita è fondamentale capire in quali condizioni la vita può essere originata, controllata e sostenuta, e in particolare come ciò avvenga se materiale prebiotico viene portato da altrove.* L'influenza di piccoli oggetti sull'ambiente planetario primordiale, inclusa la radiazione ad alta energia della giovane stella madre, può essere essenziale per l'inizio e la sopravvivenza della vita. *Lo studio dell'evoluzione molecolare delle sostanze organiche abiotiche presenti negli oggetti del Sistema Solare, inclusa la Terra primordiale, sotto il ruolo combinato di agenti fisici come variazioni termiche, particelle ad alta energia, fotoni e irraggiamento del vento solare è un compito che sarà perseguito nel prossimo decennio.* Allo stesso tempo, *il feedback sulla chimica delle atmosfere planetarie è una questione importante che amplierà la nostra comprensione dei principi generali dell'abitabilità.*

La definizione di abitabilità, l'identificazione di ambienti abitabili e il rilevamento della vita oltre la Terra sono al centro della letteratura di geoscienza, scienze planetarie e astrobiologia. Nel prossimo decennio le discipline dell'astronomia e dell'astrofisica hanno il potenziale per contribuire in modo drammatico a questi aspetti, portandoci infine sempre più vicini a rispondere all'annosa domanda: "Siamo soli?" La capacità di raggiungere risultati rivoluzionari sarà rafforzata in modo cruciale dall'istituzione di un approccio sistematico e multidisciplinare che affronterà i problemi da una triplice prospettiva:

i) Le indagini teoriche sulle condizioni di abitabilità, in quanto indipendenti dall'effettiva comparsa della vita in un dato pianeta, dovranno essere perseguite con vigore. Un cambio di paradigma

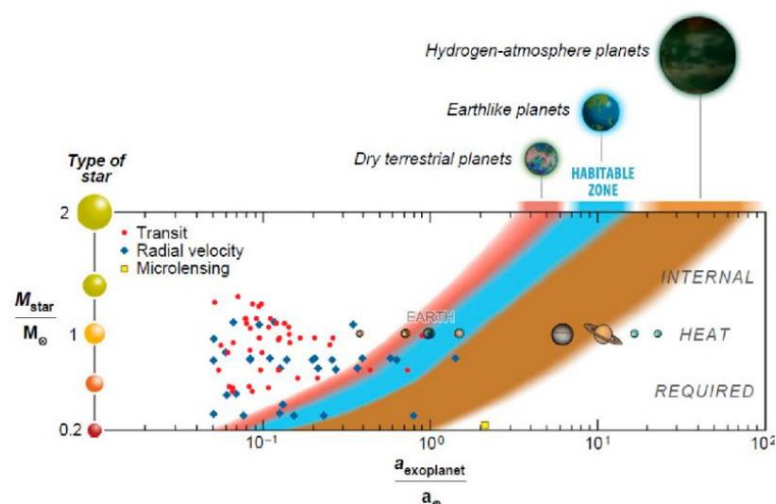


Fig. 3.4 - La Zona Abitabile estesa (da Seager 2014, PNAS).

si sta ora verificando, in cui il concetto di zona abitabile specifico per una stella viene rivisto da un concetto di abitabilità specifico per il pianeta (vedi Fig. 4), per spiegare l'enorme diversità dei sistemi planetari in termini di masse, orbite e tipi di stelle e la varietà di possibili atmosfere planetarie basate sulla natura stocastica della formazione e dell'evoluzione dei pianeti.

A questo proposito, è altamente auspicabile una maggiore sofisticatezza nei modelli climatici planetari, esplorando la possibilità di evitare il criterio dell'acqua liquida incentrata sulla Terra. La modellazione di trasferimento dinamico e radiativo può anche supportare o vincolare l'identificazione di nuovi osservabili per indagini presenti o future.

ii) Supporto di laboratorio, essenziale per studiare l'ambiente estremo trovato e previsto nella maggior parte dei sistemi esoplanetari, nonché per colmare lacune critiche nella nostra capacità di modellare i processi atmosferici degli esopianeti. Queste indagini includono elenchi di linee di opacità molecolare per diversi gas in espansione, database estesi per l'assorbimento indotto da collisioni, opacità dei dimeri e velocità di reazione chimica, studi di laboratorio sulla formazione di foschia e condensa e proprietà ottiche, misurazioni delle sezioni d'urto di fotoassorbimento del gas ad alte temperature e nuovi approcci nello studio dei gas a biofirma.

iii) Programmi di osservazione del prossimo decennio per rilevare gas di biosignature in mondi rocciosi potenzialmente abitabili. Sarà necessario raccogliere dati osservazionali per il più ampio campione possibile di esopianeti potenzialmente abitabili, per ottenere una valutazione probabilistica della comunanza dei gas delle biosignature mitigando l'inevitabilità dei falsi positivi. *Nello spazio, la corsia preferenziale per il rilevamento di gas atmosferici che potrebbero essere potenziali segni di vita sarà fornita da JWST che indagherà sulle atmosfere delle Super Terre rocciose abitabili attorno a stelle di piccola massa scoperte in transito dalle imminenti missioni di transito. Successivamente, la combinazione di HDS e HCI con HIRES/ELT (con INAF Plship) e PCS/ELT (con un forte coinvolgimento di INAF) aprirà le porte alla caratterizzazione atmosferica dei pianeti rocciosi nella zona abitabile d*

Chiave Domanda	Metodo	Progetto
<i>Processi evolutivi che danno origine all'emergere della vita</i>	Informazioni dettagliate sui corpi che potrebbero ospitare, o hanno ospitato, forme di vita Informazioni dettagliate sui corpi che potrebbero avere, o aver avuto, acqua allo stato liquido Informazioni dettagliate sulla materia organica e sui ghiacci nel Sistema Solare	ExoMars, Succo
	Osservazione di corpi primitivi (materiale organico e ghiacci)	ALMA, SKA, altri telescopi
	Simulazioni numeriche	HPC
	Esperimenti di laboratorio Studio di terreni e siti analogici	
Processi evolutivi che danno origine all'emergere della vita	Atmosfere di pianeti terrestri in zona abitabile con spettroscopia di trasmissione ed emissione a media e alta risoluzione nel visibile e NIR sia da terra che nello spazio. Imaging ad alto contrasto da terra.	Processi evolutivi che danno origine all'emergere della vita

4. Formazione stellare (locale e globale)

Parole chiave: formazione stellare, campo magnetico, turbolenza, dischi protoplanetari, getti, accrescimento, raggi cosmici.

La Via Lattea, la nostra casa, è un ecosistema complesso in cui un processo di trasformazione ciclica porta la materia barionica diffusa in dense condensazioni instabili per formare stelle, che producono energia radiante per miliardi di anni prima di rilasciare materiale chimicamente arricchito nel mezzo interstellare (ISM) nelle loro fasi finali di evoluzione. La formazione stellare (SF) è l'innescò di questo processo, guidando infine l'evoluzione della materia ordinaria nell'Universo dalla sua composizione primordiale all'attuale diversità chimica necessaria per la nascita della vita.

È noto che le stelle si formano nelle nubi molecolari, ma le prime fasi del processo, ovvero il collasso di un ammasso di gas e polvere altrimenti stabile in una protostella autogravitante, sono ancora lontane dall'essere comprese. Per collassare, una nuvola deve essere in grado di raffreddare efficacemente il calore prodotto, liberando il momento angolare primordiale che altrimenti porterebbe la protostella a ruotare alla velocità di rottura. Il collasso deve anche vincere contro il campo magnetico ambientale e la turbolenza delle nubi.

Il disco di accrescimento, generato dalla conservazione del momento angolare durante il collasso della nuvola madre verso la formazione della stella, è l'origine dei pianeti.

Pertanto è fondamentale definire le proprietà e l'evoluzione del disco, stabilire il corretto assetto iniziale per la formazione dei pianeti, e fare luce su processi come l'aggregazione dei solidi fino alla formazione dei planetesimi, l'evoluzione chimica del contenuto molecolare verso la formazione di specie prebiotiche, l'evoluzione dinamica del materiale del disco che porta alle diverse architetture planetarie.

Le domande chiave da affrontare:

- **Proprietà globali di formazione stellare nella Via Lattea**
- **Fisica dei singoli eventi di formazione stellare**
- **Dischi protoplanetari: condizioni iniziali per la formazione dei pianeti**

4.1 Proprietà globali di formazione stellare nella Via Lattea

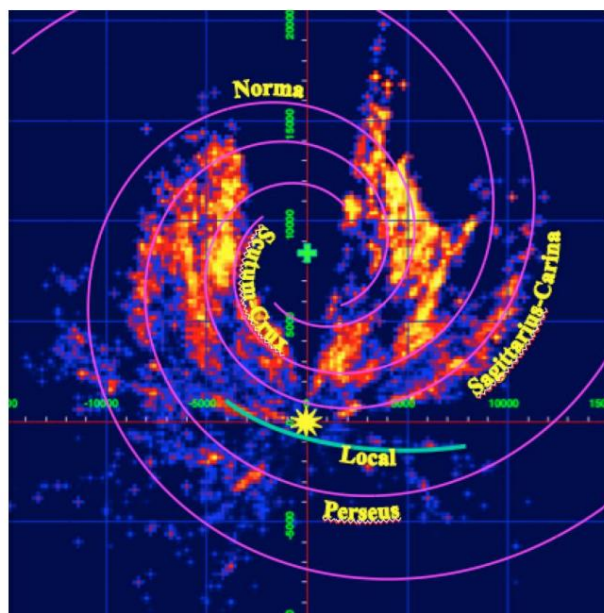
Le ultime generazioni di indagini in continuo e spettroscopiche del Piano Galattico con i satelliti SPITZER e HERSCHEL, nonché con le principali strutture radiofoniche a parabola, hanno trasformato l'immagine della Via Lattea come motore di formazione stellare. In un'immagine tradizionale di "formazione lenta", l'ISM diffuso è accumulato da perturbazioni su larga scala come il passaggio di un braccio a spirale. La schermatura da polvere e reazioni superficiali sui grani favorisce la transizione $\text{HI} \rightarrow \text{H}_2$, che a sua volta consente la formazione di altre molecole che raffreddano la nuvola. La gravità, mediata dai campi magnetici, porta a densi grumi instabili, che possono ulteriormente differenziarsi in una molteplicità di nuclei. Tipicamente ogni nucleo ospita uno Young Stellar Object (YSO) in formazione che alla fine porta a una singola stella o a una binaria stretta. Scenari alternativi più dinamici ipotizzano che le nubi molecolari siano strutture transitorie e di breve durata create nelle regioni post-shock di flussi convergenti su larga scala o in compressione guidata dalla turbolenza che producono strati e filamenti dove si accumula la densità della colonna, schermando il materiale dalla radiazione interstellare.

Sorgeranno naturalmente instabilità gravitazionali e di raffreddamento, che frammentano i filamenti sotto l'effetto dell'autogravità in catene di densi gruppi turbolenti supercritici che ospitano enormi protostelle e protocluster. In effetti, una delle scoperte più importanti e inaspettate del satellite Herschel è l'ubiquità in tutta la Galassia della natura filamentosa del freddo, denso

e potenzialmente fase di formazione stellare dell'ISM. Su scale più grandi, i tassi di formazione delle nuvole e delle stelle sono aumentati vicino ai modelli a spirale, ma non è ancora chiaro se le onde di densità a spirale costruiscano attivamente nuvole dense e inducano SF o semplicemente assemblano regioni di formazione stellare.

L'INAF è all'avanguardia in questo campo, con ruoli di primo piano nelle indagini HERSCHEL e SPITZER sul Piano Galattico come Hi-GAL e MIPS GAL, nonché con importanti partecipazioni alle indagini ESO APEX ATLASGAL e SEDIGISM. L'INAF sta anche guidando il progetto VIALACTEA, finanziato dall'UE, che riunisce tutte le indagini sul piano galattico in una base di conoscenze coerente, come quadro per uno studio integrato su scala galattica della formazione stellare globale. La figura mostra la prima mappa risolta del tasso di SF galattico (SFR) ottenuta dal progetto VIALACTEA.

L'obiettivo finale è mettere in relazione i prodotti finali della formazione stellare misurati dall'SFR e dall'efficienza della formazione stellare (SFE, massa stellare prodotta per unità di massa di gas denso disponibile), al meccanismo fisico responsabile dell'inizio della formazione stellare. Fare questo in luoghi molto diversi della Galassia e con statistiche significative è il passo necessario per inserire la formazione stellare nel contesto globale ed essere un riferimento per gli studi extragalattici per creare un proxy per la formazione stellare nelle galassie vicine, così come la storia della formazione



stellare da un punto di vista cosmologico. *La creazione di una "teoria fondamentale" o, meglio, di un modello predittivo su scala galattica per la formazione stellare nella Via Lattea che possa fungere da "modello z=0" per le galassie esterne, è la sfida chiave che verrà affrontata in il prossimo decennio.*

Strutture millimetriche/centimetriche a terra come IRAM, APEX, SRT, GBT, ARO, ecc. seguiranno spettroscopicamente decine di migliaia di siti di formazione stellare catalogati da HERSCHEL per tracciare l'impronta evolutiva su chimica, fisica e dinamica dei densi grumi che sono i progenitori degli ammassi stellari. Allo stesso tempo, queste strutture sono ideali per mappare le condizioni fisiche delle loro strutture filamentose ospiti, per seguire la complessa interazione filamento-clump e determinare il

ruolo dei filamenti a tutte le scale spaziali da diverse decine di parsec di filamenti giganti a quelli più piccoli. e "fibre" cinematicamente coerenti da cui hanno origine "nuclei" di piccola massa. Determinare se il processo di frammentazione da filamento ad agglomerato avviene in isolamento o con alimentazione continua dall'ISM circostante è fondamentale per discriminare i meccanismi dominanti che determinano i prodotti della formazione stellare. *Le misurazioni di polarizzazione con strutture monodisco, insieme alla tomografia di Faraday con LOFAR, EVLA, ASKAP e SKA ci permetteranno di migliorare notevolmente la nostra comprensione del ruolo dei campi magnetici durante il collasso delle varie fasi del mezzo interstellare e in tutto lo spazio galattico bilancia.* È obbligatorio condurre questi studi con campioni grandi e statisticamente significativi che tracciano la varietà di condizioni che si trovano in una tipica galassia a spirale come la Via Lattea.

Un ruolo ancora più importante nel campo sarà svolto dalle osservazioni ad altissima risoluzione spaziale dall'infrarosso al millimetro e alla radio. ALMA+ACA, insieme a strutture come NOEMA e SMA, consentirà il rilevamento di diverse migliaia di stelle in formazione come

così come ammassi prestellari in una varietà di ambienti galattici per seguire con dettagli e sensibilità senza precedenti la fisica, la chimica e la dinamica della frammentazione e dell'accrescimento iniziale dei precursori degli ammassi stellari. *JWST sarà fondamentale per tracciare le scale temporali dell'emergere di nuove generazioni stellari; la forma del continuum 1-20 μ m con NIRCam e MIRI è un osservabile chiave per tracciare l'approccio della formazione di YSO verso lo ZAMS, mentre la spettroscopia con MIRSpec e MIRI ci consentirà di monitorare le proprietà risolte del campo di radiazione emergente e il vento/ condizioni d'urto nei cespì. Sul lato della lunghezza d'onda lunga dello spettro elettromagnetico, le indagini grumose con ASKAP, MeerKAT e SKA potranno registrare i primi segnali di emissione da getti radio o senza termica che generalmente segnano l'arrivo di ogni YSO in formazione sullo ZAMS. I ricercatori INAF partecipano ai progetti Galactic Plane Surveys con ASKAP e MeerKAT.*

Con la determinazione della distanza verso milioni di oggetti stellari, piegata con la distribuzione della polvere dall'ISM e dalle nubi molecolari, Gaia costruirà una tomografia 3D senza precedenti dell'ISM galattico. *Le proprietà fotometriche degli YSO ripresi da Gaia in funzione della posizione rispetto ai bracci a spirale ci permetteranno di tracciare gradienti evolutivi e il ruolo dei bracci a spirale come "trigger" attivi di SF, o relegarli a un ruolo più marginale di ISM "collezionisti".*

Sarà fondamentale compiere progressi decisivi nei campi delle nuove tecnologie di data mining e apprendimento automatico. L'analisi scientifica di un corpus di conoscenze ampio ed estremamente complesso e disomogeneo (fotometria e spettroscopia, strutture compatte o estese) richiederà flussi di lavoro di analisi automatizzati e supervisionati con capacità decisionali per effettuare la classificazione e la determinazione evolutiva di SFR e SFE per decine di migliaia di siti di formazione stellare nella Galassia.

4.2 Fisica dei singoli eventi di formazione stellare

Le proprietà fisiche e chimiche vanno di pari passo, quindi lo studio, sull'intero spettro di massa, dell'evoluzione chimica nelle regioni di formazione stellare è di fondamentale importanza per la comprensione della loro evoluzione. Particolarmente rilevanti per i modelli teorici sono le condizioni iniziali, derivate da nuclei prestellari e massicci nelle nubi scure nell'infrarosso rispettivamente nel regime di piccola massa e di massa elevata. Le osservazioni sub-mm di molecole chiave come quelle ricche di deuterio, sia a bassa che ad alta risoluzione angolare, sono essenziali per lo studio delle primissime fasi di formazione stellare poiché consentono di determinare la distribuzione spaziale delle diverse specie molecolari. Gli investigatori dell'INAF sono al primo posto in questo tipo di ricerca e continueranno questo tipo di studi eseguendo indagini nel regime sub-mm utilizzando le strutture ESO ALMA e IRAM. *Queste strutture, in particolare ESO-ALMA, giocheranno un ruolo cruciale anche nello studio delle fasi successive del collasso gravitazionale, quando la materia in caduta inizia ad accumularsi in un disco circumstellare attorno alla protostella in formazione.*

Calcoli analitici e simulazioni numeriche hanno mostrato l'impatto catastrofico sulla formazione di dischi protostellari che potrebbe avere un campo magnetico galattico congelato durante la fase di collasso. Gli studi teorici si sono concentrati sui processi dissipativi che portano al disaccoppiamento gas/campo magnetico, ma sia sui meccanismi (es. diffusione ambipolare, instabilità e turbolenze macroscopiche, disallineamento tra campo magnetico e momento angolare della nuvola, ecc.) sia sullo spazio e le scale temporali del disaccoppiamento sono ancora dibattute. I diversi scenari possono essere distinti dalla cinematica del gas ionizzato e neutro, e dalle misure polarimetriche dell'emissione termica dei granelli di polvere.

L'interferometro ALMA è fondamentale per questo. Oltre ai modelli teorici, i ricercatori INAF hanno sviluppato strumenti numerici per produrre mappe sintetiche dell'emissione polarizzata convoluta con la risposta interferometrica che consentirà un confronto diretto dei modelli con le osservazioni.

Le giovani protostelle sono ancora immerse nel loro involucro di gas e polvere, quindi gli strumenti principali per studiarle sono le osservazioni nei domini millimetrici e radio. Tuttavia, un ruolo importante nel raffreddamento e nel trasferimento di massa nei deflussi/getti è svolto dal gas caldo, che emette nel medio e lontano infrarosso, principalmente in linee di atomi neutri e molecole semplici (es. [O]63 μ m, H₂, CO, H₂O). Il satellite Herschel rappresenta una svolta, perché ha rivelato queste specie, individuando le *onde d'urto*, generate nella violenta espulsione di materia durante la prima fase di accrescimento attivo sulla protostella, come la principale fonte della loro emissione. *Nei prossimi anni il JWST (MIRI in particolare), grazie alla sua maggiore risoluzione spaziale consentirà di condurre studi dettagliati della morfologia e delle condizioni di eccitazione di questo gas e del suo ruolo nel processo di formazione stellare.*

I getti collimati sono il meccanismo principale mediante il quale le protostelle in accrescimento perdono momento angolare. I getti vengono lanciati e collimati tramite un processo magnetocentrifugo che ha la capacità di rimuovere il momento angolare in eccesso. La frenatura magnetica è così efficiente quando il campo e l'asse di rotazione sono allineati che i dischi kepleriani possono essere inizialmente soppressi oltre 10 AU, mentre i dischi kepleriani più grandi potrebbero derivare da configurazioni B- γ disallineate. Tuttavia, lo studio dell'interfaccia tra getto e disco, con la sua piccola scala angolare, non è stato finora realizzabile. Non è ancora chiaro da quale momento provengano i getti di porzione di disco, comunque inferiori a 10 AU, e quanto momento angolare venga trasportato dal getto. Gli studi nel vicino ultravioletto con HST o con i prossimi impianti UV consentono di sondare il nucleo del getto, che porta la firma più affidabile del meccanismo di lancio. Inoltre, vengono utilizzate linee molecolari (Sub-)mm per sondare la base del getto ancora incorporato nell'involucro parentale. Per testare i modelli MHD e la struttura del campo magnetico è anche essenziale mappare la polarizzazione continua prodotta dall'allineamento magnetico dei granelli di polvere. Tuttavia, la risoluzione disponibile (~0,2 pollici al massimo) non ci consente di limitare le dimensioni di espulsione del getto. *Un breakthrough sarà ottenuto raggiungendo nel dominio (sub-)mm una tipica risoluzione spaziale di 1 AU, cioè 15 mas in Toro. Ciò fornirà vincoli di osservazione critici tanto attesi ai modelli di lancio di jet, dischi e formazione di pianeti. Ciò avverrà con le strutture ESO-ALMA e IRAM NOEMA.* Il gruppo INAF per la formazione di stelle e pianeti è una comunità numerosa e dinamica che guida la ricerca ad alto impatto in questo campo, come lo studio di getti/disco utilizzando ALMA attraverso progetti di classe A e una serie di grandi programmi IRAM NOEMA (es.

CALYPSO, SOLIS) dedicato ai sistemi a getto/disco incontaminati (vedi Figura 2).

Per comprendere globalmente il ruolo dei getti nel processo di evoluzione protostellare, è di fondamentale importanza importante determinare la frequenza con cui si manifestano i getti e come le loro proprietà dipendano da quelle della sorgente centrale. Ciò è ora possibile grazie ai grandi rilievi spettroscopici di giovani oggetti stellari, come quelli condotti con VLT/X-Shooter, che consentono l'analisi delle proprietà fisiche del gas nel getto in modo statisticamente significativo. I ricercatori INAF sono particolarmente attivi in questo campo, nell'ambito della collaborazione JEDI (Jets and Disks @ INAF) e in sinergia con le indagini ALMA in corso. Queste osservazioni sono fondamentali per la comprensione dei meccanismi di dispersione e dell'evoluzione del disco e della loro dipendenza dal tasso di accrescimento e perdita di massa. Tali studi saranno estesi ad una più ampia gamma di massa ed età delle sorgenti centrali. *La sinergia X-Shooter-ALMA lo consentirà*

costruire un quadro unificato e solido dell'evoluzione del sistema stella-disco e misurare gli effetti intrecciati della formazione dei pianeti, della struttura del disco, dell'evoluzione viscosa, del vento del disco e della foto evaporazione. Insieme alle osservazioni del prossimo futuro con GIANO/GIARPS e CRIRES+, questa rappresenta un'attività preparatoria per lo sfruttamento della futura strumentazione presso ELT, in particolare HIRES.

Osservazioni ad alto contrasto e risoluzione spaziale nell'ottica e nel vicino infrarosso acquisite con l'ottica adattiva rendono possibile l'indagine del disco interno e delle regioni del getto (10-20 AU dalla stella). Le osservazioni dei team INAF sono attualmente in corso con VLT/SPHERE e LBT LUCI e LBTI, e saranno strategiche per future osservazioni con SHARK-NIR e V-SHARK presso l'LBT. In prospettiva, VLT/ERIS e ELT/HIRES, studiando le righe di emissione atomica nel dominio VIS/NIR, forniranno una grande ricchezza di diagnostica sui parametri fisici e sulla cinematica dei flussi.

Nel prossimo futuro questo tipo di studi sarà condotto anche nel medio infrarosso con JWST, estendendosi a sorgenti molto più giovani rispetto a quanto fatto finora. Lo strumento MIRI, in particolare, è fondamentale per studiare le proprietà del gas caldo nel disco/getto delle protostelle e identificare molecole biologicamente importanti come acqua e idrocarburi attorno alle stelle in formazione. I team INAF stanno partecipando attivamente a progetti combinati HST / JWST all'interno dei framework Early Science Research e Open Time JWST. A lungo termine, il satellite SPICA consentirà di condurre la spettroscopia nel lontano infrarosso.

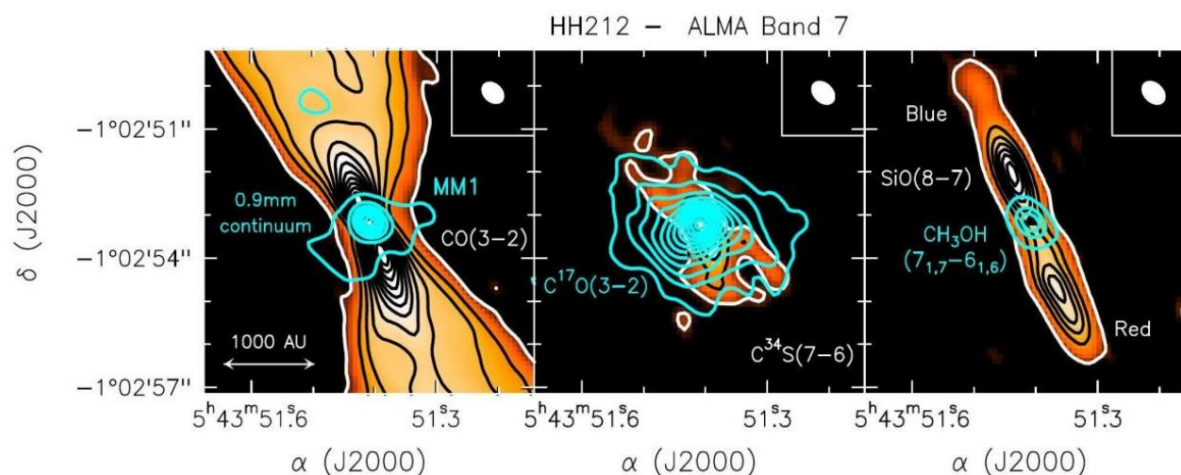


Fig.4.2 - Il sistema protostellare HH212 osservato con ALMA-Banda 7. Le emissioni di continuo e di molecole sono etichettate e indicate con colori diversi nei tre pannelli.

4.3 Dischi protoplanetari: condizioni iniziali per la formazione dei pianeti

Dal punto di vista osservazionale, la nostra comprensione della dinamica e della chimica del disco, come condizioni iniziali per la formazione di sistemi planetari, richiederà a) la determinazione robusta del rapporto massa polvere/gas nel disco, b) la ricerca di possibili meccanismi per contrastare la frammentazione e la migrazione verso la stella dei granelli di polvere di dimensioni mm/cm (trappole di polvere), c) la misurazione della frazione di dischi che accrescono attivamente la materia sulla stella, d) l'identificazione dei meccanismi che generano le ricche strutture del disco osservato (lacune, anelli,

spirali, ecc.), e la loro relazione con la presenza di pianeti di nuova formazione. Tali problemi dovranno essere studiati in funzione delle proprietà della stella centrale (massa ed età) e richiederanno il raggiungimento di un censimento statisticamente significativo dei dischi strutturati, a diverse masse ed età, della stella centrale. Sul lato teorico dovranno essere condotti importanti studi sull'interazione tra gas diffuso e polvere nel disco e nei corpi già formati, che possono spiegare il modello osservato ed essere predittivi sulla presenza di pianeti invisibili nei sistemi giovani. Bisognerà inoltre studiare il ruolo dei raggi cosmici, provenienti dal mezzo interstellare e localmente accelerati nelle protostelle. Regolano infatti l'accoppiamento tra il gas e il campo magnetico, hanno un impatto sulle dimensioni della regione in cui è attiva l'instabilità magneto-rotazionale e la velocità di ionizzazione dei raggi cosmici è un parametro fondamentale per interpretare le abbondanze osservate. Inoltre i raggi cosmici inducono un riscaldamento stocastico sui grani di polvere e possono essere responsabili del desorbimento di molecole organiche complesse.

Finora, il rilevamento diretto dei candidati protoplanetari che portano alle strutture del disco osservate è stato possibile solo in un piccolo numero di casi specifici. Per effettuare un'indagine statisticamente significativa su questo argomento è necessario utilizzare strumenti ad alta risoluzione spaziale nel dominio dell'Infrarosso e nel (sub)millimetro. Questo è un campo in cui INAF ha un forte potenziale, grazie al coinvolgimento in strumentazioni assistite da AO come VLT/SPHERE, LBT/LBTI e LUCI e, in prospettiva, LBT/SHARK, ERIS/VLT (prima luce prevista per il 2021) e in un futuro più lontano gli strumenti ELT assistiti dal modulo MAORY AO, commissionato all'INAF. In linea di principio l'interferometria NIR con il VLTI consente la migliore risoluzione spaziale per l'osservazione della parte più interna dei dischi. *L'INAF ha seguito lo sviluppo del combinatore di fasci VLTI AMBER e collaborerà con i gruppi coinvolti nei combinatori di seconda generazione, come GRAVITY e MATISSE, che supereranno i limiti di sensibilità del passato. Nello spazio, JWST lavorerà a una risoluzione limitata di diffrazione nel NIR/MIR.* L'INAF non ha partecipato allo sviluppo dell'osservatorio spaziale, ma il telescopio sarà utilizzato dall'INAF per esplorare sistemi freddi e embedded selezionati in tutte le loro possibili sfaccettature. Infine, i gruppi INAF sono leader internazionali in questo campo anche grazie al forte impegno nei programmi osservativi che stanno affrontando le problematiche di cui sopra utilizzando un'elevata risoluzione spaziale a lunghezze d'onda (sub)-mm con es. IRAM e ALMA.

L'indagine sull'emergenza della vita occupa un posto cruciale nel piano strategico dell'INAF. Quali sono i meccanismi chimici di base che hanno portato gli atomi alle molecole e poi alla vita?

Con HERSCHEL e ALMA potremo finalmente iniziare lo studio dell'astrochimica, ed è ormai chiaro che la complessità molecolare avanza in ogni fase evolutiva del sistema, dalle molecole più semplici nell'ISM alle Molecole Organiche Complesse (COM) rilevate nell'ambiente protostellare. L'INAF è attivamente coinvolta in prima linea in questo campo, in quanto, ad esempio, nello studio della distribuzione nello spazio di acqua e molecole organiche, come un CH₃CN, importante per la sintesi di aminoacidi e relativo al trasporto di materiale organico dalle comete alle pianeti e CH₃OH, che sorge sui grani ricoperti di ghiaccio ed è il primo passo per la formazione di COM.

Le abbondanze e i modelli di formazione delle COM (in particolare aminoacidi come glicina, glicolaldeide, fosfolipidi e fosfati, molecole pluricarbonato, ramificate e chirali) sono la chiave per comprendere la formazione di materiale prebiotico nel disco e la sua successiva consegna sui pianeti. Un altro aspetto importante da esplorare è il frazionamento degli isotopi nello spazio che porterà anche a grandi progressi nella comprensione del verificarsi delle catene chimiche che hanno portato alla vita.

In questa linea di ricerca, l'obiettivo principale dell'INAF è la rilevazione degli amminoacidi nel gas diffuso. Le dimensioni tipiche delle regioni associate all'emissione delle COM sono inferiori a circa 1 secondo d'arco (hot-core, jet). La risoluzione spaziale offerta dalla nuova generazione di interferometri è fondamentale per risolvere la regione emittente. La via da seguire è raccogliere spettri imparziali ad alta risoluzione che coprano la più ampia gamma di frequenze possibile, al fine di avere il censimento più completo della specie attuale. Gli sviluppi futuri di ALMA, con un unico ricevitore che copre la gamma da 67 GHz a 116 GHz (un progetto su cui INAF gioca un ruolo importante), saranno strumentali. SKA offrirà una combinazione unica tra alta sensibilità e risoluzioni angolari elevate (1-10 ma, a seconda della frequenza), in particolare se ottimizzata anche per frequenze fino a 10-15 GHz, per produrre un inventario completo di specie interstellari accessibili nel cm-gamma. Nell'emisfero settentrionale IRAM-NOEMA fornirà 12 antenne nel 2018 osservando nell'intervallo 0,8-3 mm con una risoluzione spettrale finale < 100 mas. L'INAF dovrebbe assolutamente investire risorse per entrare a far parte del consorzio internazionale IRAM-NOEMA. A questo proposito, la forte partecipazione dell'INAF al programma IRAM/NOEMA "SOLIS: Seeds Of Life In Space" sta già producendo una scienza di grande impatto. Grazie a SOLIS, la formamide (una molecola cruciale che porta alla sintesi di macromolecole metaboliche e genetiche in grado di riprodursi utilizzando l'energia esterna) è stata risolta spazialmente per la prima volta attorno a un analogo del proto-Sole e modellata attraverso calcoli di chimica quantistica. Inoltre, le osservazioni di SOLIS hanno anche mostrato che la crescita di lunghe catene di carbonio (che potrebbe essere stata un importante serbatoio di carbonio nell'origine e nello sviluppo della vita sulla Terra) è favorita dall'irradiazione di particelle energetiche sperimentata dal giovane sistema solare.

Su un terreno diverso ma complementare, un'indagine strategica sulla struttura del disco sarà la determinazione della configurazione magnetica, che è cruciale per molte ragioni diverse (es. guidando il trasporto/estrazione del momento angolare fuori dal disco, che a sua volta consente l'accrescimento osservato sulla stella centrale). ALMA ci permetterà di derivare la distribuzione del campo magnetico tramite la polarizzazione dell'emissione continua di polvere dal disco e, in un prossimo futuro, tramite l'emissione polarizzata in linea alla base dei getti. Ciò consentirà finalmente di testare i modelli di lancio del jet senza scala, compresi quelli sviluppati in INAF, applicabili a dischi magnetizzati attorno a oggetti compatti di qualsiasi massa, dalle nane brune ai nuclei galattici attivi.

Parallelamente alla configurazione magnetica, il disco interno e la regione di accelerazione del getto saranno ampiamente studiati con osservazioni ad alta risoluzione spaziale nel dominio VIS/NIR con LBT, HST e, in prospettiva, con VLT/ERIS ed ELT/HIRES. Studi approfonditi del feedback del jet-disc consentiranno di svelare: a) il suo impatto sulla chimica degli strati superficiali; b) i suoi effetti sulla fotoevaporazione del materiale del disco, ponendo così limiti stringenti alla vita del disco, al contenuto di massa rimasto per costruire i pianeti gassosi giganti e alla loro capacità di migrare; c) l'influenza dinamica delle asimmetrie dei getti, che possono generare moti su larga scala

all'interno degli strati del disco nella regione in cui hanno origine i pianeti; e d) l'effetto schermante alla radiazione stellare UV causata dai granelli di polvere di dimensioni minori trasportati all'interno dei deflussi.

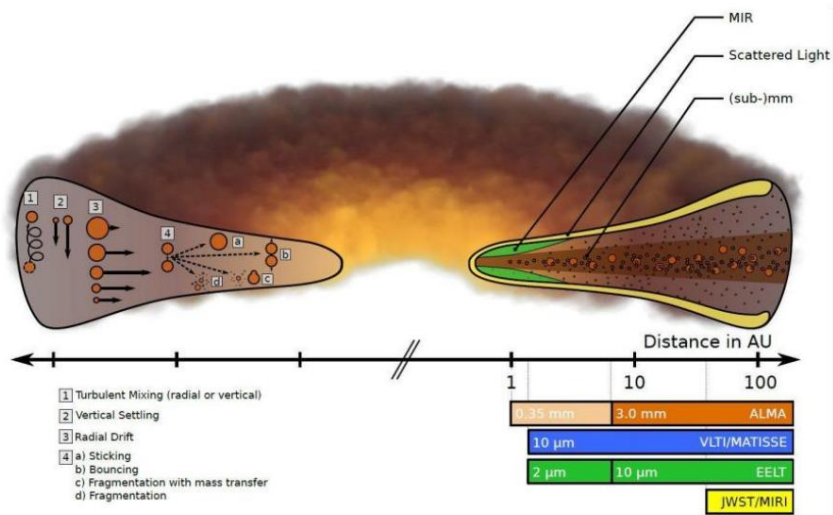


Fig.4.3 - Illustrazione della struttura e dei processi di evoluzione della polvere, e vincoli osservativi per un tipico disco protoplanetario (Testi et al., 2014, PPVI, UoA Press p. 339-361).

Domanda chiave	Metodo	Progetto
Proprietà globali di formazione stellare nella galassia della Via Lattea: nubi molecolari e gas denso.	Tasso di formazione stellare, efficienza di formazione stellare. Meccanismo fisico responsabile dell'inizio della formazione stellare in luoghi molto diversi della Galassia. Creazione di una "teoria fondamentale" di un modello predittivo su scala galattica per la formazione stellare che possa fungere da "modello $z=0$ " per le galassie esterne.	IRAM, APEX, SRT, GBT, ARO, LOFAR, EVLA, ASKAP SKA, ALMA+ACA, NOEMA, SMA, JWST, MeerKAT
Fisica dei singoli eventi di formazione stellare e degli ammassi stellari.	Frammentazione di densi cespi ed evoluzione in nuclei densi. Crollo monolitico vs accrescimento competitivo dinamico e potenziali fusioni. Migrazione core in gruppi. Origine del FMI, anche in ambienti a bassa metallicità, e della frazione binaria stellare. Dal nucleo alla protostella e alla formazione del disco circumstellare. Teoria dei processi dissipativi testata con studi polarimetrici dell'emissione termica delle polveri. Morfologia e condizioni di eccitazione nella fase gassosa del disco e suo ruolo nell'evoluzione protostellare. Modellazione dei meccanismi di lancio del jet e collegamento con l'evoluzione del momento angolare. Feedback di getti e deflussi sulle proprietà del disco. Chimica del materiale del disco e formazione di molecole complesse. Determinare l'FMI in ambienti a bassa metallicità.	ALMA, IRAM, GIANO, GIARPS, CRIRES+, ASSUNZIONI, HST, JWST, SFERA, LUCI, LBTI, Gaia, GES SHARK-NIR, V-SQUALO, MICADO, MARIO
Dischi protoplanetari: condizioni iniziali per la formazione dei pianeti	Determinazione robusta del rapporto massa polvere-gas dischi. I meccanismi per contrastare la frammentazione verso la stella GIANO, GIARPS, di granelli di polvere di diversa dimensione, della frazione di dischi che accresce attivamente la materia della GRAVITY, MATISSE, meccanismi che generano le lacune, anelli, spirali, ecc.), e loro accrescimento ed espulsione di massa in funzione dei	IRAM, ALMA, in SFERA, LBTI, CRIRES+, ASSUNZIONI, HST, JWST, SFERA, LUCI, LBTI, Gaia, GES SHARK-NIR, V-SQUALO, MICADO, MARIO

5. Evoluzione stellare

Parole chiave: fisica stellare, convezione, rotazione, campo magnetico, esplosione, ejecta, residuo, età, asterosismologia, modelli stellari, missioni spaziali

Le stelle costituiscono gli elementi costitutivi di gran parte dell'Universo visibile, quindi la comprensione della loro evoluzione e nucleosintesi è un obiettivo astrofisico chiave per il futuro.

In particolare, la conoscenza della struttura e dell'evoluzione delle stelle, sia come singoli oggetti che come parte di aggregati stellari, è fondamentale per la nostra comprensione delle popolazioni stellari risolte in ambienti galattici ed extragalattici, per la definizione di candele standard da utilizzare nella scala della distanza cosmica, per misurare in modo robusto le età, per datare i più antichi sistemi stellari e, a sua volta, l'universo stesso.

La comunità italiana ha un ruolo di primo piano nel campo dell'evoluzione stellare con team competitivi che studiano diversi intervalli di parametri stellari e si occupano di problemi aperti nell'astrofisica stellare, concentrandosi anche sulle implicazioni dei loro studi in un contesto astrofisico più ampio.

Il quadro evolutivo stellare costruito dalla comunità italiana si è dimostrato estremamente accurato nella previsione delle proprietà stellari osservate in vari ambienti galattici ed extragalattici. In questo campo, i team italiani che lavorano sull'evoluzione stellare hanno un'esperienza riconosciuta a livello mondiale con importanti database di modelli stellari di riferimento che sono stati messi a disposizione dell'intera comunità scientifica e un numero enorme di documenti cardine su tutte le fasi evolutive rilevanti. Questa leadership non dovrebbe assolutamente essere persa nel prossimo decennio, ma in realtà dovrebbe essere rafforzata. In effetti, ci sono diverse questioni scientifiche critiche che devono essere sfruttate appieno.

La domanda chiave:

5.1 Portare modelli stellari alla potenza successiva

Sebbene lo sviluppo dei codici evolutivi e la struttura fisica canonica abbiano raggiunto un livello soddisfacente di accuratezza e affidabilità, esistono ancora diversi meccanismi fisici come la rotazione e le relative miscele indotte dalla rotazione, campi magnetici, miscele termolineari, onde gravitazionali interne e perdita di massa che sono ancora poco conosciuti.

Questi processi fisici sono stati - finora - scarsamente studiati, o nella maggior parte dei casi addirittura ignorati, in quasi tutti i calcoli evolutivi stellari a causa sia dell'enorme complessità della loro inclusione in un codice evolutivo stellare, sia del fatto che la loro efficienza, e - quindi -

il loro impatto sui modelli stellari, è talvolta controllato da una serie di parametri liberi solitamente scarsamente vincolati dalle osservazioni.

Tuttavia, dall'ultimo decennio, grazie alla "rivoluzione dell'asterosismologia", l'astrofisica stellare sta entrando in una nuova era. A partire dalla missione CoRoT, sebbene il contributo maggiore venga dal satellite Kepler, l'asterosismologia delle stelle simili al Sole e degli oggetti più evoluti come le giganti rosse e le stelle Red Clump sta in realtà fornendo uno strumento per studiare i segreti intimi delle stelle, offrendo così un approccio senza precedenti per studiare la reale efficienza dei processi fisici solitamente ignorati nei calcoli dei modelli stellari. Solo per citare una questione importante, l'analisi sismica sta effettivamente dimostrando che l'attuale generazione di modelli stellari sottostima la capacità delle stelle di estrarre il momento angolare dalle regioni interne, cioè il livello di coppia tra il nucleo interno e l'involucro esterno. Questa è chiaramente una prova che, insieme alle miscele rotazionali, alcuni altri processi come la gravità interna

onde e/o campo magnetico devono contribuire al trasporto del momento angolare. Questo problema è stato finora indagato solo marginalmente.

In questo contesto un importante passo avanti sarebbe rappresentato anche dallo sviluppo di modelli stellari 3D. Questo è un progetto molto ambizioso e ci sono solo pochi team internazionali che stanno già lavorando in questa direzione. La comunità italiana dovrebbe assolutamente evitare di perdere questa occasione, favorendo la crescita di un team italiano competitivo che includa nuovi giovani astronomi ma facendo affidamento sull'esperienza degli attuali leader dell'evoluzione stellare. I risultati basati su simulazioni 3D possono essere utilizzati anche come linee guida per aggiornare il trattamento dei processi fisici non canonici nei codici 1D tradizionali.

Nuove strutture a terra e spaziali sono in corso e pianificate per il prossimo decennio.

Questi ci permetteranno di ottenere un'eccellente accuratezza delle osservazioni delle oscillazioni stellari per una varietà di stelle in diversi stadi evolutivi e, a loro volta, un punto di riferimento unico per testare e migliorare i modelli di evoluzione stellare. Infatti l'asterosismologia è una delle tecniche più potenti per studiare la struttura interna delle stelle e per vincolare le proprietà fisiche.

D'altra parte, l'evoluzione stellare può fornire un supporto fondamentale alle indagini asterosismologiche, in particolare nell'ambito dell'"archeologia galattica" (vedi Sezione 7). In effetti, i parametri stellari più basilari forniti dall'asterosismologia sono la massa stellare attuale - solitamente diversa dalla massa iniziale in conseguenza dei processi di perdita di massa - il raggio e la distanza di migliaia di singole stelle entro alcune decine di kpc. Tuttavia, l'asterosismologia di per sé non può fornire età stellari: questo risultato può essere ottenuto solo combinando i dati sismici con le informazioni astrometriche fornite dalla missione Gaia e con le previsioni di insiemi estesi, omogenei e aggiornati di modelli stellari. Questa combinazione è in grado di fornire stime dell'età delle stelle di campo con errori inferiori a quelli ottenuti con altri metodi.

Come accennato in precedenza, l'asterosismologia fornisce una stima della massa effettiva della stella, mentre le vite evolutive – ovvero l'età della stella in uno specifico stadio evolutivo – sono completamente determinati dalla sua massa iniziale. Ciò implica che una migliore comprensione dell'efficienza della perdita di massa e dei meccanismi fisici che innescano questo processo è obbligatoria per migliorare sia l'accuratezza dei modelli stellari che la loro capacità predittiva quando utilizzati in combinazione con misurazioni sismiche.

L'accuratezza della determinazione dell'età può essere aumentata di ordini di grandezza, quando si fa affidamento non solo sui parametri stellari di base forniti dall'asterosismologia - che sono ottenuti da leggi di scala approssimate ancora dibattute - ma sul confronto dell'intero spettro sismico empirico con il modello corrispondente predizioni. Tuttavia, per portare a termine questo sforzo, è necessario un set di dati esteso di modelli di struttura stellare da utilizzare come file di input nei codici di pulsazione sia radiali che non radiali. Inutile dire che si tratta di uno sforzo estremamente impegnativo sia in termini di tempo di elaborazione che di capacità di archiviazione. La comunità italiana dell'evoluzione stellare e della pulsazione sta collaborando fortemente con team di ricerca internazionali su questi importanti argomenti.

Basandosi sull'esperienza maturata con i risultati asterosismologici dei satelliti CoRoT e Kepler, la comunità italiana che lavora sull'evoluzione stellare è anche profondamente coinvolta nella fase preparatoria delle nuove missioni TESS e PLATO, che rivoluzioneranno la nostra visione delle stelle e dei sistemi stellari. In particolare, la missione della NASA TESS sarà lanciata nel 2017 e esplorerà l'intero cielo per scoprire migliaia di pianeti attorno a stelle luminose (nane fredde di tipo spettrale K e M), ma non vedrà pianeti di dimensioni simili alla Terra. D'altra parte, la missione ESA PLATO 2.0 rileverà e caratterizzerà i pianeti attorno a stelle luminose simili a quelle solari e fornirà una sismologia accurata per 85000 stelle e, a sua volta, raggi stellari e masse a un ~2%

livello di precisione e, se supportato da dettagliate previsioni evolutive stellari, invecchia a circa il 10%. Questi risultati saranno determinanti anche per la sinergia con i parallassi di Gaia. Inoltre, SKA ci permetterà di studiare la forza e le proprietà dei campi magnetici stellari con elevata accuratezza. Il coinvolgimento in questi progetti osservativi rende estremamente tempestivo la necessità per la comunità italiana dell'evoluzione stellare di avere le opportunità e le strutture per indagare le questioni scientifiche sopra menzionate.

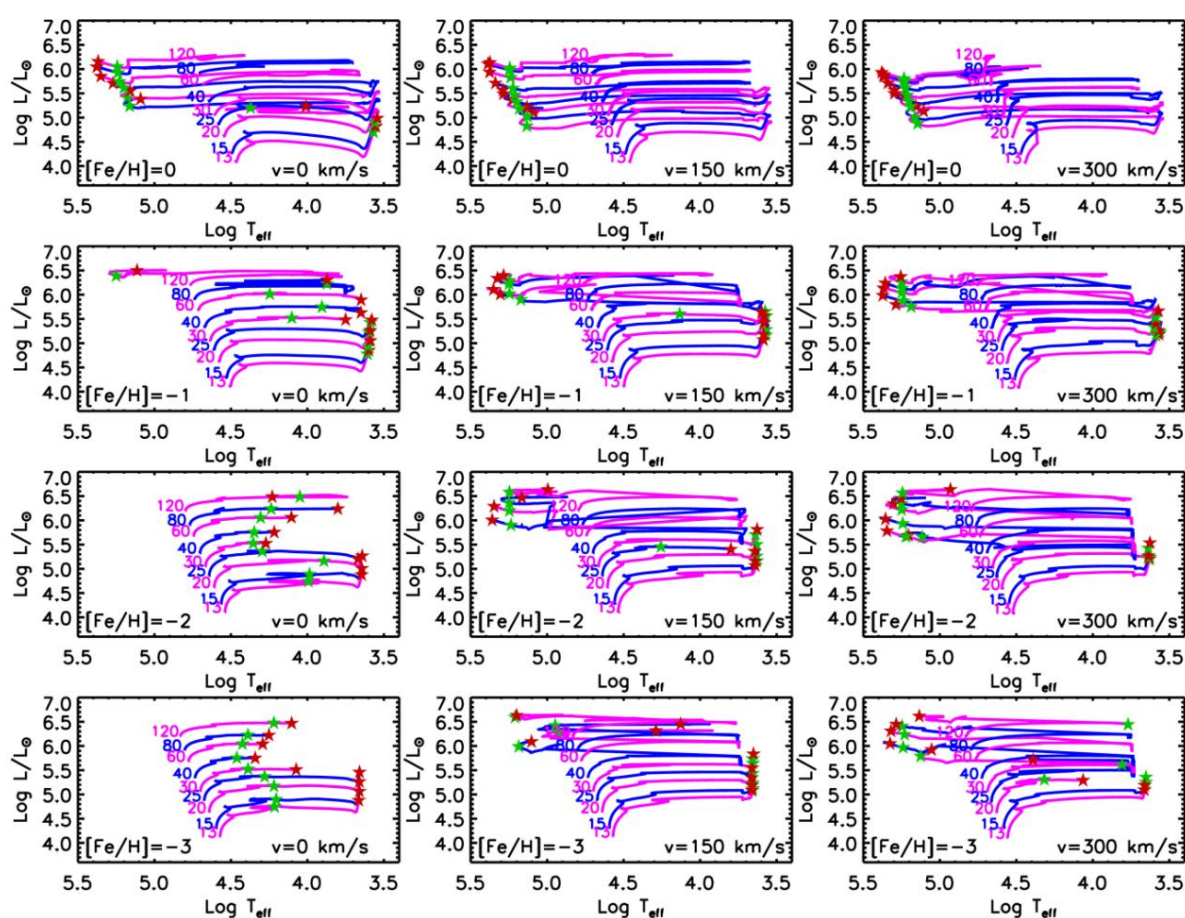


Fig. 5.1 - Tracce evolutive teoriche della presupernova nel diagramma HR di un insieme di modelli di stelle massicce nell'intervallo 13-120 M_{\odot} . Le stelle verdi indicano il punto di partenza e le stelle rosse il punto di arrivo a modelli con velocità di rotazione iniziale $v = 0, 150$ e 300 km/s, rispettivamente. I modelli con metallicità $[Fe/H]=0, -1, -2$ e -3 sono mostrati dall'alto verso il basso.

Va da sé che la conoscenza della struttura interna delle stelle e un'accurata determinazione della storia della perdita di massa ci permettono di dedurre l'evoluzione e il destino finale.

Di seguito discutiamo diversi scenari evolutivi finali a seconda dell'intervallo di massa stellare iniziale.

a) Le stelle massicce, cioè quelle che si evolvono attraverso tutti gli stadi stabili di combustione nucleare e che alla fine esplodono come supernove di collasso del nucleo, giocano un ruolo fondamentale nell'evoluzione dell'Universo. Tra le altre cose, sintetizzano la maggior parte degli elementi durante la loro idrostatica

e stadi di combustione esplosiva, in particolare quelli necessari alla vita, e quindi contribuiscono in modo significativo all'arricchimento chimico dell'Universo. Dopo l'esplosione, lasciano resti compatti, stelle di neutroni o buchi neri, che possono essere identificati attraverso le osservazioni. In questo contesto, le stelle massicce sono diventate recentemente molto interessanti nell'ambito dell'astronomia multimessaggero. Le prime (e finora uniche) due rilevazioni dirette di onde gravitazionali (GW150914 e GW151226) sono state associate alla fusione di due buchi neri, presumibilmente di origine stellare, con masse ~ 36 - $29 M_{\odot}$ e ~ 14 - $7 M_{\odot}$, rispettivamente. *Qual è il percorso evolutivo che porta alla formazione di buchi neri in un intervallo di massa simile? In che modo questo percorso evolutivo dipende dai parametri stellari iniziali, cioè massa, metallicità, velocità di rotazione? Qual è la frequenza prevista dei binari di buchi neri e con quale rapporto di massa?*

Rispondere a queste domande significherà un passo avanti fondamentale per una migliore comprensione delle sorgenti di onde gravitazionali, per una corretta interpretazione delle prossime rilevazioni che ci aspettiamo dagli strumenti a terra (Advanced-LIGO, Advanced-VIRGO) così come dalla prossima generazione di rivelatori spaziali che saranno pienamente operativi nei prossimi 30 anni (eLISA).

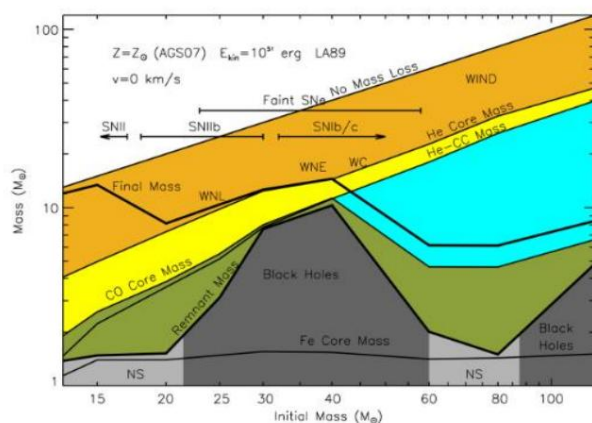
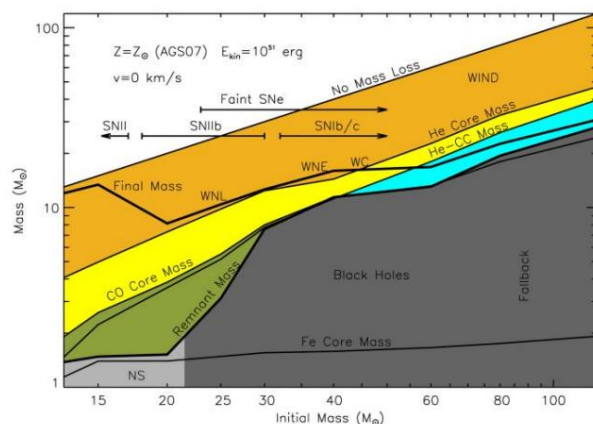


Fig.5.2 - Effetto della perdita di massa durante la fase di Wolf-Rayet (WR) sulla massa residua finale. Pannello di sinistra: masse finali e masse residue (linee continue spesse) in funzione della massa iniziale dopo l'esplosione per modelli calcolati con la prescrizione di perdita di massa per la fase WR fornita da Nugis e Lamers (2000). Pannello di destra: uguale al pannello di sinistra ma per i modelli calcolati con la perdita di massa per la fase WR fornita da Langer (1989).

Nelle figure sono mostrate anche le masse massime del nucleo di He, del nucleo convettivo di He e del nucleo di CO, le masse minime che entrano nei vari stadi WR, la massa limite tra le stelle che esplodono come SNII e SNIIb/c, la massa limite tra le stelle che formano stelle di neutroni e buchi neri dopo l'esplosione.

In generale, la massa residua di una supernova con collasso del nucleo dipende sia dall'evoluzione della presupernova che dalla dinamica dell'esplosione. Al momento non esiste un modello autoconsistente e ben consolidato per le supernovae di collasso del nucleo in grado di ottenere l'esplosione con le proprietà tipiche osservate, anche con i modelli idrodinamici e gli ingredienti microfisici più aggiornati. Sono in corso lavori da parte di tutti i gruppi teorici per comprendere meglio

il problema e possiamo aspettarci progressi nel prossimo futuro. L'evoluzione della presupernova è ancora largamente influenzata dalle ben note e di lunga data incertezze dell'evoluzione stellare, cioè tutti quei fenomeni fisici che richiedono un trattamento multidimensionale come, ad esempio, la convezione e la rotazione (Figura 1). *Un passo fondamentale verso un miglioramento del potere predittivo dei modelli di stelle massicce sarà raggiunto solo quando saranno disponibili modelli evolutivi 3D completi (vedi sopra).* Un altro ingrediente nei modelli stellari che gioca un ruolo fondamentale nel determinare la massa residua finale è la cronologia delle perdite di massa (Figura 2). Ciò può essere dedotto dallo studio dell'interazione tra l'ejecta rilasciato nelle esplosioni stellari e il materiale circumstellare preesistente (CSM). Durante le interazioni shell-shell vengono emesse radiazioni dure (X e UV, rilevate con strumenti a bordo di satelliti come Swift, XMM, Chandra), così come radiazioni morbide (tale emissione radio sarà rilevabile fino a un elevato spostamento verso il rosso una volta che SKA sarà essere operativo). *In questo quadro, sarà di fondamentale importanza effettuare un censimento e un attento monitoraggio delle fasi finali delle stelle massicce, le cosiddette ipergiganti che popolano la parte più luminosa del diagramma HR.* La maggior parte delle stelle massicce si evolve durante la cosiddetta fase Luminous Blue Variable (LBV), dove sperimentano forti episodi di espulsione dinamica di massa. Data la natura transitoria di questo fenomeno, nonché il suo verificarsi sporadico, un monitoraggio continuo del cielo farebbe sicuramente avanzare notevolmente la nostra comprensione di questa fase misteriosa. *In questo contesto, prevediamo che le capacità di monitoraggio multibanda ad alte prestazioni di LSST ci consentiranno di aumentare significativamente il numero di stelle LBV confermate. In questo modo avremo determinazioni più accurate della lunghezza della fase LBV, delle proprietà (principalmente la posizione nel diagramma HR) delle stelle durante queste fasi instabili e della quantità totale di massa persa, sia in totale che per eruzione. Questi dati miglioreranno notevolmente la nostra comprensione di questa fase così come il suo impatto sulla determinazione della relazione massa-massa residua iniziale per stelle massicce.*

b) Il telescopio di classe 2-4m svolgerà un ruolo chiave negli studi spettrofotometrici dei nuovi transitori nell'Universo Locale. *In questo quadro, i nuovi spettrografi previsti aventi una risoluzione media su un'ampia gamma spettrale (dall'UV fino al NIR), ad esempio SOXS e NTE, forniranno un contributo rilevante.* Tali osservazioni, per gli eventi più luminosi (Galattici o appartenenti al Gruppo Locale), verranno effettuate anche con i telescopi di classe 1.5m.

Inoltre, lo studio delle curve di luce storiche LBV, potrebbe essere potenziato utilizzando lastre fotografiche d'archivio. *Sarebbe poi molto importante la scansione digitale di tutte le lastre disponibili negli archivi dei telescopi italiani, anche di quelli più piccoli, e mettere on-line i dati digitali e mettere a disposizione un database pubblico incrementale, che raccolga le curve di luce e gli spettri di queste stelle estreme.* In questo modo potremo sia tenere traccia dell'evoluzione nel tempo di questi oggetti, sia creare un database da utilizzare in modo efficiente per ingerire i dati provenienti da future strumentazioni. *Ulteriori informazioni potrebbero essere raccolte dallo studio degli involucri circumstellari attorno a stelle massicce della Via Lattea e del Gruppo Locale e, per questo aspetto, l'elevata risoluzione spaziale degli strumenti di prossima generazione nell'ottica (ELT) e nella radio (SKA). essere cruciale.*

c) Per le stelle di massa da bassa a intermedia, anche la perdita di massa gioca un ruolo chiave per la determinazione del loro destino finale. In particolare, per le stelle aventi alla nascita $M < 10 M_{\odot}$, la maggior parte dell'involucro ricco di H viene espulsa durante il ramo asintotico (AGB), con un tasso di perdita di massa che varia da 10^{-7} a $10^{-4} M_{\odot}/\text{anno}$. Tuttavia, per le stelle con $M < 1,5 M_{\odot}$, una parte rilevante dell'involucro ricco di H viene persa anche durante la prima salita verso il ramo gigante (RGB). *In caso il destino finale di queste stelle è la formazione di una nana bianca fredda, solitamente costituita da una miscela di C e O (per stelle con massa iniziale $M < 8 M_{\odot}$) o da una miscela di O e Ne (per stelle con massa iniziale*

$8 < M/M < 10$). Va da sé che un'accurata determinazione della storia della perdita di massa durante le fasi RGB e AGB è fondamentale per ottenere una stima affidabile della relazione di massa iniziale e finale.

In particolare, la fase Asymptotic Giant Branch (AGB) è caratterizzata dai più alti tassi di perdita di massa che le stelle di massa medio-bassa sperimentano durante la loro vita, con conseguente arricchimento chimico del mezzo interstellare in termini di polvere e gas. Le stelle AGB svolgono un ruolo fondamentale in molti ambienti astrofisici, che vanno dall'Universo Locale fino alle regioni più remote dell'Universo e lo studio delle proprietà fisiche e chimiche di queste stelle è fondamentale per tracciare l'evoluzione chimica della Via Lattea, per determinare correttamente la relazione tra la massa iniziale e la massa finale delle stelle di massa intermedia, per la comprensione dei meccanismi di formazione delle popolazioni multiple negli ammassi globulari galattici, per analizzare i processi di formazione di nebulose planetarie e perseguire la loro caratterizzazione spettroscopica.

L'involucro delle stelle AGB viene perso dai venti freddi e densi, adatti alla condensazione di molecole di gas in polvere. La pressione delle radiazioni sui granelli di polvere innesca l'accelerazione del vento, favorendo la perdita di massa in queste strutture. *Tuttavia la descrizione dei meccanismi di formazione della polvere nei venti delle stelle AGB è fondamentale per l'interpretazione delle osservazioni infrarosse delle popolazioni evolute, ad esempio nelle Nubi di Magellano e nelle galassie nane del Gruppo Locale, e per lo studio di proprietà di estinzione delle galassie.*

In INAF c'è una lunga tradizione nella modellazione della fase dell'impulso termico delle stelle AGB che consente progressi significativi nel campo della ricerca astrofisica teorica nel contesto internazionale. Inoltre recenti osservazioni ad alta risoluzione spaziale e ad alto rapporto segnale-rumore, ottenute utilizzando strumenti come ALMA e Hershel, hanno stimolato all'interno dell'INAF una nuova ricerca volta allo studio del processo di formazione della polvere nel vento stellare, con la prima modellazione di questo processo come basata su una descrizione autoconsistente della fase AGB. *Questa nuova versione dei modelli AGB + polvere è stata testata contro i dati infrarossi, presi con lo Spitzer Space Telescope, delle popolazioni stellari evolute delle Nubi di Magellano, trovando un ottimo accordo tra modellazione teorica e osservazioni, che ha permesso una caratterizzazione completa dell'AGB stelle in queste galassie. Un approccio così fruttuoso, non solo rappresenta un passo importante nella comprensione dell'inquinamento da gas e polvere delle stelle AGB, ma dimostra anche che questi modelli possono essere utilizzati per caratterizzare popolazioni stellari evolute in ambienti diversi.*

Questi risultati sono tempestivi con gli strumenti imminenti come NIRCam e MIRI a bordo del James Webb Space Telescope e della Multi-Adaptive Optics Imaging Camera for Deep Observations per l'European Extremely Large Telescope, che aumenterà enormemente il numero di galassie in cui AGB stelle sarà risolto e studiato. Inoltre, LSST aprirà importanti possibilità su aspetti ancora poco conosciuti dell'evoluzione dell'AGB: la pulsazione e il suo impatto sul processo di formazione della polvere.

Chiave Domanda	Metodo	Progetto
<p>Portare modelli stellari al potere successivo</p>	<p>Confronto con informazioni astrometriche e dati asterosismici accurati; Sviluppo di opportuni algoritmi numerici per implementare fenomeni fisici multidimensionali in codici evolutivi stellari 1D basati su simulazioni 3D; Sviluppo di modelli stellari 3D;</p> <p>Raffinare i codici di formazione della polvere attraverso il confronto con osservazioni ad alta risoluzione spaziale e alto rapporto segnale-rumore o tramite strumenti osservativi che aumenteranno enormemente il numero di galassie in cui verranno risolte le stelle AGB.</p> <p>Sviluppo di codici idrodinamici per lo studio dell'impatto/efficienza di processi di miscelazione non canonici; Confronto con campi magnetici aggiornati misurazioni.</p>	<p>Keplero, Gaia, TESS, PLATO, JWST, ALMA.Herschel, LBT, VLT, SKA, LSST, ELT</p>

6. Astrofisica relativistica e astroparticelle

Parole chiave: *Stelle compatte relativistiche (nane bianche, stelle di neutroni, stelle di quark, ecc.) - Buchi neri a tutte le scale di massa – GRB, Fast Radio Bursts, esplosioni SN, Novae, e altri fenomeni transitori – Raggi cosmici e astroparticelle – Onde gravitazionali*

Domande chiave:

- Rivelare e studiare gli effetti di GR nel limite di campo forte
- Misurare le proprietà dei BH (massa, spin) e capire come viene estratta l'energia da essi
- Fisica dell'accrescimento e dell'espulsione su/da oggetti compatti
- Studiare i processi di accelerazione delle particelle a tutte le diverse scale
- Ricerca di controparti elettromagnetiche delle onde gravitazionali e del neutrino fonti
- Utilizzare gli oggetti compatti e le osservazioni ad alta energia per vincolare le leggi fondamentali della natura (es. Violazione dell'invarianza di Lorentz, particelle simili ad assioni, materia oscura)

6.1 Sondaggio Buchi neri e oggetti compatti

I buchi neri (BH) sono completamente caratterizzati da soli tre parametri: massa, momento angolare per unità di massa ($a=J/M$) e carica elettrica. Tutte le informazioni aggiuntive vengono perse all'interno dell'orizzonte degli eventi e pertanto non sono accessibili agli osservatori esterni. I BH astrofisici sono ancora più semplici, poiché la loro carica dovrebbe essere zero in tutte le situazioni di interesse astrofisico. Nonostante i numerosi progressi nella ricerca di BH negli ultimi tre decenni, è principalmente attraverso l'argomento della massa (cioè una massa maggiore della massa massima possibile di NS) che le sorgenti sono state identificate fino a poco tempo fa come BH. Con la prima rilevazione delle onde gravitazionali (GW) nel settembre 2015 e l'identificazione della loro sorgente come fusione di due buchi neri di circa 30 M_{sun} , l'esistenza di BH di massa stellare è stata finalmente dimostrata. Sebbene ciò implichi inevitabilmente che anche gli orizzonti degli eventi debbano esistere, mancano ancora prove dirette di questi ultimi. Tuttavia, si prevede che nel prossimo futuro saranno possibili osservazioni dirette degli effetti legati alla presenza dell'orizzonte, anche se limitate al buco nero supermassiccio (SMBH) al centro della Via Lattea, attraverso osservazioni VLBI mm del BH ombra (Telescopio dell'orizzonte degli eventi). Le osservazioni più precise finora eseguite risolvono regioni delle dimensioni dell'orbita terrestre al centro galattico. È necessario un miglioramento di un fattore di ~10 per risolvere veramente l'orizzonte SMBH. Attualmente sono stati proposti alcuni metodi per identificare la presenza di un buco nero in un sistema. Uno di questi metodi affronta direttamente l'assenza di una superficie dell'oggetto compatto. Se il flusso di accrescimento è radiativamente inefficiente, come si osserva a basse velocità di accrescimento, in assenza di una superficie, l'energia può essere persa all'interno dell'orizzonte, mentre nel caso di una stella di neutroni la stessa energia verrebbe irradiata sulla superficie. Ciò si traduce in una differenza nella luminosità dei raggi X a basse velocità tra i sistemi NS e BH, che è osservata ma difficile da quantificare, e in una differenza nello spettro energetico, ostacolata dalla mancanza di statistiche. Le future osservazioni ad alta sensibilità ad alta energia possono essere utilizzate per discriminare tra flussi radiativamente inefficienti su BH e stelle di neutroni. Altri metodi si basano sugli effetti della relatività generale (GR) nel regime di campo forte. In particolare, la presenza di un'orbita circolare stabile più interna attorno a un oggetto compatto, il cui valore dipende dai parametri dell'oggetto (come spin e massa) dovrebbe terminare efficacemente il flusso di accrescimento radiativo. Questo raggio interno può essere misurato in diversi modi. La modellazione dettagliata dello spettro energetico di un disco di accrescimento, quando presente, può portare alla determinazione della sua luminosità e quindi della sua dimensione. Questo è stato applicato ai binari BH, ma richiede osservazioni ad alta sensibilità e banda larga

copertura per determinare lo spettro a banda larga. L'analisi della deformazione relativistica della linea Ka del ferro fluorescente è un altro modo per determinare quanto vicino all'oggetto compatto va il flusso di accrescimento. Osservazioni dettagliate di profili di linee di ferro spostati verso il rosso, allargati e inclinati consentono di misurare il momento angolare per unità di massa, poiché l'orbita stabile interna ha un raggio che dipende da $a=J/M$. Per un BH che ruota al massimo questo raggio è circa sei volte più piccolo di un BH non rotante. Ciò significa che i profili di linea emessi dalla materia attorno a un BH rotante sono distorti in modo più relativistico perché la materia percepisce un campo più forte.

Inoltre, se l'emissione della linea viene prodotta all'interno di un "punto caldo" relativamente piccolo sul disco di accrescimento, la massa può essere stimata, assumendo la rotazione del disco kepleriano, determinando il periodo orbitale e la posizione del punto dall'ampiezza e dall'energia della linea. Infine, la modellazione di caratteristiche di temporizzazione rapida come le oscillazioni quasi periodiche (QPO), originate dal flusso di accrescimento interno, può essere collegata ai parametri GR e produrre spin e misurazioni di massa. Sono disponibili alcune misurazioni, ma sono necessari strumenti con un'area effettiva molto più ampia per confermare l'applicabilità dei modelli.

La polarimetria a raggi X può essere utilizzata anche per sondare gli effetti GR a campo forte. Negli AGN è infatti prevista una rotazione nel tempo dell'angolo di polarizzazione della componente di riflessione Compton (prodotta con la linea di ferro) e, più in generale, un angolo di polarizzazione dipendente dal tempo sarebbe una chiara firma della presenza del campo forte GR effetti. Analogamente, nelle binarie a raggi X BH è prevista una rotazione con l'energia dell'angolo di polarizzazione della componente del disco termico.

6.2 Oggetti binari compatti

I binari a doppia stella di neutroni sono ottimi laboratori per la fisica gravitazionale. La scoperta di PSR1913+16 nel 1975 ha fornito la prima prova indiretta di radiazione gravitazionale. PSR0737-3039, la prima pulsar doppia, scoperta nel 2004, è un laboratorio ancora migliore per materia ad alta densità e GR, consentendo la determinazione di tutti i parametri geometrici del sistema e la misura di cinque parametri Post Kepleriani (parametri che quantificano la deviazione dalle leggi di Keplero). Questi risultati hanno prodotto test più estesi di GR rispetto a quelli derivati in 30 anni di osservazione di PSR1913+16. Recentemente sono stati raggiunti ulteriori miglioramenti di questi test, nonché la misurazione di nuovi parametri.

Continuare a monitorare il sistema ci permetterà di aumentare costantemente la precisione delle nostre misurazioni e, in particolare, di determinare il momento di inerzia di un NS.

Mentre i binari Double NS sono i migliori banchi di prova per GR, i binari nana bianca-pulsar in orbite ravvicinate sono gli obiettivi più promettenti per vincolare teorie alternative della gravità.

PSRJ1738+0333, ad esempio, attualmente pone il limite più forte sulla costante di accoppiamento lineare $\gamma_0 < 0,5 \times 10^{-6}$ nel regime di accoppiamento in quadratura forte ($\gamma_0 \gg 0$), 10 volte più vincolante rispetto alle misurazioni della sonda Cassini. A valori inferiori di γ_0 , il suo limite di corrente è solo un fattore $\gamma_0^{-1,7}$ meno vincolante del limite di Cassini e può migliorare e superare i test laser del Sistema Solare nei prossimi anni.

Le nuove indagini radio pianificate avranno anche la capacità di svelare una presunta pulsar in orbita attorno a un BH: un tale sistema può sondare la gravità relativistica con un potere discriminante che supera tutte le altre metodologie.

6.3 Onde gravitazionali da oggetti binari compatti I binari BH sono il

laboratorio ideale per sondare GR in condizioni forti e relativistiche. Tracciando la fase e l'ampiezza dei GW durante la spirale in entrata, la fusione e l'anello in basso, è possibile estrarre informazioni estremamente precise sul tensore energia-stress. Le forme d'onda binarie dipendono, nel caso più generale, da 17 parametri e rilevamenti GW ad alto rapporto segnale-rumore possono fornire misurazioni con una precisione senza precedenti. Ad esempio, la massa binaria, la massa chirp e la massa ridotta possono essere misurate in poche parti in 10^{-5} con interferometri spaziali. Compatto

binari (NS-NS, NS-BH e BH-BH) e binari di buchi neri massivi (MBHBs) producono segnali in due diversi domini di frequenza GW, rispettivamente 1-1000 Hz e mHz, dove basati sullo spazio e limitati al gamma precedente, gli interferometri a terra sono sensibili.

I binari a coalescenza NS-NS, NS-BH e BH-BH sono sorgenti primarie di radiazione gravitazionale ad alta frequenza per interferometri a terra. Le velocità cosmiche a cui si verificano tali eventi sono incerte.

Mentre le controparti elettromagnetiche dei buchi neri di dimensioni stellari coalescenti sono coperte da un'incertezza simile (la teoria prevede possibili transienti a più lunghezze d'onda associati ai deflussi relativistici prodotti dopo la fusione), le fusioni di doppie stelle di neutroni sono associate a sorgenti elettromagnetiche rilevabili. L'evento GW del 17 agosto 2017 è stato uno spartiacque per l'astrofisica multi-messaggero: l'evento gravitazionale, riconosciuto come una fusione di stelle compatte di cui almeno una è una NS, ha avuto una controparte di raggi gamma rilevata dal Fermi GBM e INTEGRAL e identificato inequivocabilmente come un breve GRB, una conseguenza di raggi X che è coerente con la radiazione dall'interazione dell'onda d'urto con il mezzo circumstellare e una prima controparte ottica/infrarossa ("kilonova") che porta la firma spettroscopica del processo di nucleosintesi, cioè la formazione di atomi radioattivamente instabili ricchi di neutroni.

Le fusioni a doppia stella compatta si sono così rivelate luoghi privilegiati di produzione del 50% degli elementi più pesanti del ferro.

A causa della loro dimostrata associazione con le fusioni di stelle compatte, i GRB brevi offrono un modo per misurare la velocità dei GW, un'alternativa a quella dedotta dalle pulsar binarie relativistiche nella nostra Galassia. Tuttavia, anche in questo caso sono implicate incertezze significative, dovute ad esempio agli angoli di collimazione sconosciuti, alla funzione di luminosità e alla frazione di binari compatti che producono un GRB corto. La possibilità che NS deformati a rotazione rapida producano segnali GW ad alta frequenza di lunga durata rilevabili con gli interferometri a terra presenti o di prossima generazione ha ricevuto molta attenzione. I due scenari principali coinvolgono vecchi NS in binari a raggi X a bassa massa, che vengono fatti ruotare fino a periodi di rotazione di millisecondi da coppie di accrescimento e magnetar neonatali a rotazione rapida.

Se gli SMBH erano comuni in passato come lo sono oggi, e se le galassie si fondono come implicito nei modelli di raggruppamento gerarchico di formazione della struttura, allora le MBHB devono essersi formate in gran numero durante la storia cosmica. I GW di MBHB nell'intervallo di massa 10^5 - 10^7 M_{sun} sono tra i migliori bersagli per gli interferometri spaziali, mentre la temporizzazione ad alta precisione su un campione di alcune decine di millisecondi radio pulsar (il cosiddetto Pulsar Timing Array) può effettuare un rilevamento diretto del fondo GW a frequenze nano-Hz, molto probabilmente generato da SMBH nei nuclei delle galassie.

Il rilevamento di GW da MBHB è interessante per due ragioni: primo, sonderà in situ la forte gravità nel regime relativistico non lineare; in secondo luogo, i GW possono integrare le osservazioni elettromagnetiche per studiare l'evoluzione cosmica delle strutture, come le interazioni e le fusioni delle galassie, e la demografia di SMBH.

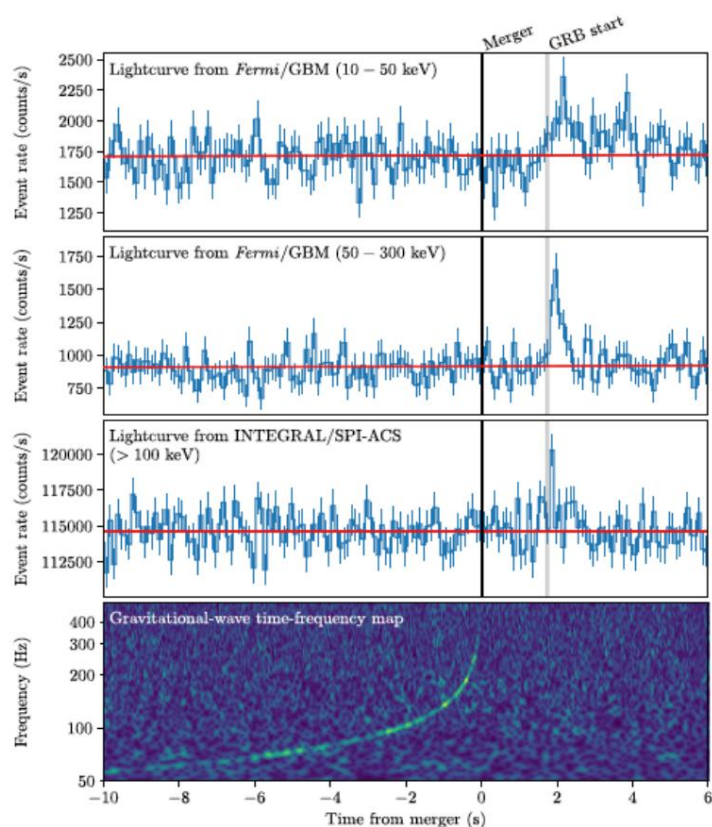


Fig. 6.1 - Segnale GW da GW170817 e relativo breve GRB osservato con Fermi/GBM e INTEGRAL. Crediti: Abate et al. 2017, ApJ 848, L13.

Le previsioni teoriche per i meccanismi di perdita di momento angolare, che guidano l'evoluzione di binari ravvicinati (CB) di piccola massa contenenti oggetti compatti, includono la frenatura magnetica, la radiazione gravitazionale e, per i CV anche la perdita di massa dovuta alle esplosioni di Nova. L'attuale evidenza osservativa della loro efficienza si basa solo sulla distribuzione del periodo orbitale misurato. Il rilevamento di GW da CB con uno o due WD fornirà supporto osservativo alla teoria e consentirà l'identificazione di una popolazione ampia e nascosta di binari degenerati a periodo ultracorto, inclusi i sistemi WD che si pensa siano il collegamento alla supernova SNIa progenitori.

6.4 Materia in condizioni estreme

Le stelle di neutroni (NS) sono laboratori ideali per studiare la materia in condizioni estreme (densità, campo magnetico), non raggiungibili nei laboratori terrestri. Approfondimenti cruciali sull'equazione di stato e altre proprietà della materia a densità nucleari possono essere derivati da quanto segue misurazioni.

Se la frequenza più alta delle oscillazioni quasi periodiche (QPO) nel flusso di raggi X di NS in accrescimento corrisponde alla frequenza del movimento della materia vicino alla superficie della stella, è possibile dedurre un limite superiore sul raggio NS, vincolando quindi l'equazione di stato. Questa tecnica è già stata applicata ai dati QPO ottenuti con RXTE, ma il suo pieno potenziale può essere sfruttato solo attraverso studi di throughput più elevati (ampia area di raccolta e banda estesa a energie più elevate) che affrontano la forma del segnale, la sua dipendenza dall'energia e il contenuto armonico in modo molto maggiore dettaglio.

Informazioni dirette sul redshift sulla superficie NS possono essere ottenute da deboli righe spettrali ioniche originate sulla superficie stessa. Rilevamenti di tali linee (in particolare Fe XXVI, Fe XXV e O VIII) sono stati segnalati in passato, ma ancora una volta uno studio sistematico attende un osservatorio di raggi X a velocità molto più elevata. Combinato con il periodo di spin NS dedotto da pulsazioni e/o oscillazioni burst, il profilo delle linee così ottenuto produrrebbe misurazioni di

la massa e il raggio NS.

La sincronizzazione delle pulsar ad alta precisione ci sta già fornendo le determinazioni più precise delle masse delle stelle di neutroni. Come accennato in precedenza, la temporizzazione a lungo termine del sistema a doppia pulsar J0737-3039 consentirà una misurazione precisa del suo momento di inerzia, e quindi del raggio, con una precisione sufficiente per escludere il 90% delle equazioni di stato proposte per la materia nucleare.

Le magnetar sono NS (isolate) alimentate principalmente da energia magnetica (includono ripetitori di raggi gamma morbidi (SGR) e pulsar di raggi X anomali (AXP)). La maggior parte di loro sono transitori, il che implica una popolazione totale nella Galassia molto più ampia del campione attualmente noto (circa 30, inclusi i candidati). Ci sono ormai diverse linee di prova a sostegno dell'opinione che SGR e AXP ospitino stelle di neutroni con intensità di campo magnetico di almeno 10^{14} - 10^{15} Gauss, inclusa la rilevazione di linee di ciclotrone protonico negli spettri di raggi X risolti in fase di queste sorgenti. Un'altra prova proverrebbe dalla polarimetria risolta in fase ed energia degli SGR che mostrerebbe sia le risonanze del ciclotrone del protone che le risonanze della polarizzazione del vuoto. L'estensione dell'indagine della loro componente di raggi X molto dura a energie più elevate potrebbe gettare luce sulla fenomenologia della magnetosfera in campi così estremi. Una strumentazione ad alto rendimento con una buona risoluzione spettrale sarebbe l'ideale per raggiungere questo obiettivo. Gli SGR emettono sporadicamente razzi giganti durante i quali vengono emesse enormi quantità di energia (fino a 10^{47} erg) nel picco iniziale di meno di un secondo. Questi eventi probabilmente derivano da improvvisi riarrangiamenti su larga scala dei campi magnetici estremamente intensi di queste magnetar, probabilmente innescati da una grave frattura della crosta NS. Un intenso bagliore gigante (come quello di SGR 1806-20 nel 2004) che si verifica in una galassia a decine di Mpc sembrerebbe un breve GRB. Pertanto i razzi giganti di SGR potrebbero costituire una sottoclasse di GRB brevi.

Lo studio di NS isolati (non alimentati dall'accrescimento e quindi offrendo in linea di principio un ambiente molto più "pulito") è utile anche per sondare le proprietà della materia in condizioni estreme.

Lo strumento principale in tal senso è fornito dalle osservazioni a raggi X dell'emissione termica dalla superficie della stella, che risente della struttura interna e dell'evoluzione, nonché dalla composizione e magnetizzazione dell'atmosfera della stella. La spettroscopia ad alta risoluzione e risolta nel tempo su un ampio intervallo di energia è essenziale per identificare correttamente le linee e altre caratteristiche spettrali (che possono quindi fornire uno spostamento verso il rosso gravitazionale) e per ricavare il raggio della stella di neutroni e la distribuzione della temperatura superficiale, mentre lo spettro e la polarimetria risolta in fase potrebbero provare la birifrangenza del vuoto prevista dall'elettrodinamica quantistica.

La cromodinamica quantistica prevede che la materia in condizioni estreme potrebbe avere la forma di un plasma di quark e gluoni. È stato ipotizzato che, a causa dell'accrescimento, un NS potrebbe essere temporaneamente in questo stato prima di crollare in un BH. Il tempo trascorso dalla stella in questo stato dipende dalle proprietà del Quark-Gluon Plasma. Se si verifica questa transizione al plasma Quark-Gluon, allora in Nature NS dovrebbe essere più compatto di quanto ci si potrebbe aspettare sulla base di qualsiasi equazione di stato per la materia ordinaria. Stelle di quark di questo tipo fornirebbero un banco di prova senza precedenti per la fisica fondamentale.

6.5 Fisica dell'accrescimento e dell'espulsione

L'accrescimento gioca un ruolo fondamentale nell'alimentare l'emissione da oggetti compatti a diverse scale, ma i dettagli dei processi attraverso i quali l'energia gravitazionale viene convertita in radiazione sono ancora poco conosciuti. Il disco $\dot{\gamma}$ otticamente spesso e geometricamente sottile ancora ampiamente adottato (modello "Shakura & Sunyaev standard") è probabilmente troppo semplice per descrivere la complessa fenomenologia osservata, specialmente a velocità di accrescimento elevate e molto basse. Molta attenzione viene dedicata allo studio del trasporto del momento angolare nei dischi di accrescimento attraverso la turbolenza magnetica e l'instabilità magneto-rotazionale. Sebbene gli studi analitici possano ancora fornire inestimabili progressi, le simulazioni numeriche sono necessarie per quantificare il

importanza degli effetti fisici generati nell'evoluzione non lineare di questi scenari astrofisici. Vicino ai BH, anche gli effetti GR sono importanti. Con gli strumenti numerici attualmente disponibili, è ora possibile andare oltre la semplice ricerca di soluzioni stazionarie o quasi stazionarie, mettendo alcune delle idee originali dei lavori pionieristici (come il modello Shakura Sunyaev) su un livello più quantitativo.

C'è un ampio consenso sul fatto che l'emissione di raggi X duri osservata sia dovuta alla comptonizzazione di fotoni seme morbidi (UV ottici per AGN, raggi X morbidi per binari) da parte di una popolazione di elettroni caldi (10^9 K). La modellazione degli spettri di raggi X con un appropriato modello di comptonizzazione fornisce informazioni chiave sulla geometria del sistema e sullo stato fisico del flusso di accrescimento (la natura termica o non termica della popolazione di elettroni). Nei binari galattici, ci sono prove che diversi processi sono al lavoro in diversi stati sorgente e sono stati osservati spettri ibridi termici/non termici. Per fare un progresso significativo in questo campo, è necessaria una combinazione di sforzi teorici e di osservazione. Sono necessarie misurazioni di raggi X più sensibili, che si estendono fino alle energie in cui gli spettri mostrano un taglio (decine o centinaia di keV), insieme al monitoraggio simultaneo ottico/UV e raggi X. Sul lato teorico, sottolineiamo la necessità di capire perché i sistemi con una massa stellare BH mostrano differenze evidenti rispetto alle loro controparti più grandi, nonostante la somiglianza nella fisica dell'accrescimento che dovrebbe essere la stessa per entrambe le classi di oggetti.

Lo studio dell'accrescimento su stelle di neutroni e nane bianche fornisce una ricchezza di informazioni sui fenomeni legati alla presenza di una superficie stellare "dura" e di una magnetosfera. Tali fenomeni richiedono una comprensione della fisica dello strato limite, delle coppie di accrescimento, dell'accrescimento magnetosferico e della colonna, del trasferimento radiativo e della diffusione del ciclotrone risonante in forti campi magnetici e della combustione termonucleare instabile di materiale appena accresciuto nello strato superficiale della stella. Un confronto completo tra le proprietà dell'accrescimento BH, NS e WD è essenziale per la comprensione di tutte le classi di sistemi.

Un problema importante che rimane attualmente irrisolto è l'osservazione che, sebbene tutte le galassie ospitino un SMBH nella loro regione centrale, la maggior parte di esse non sembra essere attualmente attiva. Il caso più eclatante è quello della nostra Galassia, il cui BH al Centro Galattico ha una luminosità di circa dieci ordini di grandezza inferiore al limite di Eddington per un BH della sua massa (cioè $2,6 \times 10^6$ masse solari). La sua emissione di raggi X mostra due stati diversi. Nello stato di quiescenza, l'emissione debole sembra originarsi in un'area estesa intorno al BH, dando evidenza di gas caldo in accrescimento nell'ambiente di Sgr A*. Lo stesso Sgr A* mostra bagliori di raggi X che si verificano circa una volta al giorno, durante i quali l'emissione aumenta di fattori fino a 100 per diverse decine di minuti. I brevi tempi di salita e di decadimento dei brillamenti suggeriscono che la radiazione deve provenire in una regione entro 10 raggi di Schwarzschild dal BH. Sia lo stato quiescente che quello flaring sono stati modellati in termini di accrescimento radiativamente inefficiente che prevede uno spettro molto duro, con un picco di circa 100 keV. Strumenti a raggi X duri ad alta sensibilità nel 10-

Per confermare questa ipotesi è necessaria una banda di 100 keV. Ci sono prove che il centro galattico BH fosse molto più attivo qualche centinaio di anni fa, sulla base dello spettro di riflessione pura dei raggi X di Sgr B2, una nuvola molecolare ad una distanza proiettata da Sgr A* di circa 100 pc. È quindi possibile che Sgr B2 stia facendo eco a un'attività passata di Sgr A*. Una misura polarimetrica confermerebbe sicuramente che l'illuminazione proviene da Sgr A* (dall'angolo di polarizzazione), e aiuterebbe a stimare la reale distanza di Sgr B2 (dal grado di polarizzazione) e l'epoca in cui il BH era attivo.

Una caratteristica comune delle dimensioni stellari e dei BH supermassicci è l'espulsione sia dei venti che dei getti che si muovono a velocità relativistica. La presenza dei getti potrebbe essere un elemento chiave per capire come funziona il motore centrale. Mentre è ampiamente riconosciuto che i processi magneto-idrodinamici sono coinvolti nella collimazione e nell'accelerazione dei getti, i meccanismi specifici di lancio e

alimentarli non sono noti in dettaglio. Inoltre, non sappiamo ancora se i getti siano costituiti principalmente da leptoni o da flusso Poynting. I progressi nella comprensione di questi fenomeni si basano su osservazioni a più lunghezze d'onda e polarizzazione. La misura del diametro del getto può fornire informazioni sulla dimensione della regione in cui il getto è formato e inizialmente accelerato. Secondo i modelli attuali, le linee di campo magnetico attorcigliate sono ancorate nella parte interna del disco di accrescimento rotante. L'ultima orbita stabile determina quindi la larghezza minima del getto. L'attuale mm-VLBI fornisce una risoluzione di 15 raggi gravitazionali, ma nel prossimo futuro la risoluzione può essere notevolmente migliorata, consentendo così un test diretto del ruolo della rotazione BH nella formazione del getto.

Nei BH di dimensioni stellari, gli episodi di espulsione sono chiaramente associati a particolari stati sorgente definiti da proprietà spettrali e di variabilità temporale; in particolare, brusche transizioni di stato, che comportano marcati cambiamenti spettrali e la comparsa di particolari caratteristiche nella rapida variabilità temporale, sembrano essere correlate alla presenza di getti. Pertanto, sono necessari una strumentazione sensibile alla banda larga e un monitoraggio continuo efficiente delle sorgenti. Raggiungere una piena comprensione delle proprietà di accrescimento/espulsione nei sistemi di massa stellare si collegherà direttamente ai modelli per AGN, poiché sono state trovate correlazioni su larga scala che collegano le due classi di sistemi, indicando che molte proprietà di accrescimento ed espulsione sono in gran parte di massa indipendente.

Per l'accrescimento di NS nei sistemi binari, la connessione tra disco e jet è ancora poco conosciuta. Le osservazioni di binari NS a diverse luminosità nei raggi X e nei regimi vicino IR/radio saranno cruciali per determinare la frequenza della rottura del getto e la sua evoluzione.

Alcune pulsar binarie msec che transitano dallo stato del disco (stato LMXB) allo stato di alimentazione rotazionale (stato radio) stanno ora sfidando la nostra comprensione del meccanismo di accrescimento/espulsione al confine magnetosferico. Particolarmente intrigante è il recente rilevamento di pulsazioni di raggi X msec interpretate come accrescimento e pulsazioni ottiche msec che non possono essere dovute all'accrescimento. I prossimi anni vedranno l'avvento di osservazioni coordinate a tempi rapidi nei regimi di raggi X, ottico/NIR, radio e raggi gamma che saranno cruciali per comprendere l'interazione dei processi di accrescimento ed espulsione in ambienti con campo magnetico moderato.

Le osservazioni di pulsar binarie msec in accrescimento a bassa luminosità, insieme alla loro variabilità della luminosità a lungo termine, aiuterebbero notevolmente a far luce sulla geometria di accrescimento e sull'interazione con il campo magnetico NS, nonché sul legame con i - finora pochi -

individuati i sistemi transitori. Questi aspetti beneficeranno di osservazioni coordinate a raggi X, ottiche/NIR e radio con corrente (XMM-Newton, Parkes, SRT, ALMA, VLT, TNG) e futura (eXTP, ATHENA, Meerkat, LSST, SKA, ELT, CTA) strutture.

La recente scoperta da Fermi-LAT di novae durante l'esplosione indica che le novae sono una classe di oggetti galattici che emettono raggi gamma recentemente scoperta. L'espulsione della materia durante le esplosioni di nova e la fisica degli shock in collisione nelle novae simbiotiche e classiche devono ancora essere comprese. Le osservazioni dalle prime fasi dell'esplosione della nova su un'ampia gamma di energia, inclusi i raggi gamma, i raggi X, l'ottica al regime radio, saranno cruciali per comprendere i processi di accelerazione delle particelle e il collegamento al deflusso di massa.

Secondo schemi unificati, le diverse classi di AGN possono essere spiegate in termini di diversi angoli di visuale. I Blazar, in cui il getto è visto quasi di fronte, sono estremamente interessanti perché possiedono un'importante emissione di alta energia: ~60% di tutte le sorgenti di raggi gamma rilevate da Fermi/LAT appartengono alla classe Blazar e ~70 Blazar sono stati rilevati a Energie TeV dei telescopi Cherenkov, che costituiscono circa 1/3 di tutte le sorgenti TeV conosciute.

Ciò indica chiaramente che l'accelerazione delle particelle deve aver luogo in queste sorgenti. I dettagli della variabilità spettrale e temporale dipendono dalla composizione del getto. Come energia diversa

le bande in questi sistemi variabili testano diverse componenti di emissione e scale di getto, le osservazioni simultanee sull'intero spettro elettromagnetico (dalle onde radio ai raggi gamma) sono di fondamentale importanza e dovrebbero essere spinte verso il raggiungimento di una maggiore sensibilità e risoluzione spaziale in tutto lo spettro.

Le Radio Galassie (RG) con il getto puntato lontano dall'osservatore sono considerate la popolazione madre dei blazar. Sono molto più deboli e difficili da rilevare ad alte energie perché la loro emissione non termica non è significativamente potenziata con Doppler. In effetti il numero di RG osservati ad alte energie è piccolo, una ventina nella banda 0,1-100 GeV e solo cinque nella banda TeV.

Tuttavia, le Radio Galassie sono la classe di oggetti extragalattici più adatta per esplorare la connessione tra il getto e il flusso di accrescimento. Poiché i getti negli RG sono meno influenzati dagli effetti relativistici, l'osservatore può avere una visione diretta dei processi di accrescimento. In almeno due radiogalassie è stata osservata un'improvvisa diminuzione del flusso di raggi X, seguita poco dopo dalla comparsa di una caratteristica di emissione radio superluminale e da un bagliore di raggi gamma. Questo sembra mettere in relazione le instabilità nel disco di accrescimento con l'espulsione della materia lungo il getto.

Infine, il disallineamento del getto negli RG favorisce lo studio di regioni estese (lobi), solitamente sopraffatte dall'emissione del getto nei blazar, fino alle energie GeV, migliorando la nostra comprensione dei processi di accelerazione che si verificano anche a distanze kpc dal buco nero.

Sono comuni anche deflussi massicci a velocità non relativistiche o trans-relativistiche. L'espulsione di massa dagli AGN più estremi può essere prominente, vicino al tasso di accrescimento di Eddington.

Le velocità potrebbero raggiungere il 10-30% della velocità della luce. Questi deflussi sono generalmente altamente ionizzati e vengono studiati attraverso linee di raggi UV e raggi X ad alta ionizzazione. Il meccanismo per l'avvio del deflusso è in gran parte una questione aperta e presumibilmente richiederà un intenso sforzo teorico e alcune idee innovative. Dal punto di vista osservativo, mancano ancora le informazioni più rilevanti: la struttura geometrica, cinematica e di ionizzazione del flusso, necessaria per determinare la velocità di espulsione della materia e l'energia cinetica associata, non possono essere sondate in modo sufficientemente dettagliato con gli strumenti attuali. Per sfruttare le capacità diagnostiche del ferro sono necessari strumenti ad alta risoluzione spettrale e ad alta sensibilità

righe di assorbimento nella banda dei raggi X.

I venti e i getti AGN possono propagarsi nell'ISM, nell'ICM e nell'IGM. A causa della loro grande energia totale, i getti relativistici potrebbero svolgere un ruolo cruciale nel bilancio energetico dei mezzi attraverso i quali si propagano.

L'interazione di queste espulsioni su larga scala con il mezzo circostante è di importanza cruciale per i gruppi e gli ammassi di galassie. In queste grandi strutture, approssimativamente virializzate, si osservano chiaramente fenomeni di forti interazioni tra i getti radiogalattici e l'ICM sotto forma di bolle e cavità, nonché sotto forma di accelerazione delle particelle alle energie sovratermiche e relative emissioni.

Il potente raggio di raggi gamma naturale dei blazar può essere utilizzato per misurare i campi di radiazione astrofisici e cosmologici intermedi (la luce di fondo extragalattico, EBL) e persino sondare l'esistenza del minuscolo campo magnetico intergalattico previsto. I blazar sono stati esaminati anche in vista della ricerca di possibili sorgenti di raggi cosmici di altissima energia. In un possibile scenario, il peculiare spettro di raggi gamma duri di alcuni blazar potrebbe segnalare la rielaborazione di fotoni ad altissima energia emessi da UHECR che interagiscono con la radiazione di fondo mentre si propagano dal blazar alla Terra. In questo caso, è prevista la rivelazione di fotoni di energie intorno a 10-20 TeV da sorgenti a $z > 0.1$ o anche 1 TeV per $z > 1$, allargando enormemente l'"orizzonte a raggi gamma" cosmologico. Le stesse reazioni del fotomesone coinvolte nella produzione di fotoni determinano l'emissione di neutrini ad alta energia.

I neutrini potrebbero anche essere prodotti all'interno del getto. Sia FSRQ che BL Lacs sono stati considerati come fonti per il recente rilevamento di IceCube.

L'uso dei fasci blazar per scoprire le impronte spettrali dell'interazione di fotoni ad alta energia con particelle simili ad assioni (particelle molto leggere previste in diverse estensioni del Modello Standard) è un'eccitante possibilità discussa attivamente nella comunità. Effetti simili sono attesi dall'ipotetica rottura dell'invarianza di Lorentz ad alta energia, che consentirebbe ai fotoni di alta energia di acquisire una "massa effettiva", portando alla soppressione dello scattering fotone-fotone e quindi alla libera propagazione da grandi distanze cosmologiche.

L'imminente nuova generazione di array di telescopi Cherenkov per immagini atmosferiche, come CTA, non solo avrà la capacità di espandere la sensibilità, il redshift e l'energia fotonica dell'indagine su tutto il cielo di Fermi, ma eseguirà anche per la prima volta un rilevamento imparziale del cielo su 3 decenni di energia superiore a quella svolta da Fermi, alla ricerca di nuove fonti e fenomeni inaspettati.

6.6 Esplosioni radio veloci

I Fast Radio Burst (FRB) sono enigmatici lampi di emissione radio di breve durata (millisecondi). La dispersione del loro segnale punta verso un'origine extragalattica e implica radioluminosità ordini di grandezza maggiori di quelle di tutti gli altri brevi transitori radio noti.

Solo molto recentemente uno di questi segnali, FRB 121102, l'unico FRB per il quale sono stati rilevati più impulsi, è stato localizzato saldamente in una galassia nana con spostamento verso il rosso $z=0,2$. Un altro, FRB 150418, è stato provvisoriamente associato a una galassia ellittica a $z = 0,5$, che ospita un debole AGN.

Gli FRB sembrano quindi non solo extragalattici, ma cosmologici e, come tali, hanno il potenziale per essere utilizzati come sonde del lontano Universo. Ciò che alimenta le emissioni radio degli FRB rimane, tuttavia, ancora indeterminato. Non è inoltre chiaro se l'FRB 121102 ripetuto sia lo stesso tipo di segnale degli altri, per i quali, nonostante le ampie osservazioni di follow-up, è stato rilevato un solo impulso. Gli FRB potrebbero benissimo essere la manifestazione di diversi fenomeni, come nel caso dei GRB.

6.7 Gamma Ray Burst e supernove luminose

I Gamma Ray Burst (GRB) sono brevi (0,1-100 s) lampi di raggi gamma prodotti durante il collasso di una stella molto massiccia o durante la fusione di due oggetti collassati. La loro origine cosmologica potrebbe essere dedotta solo dopo le osservazioni con BeppoSAX nel 1997, circa 30 anni dopo la scoperta dei GRB. Se isotropica, l'energia emessa nella fase dei raggi gamma pronta corrisponde a una luminosità di $\sim 10e54$ erg/s, rendendo i GRB le più grandi esplosioni cosmiche dopo il Big Bang.

I GRB sono gli oggetti macroscopici relativistici speciali più estremi nell'universo, che producono gusci di materiale in espansione che si muovono con fattori di Lorentz di massa dell'ordine 100-1000. La relativa complessa fenomenologia può essere spiegata in termini di creazione di una palla di fuoco, a causa dell'enorme apporto energetico iniziale e di una trasformazione dell'energia interna di questa palla di fuoco in energia cinetica del plasma in espansione. Parte di questa energia cinetica viene successivamente convertita in particelle accelerate, attraverso meccanismi oggetto di indagine attiva, e quindi in radiazione, il cosiddetto GRB.

Lo scenario sopra descritto si dirama in molti dei problemi più caldi dell'astrofisica del 21° secolo:

- Comprendere il GRB stesso implica comprendere: la formazione di una palla di fuoco calda, la relatività speciale e generale, i processi di accelerazione delle particelle, gli shock relativistici senza collisioni, la formazione di getti e la collimazione, l'accelerazione delle particelle, i processi di accrescimento, i meccanismi di radiazione.

- I GRB emergono da regioni di formazione stellare attiva nelle galassie. Il GRB associato a stelle massicce può essere utilizzato per studiare il tasso di formazione stellare e la funzione di massa stellare iniziale in funzione del redshift. Inoltre, possono essere usati come "fari" per studiare l'ISM delle loro galassie ospiti (abbondanza di metalli, dinamica, ionizzazione di gas, contenuto di polvere).
- L'epoca della reionizzazione. Poiché i GRB sono così luminosi, sono uno strumento adatto per sondare la cosiddetta Dark Age of the Universe.
- Il destino dei barioni. I GRB possono essere usati come fari per illuminare la cosiddetta "foresta di ossigeno", permettendoci così di mappare la rete della struttura filamentosa indotta dalla materia oscura dell'Universo ed eventualmente trovare il segnale a raggi X corrispondente alla presenza di un mezzo caldo di materia ordinaria, che si ritiene nasconda i cosiddetti barioni scomparsi.
- Fisica fondamentale. I GRB possono essere usati per vincolare effetti esotici di violazione di simmetrie fondamentali come l'invarianza di Lorentz, possibile conseguenza di alcune teorie della gravità quantistica.

Swift ha rilevato 15 GRB a $z > 5$, ovvero l'1% di tutti i GRB Swift, con il più lontano a $z = 9,2$. Questi possono essere utilizzati per tracciare la formazione stellare, la reionizzazione e l'arricchimento dei metalli nelle galassie ad alto spostamento verso il rosso. Inoltre, Swift ha aumentato notevolmente il campione di GRB di lunga durata che vengono utilizzati per studiare le correlazioni tra osservabili, il che apre la possibilità di trasformare i GRB in candele standard utilizzabili per la cosmologia di precisione.

L'energia coinvolta nelle esplosioni di GRB è enorme e viene rilasciata in una piccola regione. Pertanto, si raggiunge un equilibrio quasi termico (a temperature relativistiche) tra materia e radiazione, con la formazione di coppie elettrone-positrone accelerate a velocità relativistiche dall'elevata pressione interna. Questa è una palla di fuoco. La presenza anche di una piccola quantità di barioni rende la palla di fuoco opaca allo scattering di Thomson, così che l'energia interna del plasma si trasforma gradualmente in energia cinetica della palla di fuoco, che quindi accelera fino a raggiungere una fase di coasting. Ad un certo punto la palla di fuoco alla fine diventa trasparente. Se il motore centrale funziona in modo intermittente, la palla di fuoco in espansione può contenere disomogeneità indotte dai proiettili che si muovono con fattori di Lorentz leggermente diversi. L'interazione occasionale tra gusci più veloci e più lenti è responsabile della formazione di shock interni e si prevede che dia origine alla variabilità temporale osservata dell'emissione di GRB. L'intera palla di fuoco interagisce anche con il mezzo interstellare circostante nella galassia ospite, spazzando così il materiale e formando lo shock esterno. Si ritiene che l'accelerazione delle particelle a questi shock e i seguenti processi radiativi correlati siano responsabili del GRB e della sua emissione di bagliore residuo. Nonostante il quadro generale sia piuttosto ben definito, numerosi sono gli aspetti dei processi di accelerazione e radiazione che sono considerati temi caldi per la ricerca teorica nel campo.

Una delle più grandi incognite nella scienza GRB è la natura del progenitore, anche se fortunatamente le linee guida generali illustrate sopra possono essere discusse senza presupposti specifici sulla natura del progenitore.

I lunghi GRB seguono il probabile collasso altamente anisotropo del nucleo spogliato di una stella più massiccia di $\sim 20 M_{\text{sun}}$ e possono derivare da un getto/deflusso relativistico lanciato da un buco nero in rapido accrescimento (collassare) o formato tramite il meccanismo della "torre magnetica" da un proto-NS (magnetar) a rotazione rapida altamente magnetizzato. In entrambi i casi, il bilancio energetico è dominato dall'energia cinetica della supernova del collasso del nucleo ($1-5 \times 10^{52}$ erg), che è un ordine di grandezza maggiore dell'energia totale corretta per la collimazione del GRB (10^{51} erg).

I brevi GRB vengono prodotti dopo che due oggetti stellari compatti si fondono in un unico BH circondato da un toro in accrescimento. In tutti gli scenari progenitori, il motore centrale è una compatta che gira veloce

stella circondata da un toro molto denso. L'energia dovrebbe quindi essere resa disponibile sotto forma di neutrini, accrescimento del materiale nel toro sull'oggetto compatto, rotazione sia del toro che della stella compatta e processi magneto-idrodinamici. Le osservazioni delle curve di luce del GRB, degli spettri e degli ambienti vicini confermano l'associazione del fenomeno con le stelle massicce. In particolare, quasi tutti i GRB a basso spostamento verso il rosso hanno una supernova a busta spogliata rilevata in modo inequivocabile, la cui epoca di esplosione è compatibile con l'essere simultanea con l'ora di inizio del GRB. Tuttavia, la connessione tra l'esplosione della supernova o la fusione di stelle compatte e la formazione del motore centrale e lo sviluppo della palla di fuoco GBR rimane oggetto di indagine.

Le stime della quantità di materiale vicino al sito GRB e della sua composizione (metalli) farebbero luce sulla storia del materiale pre-eiettato e quindi sull'evoluzione della stella massiccia progenitrice. Le caratteristiche di assorbimento di breve durata e le densità variabili delle colonne indicherebbero la presenza di un assorbitore vicino interessato dall'emissione rapida dell'esplosione e dal bagliore residuo precoce.

Le caratteristiche di emissione forniscono informazioni sulla cinematica dell'espulsione, sull'abbondanza e sulla posizione del mezzo di ritrattamento. Per estrarre le informazioni rilevanti da queste caratteristiche sono necessari spettri ad alta risoluzione e bassa energia degli afterglow dei raggi X.

Un'informazione cruciale è il budget energetico totale di un GRB. Tenendo conto dell'angolo di collimazione del getto, sembra che il contenuto energetico dei diversi burst sia universale, $\sim 10^{51}$ erg, in modo che l'efficienza nel convertire l'energia totale in radiazione ad alta energia, così come il caricamento del barione della palla di fuoco, dovrebbe essere anche universale. Nello scenario del collasso, in cui la palla di fuoco deve propagarsi attraverso l'interno stellare, è improbabile che ciò accada. D'altra parte, se la palla di fuoco è dominata magneticamente, piuttosto che dominata dalla materia, potrebbe sorgere un alto grado di polarizzazione della radiazione GRB e le misurazioni della polarizzazione in tempi iniziali potrebbero essere di importanza cruciale.

Nello scenario di shock interno i proiettili in collisione sono entrambi relativistici e, dopo la collisione, il proiettile fuso è ancora relativistico. L'energia liberata è una piccola frazione di quella iniziale.

L'efficienza di trasformazione dell'energia cinetica di massa in radiazione è quindi piccola. D'altra parte, shock esterni efficienti dovrebbero produrre il bagliore residuo. Pertanto, il bagliore residuo dovrebbe essere più energico dell'emissione immediata, contrariamente a quanto si osserva attualmente. Questo paradosso non è stato ancora risolto.

La radiazione di sincrotrone sembra essere il meccanismo più probabile che alimenta il bagliore residuo alle frequenze radio, ottiche e dei raggi X. Tuttavia, la durezza dello spettro sembra non essere d'accordo con la prevista pendenza di limitazione del sincrotrone. Per i GRB con spostamenti verso il rosso da bassi a moderati, un'estensione degli spettri di afterglow misurato fino a 50-100 keV (dove dovrebbe dominare la componente Compton) sarebbe fondamentale per testare i meccanismi di emissione. Le osservazioni del primo bagliore residuo, che dovrebbe essere luminoso alle alte energie, sono state effettuate con Swift, che ha rilevato bagliori precoci luminosi ($t < 10^4$ s), presumibilmente dovuti all'attività prolungata del motore, e da Fermi-LAT nel MeV- Banda GeV in cui viene rilevato solo il 5% circa dei GRB. La radiazione MeV-GeV mostra un decadimento monotono, in linea con il comportamento a più lunghezze d'onda, e la sua natura è compatibile con il sincrotrone in uno shock esterno. L'attuale frontiera osservativa è rappresentata dall'emissione di afterglow di TeV, mai rilevata finora e forse alla portata dell'esperimento CTA, almeno per GRB a $z < 1$.

Swift ha studiato una varietà di GRB con spettro più morbido, i cosiddetti flash a raggi X, scoperti per la prima volta da BeppoSAX, che ha rilevato numerosi membri di questa classe. In due casi con uno spostamento verso il rosso particolarmente basso, nell'ottica sono state rilevate supernove di accompagnamento, di tipo simile a quelle collegate ai classici GRB (cioè stripped-envelope), ma di energia e luminosità inferiori.

Degne di nota, supernove con collasso del nucleo a busta spogliata (cioè povere di idrogeno ed elio) con energie significativamente più grandi dell'erg canonico 10^{51} , sebbene non così energetiche come quelle che accompagnano i GRB, sono ora regolarmente rilevate da indagini ottiche profonde, ad alta cadenza e ad ampio campo. Rappresentano circa il 5% di tutte le supernove a busta spogliata e sono il probabile risultato di un collasso asimmetrico; spesso emettono copiosamente ai raggi X e alle radiofrequenze e sono buoni candidati sia per il rilevamento di TeV con CTA che, se molto vicini, per il rilevamento di neutrini GW e MeV. La loro osservazione fornirà informazioni fondamentali sulla perdita di massa pre-supernova e sulla sua connessione con la massa iniziale del progenitore, sulla fisica del collasso del nucleo e sulla formazione compatta del residuo. Un ulteriore importante risultato delle indagini non mirate in corso è il gran numero di transitori esotici scoperti (che vanno da quelli ultradeboli fino a quelli superluminosi, comprese le supernove superluminose recentemente rilevate), le cui proprietà osservate non sono ancora completamente studiate e interpretazione teorica quasi del tutto assente. La teoria va dalla cattura di elettroni SNe alle fusioni stellari, per i transitori più deboli, fino all'instabilità di coppia, alle collisioni shell-shell, magnetar per SLSNe.

6.8 L'origine dei raggi cosmici

Durante gli esperimenti pionieristici del 19° secolo sui fenomeni elettrostatici, gli scienziati hanno notato lo sconcertante fenomeno della scarica delle foglie d'oro degli elettroscopi in assenza di azione esterna. Ciò indicava che si verificava una sorta di ionizzazione nell'aria all'interno dell'elettroscopio, che alla fine portava alla scarica elettrica del sistema. Nel 1912, V. Hess eseguì i suoi primi pionieristici voli in mongolfiera che mostrarono che questa radiazione ionizzante, inizialmente pensata per provenire dalla superficie terrestre, proveniva in realtà dallo spazio esterno. A questa misteriosa radiazione fu dato il nome di Raggi Cosmici. Proliferarono esperimenti volti a svelare l'origine dei Raggi Cosmici e, mentre il loro potenziale tecnico migliorava, le persone si resero conto che questa radiazione era in realtà composta da particelle cariche (effetto est-ovest), con energie sempre più elevate se misurate con sempre meglio allestimenti sperimentali.

Ci è voluto molto tempo e molti esperimenti prima di raggiungere la nostra più recente comprensione di questo fenomeno: i raggi cosmici sono particelle cariche estremamente energetiche, con un'energia che varia tra 10^6 eV e più di 10^{20} eV. Alle energie più basse la loro origine è correlata e/o influenzata da fenomeni che si verificano nell'ambiente Terra-Sole. A energie di cento miliardi di eV, i raggi cosmici iniziano a essere generati in sorgenti lontane all'interno della nostra Galassia. A queste energie il loro flusso sulla Terra supera ~1 particella per metro quadrato al secondo. A energie maggiori, il loro numero diminuisce rapidamente e alle energie più elevate, $\sim 10^{20}$ eV, il flusso corrisponde a circa una particella per km quadrato per secolo!

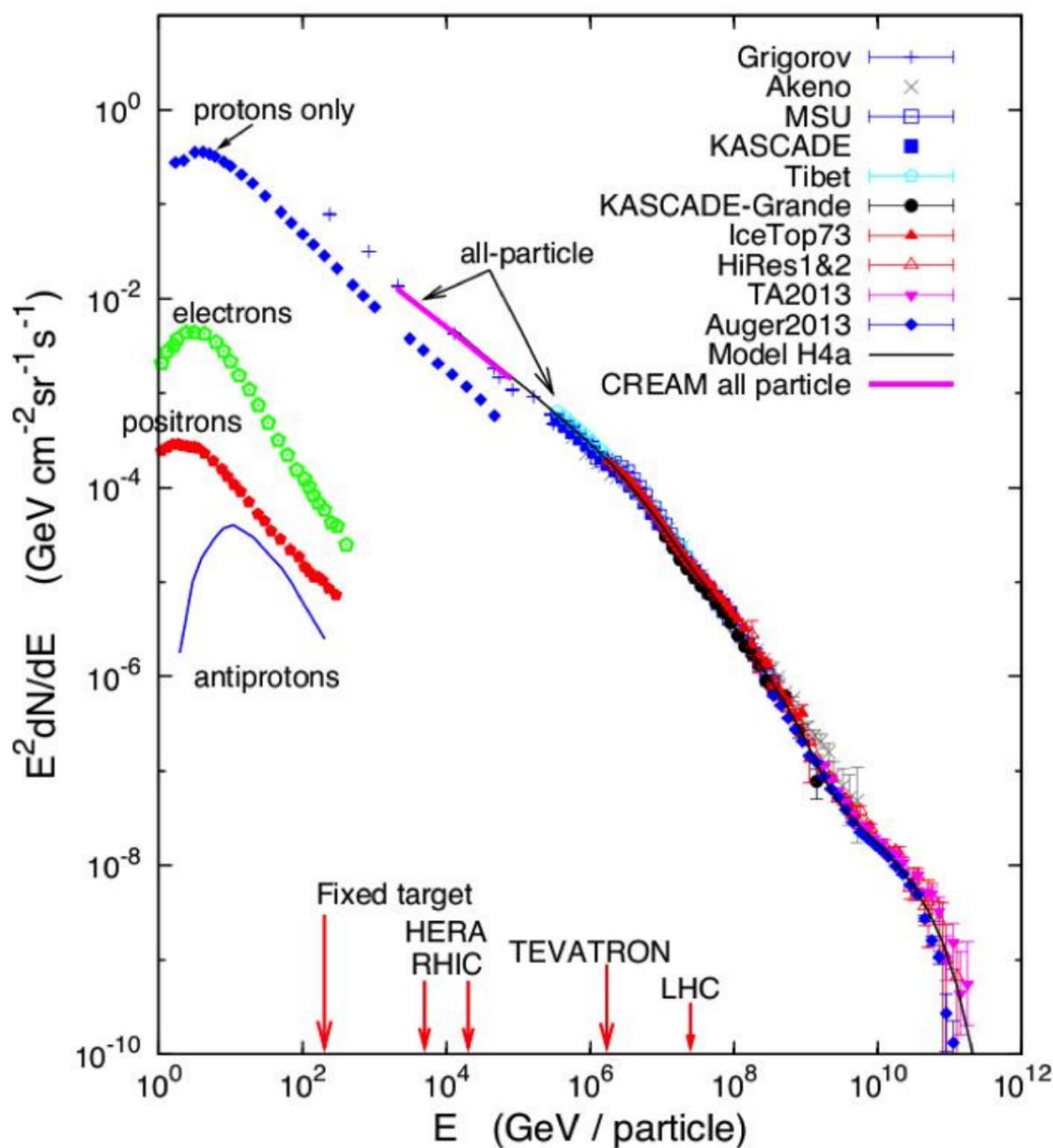


Fig. 6.2 - Spettro energetico dei raggi cosmici (credits Blasi 2013, A&ARev 21,70).

Tale energia è solo di pochi ordini di grandezza inferiore a quella corrispondente alla cosiddetta Grande Unificazione delle Forze, dove gli scienziati si aspettano che tutte le forze fondamentali tranne la gravità si uniscano in un unico tipo di interazione.

L'esistenza dei raggi cosmici ci costringe a immaginare nuovi luoghi dell'Universo, piuttosto violenti, in cui la Natura riesce a trasformare altre forme di energia in particelle subnucleari estremamente energetiche, lungi dall'essere in equilibrio termico con l'ambiente circostante. L'indagine sui processi di accelerazione delle particelle in ambienti astrofisici è stata citata più volte in questo documento, per sottolineare il fatto che è assolutamente centrale per una varietà di fenomeni non termici, dai GRB agli AGN, dagli ammassi di galassie alle supernove.

Per quanto riguarda l'origine dei Raggi Cosmici, l'associazione del grosso dei Raggi Cosmici

con Supernova (SN) Le esplosioni che si verificano nella nostra Galassia sono in circolazione da molto tempo e sono diventate un paradigma. Queste esplosioni cosmiche espellono diverse masse solari di materiale nel mezzo interstellare, arricchendolo di elementi pesanti, come il ferro. Il materiale espulso si espande verso l'esterno dal sito dell'esplosione a velocità supersoniche, formando un'onda d'urto che riscalda il gas e, allo stesso tempo, energizza una piccola frazione di particelle a grandi energie sovratermiche: queste alla fine diventeranno Raggi Cosmici. Il materiale ad alta velocità espulso durante l'esplosione di SN porta allo sviluppo di nebulose simili a conchiglie chiamate Supernova Remnants (SNRs), dove, sopra il materiale termico, sono viste attraverso osservazioni di emissione lineare, radio, raggi X e raggi gamma mostrano la presenza di particelle non termiche, che sono state accelerate fino a energie multi-TeV. Si ritiene che l'onda d'urto generata dall'esplosione SN sia responsabile di tale accelerazione. La determinazione delle condizioni fisiche nel suo ambiente è essenziale per comprendere l'accelerazione delle particelle nella Galassia, ed è oggetto di un'indagine molto attiva, perseguita con tutti i mezzi, dalle osservazioni in tutte le bande d'onda alla modellazione teorica, sia analitica che numerica. Inutile dire che queste fonti saranno gli obiettivi primari per il prossimo Cherenkov Telescope Array.

Il processo di accelerazione che si pensa sia all'opera negli SNR e il principale responsabile dell'accelerazione CR è chiamato accelerazione diffusiva d'urto e consiste in ripetuti incroci della superficie d'urto SNR. Ad ogni incrocio la particella guadagna una piccola quantità di energia e allo stesso tempo ha una probabilità finita di sfuggire al sistema a valle dell'urto. Mentre la formulazione di base di questo meccanismo di accelerazione dell'urto è in vigore dagli anni '70, nell'ultimo decennio sono stati compiuti importanti progressi dall'indagine sulla reazione dinamica che le particelle accelerate esercitano sul loro acceleratore: questa reazione si riflette in un cambiamento della dinamica dell'urto e termodinamica e nell'amplificazione del campo magnetico ambientale. Questi fenomeni influenzano a loro volta le proprietà del sistema come acceleratore, con implicazioni cruciali per gli spettri delle particelle e la massima energia che può essere raggiunta. L'intero quadro teorico, noto come "teoria non lineare dell'accelerazione delle particelle ai fronti d'urto", ha fornito un potente strumento per interpretare la ricchezza di informazioni che le osservazioni ad alta energia degli SNR hanno prodotto e ci ha permesso di trasformarla prontamente in una migliore comprensione. I raggi X di sincrotrone rilevati da Chandra e XMM da SNR giovani e vicini hanno dimostrato che questi oggetti accelerano gli elettroni fino a energie di 1-10 TeV e ospitano campi magnetici fino a poche centinaia di μG . Campi magnetici così elevati a loro volta vengono interpretati come prodotti dalle instabilità indotte dalle particelle accelerate. La stima dell'efficienza dell'accelerazione che segue è di circa il 10-20%, esattamente ciò che è necessario affinché gli SNR siano i principali contributori al flusso di raggi cosmici misurato sulla Terra. Allo stesso tempo campi magnetici così intensi, essendo autogenerati dalle particelle, sarebbero aggrovigliati esattamente sulle scale appropriate per garantire un'efficiente dispersione delle particelle, e di conseguenza accelererebbe il processo di accelerazione in modo da poter raggiungere un'energia molto elevata, fino a pochi PeV per i protoni e circa 30 volte superiore per i nuclei di ferro.

Naturalmente, le particelle che si vedono emettere negli SNR nella maggior parte delle bande d'onda sono elettroni, piuttosto che protoni o nuclei, e la loro energia massima è limitata dalle perdite di radiazione, che la costringono a essere sempre molto inferiore a 1 PeV. La migliore diagnostica diretta per i protoni, che sono i principali costituenti dei CR rilevati sulla Terra, viene invece dai raggi gamma e dai neutrini, gli output primari dell'interazione degli adroni energetici con il mezzo interstellare. La prova a lungo ricercata dei raggi gamma degli SNR è finalmente arrivata grazie ai telescopi spaziali per raggi gamma AGILE e Fermi e agli array Cherenkov a terra, HESS, MAGIC e VERITAS. Anche dopo che i raggi gamma sono stati visti, tuttavia, il problema di valutare se lo sono

di origine adronica o meglio il risultato dello scattering Inverse Compton dei leptoni emettitori di sincrotrone non è affatto banale. Nel caso dei raggi gamma da SNR, invece, il funzionamento contemporaneo di tutti gli strumenti sopra citati e l'esistenza di un quadro teorico ben consolidato è stato determinante per un rapido progresso scientifico, che ha consentito di discriminare l'origine dell'emissione nei casi diversi. Abbiamo scoperto che quello che sembrava il miglior candidato per le emissioni adroniche al momento della versione precedente di questo documento, RXJ1713-

3946, è molto probabilmente dominato dai leptoni nei raggi gamma; allo stesso tempo, abbiamo prove indirette ma forti che in Tycho i protoni vengono accelerati almeno fino a 500 TeV; infine, siamo pienamente fiduciosi che l'emissione di raggi gamma dagli SNR W44 e IC443 sia di origine adronica. Le ultime due sorgenti sono SNR di mezza età che interagiscono con le nubi molecolari, che forniscono l'obiettivo ideale per i protoni relativistici per produrre raggi gamma attraverso il decadimento neutro dei pioni. La questione principale diventa quindi se si sta osservando l'emissione di adroni appena accelerati o piuttosto di raggi cosmici provenienti dalla piscina galattica che vengono catturati dai lenti shock radiativi di questi resti e li compressi e riaccelerati. La risposta a questa domanda, che è in un modo ancora più sottile di quella riguardante l'origine leptonica o adronica dell'emissione di raggi gamma, è arrivata, almeno nel caso di W44, da una combinazione di banda larga e multi-messaggero osservazioni e teoria: mentre la maggior parte dell'emissione di raggi gamma rilevata da questo residuo da AGILE e Fermi può essere spiegata come dovuta a particelle riaccelerate, è probabile che sia necessaria una frazione di protoni appena accelerati.

Inutile dire che l'avvento del CTA, insieme ai telescopi per neutrini imminenti ed esistenti come IceCube, ANTARES e Km3Net, promette di aumentare notevolmente la nostra capacità di rilevare l'emissione di CR adronici direttamente dai loro acceleratori. Allo stesso tempo, i recenti risultati teorici ci hanno finalmente fornito una descrizione fisicamente corretta degli shock modificati dai raggi cosmici che si propagano in un mezzo parzialmente ionizzato, aprendo nuove possibilità di studiare l'accelerazione dei CR attraverso studi ottici: 1) L'ampiezza dell'ampio e le componenti strette della linea di Balmer contengono informazioni sulla densità di energia sotto forma di CR allo shock di una supernova; 2) Lo spettro dei CR accelerati allo shock è sensibilmente influenzato dalla presenza di idrogeno neutro vicino allo shock. Il confronto tra la teoria e le osservazioni delle onde d'urto SNR, effettuate con una risoluzione spaziale e spettrale sufficientemente elevata, può fornire una stima diretta dell'efficienza dell'accelerazione dell'urto. Tali osservazioni possono essere attualmente effettuate ad esempio con lo spettrometro GHaFaS, montato sul William Herschel Telescope alla Palma, o con il MUSE su VLT, e in futuro beneficeranno del GMT (Giant Magellan Telescope) e dell'ELT (Extremely Large Telescope) .

Nel loro cammino dalle sorgenti alla Terra, i CR interagiscono con il gas e il campo magnetico nel mezzo interstellare, fornendo un bagliore di emissioni radio diffuse, radiazioni di raggi X e raggi gamma che osserviamo dalla Terra. L'osservazione di queste radiazioni ci consente di ottenere una migliore comprensione dei processi coinvolti nell'accelerazione dei CR e nel vagare casuale che porta i CR dalle loro sorgenti alla Terra attraverso la diffusione nel campo magnetico.

Durante il loro viaggio, i CR ionizzano anche parte del mezzo che attraversano, consentendo così la regolazione della velocità di formazione delle stelle nella Galassia. La ionizzazione dei mezzi neutri influisce sull'interazione di gas e campi magnetici, in particolare nelle dense nubi molecolari, dove si formano la maggior parte delle stelle. Il collasso gravitazionale che porta alla formazione delle stelle avviene con una velocità che è regolata dalla forza e dalla struttura dei campi magnetici e dal gas stesso che finirà nella stella. I CR sono il termostato di tutti questi fenomeni complessi. In un certo senso, contribuiscono a formare quelle stelle che a loro volta restituiranno la loro energia ai CR dopo la loro morte. La morte di queste stelle restituisce allo spazio anche quegli elementi pesanti e in particolare quelli ferrosi

e nuclei di carbonio che sono così fondamentali per lo sviluppo della vita.

Le interazioni di questi proiettili ad alta energia che colpiscono il mezzo interstellare inducono la spallazione di nuclei pesanti. Questo importantissimo processo inquina la Galassia con elementi leggeri come boro e litio che sono molto poveri nella zuppa primordiale emersa dal Big Bang e che si possono trovare nella Galassia principalmente a causa della presenza di CR e delle loro interazioni con la galassia. Le misurazioni delle abbondanze di questi elementi, di seguito indicati come "secondari", nonché dei positroni che sono sottoprodotti delle stesse interazioni, sono preziose per comprendere i processi responsabili della diffusione nella Galassia.

Progressi straordinari in questo senso sono arrivati nell'ultimo decennio da esperimenti di rilevamento diretto di CR. La sonda Voyager ci ha finalmente fornito lo spettro dei CR al di fuori dello shock di terminazione solare, dove le particelle non sono influenzate dal vento solare e il loro spettro è si spera rappresentativo della media galattica. Allo stesso tempo, PAMELA e AMS-02 hanno evidenziato anomalie inaspettate nello spettro CR al di sotto del 'ginocchio' che apparivano finora senza caratteristiche: ci sono rotture negli spettri delle specie più abbondanti, protoni e nuclei He, che probabilmente ci sta dicendo che gli effetti non lineari non sono importanti solo per l'accelerazione CR, ma anche per descrivere correttamente la loro propagazione. Una possibilità affascinante è che fino a poche centinaia di GeV il trasporto di CR attraverso la Galassia è principalmente determinato dalla turbolenza che si autoinducono.

A energie maggiori, dove i CR sono troppo pochi per eccitare in modo efficiente le onde e semplicemente propagarsi nel campo su larga scala che pervade la Galassia, le misurazioni del rapporto tra il flusso dei secondari e quello dei CR primari (vale a dire i nuclei che sono direttamente accelerati nei sorgenti) ha una dipendenza energetica che è direttamente correlata allo spettro di turbolenza. L'AMS-02 sta estendendo la misurazione di questo rapporto ad alta energia e con una precisione sufficientemente elevata da consentirci di utilizzarlo come la migliore diagnostica disponibile della turbolenza sottostante. In modo simile, l'accurata misurazione AMS-02 del flusso di antiprotoni e il rapporto tra il loro flusso e quello di protoni è oggetto di studi approfonditi per rivelare possibili discrepanze all'interno della vista standard della propagazione CR nella Galassia.

Infine, esperimenti di rivelazione diretta (PAMELA, AMS-02, Fermi-LAT) hanno scoperto la cosiddetta "rise in the positron fraction", che ha suscitato un enorme interesse nella comunità: il rapporto tra positroni CR ed elettroni aumenta con l'energia al di sopra di pochi decine di GeV.

Un tale comportamento potrebbe essere dovuto ad alcune sottigliezze nella propagazione CR che ancora ci mancano o al contributo di qualche fonte di positroni nella Galassia che è stata finora trascurata.

Il suggerimento iniziale di un'origine correlata alla materia oscura dei positroni in eccesso ha progressivamente ceduto all'idea che i positroni "in eccesso" provengano da sorgenti astrofisiche più standard, le pulsar, che sono ben note fabbriche di antimateria leptonica. Le pulsar sono stelle di neutroni a rotazione rapida altamente magnetizzate che rilasciano la maggior parte della loro energia rotazionale sotto forma di un vento relativistico magnetizzato costituito principalmente da coppie elettrone-positrone, grazie alla produzione di coppie molto efficace nella magnetosfera stellare. L'interazione tra un tale vento e il mezzo circostante, sia il genitore SNR che l'ISM, produce una nebulosa non termica, chiamata Pulsar Wind Nebula (PWN).

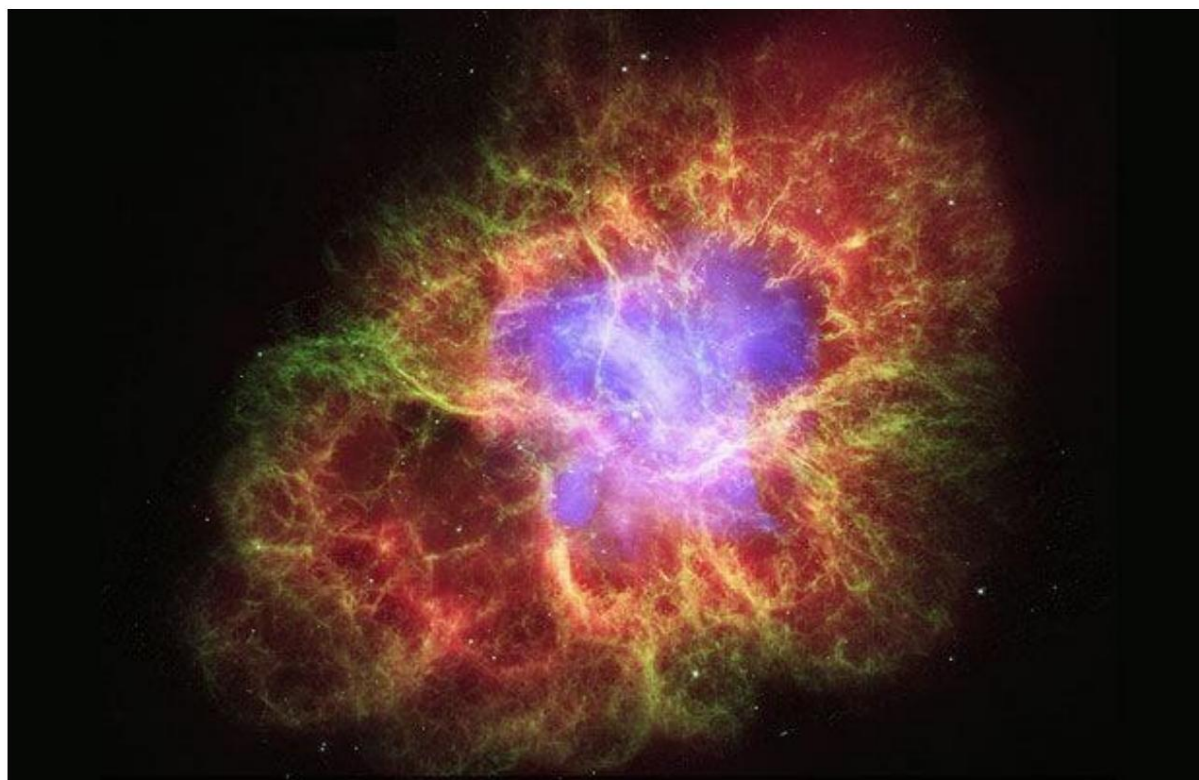


Figura 6.3 - Immagine composta della Nebulosa del Granchio. Raggi X di Chandra in azzurro, ottici dell'HST in verde e blu scuro, infrarossi del telescopio spaziale Spitzer in rosso.

Crediti: raggi X: NASA/CXC/ASU/J.Hester et al.; Ottico: NASA/ESA/ASU/J.Hester e A.Loll; Infrarossi: NASA/JPL-Caltech/Univ. Minn./R.Gehrz.

I PWNe sono fonti di interesse centrale per gli studi di Astrofisica delle Alte Energie: ospitano i deflussi più relativistici in Natura, con fattori di Lorentz stimati nell'intervallo 10^4 - 10^8 e sono gli acceleratori di particelle più efficienti conosciuti: il prototipo di classe, il Granchio Nebula, mostra un'efficienza di accelerazione che si avvicina al 30% ed è l'unica fonte da cui abbiamo prove dirette di particelle PeV, attraverso i leptoni, piuttosto che gli adroni. Come si ottenga un'accelerazione così efficiente è un mistero profondo e una domanda che sta attirando sempre più attenzione dal momento in cui l'eccesso di positroni è stato rilevato con sicurezza e PWNe è entrato nel regno delle sorgenti CR. Comprendere i processi di accelerazione delle particelle e di fuga da queste sorgenti è un compito impegnativo, che richiede l'accoppiamento della dinamica CR all'evoluzione del sistema PWN SNR nell'ambito del MHD relativistico. Tale sforzo è tuttavia fortemente incoraggiato anche dal fatto che la valutazione del contributo delle pulsar in termini di positroni CR è essenziale per valutare adeguatamente il possibile contributo dei processi correlati alla Materia Oscura.

A energie di circa 3×10^{15} eV lo spettro osservato dei CR mostra una caratteristica, nota come il ginocchio. Il mistero di questa caratteristica perseguita gli scienziati da decenni, ma esperimenti come KASCADE (e precedenti osservazioni effettuate con EAS-TOP) hanno dimostrato che la composizione della massa sembra cambiare attraverso il ginocchio, diventando più pesante a energie più elevate. Questo quadro è coerente con gli elementi più leggeri che vengono accelerati a energie inferiori rispetto agli elementi più pesanti, ovvero tutti gli elementi sarebbero accelerati alla stessa rigidità massima (rapporto tra la quantità di moto p e la carica q , $R=p/q$). D'altra parte, recentemente, altri esperimenti, come ARGO-YBJ e Tibet Array, hanno dimostrato che il ginocchio nella componente leggera (protoni e

nuclei di elio) è piuttosto a ~700 TeV, abbastanza al di sotto del ginocchio di tutte le particelle, sollevando così un problema su cosa sta succedendo esattamente.

Questa incertezza influisce anche sulla nostra comprensione della cosiddetta regione di transizione tra i CR galattici e i CR extragalattici, indicati anche come raggi cosmici di energia ultra alta (UHECR). Nello scenario standard, coerente con i dati KASCADE e ulteriormente rafforzato dai dati KASCADE-Grande, i CR galattici terminano a energie intorno a poche volte 10¹⁷ eV con una composizione prevalentemente pesante, cedendo a UHECR che entrano in gioco a energie intorno a 10¹⁸ eV, dove la composizione della massa ricomincia a diventare leggera, un risultato confermato dai due più grandi rivelatori CR operanti a energie così elevate, il Telescope Array (TA) e l'Osservatorio Pierre Auger. Quest'ultimo ha finora raccolto le statistiche più alte degli eventi UHECR.

La propagazione degli UHECR su distanze cosmologiche apre nuove domande di interesse senza precedenti: per protoni con energia sufficientemente elevata, lo scattering con i fotoni nel fondo cosmico a microonde dà luogo alla produzione di fotopioni (i pioni compaiono nello stato finale). Nel 1966 due scienziati russi, Zatsepin e Kuzmin e uno scienziato americano, Greisen, predissero indipendentemente che questa interazione fisica delle particelle avrebbe causato la comparsa di una caratteristica nello spettro dei raggi cosmici (la caratteristica GZK), una soppressione del flusso, che sarebbe poi diventata la Santo Graal della fisica CR. Per i nuclei, il processo di interazione rilevante è la fotodisintegrazione: un nucleo di massa A, in collisione con i fotoni nella luce di fondo (costituita dalla radiazione fossile del Big Bang, dalla CMB e dalla luce prodotta dalle stelle e rielaborata dalla polvere) si trasforma in un elemento più leggero. Per un nucleo di ferro il processo di fotodisintegrazione si traduce in una caratteristica spettrale simile, ma non identica, al GZK.

Le misurazioni Auger dello spettro e della composizione di massa degli UHECR hanno completamente cambiato il nostro modo di guardare a questo campo: questi dati hanno mostrato che esiste una caratteristica simile al GZK, ma allo stesso tempo la composizione di massa è mista a energie >10¹⁸ eV. Mentre la composizione della massa è principalmente leggera a 10¹⁸ eV, diventa sempre più pesante a energie più elevate. L'indagine teorica di questa sorprendente situazione ha portato a un'ulteriore sorpresa in quanto è stato dimostrato che gli spettri di iniezione (alle sorgenti) necessari per riprodurre i dati sono estremamente duri, del tutto a differenza di quelli tipicamente osservati nelle sorgenti astrofisiche, con la possibile eccezione di pulsar a rotazione rapida e forse una manciata di altre possibilità. Il futuro dell'indagine in questo campo è destinato a essere riempito con misurazioni migliori e possibilmente complementari della composizione della massa e con spiegazioni convincenti della ricchezza di osservazioni che saranno disponibili.

Inoltre, i risultati della ricerca CR indicano l'importanza dei campi magnetici su diverse scale Mpc negli ammassi di galassie e nei filamenti cosmici. La loro evoluzione è un problema aperto e oggetto di indagine multi-lunghezza d'onda (EVLA, ALMA, precursori SKA, Planck, Fermi, LBT ed eROSITA).

Domanda chiave	Metodo	Progetto
Fisica dell'accrescimento e dell'espulsione su/da oggetti compatti	Modalità di accrescimento efficienti/ inefficienti. Venti e getti. Simulazioni numeriche.	Telescopi Chandra, XMM, Swift, Nustar, radio e mm. SKA, Atena, CTA, Ligo Vergine
Rivela e studia gli effetti di GR nel limite di campo forte	Temporizzazione dei raggi X e spettroscopia	Chandra, XMM, Swift, Nustar Atena
Misurare le proprietà dei BH (massa, spin) e capire come viene estratta l'energia da essi	Linee larghe di ferro. Feedback: Interazione tra galassia e BH	Chandra, XMM, Swift, Nustar Atena
Studia i processi di accelerazione delle particelle a tutte le diverse scale	Strutture a getto su scale sub-parsec-pc. Punti caldi e lobi radio. Reliquie radiofoniche a grappolo. Resti di supernovae. Pulsar, Gamma-ray burst	Telescopi Chandra, XMM, HST, radio e mm. SKA, Athena, CTA, IXPE
Ricerca di controparti elettromagnetiche delle onde gravitazionali e del neutrino fonti	Controparti elettromagnetiche delle onde gravitazionali. Lampi di raggi gamma. Le galassie Blazars-Radio come possibili fonti di neutrini.	Ligo-Virgo e tutti i telescopi/ satelliti disponibili CTA
Usa gli oggetti compatti e le osservazioni ad alta energia per vincolare le leggi fondamentali della natura (ad es. Violazione dell'invarianza di Lorentz, particelle simili ad assioni, materia oscura)	Spettri Blazar alle energie TeV WIMP....	CTA Atena

7 La Via Lattea e il Gruppo Locale

Parole chiave: Popolazioni stellari - Ammassi stellari - Il mezzo interstellare - Formazione e Evoluzione chimica della Via Lattea - Storia della formazione stellare ed evoluzione chimica delle galassie locali - Nucleosintesi degli elementi pesanti - La scala delle distanze extragalattiche

Lo studio delle sottostrutture galattiche è da un lato un compito fondamentale per esplorare le regioni dell'Universo più vicine a noi e dall'altro un ingrediente chiave per studiare la formazione e l'evoluzione delle galassie. In particolare, l'indagine del MW implica una completa comprensione della formazione e dell'evoluzione chemiodinamica delle popolazioni che lo compongono, inclusi gli ammassi stellari. Mentre il MW rimane il nostro punto di riferimento per lo studio della formazione e dell'evoluzione delle galassie, potrebbero esistere differenze tra i diversi tipi morfologici di galassie e si dovrebbe verificare fino a che punto l'ipotesi del MW come stele di Rosetta sia alla fine valida. Una sfida importante per l'astrofisica del prossimo decennio è la determinazione di distanze stellari estremamente precise e la caratterizzazione di diverse proprietà fisiche di stelle e galassie; questo può essere affrontato studiando sia le popolazioni stellari irrisolte che quelle risolte, in particolare le stelle pulsanti.

La comunità italiana ha un ruolo di primo piano sia nell'osservazione che nell'interpretazione e modellazione. È essenziale mantenere e rafforzare questa leadership nel prossimo decennio, affrontando diverse questioni scientifiche critiche che devono essere completamente risolte.

La questione chiave che dobbiamo affrontare è la formazione e l'evoluzione della Via Lattea (come stele di Rosetta per tutte le galassie).

Ciò richiede lo studio e la comprensione: 1) della formazione delle strutture subgalattiche, nella Via Lattea e nel Volume Locale
 2) l'evoluzione chemiodinamica degli ammassi stellari
 3) la storia della formazione stellare nel MW, nel Gruppo Locale e oltre
 4) le popolazioni stellari risolte e non risolte mediante traccianti ben educati.
 5) la produzione di elementi pesanti tramite il processo s (tracciato da stelle massicce e AGB) e il processo r (tracciato da supernove e/o fusioni di stelle di neutroni).

7.1 La formazione e l'evoluzione delle strutture subgalattiche nella Via Lattea e nel Volume Locale.

Nonostante i recenti progressi, ci sono ancora molte domande generali aperte, come ad esempio: le galassie si formano dalla fusione di blocchi costitutivi primordiali e/o da sistemi in cui la formazione stellare era già in atto? Qual è la natura delle diverse componenti galattiche? Qual è la relazione tra disco e rigonfiamento/barra? La storia della formazione stellare è un processo relativamente regolare o altamente episodico nel tempo e raggruppato nello spazio? Come viene distribuito spazialmente il contenuto di metallo nelle galassie a disco e come si evolve nel tempo? In che modo la combinazione di rendimenti nucleosintetici, storia di formazione stellare, funzione di massa stellare e flussi di gas in entrata/uscita si traduce in complessi modelli di metallicità e abbondanza che variano con l'età e l'orbita all'interno della Galassia e dei suoi satelliti? Qual è la natura e la quantità di Materia Oscura (DM) nei vari componenti galattici?

Questi argomenti possono essere affrontati con diversi approcci, uno dei quali è lo studio dettagliato delle galassie vicine, a partire dalla nostra stessa Galassia, la Via Lattea (MW), che può essere utilizzata come una "pietra di Rosetta". La ricchezza di dati che sono diventati disponibili nel recente passato ha aperto una nuova visione della nostra Galassia aggiungendo maggiore complessità al quadro generale. Ora è chiaro che lo è

è improbabile che una componente del MW possa essere separata da un'altra; la migrazione influisce sulla formazione di dischi sottili/spessi; l'instabilità del disco potrebbe essere responsabile della formazione della barra; barra/rigonfiamento/alone interno sembrano essere collegati. In questo contesto, è importante avere una visione globale della cinematica, della dinamica e dell'evoluzione chimica della Galassia nel suo insieme. Questo è l'obiettivo dell'Archeologia Galattica.

Ricostruire la complessa evoluzione delle popolazioni di galassie implica derivare la distribuzione spaziale 3D e la struttura, nonché le distribuzioni di cinematica, metallicità/abbondanze ed età, cioè $f(V_r, [X/H], t)$, per grandi, possibilmente campioni imparziali di stelle e ammassi appartenenti alle varie strutture subgalattiche. Per le popolazioni galattiche, grazie ai numerosi rilievi astrometrici, fotometrici e spettroscopici effettuati negli ultimi anni, tali distribuzioni sono ora molto meglio definite. I dati asterosismologici (come quelli dei satelliti CoRoT e Kepler) hanno contribuito alla definizione di una delle principali proprietà delle componenti stellari, l'età.

Nei dischi, la disponibilità di abbondanze elementari per grandi campioni di stelle nel campo MW e negli ammassi aperti ha fornito un contributo significativo alla misurazione accurata della metallicità radiale e verticale e dei gradienti di abbondanza. Inoltre, le correlazioni chemio-cinematiche, come la velocità di rotazione rispetto a $[Fe/H]$ o $[y/Fe]$, hanno chiaramente mostrato pendenze opposte per le stelle a disco sottile e le più antiche stelle a disco spesso. Questi risultati, combinati con l'apparente distribuzione bimodale delle stelle del disco galattico nel piano $[y/Fe]$ - $[Fe/H]$, sembrano suggerire che la definizione delle stelle del disco spesso e sottile dovrebbe basarsi maggiormente sulle abbondanze chimiche in luogo della precedente divisione in base alle proprietà spaziali e cinematiche.

Sebbene le osservazioni dell'andamento della metallicità e dell'abbondanza di diverse popolazioni stellari siano ben coerenti con uno scenario di formazione inside-out, i processi effettivi che hanno determinato la storia della formazione stellare e l'evoluzione chemio-dinamica del disco galattico sono ancora oggetto di dibattito. Ad esempio, non è ancora chiaro il ruolo degli effetti secolari, come la migrazione radiale dovuta a componenti non assialsimmetriche (es. bracci a spirale e barra centrale) rispetto alle perturbazioni esterne innescate dagli eventi di fusione dei satelliti. Questo è il motivo per cui, dopo più di trent'anni dalla scoperta del disco "spesso" galattico, non possiamo ancora dire se questo componente sia derivato da un processo di accrescimento dall'alto verso il basso o da un meccanismo di riscaldamento dal basso verso l'alto. Inoltre, molto recentemente è stato dimostrato che i giovani ammassi situati nelle parti interne del disco sono significativamente più poveri di metalli rispetto alle controparti più vecchie, il che implica una complessa combinazione di formazione stellare, storia di accrescimento e afflussi, flusso di gas radiale, feedback di supernova, ecc. .

Per quanto riguarda l'alone galattico, diversi autori hanno mostrato la presenza di un certo numero di sovradensità stellari nelle regioni esterne, supportando così le attuali teorie sulla formazione di strutture gerarchiche in uno scenario cosmologico di materia oscura fredda. L'indagine sui flussi stellari e sugli allineamenti planari nell'alone galattico è un argomento caldo, poiché queste sottostrutture sono attualmente interpretate come le firme della distruzione dei satelliti e della fusione con la Via Lattea. Tuttavia, non è ancora chiaro fino a che punto l'alone sia stato formato per accrescimento o in situ e fino ad ora il numero di flussi rilevati è in contrasto con le previsioni del modello. Numerosi ricercatori dell'INAF sono coinvolti nella ricostruzione dei gruppi di nascita originali delle stelle nell'alone al fine di ottenere informazioni sulla loro formazione, utilizzando la cinematica e l'etichettatura chimica. È fondamentale districare le componenti accumulate da quelle formate in situ nell'alone, risalire alle stelle originate da ammassi globulari (parzialmente o completamente) interrotti e satelliti accumulati, stimando così il loro contributo alla formazione dell'alone stesso e fornendo vincoli

sulla questione poco conosciuta della formazione di questi sistemi e sull'evidenza impegnativa di popolazioni stellari multiple negli ammassi globulari.

Avanzamenti simili saranno fondamentali nella nostra comprensione della formazione del Bulge, della sua evoluzione chimica e delle sue sottostrutture (se presenti). Ci si aspettava da tempo che si formassero rigonfiamenti durante il collasso monolitico iniziale della Galassia (rigonfiamento classico) o attraverso la fusione di grumi di dischi ad alto spostamento verso il rosso. Questa immagine ha recentemente subito un cambiamento radicale. È ormai opinione diffusa che la nostra Galassia ospiti uno pseudo-rigonfiamento squadrato a forma di arachidi di origine secolare, il che implica che la formazione del rigonfiamento sia avvenuta più tardi e molto probabilmente dal materiale del disco. Tuttavia, sono stati avanzati suggerimenti sul fatto che la Galassia interna sia davvero una struttura molto complessa, che potrebbe includere diverse componenti stellari con proprietà diverse, forse anche uno pseudo-rigonfiamento a forma di arachidi squadrata e un rigonfiamento classico. Tutti questi componenti hanno proprietà morfologiche, cinematiche e chimiche diverse e potrebbero non essere ovvi da districare, ma sono fondamentali per comprendere i processi dinamici che governano la formazione e l'evoluzione dei MW.

Mentre gli ultimi anni hanno già assistito a progressi significativi, il prossimo decennio porterà a cambiamenti trasformativi in quest'area di ricerca grazie alla missione spaziale Gaia, con un significativo coinvolgimento della comunità INAF, e al numero crescente di rilievi a terra associati. La combinazione di astrometria, fotometria e informazioni precise dalla spettroscopia ad alta risoluzione consentirà una caratterizzazione chimica e cinematica completa di enormi campioni di campi MW e popolazioni di cluster. In particolare, la spettroscopia multi-oggetto è fondamentale per integrare e sfruttare appieno lo squisito set di dati Gaia, possibilmente con un telescopio dedicato alla spettroscopia multiplex di massa, una struttura MOS su ELT in un futuro più lontano. Questo, rispetto ai modelli stellari aggiornati e in sinergia con l'astrosismologia, permetterà di vincolare in modo determinante la loro età. La caratterizzazione e le proprietà 6D precise, oltre ad abbondanze ed età, saranno quindi disponibili per milioni di stelle, fino a deboli magnitudini e per l'intero volume del MW, fornendo vincoli dettagliati sui modelli chemiodinamici di ammassi e popolazioni MW. Per lo sfruttamento di questi dati estremamente accurati, abbiamo anche bisogno di sviluppare una metodologia adeguata e di ridefinire gli attuali modelli galattici newtoniani in un contesto dinamico relativistico pienamente coerente. A causa della qualità senza precedenti dei dati di Gaia, prevediamo di utilizzare la cinematica e la dinamica relativistica e di definire nuovi parametri astrometrici, per testare gli effetti relativistici non lineari dovuti alle nostre sorgenti locali di campo debole; questo può poi essere esteso all'analisi di sistemi e cluster extrasolari. Il primo problema è la comprensione della corretta gravità da implementare nella nuova branca della modellistica astrometrica relativistica/gravitazionale, sviluppando strumenti numerici e analitici innovativi (vedi, ad esempio, la missione Gaia) per applicare correttamente la Relatività Generale all'astronomia sia osservativa che teorica. Questo va ben oltre la missione Gaia stessa e avrà importanti implicazioni anche per i futuri progetti spaziali. Infine, la modellazione della struttura stellare, delle atmosfere stellari e la modellazione chemiodinamica e idrodinamica della formazione e dell'evoluzione dei sistemi stellari trarranno sicuramente vantaggio dalle imminenti risorse computazionali e dalle infrastrutture di supporto attualmente supportate (ASDC, Trieste, Cineca) in Italia. In tutte queste aree scientifiche e tecnologiche, e nelle missioni terrestri e spaziali, il contributo dell'INAF è forte e qualificato.

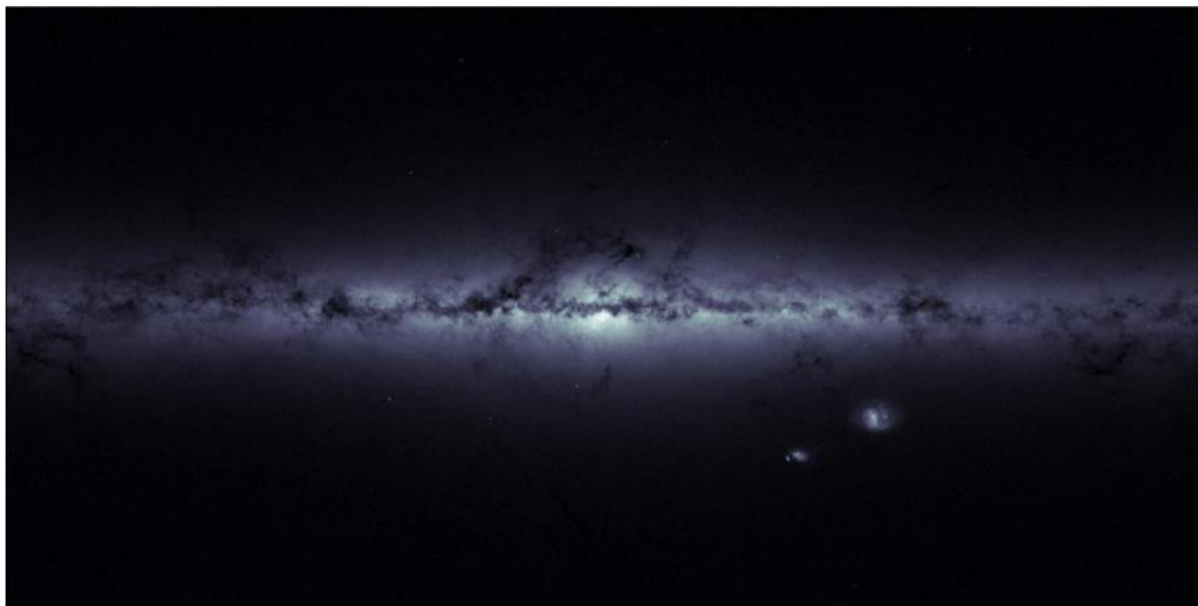


Figura 7.1 - La prima mappa del cielo prodotta da Gaia (Credits: ESA/Gaia-CC BY-SA 3.0 IGO).

7.2 L'evoluzione chemiodinamica degli ammassi stellari nelle galassie.

I processi fisici che portano alla formazione e alla dissoluzione degli ammassi aperti sono elementi cruciali per comprendere la formazione e l'evoluzione del disco, poiché i parametri più critici per modellare la formazione e l'evoluzione della Galassia, ovvero la funzione di massa iniziale e il tasso di formazione stellare, sono regolati da questi processi. La comprensione della formazione degli ammassi globulari e dell'evoluzione chemiodinamica ha un forte impatto sulla nostra comprensione della formazione della struttura e dell'evoluzione precoce, ma anche sulla formazione di stelle e pianeti (vedi Sez.3), poiché le proprietà dei sistemi stellari e planetari dipendono dall'ambiente di formazione stellare (vedi Sez.4).

Cluster aperti

I recenti sviluppi ottenuti grazie alle indagini di cui sopra hanno evidenziato complesse sottostrutture cinematiche nelle regioni giovani e possibili dispersioni di età, che sfidano i modelli di formazione dei cluster. Infatti, nonostante la loro rilevanza nell'astronomia galattica e stellare, sono ancora aperte diverse questioni dell'attuale paradigma che descrive la formazione e la successiva dispersione degli ammassi aperti. Sappiamo che gli ammassi si formano dal collasso gravitazionale e dalla frammentazione delle nubi molecolari. Tuttavia, il ruolo di importanti processi fisici, come la turbolenza, il campo magnetico e il feedback stellare, è tutt'altro che chiaro e molto dibattuto.

Inoltre, non è chiaro se la dissoluzione dell'ammasso sia guidata dal feedback stellare e regolata dall'efficienza della formazione stellare o piuttosto sia dominata dalle interazioni stellari a due corpi.

Ci si aspetta che la squisita astrometria e fotometria di Gaia migliorino sostanzialmente le nostre conoscenze.

Fondamentalmente, verso la fine del prossimo decennio gli ammassi stellari aperti diventeranno anche uno dei principali strumenti per collegare il processo di formazione stellare e l'evoluzione chemiodinamica nella nostra Galassia con quelli in altre galassie del Gruppo Locale (LG). In particolare, i dati fotometrici e astrometrici profondi dell'LSST, insieme alla spettroscopia dell'ELT, consentiranno di eseguire studi dettagliati di giovani ammassi stellari nelle galassie vicine. Grazie alla nuova strumentazione sarà possibile raggiungere non solo le popolazioni della linea di emissione, ma anche effettuare studi dettagliati sull'abbondanza di ammassi stellari che vanno in un intervallo più ampio di età in galassie situate fino a distanze di 20 Mpc. Questo aprirà nuovi orizzonti nello studio del

distribuzione della metallicità radiale, consentendoci di estendere la nostra vista a un numero maggiore di galassie con una varietà di morfologia e ambiente.

Ammassi globulari

Lo studio degli ammassi globulari galattici ed extragalattici (GCs) ha subito una rivoluzione negli ultimi 20-30 anni, anche grazie alle nuove tecnologie osservative, e guidato dai ricercatori dell'INAF. Molteplici popolazioni stellari con diversa composizione chimica e proprietà fotometriche sono ora onnipresenti in tutti i GC adeguatamente studiati. Le specie chimiche coinvolte sono per lo più elementi leggeri (C, N, O, Mg, Al, Na). La composizione chimica molto diversa ha un impatto sulle proprietà fotometriche delle stelle GC, che formano sequenze multiple nei diagrammi di magnitudine del colore. Queste scoperte hanno richiesto un profondo ripensamento della formazione e dell'evoluzione dei GC e del loro ruolo come semplici popolazioni stellari. La comprensione di come si formano ed evolvono gli ammassi stellari rimane un compito complicato e sono stati ideati nuovi scenari per la loro formazione, che devono essere esplorati e che aprono la questione sull'impatto che gli ammassi (o i loro progenitori) hanno avuto nella formazione e nell'evoluzione di l'alone della Galassia, o più in generale della Via Lattea. I siti di produzione delle variazioni chimiche dell'abbondanza sono stati identificati nella combustione dell'idrogeno CNO che avviene o nei nuclei delle stelle massicce o nei gusci delle stelle AGB; tuttavia, non possiamo ancora costruire un modello autoconsistente che descriva come i prodotti CNO possono essere trasferiti e riutilizzati da una popolazione all'altra all'interno dei GC. Ad esempio, secondo gli scenari attuali, è necessario presumere che i GC fossero inizialmente estremamente più massicci, per poi perdere gran parte della loro massa, preferenzialmente delle stelle di prima generazione, cioè quelle con una composizione simile a quella dell'alone galattico. Questa ipotesi sembra scontrarsi con il rapporto dimensionale delle popolazioni di GC e alone nelle galassie nane come Fornax.

In definitiva, il fatto che i GC mostrino variazioni chimiche mentre né gli ammassi aperti (che sono più giovani e più ricchi di metalli) né le galassie nane (che sono più massicce e complesse) ne mostrano alcuna traccia, mette in dubbio la nostra comprensione di come si formano i sistemi stellari, e a sua volta questo mette in dubbio la nostra comprensione di come si formano ed evolvono le galassie. È necessario presumere che le condizioni iniziali in cui si sono formate le GC fossero significativamente diverse da quelle che osserviamo oggi, presupposto non irrealistico, e tenere presente che quegli ambienti potrebbero essere i mattoni primordiali che hanno dato origine all'alone del MW e le altre galassie che osserviamo oggi.

Anche in questo caso la risposta a queste domande non può che venire dai grandi progetti che sono attualmente in corso da terra e dallo spazio. Gaia aiuterà a derivare orbite accurate (e quindi la provenienza GC) e la cinematica interna (e quindi la caratterizzazione di popolazioni multiple) di GC nella Via Lattea e nel Gruppo Locale.

I progetti spettroscopici a terra in corso dei ricercatori INAF, le indagini su larga scala come Gaia-ESO, WEAVE e MOONS, gli studi fotometrici che utilizzano filtri sensibili alle variazioni di abbondanza (es. l'ultravioletto) forniranno una caratterizzazione chimica e astrofisica completa delle molteplici popolazioni, con campioni 10 o 100 volte più grandi di quelli attualmente disponibili e misurazioni più precise e accurate. Tutto ciò aiuterà a definire le proprietà GC che consentono la presenza di più popolazioni.

7.3 La storia della formazione stellare (SFH) nella Via Lattea, nelle galassie del Gruppo Locale e oltre.

L'LG e le galassie del gruppo vicino offrono la possibilità di studiare la composizione di popolazioni di età diverse in galassie diverse dalla MW.

Ci sono una serie di questioni aperte che rendono lo studio dell'SFH e delle proprietà di diverse galassie un argomento impegnativo. In particolare: - C'è una bassa soglia di luminosità per la galassia

formazione? Ci sono prove di accrescimento/interazione di galassie (nane) a formazione stellare risolte? Il censimento dei piccoli satelliti è coerente con le previsioni del CDM su scala galattica?

La distribuzione spaziale di dSphs (planare vs sferica) è coerente con CDM? Possiamo testare diversi modelli DM con velocità risolte in 3D? Le misurazioni dell'età sub-gira rivelano una sincronizzazione cosmologicamente guidata negli SFH?

Per affrontare queste questioni aperte sono obbligatorie ampie indagini sulle popolazioni stellari risolte galattiche ed extragalattiche. Per la prima volta nella storia, le indagini fotometriche e spettroscopiche in corso e pianificate che utilizzano strutture e missioni spaziali esistenti o imminenti ci consentiranno - e saranno - di raccogliere una quantità sufficientemente ampia di dati di qualità sufficiente per portare a una mappatura statisticamente significativa della composizione, cinematica e SFH di un gran numero di stelle in tutte le componenti galattiche e nell'LG e oltre. Questo flusso senza precedenti di dati spettrofotometrici ottici, ultravioletti e infrarossi, fatto di dati proprietari e archivi pubblici pianificati, combinato con l'ultima generazione di modelli chemodinamici dettagliati ci consentirà di fare luce sulla formazione delle galassie LG, tra cui la galassia a spirale Andromeda, nani sferoidali e nani irregolari, e le galassie nane ultra-deboli scoperte di recente, che sono state ipotizzate per rappresentare i mattoni dell'alone galattico e M31.

Le ellittiche e le nane compatte blu (cioè le più e le meno evolute) non sono presenti nell'LG e occorre estendere lo studio ben oltre. Questi studi richiedono una fotometria accurata su una linea di base di lunghezza d'onda lunga. A questo proposito sarà molto importante la sinergia tra ELT, HST, JWST: l'eccezionale risoluzione aprirà all'esplorazione di porzioni di galassie molto affollate e inaccessibili, consentendo studi dettagliati dell'SFH in quelle regioni dove si svolge la maggior parte dell'azione. Nel decennio successivo un telescopio spaziale nel vicino infrarosso ottico a grande apertura, con un ampio campo visivo e capacità spettroscopiche e fotometriche, appare come la capacità chiave per ambiziosi rilievi galattici e LG. Un tale strumento fornirebbe velocità e abbondanze di precisione per milioni di bersagli fuori dalla portata dei telescopi odierni e/o distribuiti su aree molto vaste, consentendoci una panoramica completa dell'SFH e dell'evoluzione chemodinamica delle popolazioni galattiche e dei satelliti MW più vicini.

7.4 Il ruolo delle stelle pulsanti e delle fluttuazioni della luminosità superficiale come traccianti di popolazioni stellari risolte e irrisolte.

Una sfida importante per l'astrofisica del prossimo decennio è la determinazione di distanze con una precisione migliore del 5% dal Gruppo Locale a circa 200 Mpc come ingrediente cruciale non solo per vincolare la geometria dell'Universo (vedi Sez. 9) ma anche per caratterizzare diverse fisiche proprietà di stelle e galassie (comprese scale temporali dinamiche, masse, età, dimensioni lineari ecc...).

Come è noto, nella Via Lattea (MW) e nelle galassie risolte fotometricamente, lo studio dei diversi tipi di stelle pulsanti ospitate (in diverse fasi evolutive) permette di risalire alle proprietà intrinseche (età e composizione chimica) e, attraverso stime della distanza, la distribuzione spaziale delle popolazioni stellari associate. Anche questo approccio

permette di evidenziare la possibile presenza di trend radiali, aloni e/o flussi, ea sua volta di ricostruire la storia della formazione stellare della galassia indagata e di ottenere informazioni sulla formazione galattica e sui meccanismi di evoluzione.

In questo contesto la missione Gaia, con una significativa partecipazione di ricercatori INAF, sarà una pietra miliare. Attraverso un monitoraggio multi-epoca del cielo pieno, Gaia otterrà la posizione, la parallasse, il moto proprio e la fotometria delle serie temporali di migliaia di stelle pulsanti nel MW e dintorni, fino a un debole limite di magnitudine di $G \approx 20,7$ mag. In particolare, il censimento completo di Gaia delle Cefeidi Galattiche e delle Lire RR consentirà una svolta nella nostra comprensione della struttura MW tracciando stelle variabili di varie età nell'Oceano Galattico

rigonfiamento, disco, alone, che probabilmente rivelano nuovi flussi e deboli satelliti come segni distintivi dell'accumulo gerarchico di MW. L'immagine del MW fornita da Gaia rappresenterà un punto di riferimento senza precedenti per testare le attuali teorie sulla formazione e l'evoluzione galattica.

I ricercatori dell'INAF che hanno già un ruolo di primo piano nel campo dell'evoluzione stellare e delle teorie delle pulsazioni potranno confrontare le loro previsioni del modello con le misurazioni di Gaia, consentendo così un passo avanti cruciale nella nostra conoscenza della fisica stellare. È previsto un crescente coinvolgimento della comunità scientifica INAF con l'obiettivo di ottimizzare lo sfruttamento scientifico dei dati di Gaia.

Nel prossimo futuro la partecipazione di numerosi ricercatori INAF alla missione LSST estenderà lo stesso livello di accuratezza raggiunto nella Via Lattea con Gaia alle galassie del Gruppo Locale (LG) e oltre. Infatti, le misure di distanza fornite da LSST (che estendono le capacità di Gaia a cinque magnitudini più deboli) per Cefeidi e RR Lyrae, ci permetteranno: i) di vincolare a un livello di accuratezza senza precedenti le relazioni che rendono queste stelle indicatori primari di distanza; ii) derivare la struttura 3D dei sistemi studiati; iii) vincolare le ipotesi fisiche e numeriche dei modelli di pulsazione.

Infine, utilizzando JWST e successivamente ELT (con risoluzione spaziale simile a quella del telescopio spaziale Hubble) sarà possibile estendere le osservazioni di Cefeidi Classiche fino ai campi affollati dell'ammasso di Coma e le osservazioni di RR Lyrae in galassie ellittiche e a spirale giganti fino a 6 Mpc.

Lo studio di popolazioni stellari extragalattiche non risolte può in gran parte trarre vantaggio dall'uso del metodo SBF, soprattutto in vista delle prossime indagini di imaging ottico ampio e profondo e del vicino IR.

Lo studio delle popolazioni stellari extragalattiche, basate su colori e magnitudini integrate, è ostacolato dalla ben nota degenerazione età-metallicità, vale a dire: un cambiamento di età per un fattore tre può simulare un cambiamento di metallicità per un fattore due. Quindi la spettroscopia è essenziale per fornire solidi vincoli alle proprietà fisiche dei sistemi stellari irrisolti.

Tuttavia, l'analisi dei gradienti SBF e dei colori SBF ha dimostrato che è possibile fornire vincoli accurati alla popolazione stellare dominante ponderata in base alla luminosità per le galassie di primo tipo.

Il grande progresso dello strumento proposto, rispetto, ad esempio, agli studi spettroscopici, è che i dati necessari per l'analisi dei colori SBF e dei gradienti SBF proverranno "gratuitamente" dalle indagini di imaging pianificate o in corso, senza la necessità di un tempo di osservazione aggiuntivo rispetto a quello già assegnato in sede di indagine. Quindi, almeno per galassie di tipo primordiale morfologicamente quasi indisturbate, le proprietà della popolazione stellare locale e globale molto accurate, con una precisione di $\sim 0,2$ dex in $[\text{Fe}/\text{H}]$, saranno alla portata di galassie con un segnale al rumore sufficientemente alto rapporto affinché la misurazione SBF sia possibile.

7.5 La nucleosintesi degli elementi pesanti nella Via Lattea

La kilonova SSS17a osservata dopo pochi giorni dalla rilevazione delle onde gravitazionali di GW170817 è stata collegata al decadimento di alcuni 10-3 MSUN di nuclei radioattivi pesanti prodotti dal processo di cattura rapida dei neutroni (il processo r) che avviene all'interno dell'ejecta della precedente fusione binaria di stelle di neutroni. Questo fatto ha rinnovato e amplificato l'interesse della comunità scientifica per la nucleosintesi degli elementi pesanti.

È noto che la stragrande maggioranza degli isotopi più pesanti del ferro viene prodotta attraverso la cattura dei neutroni. La metà degli elementi pesanti è prodotta dal lento processo di cattura dei neutroni (processo s), che ha luogo nel mantello ricco di He delle stelle Asintotic Giant Branch (AGB) che subiscono impulsi termici ricorsivi e durante il nucleo He-burning e C- fasi di combustione delle conchiglie dell'evoluzione delle stelle massicce. L'altra metà deriva dal processo r, per il quale un numero crescente di evidenze indica come luogo più probabile la fusione di piccoli oggetti compatti,

come due stelle binarie di neutroni o una stella di neutroni e un buco nero, senza ignorare il possibile (importante) contributo delle esplosioni di Supernovae. Mentre il processo s è caratterizzato da densità di neutroni piuttosto basse e procede lungo la cosiddetta valle della β -stabilità, il processo r è al lavoro in un ambiente più estremo, con un rilascio improvviso ($\tau < 1$ sec) di un'enorme quantità di neutroni (maggiore di 10^{23} cm⁻³). Di conseguenza, le impronte di tali processi sono facilmente identificabili nelle abbondanze stellari, grazie al rapporto tra gli elementi per lo più prodotti da un processo o dall'altro (es. bario per il processo s ed europio per il processo r). In questi anni il personale dell'INAF ha ampiamente contribuito su questo tema sia dal punto di vista osservativo che teorico.

Ad esempio, gli spettri ad alta risoluzione Gaia-ESO ottenuti con UVES hanno consentito la determinazione dell'abbondanza di una grande varietà di elementi inclusi molti elementi di cattura dei neutroni: cinque elementi dominati dal processo s (Y, Zr, Ba, La, Ce), un elemento dominato dal processo r (Eu) e tre elementi con contributi significativi da entrambi i processi (Mo, Pr e Nd). Sfruttando l'ampio ed omogeneo campione di parametri stellari e abbondanze elementari di Gaia-ESO, è così possibile studiare l'evoluzione delle abbondanze degli elementi di cattura dei neutroni in diverse componenti galattiche.

Le grandi indagini spettroscopiche in corso come APOGEE e GALAH al loro completamento forniranno le abbondanze per diversi elementi, tra cui quelli a cattura di neutroni, per un massimo di 1 milione di avviamenti. Una caratterizzazione chimica ancora più dettagliata, inclusi gli elementi n-capture, per un campione di 2,5 milioni di stelle nell'alone e nei dischi galattici sarà fornita da WEAVE, un'indagine pianificata (a partire dall'autunno 2019) di cui l'INAF è uno dei fondatori compagno. Il personale dell'INAF ha già studiato l'arricchimento della cattura dei neutroni nell'alone galattico, ma questi modelli devono essere accoppiati con potenti strumenti statistici per rispondere a domande chiave sulla produzione di elementi di cattura dei neutroni e sugli eventi del processo r. In particolare, occorre stabilire se i NSM sono gli unici responsabili dell'arricchimento chimico nel nostro Universo vicino (o se altri attori stanno giocando un ruolo). Inoltre, la velocità e la scala temporale degli eventi del processo r necessari per spiegare l'arricchimento nell'alone galattico devono essere vincolati.

Dal punto di vista della modellizzazione stellare, il contributo delle persone INAF alla nucleosintesi del processo s è riconosciuto a livello mondiale, come testimoniano i numerosi articoli sull'argomento e il repository web FRUITY, attualmente l'unico database al mondo interamente dedicato alla nucleosintesi delle stelle AGB. Inoltre, anche il contributo delle stelle massicce alla componente debole del processo s è stato attentamente determinato dai ricercatori dell'INAF. La comprensione dettagliata della nucleosintesi del processo s è fondamentale per derivare il contributo del processo r all'inventario solare, poiché la nostra attuale conoscenza teorica del processo r è lungi dall'essere completa (in effetti la percentuale r è calcolata come $r = 1 - s$). Pertanto, qualsiasi studio relativo al processo s è di interesse per la nucleosintesi del processo r.

Nonostante ciò, è obbligatoria una comprensione dettagliata del processo r. In futuro l'INAF potrebbe fare passi avanti nella teoria del processo r sfruttando i profili scientifici già strutturati nel proprio organico oltre che sviluppando sinergie con altri istituti di ricerca (in particolare con l'INFN, non solo lato onde gravitazionali, ma anche sulla cattura dei neutroni e sulle misurazioni della fissione nucleare, che modellano fortemente le risultanti distribuzioni degli elementi pesanti).

7.6 Di cosa abbiamo bisogno?

Negli ultimi anni i ricercatori INAF hanno avuto ruoli chiave e risultati di impatto in questo campo di ricerca.

La forza dell'INAF trae origine dalla competenza scientifica dei ricercatori, nonché dallo sviluppo, partecipazione e sfruttamento scientifico di ambiziosi programmi di osservazione. In particolare è significativo il coinvolgimento della comunità INAF nella missione Gaia, così come il

partecipazione al Gaia-ESO Survey, attualmente la più grande indagine stellare eseguita su un telescopio di classe 8m, e alla preparazione di WEAVE e MOONS (ed Euclid, PLATO, THEIA) e alla definizione di casi scientifici.

Al fine di mantenere quei ruoli chiave e l'eccellenza scientifica, è necessario:

- formare, in sinergia con le Università, una nuova generazione di ricercatori con competenze in spettroscopia stellare, astrometria, modellistica chemiodinamica, astrosismologia, analisi di grandi banche dati e data mining;
- rafforzare e finanziare la partecipazione dell'INAF a grandi progetti/sondaggi e collaborazioni internazionali, e aprirne di nuovi;
- supportare il coinvolgimento (tecnologico e scientifico) in attività dedicate allo sviluppo di nuova strumentazione per la spettroscopia [massiva] multiplex;
- dedicare sostegno e fondi allo sviluppo di strumenti teorici, data mining e, in generale, metodi e strumenti per la valorizzazione scientifica del patrimonio informativo proveniente da strumentazioni/ rilevamenti in corso e futuri;
- favorire collaborazioni e sinergie sia all'interno di MA2 (ad es. con la comunità di formazione stellare) che con MA1 (e MA5). Al riguardo, è auspicabile, all'interno di ciascuno degli AD INAF, la nascita di gruppi di lavoro su temi multidisciplinari/trasversali per stabilire, ove possibile, sinergie.

Metodo delle domande chiave		Progetto
Formazione ed evoluzione di strutture subgalattiche nella Via Lattea e nel Volume locale	Studio dettagliato della nostra Galassia e delle galassie vicine, mappatura della distribuzione spaziale e della struttura 3D, cinematica, metallicità, abbondanze ed età. Modellazione teorica. Relatività generale.	Gaia, Gaia-ESO, APOGEE1/2, GALAH, TESSERE, LUNA, 4MOST, ELT, Pan STARRS, LSST, Keplero, Euclide, THEIA, HST, JWST, WFIRST, HPC
L'evoluzione chemiodinamica degli ammassi stellari nelle galassie	Campioni grandi e imparziali di ammassi (aperti, globulari) e della loro popolazione studiati con fotometria, astrometria e spettroscopia accurate e precise. Modelli di formazione, evoluzione, dissoluzione dei cluster.	Gaia, Gaia-ESO, TESSERE, LUNA, 4LA MAGGIOR PARTE, GIARPS, CRIRES+, ESPRESSO, ELT (ASSUNZIONI & MOS), HPC, Pan-STARRS, LSST
La storia della formazione stellare (SFH) nella Via Lattea, nelle galassie del Gruppo Locale e oltre.	Utilizza indagini galattiche ed extragalattiche su larga scala (fotometriche, astrometriche, spettroscopiche) per mappare la struttura, la composizione, la cinematica e la storia della formazione stellare nelle galassie MW e LG. Testare i meccanismi di formazione delle galassie nei modelli CDM.	OGLE, J-PAS, Pan STARRS, Gaia, WEAVE, LBT, VISTA, VST, ALMA, LSST, Euclide, HST, JWST, DESI, PRIMO, Euclide, ELT
La produzione di elementi pesanti tramite il processo s e il processo r	Monitoraggio multi-epoca, tutto il cielo di variabili risolte (MW componenti diversi, galassie esterne) per derivare strutture 3d e vincolare modelli di pulsazione. Studia le popolazioni irrisolte utilizzando indagini fotometriche.	Gaia, LSST, JWST, MICADO@ELT, Euclide
Il ruolo delle stelle pulsanti e la luminosità della superficie. Fluttuazioni come traccianti di popolazioni stellari risolte e irrisolte	Monitoraggio multi-epoca, tutto il cielo di variabili risolte (MW componenti diversi, galassie esterne) per derivare strutture 3d e vincolare modelli di pulsazione. Studia le popolazioni irrisolte utilizzando indagini fotometriche.	Gaia, LSST, JWST, MICADO@ELT, Euclide

8. Formazione ed evoluzione di galassie e strutture cosmiche

Parole chiave: Galassie e AGN, Ammassi di Galassie, IGM e reionizzazione

Domanda chiave:

Quali sono i processi fisici che guidano l'assemblaggio e l'evoluzione delle strutture su scale di galassie fino ad ammassi di galassie?

- **Proprietà delle prime galassie e buchi neri. Fonti responsabili della reionizzazione**
- **Origine e destino delle galassie, funzione di massa stellare e morfologica delle galassie differenziazione.**
- **Processi di feedback tra le diverse componenti delle galassie (stelle, gas, polvere) e AGN. Ruolo degli aloni DM.**
- **Meccanismi esterni ed interni (ambiente e relazione con la Rete Cosmica) che regolano l'efficienza della formazione stellare e i parametri strutturali delle galassie.**
- **Censimento e distribuzione di massa/energia in strutture di grandi dimensioni (barioni caldi, connessione AGN ICM, turbolenza, fenomeni non termici e loro relazione con i fenomeni termici mappati ai raggi X e con l'effetto Sunyaev-Zeldovich).**

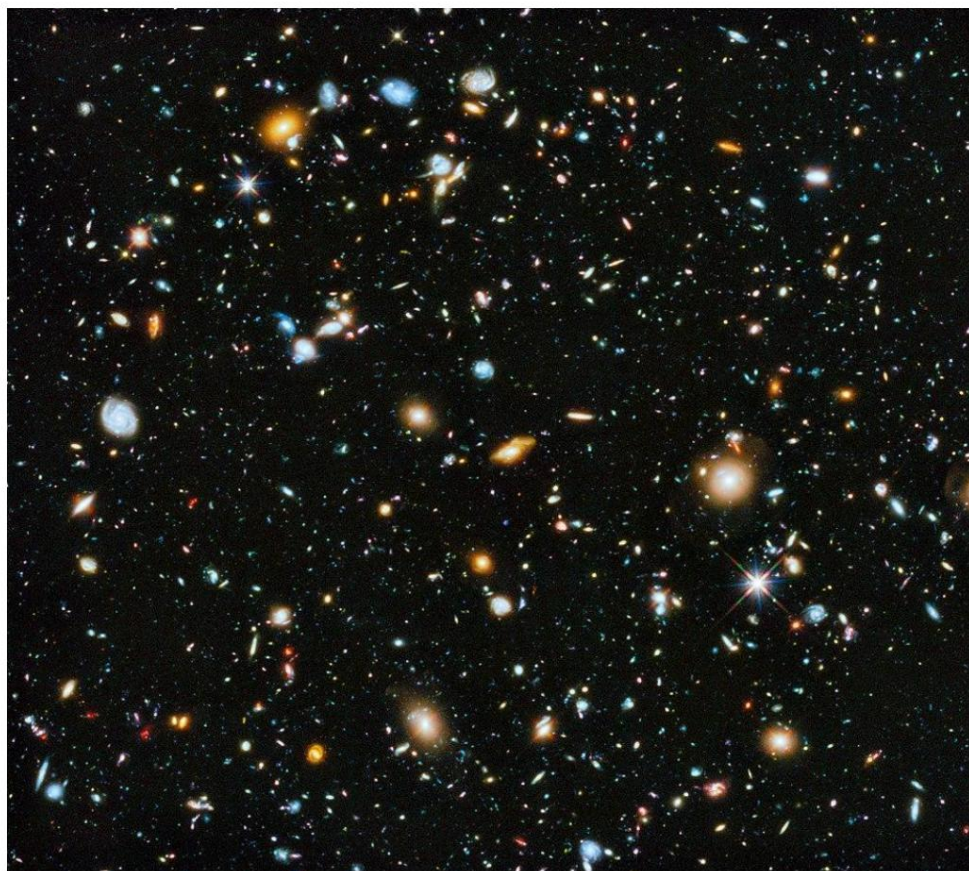


Fig.8.1 – L'Ultra-Deep Field (HUDF) ripreso dal telescopio spaziale Hubble registra la luce (dall'ultravioletto al vicino infrarosso) di galassie lontane fino ai limiti più deboli raggiunti da un telescopio ottico.

Energia oscura, materia oscura e barioni sono le componenti di base dello scenario cosmologico attualmente accettato (vedi Cap. 9). Le strutture che popolano l'Universo sono il risultato della crescita delle fluttuazioni della distribuzione della densità primordiale: mentre la spina dorsale della struttura a larga scala dell'Universo è determinata dai suoi parametri cosmologici e dall'interazione gravitazionale della materia oscura dominante, **l'assemblaggio e l'evoluzione delle strutture su scale di galassie e fino ad ammassi di galassie** sono principalmente **guidate e fortemente influenzate dalla complessa fisica dei barioni**. La sfida del prossimo decennio sarà **comprendere questi processi attraverso il confronto di osservazioni multi-lunghezza d'onda con modelli teorici e simulazioni**.

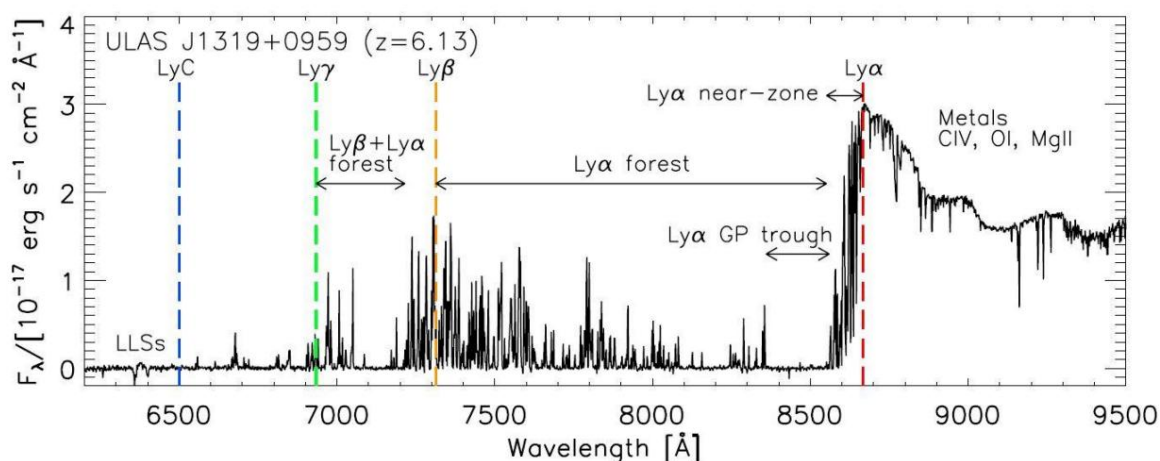


Fig.8.2 - Un elevato spettro segnale-rumore del quasar ULAS J1319+0959 a $z = 6,13$ ottenuto con lo spettrografo X-Shooter sul Very Large Telescope (VLT). La foresta di Ly γ traccia l'idrogeno diffuso nell'IGM, che diventa quasi completamente opaco di $z \approx 6$. Le linee di assorbimento del metallo, che tracciano il gas chimicamente arricchito attorno alle galassie, possono essere viste verso il rosso del picco di emissione di Ly α .

8.1 L'Epoca della Reionizzazione

L'epoca della reionizzazione (EoR) rappresenta una svolta cruciale nella storia cosmica: in meno di un miliardo di anni dopo il big bang la radiazione prodotta dai primi oggetti luminosi ionizzò quasi ogni atomo di idrogeno nel mezzo intergalattico diffuso. La comprensione della reionizzazione si trova ancora alla frontiera delle nostre attuali osservazioni cosmologiche e rappresenta uno dei principali obiettivi del prossimo decennio per diversi motivi: è l'ultima grande transizione di fase globale nell'Universo e determina quando si è verificata, così come la fisica i processi coinvolti e la natura delle sorgenti di radiazioni ionizzanti, fornisce una visione unica della formazione delle prime galassie e buchi neri, molti dei quali sono troppo deboli per essere osservati direttamente. Inoltre, la comprensione della reionizzazione è strumentale per sfruttare appieno la CMB e l'IGM come sonde cosmologiche.

Quando e come è avvenuta la reionizzazione? Le misurazioni CMB della profondità ottica per lo scattering Thomson individuano l'EoR a uno spostamento verso il rosso approssimativo di $z \sim 7,5$, mentre le indagini dell'emettitore Ly- γ e gli spettri di assorbimento di $z > 6$ quasar, forniscono informazioni sull'opacità/frazione neutra dell'IGM, aumentando rapidamente con redshift, e la sua storia termica, mostrano che la reionizzazione è stata sostanzialmente completata da $z \sim 6$. I vincoli sulla tempistica rimangono ampi e non è ancora chiaro se i vincoli siano reciprocamente coerenti. Una comoda sonda per studiare l'EoR è stata identificata nel segnale spostato verso il rosso di 21 cm a causa dell'interazione tra il CMB

e l'idrogeno neutro diffuso, rilevato con radiointerferometri. Il prossimo decennio sarà cruciale per lo sviluppo di questo campo di ricerca: si otterranno le prime misurazioni statistiche, aprendo la strada alla tomografia da 21 cm abilitata dai radiointerferometri di prossima generazione [SKA]. Vincoli indipendenti e complementari sulla quantità di idrogeno neutro presente all'EoR saranno ottenuti con: (i) rilevamenti di $z > 6$ emettitori Ly- γ : osservazioni sub-mm (es. della linea [CII] γ 158 μ m, ALMA) ci consentono di determinare contemporaneamente redshift (in assenza di Ly- γ), polvere, SFR e proprietà di ionizzazione; le osservazioni NIR spaziali e terrestri forniranno la possibilità di confermare galassie di formazione stellare sempre più deboli, accedendo a indicatori di spostamento verso il rosso alternativi come le linee di emissione nebulari ([CIII], H α , ecc.) [JWST, ELT]; (ii) osservazioni spettroscopiche di quasar a $z \sim 6$: sono in corso o pianificate diverse indagini dedicate per scoprire quasar luminosi a $z \sim 6$ [Euclid, WFIRST]; Le osservazioni spettroscopiche VIS-NIR porranno vincoli alla quantità di idrogeno neutro e, allo stesso tempo, rileveranno l'impronta degli elementi chimici formati dai primi oggetti. Gli studi attuali ora vincolano i tempi di reionizzazione con una precisione paragonabile a quella di Planck, fornendo un controllo completamente indipendente sui risultati della CMB; sono tuttavia limitati dal piccolo numero di QSO ad alto redshift che possono essere studiati ad alta risoluzione ($R \sim 40.000$). Uno spettrografo NIR ottico ad alta risoluzione su un ELT darebbe accesso a centinaia di QSO fornendo vincoli solidi.

Quali fonti hanno causato la reionizzazione? Sebbene sia ampiamente accettato che la produzione di radiazioni ionizzanti sia probabilmente dovuta alla formazione stellare e/o all'attività nucleare, il contributo globale di ciascuno di questi oggetti allo sfondo ionizzante è ancora ampiamente dibattuto. Mentre il censimento delle galassie di formazione stellare a $z > 6$ e fino a redshift 11 rappresenta l'attuale frontiera, la ricerca delle sorgenti che hanno reionizzato l'universo richiede una profonda caratterizzazione di: (i) la natura delle popolazioni stellari (e/o nucleari attività) e il contenuto di gas e polveri dei primi oggetti; (ii) i meccanismi fisici che consentono alla radiazione ionizzante di sfuggire alle galassie natali e raggiungere il mezzo intergalattico: questo è legato a processi di feedback, eventualmente connessi all'inquinamento metallico dello spazio intergalattico; (iii) domini di massa/bassa luminosità all'interno del primo Gyr, a livello di formazione di ammassi stellari, per sondare i primi episodi di formazione stellare. Questi tre problemi verranno affrontati nei prossimi anni analizzando le lunghezze d'onda del vicino e medio infrarosso (1-30 μ m) con spettrografi e imager [JWST, Euclid, WFIRST, ELT, VLT].

Come, quando e dove si sono formati i primi SMBH? L'esistenza di QSO luminosi a $z > 7$, cioè quando l'Universo aveva meno di 1 Gyr, rappresenta una sfida persistente per l'astrofisica extragalattica. Qual è l'origine dei semi che in seguito divennero SMBH? In che modo l'accrescimento potrebbe essere così efficiente? Quali sono state le condizioni ambientali che hanno reso possibile la loro crescita? Qual è la natura degli AGN deboli che sono ancora inosservati? Il modo migliore per affrontare queste domande chiave nel prossimo decennio sarà i) sfruttare le osservazioni a raggi X in profondità [Chandra e XMM] di QSO ad alto z per rivelare la fisica dell'accrescimento dei primi SMBH e se il loro rifornimento avvenga in ambienti densi popolati da altri BH compagni, più piccoli e possibilmente oscurati, e ii) effettuando indagini ampie e profonde nell'IR (integrato ad altre lunghezze d'onda) e nei campi di cielo bianco profondo di raggi X per scoprire la tipica popolazione di BH in accrescimento a $z > 7$ iii) L'esperienza accumulata con questi sforzi sarà la chiave per sfruttare al meglio le indagini a raggi X ampi e profondi che verranno eseguite e porteranno un importante passo avanti in questo settore [Athena].

8.2 L'origine e l'evoluzione delle galassie

L'origine e l'evoluzione delle galassie è uno dei capitoli più intriganti e complessi nella formazione delle strutture cosmiche. La comprensione dell'evoluzione delle galassie richiede la conoscenza di come le proprietà delle galassie dipendano dall'ambiente e dal tempo cosmico. Molti processi fisici possono

forma galassie: Il gas (atomico e molecolare), essendo il combustibile grezzo per la formazione delle stelle, svolge un ruolo dominante nella crescita delle galassie e, allo stesso tempo, è arricchito da prodotti stellari ridistribuiti nell'alone galattico da meccanismi di feedback. L'attività dell'AGN sta in parte regolando e in parte è regolata dalla formazione stellare. La massa stellare e l'ambiente, e forse altri fattori, governano i processi che portano all'estinzione della formazione stellare e all'emergere della sequenza in evoluzione passiva. Inoltre, l'assemblaggio delle galassie è certamente connesso alla crescita della materia oscura. In breve, le galassie sono sistemi complessi che vivono in ambienti dinamici.

In questo contesto, la domanda fondamentale di base è: **quali processi fisici guidano la trasformazione delle proprietà delle galassie?** Gli astronomi possono suggerire la risposta o le risposte osservando le proprietà delle galassie vicine in grande dettaglio e allo stesso tempo osservando l'Universo lontano per esaminare le proprietà delle galassie in epoche diverse nel passato. Per comprendere in definitiva la fisica della formazione e dell'evoluzione delle galassie, è necessario un continuo confronto e feedback tra il quadro empirico derivato dalle osservazioni e dai modelli teorici.

La domanda di base sopra menzionata può essere suddivisa in sotto-argomenti diversi, ma interconnessi:

- Quanto erano diverse le galassie primordiali dai loro analoghi più recenti? Qual è l'FMI delle popolazioni stellari a metallicità molto bassa ad alta z ? Qual è il contenuto di polvere delle galassie primordiali ad alta z ?
- Come funziona il ciclo barionico tra gas/metalli nelle galassie e gas/metallo "esterno" (nel mezzo intergalattico o circumgalattico)? Quanto gas/metalli vengono riciclati e possiamo distinguere tra il gas che sta cadendo per la prima volta rispetto al gas che è già stato in un "vento galattico"? Qual è la storia dell'arricchimento chimico delle galassie?
- Qual è il ruolo relativo dell'AGN e del feedback stellare nel determinare la storia della formazione stellare? Quali sono i meccanismi fisici che guidano queste diverse modalità di feedback? In che modo l'energia si accoppia con il mezzo interstellare circostante? Buchi neri e galassie si stanno evolvendo insieme? cioè l'attività nucleare e la formazione stellare sono in relazione causale o incidentale?
- È stato stabilito oltre ogni ragionevole dubbio che la storia della formazione stellare cosmica è guidata dall'accrescimento di gas e che i processi "esterni" sono importanti solo per le galassie di piccola massa?
- Quali processi fisici modellano e trasformano i parametri strutturali delle galassie? Cosa guida l'evoluzione dimensionale delle massicce galassie di primo tipo? Qual è l'origine della connessione tra le proprietà delle regioni centrali delle galassie (<1 kpc) e i principali meccanismi di crescita di massa e dimensione?
- Qual è il ruolo dell'assemblaggio gerarchico nel determinare le proprietà fisiche delle galassie in diversi ambienti (campo, ammassi ecc.)? In che modo questo cambia in funzione del tempo cosmico, essendo l'ambiente in evoluzione in un universo gerarchico, e come si adatta alla massa? Qual è il contributo relativo dei processi di estinzione ambientale, come la pressione dell'ariete e/o lo stripping delle maree, le molestie, le collisioni di gruppi di gruppi e la fame, a diversi spostamenti verso il rosso? Qual è il legame tra le proprietà delle galassie e gli aloni DM in cui risiedono? In che misura l'evoluzione della galassia è guidata/modulata dall'assemblaggio di aloni di materia oscura?

Alcune di queste domande chiave saranno affrontate nei prossimi decenni in diversi modi:

- Un quadro dettagliato della cinematica del gas stellare e (multifase), degli afflussi e deflussi di gas nelle galassie di formazione stellare sia alta che media z e la sua connessione con il mezzo circumgalattico e intergalattico sta diventando accessibile grazie alla spettroscopia a risoluzione spaziale (ottica/IR/radio) [COS@HST, ELT, ALMA, MUSE@VLT, WEAVE, SKA e suoi precursori].

- I giacimenti molecolari di gas tipici delle galassie con normali velocità e masse di formazione stellare possono essere misurati fino a $z \sim 2$ e oltre, nonché il contenuto di polvere fino a $z \sim 6$, fornendo una chiave sul ciclo barionico e sul riciclo [ALMA, VLA, IRAM PdBI e NOEMA]. A questo proposito sarà fondamentale un'accurata calibrazione dei fattori di conversione tra specie molecolari (es. CO e H₂) in funzione del redshift.
- Studi statistici del contenuto HI delle galassie e della sua evoluzione con il tempo cosmico diventeranno finalmente fattibili attraverso indagini di prossima generazione della linea dei 21 cm [SKA e suoi precursori, si veda anche l'indagine ALFALFA a $z \sim 0$].
- I processi fisici all'opera nell'ISM saranno studiati attraverso l'intera storia cosmica dell'Universo misurando tutti gli elementi chiave del ciclo barionico galattico con spettroscopia sensibile del medio e lontano infrarosso, poiché la maggior parte dell'energia emessa dalle stelle e l'accumulo di buchi neri supermassicci viene assorbito e riemesso dalla polvere [JWST]. Altre strutture rilevanti saranno progettate nel prossimo decennio, anche se non saranno operative nel prossimo decennio [es. SPICA].
- Le indagini radio di prossima generazione avranno la sensibilità per fornire un censimento completo della formazione stellare e dei processi AGN fino a un elevato spostamento verso il rosso e indipendentemente dall'oscuramento [SKA e suoi precursori].
- Le regioni centrali di galassie massicce di tipo primitivo a $z > 0.8$ e oltre diventeranno osservabili grazie ai miglioramenti nella risoluzione, sondando la connessione tra loro e la dimensione/crescita di massa delle galassie [JWST, ELT].
- I parametri strutturali e la morfologia delle galassie (incluso l'effetto della fusione) su vaste aree di cielo e in una varietà di ambienti negli ultimi 10 Gyr dell'Universo, la storia sarà campionata da future grandi indagini dallo spazio e dal suolo, consentendo di collegare la galassia marcatori di evoluzione (dimensioni, massa, forma delle galassie, presenza di instabilità del disco) con i meccanismi guida della crescita e trasformazione delle galassie. [Euclide, LSST, VST, VISTA].
- Studi statistici (ad es. luminosità, massa stellare e funzioni di formazione stellare) in epoche diverse da indagini profonde a più lunghezze d'onda e ad ampia area possono sondare la storia dell'assemblaggio di diversi tipi di galassie in ambienti diversi raggiungendo un regime di massa stellare in cui le previsioni del modello sono già in tensione con i dati attuali e limitati [Euclide, LSST].
- I (proto)cluster al picco del tasso di formazione stellare cosmica ($z \sim 2$) iniziano a essere rilevati in numero considerevole e vengono osservati con un livello di dettaglio sufficiente per studiare le galassie dei loro membri in una fase critica dell'assemblaggio degli ammassi [VISTA, Euclide]. È essenziale capire se e come sono collegati alle strutture virializzate osservate al redshift inferiore.
- Il contenuto di materia oscura di vari sistemi sta diventando accessibile con i follow-up spettroscopici multi-oggetto, il lensing forte e debole e le osservazioni a raggi X, rendendo possibile ricostruire l'assemblaggio di massa stellare e oscura di questi sistemi e studiare l'evoluzione il legame tra i barioni osservati e l'alone di materia oscura [VLT, WEAVE, 4MOST, MOONS].

8.3 Censimento e distribuzione di massa/energia nelle grandi strutture

In che modo i barioni in gruppi e ammassi si accumulano e si evolvono dinamicamente in enormi aloni DM?

Cosa guida l'evoluzione chimica e termodinamica di queste strutture? Come e quando si formano i primi gruppi crollati?

Qual è l'interazione tra le galassie e il nero supermassiccio

buchi e come si evolve nei gruppi e negli ammassi di galassie? Dove sono i barioni mancanti a basso redshift e qual è il loro stato fisico?

Gli ammassi di galassie sono le più grandi strutture dell'universo legate gravitazionalmente e, in uno scenario di formazione gerarchica, la più recente formazione nella storia cosmica.

Le osservazioni a raggi X giocheranno un ruolo importante per rispondere a queste domande considerando che il plasma caldo che emette raggi X domina il contenuto barionico. I principali osservabili includono la temperatura e la densità del gas, la sua abbondanza e velocità di metallo, tutte fornite tramite osservazioni del continuum spettrale dei raggi X e delle linee di emissione. La pressione termica lungo la linea di vista può anche essere rilevata a lunghezze d'onda mm attraverso l'effetto Sunyaev-Zeldovich a causa della diffusione Compton inversa dei fotoni CMB da parte degli elettroni nel mezzo intra-cluster (ICM). Questi osservabili ci consentono di indagare su come l'energia gravitazionale modella l'assemblaggio di cluster, e come e in quale frazione viene convertita in componenti termiche e non termiche, producendo turbolenza e movimenti di massa su scala kpc. Questi ultimi processi lasciano impronte nella banda radio che sono strumenti estremamente potenti per studiare i dettagli della formazione di strutture su larga scala. Aloni radio e reliquie (sorgenti radio di sincrotrone di dimensioni Mpc associate all'ICM in un certo numero di ammassi di galassie), nonché sorgenti di spettro molto ripido recentemente scoperte in ammassi e gruppi, sono i risultati dell'iniezione di turbolenza e shock nell'ICM in conseguenza di eventi di fusione e accrescimento. Le proprietà osservative delle radiosorgenti a grappolo diffuso sono estreme e rappresentano una sfida per gli attuali radiointerferometri, nella misura in cui solo le fusioni più estreme nei sistemi più massicci possono essere tracciate e studiate nella banda radio e le principali domande rimangono senza risposta, come ad esempio: quali sono i dettagli dell'accrescimento di sistemi più piccoli? Quanto lontano nel redshift possiamo rilevare aloni e reliquie radio? Quanto lontano nel redshift possiamo rilevare mini-alone (fonti di cluster diffuse che si trovano nei nuclei dei sistemi rilassati)? [LOFAR, SKA]

Su scale più piccole, si osserva che l'interazione dell'ICM con le galassie membri dell'ammasso modifica le aspettative dal puro collasso gravitazionale, ad esempio aggiungendo energia e metalli attraverso i venti di supernova e stabilendo un feedback energetico con un buco nero supermassiccio centrale. I dettagli di questi processi (Cosa regola il processo di feedback dalle galassie centrali negli ammassi (principalmente nucleo freddo)? Come possiamo sviluppare un modello completo per descrivere l'intero ciclo barionico nei nuclei freddi?), in particolare nel suo bilancio energetico, sono ancora non noto e richiedono osservazioni a raggi X con un elevato throughput a risoluzione spaziale arcsec.

Su scala più ampia, la teoria prevede che la maggior parte dei barioni nell'Universo locale risiedano in vaste strutture filamentose non virializzate che collegano gruppi di galassie e ammassi in una fase caldo-calda (105 - 107 K). Sebbene sarà estremamente difficile vincolare l'emissione del continuo termico da questo WHIM, le transizioni discrete di metalli altamente ionizzati che risiedono già al redshift ~ 4 , forniranno un buon proxy per rilevare e caratterizzare questo gas con strumenti a raggi X, mentre la radio l'emissione ad esso associata può fornire alcuni limiti al campo magnetico in tali ambienti. [Athena, SKA]

Per fare progressi in questo campo di ricerca è necessario accoppiare i risultati delle osservazioni con le previsioni di simulazioni numeriche e modelli semi-analitici, in particolare per interpretare i dati futuri e definire nuove strategie di osservazione. Sono necessarie simulazioni idrodinamiche ad alta risoluzione per sondare gli effetti dei processi fisici su piccola scala e modelli semi-analitici per sondare i volumi cosmologici, entrambi tra cui la modellazione realistica delle prime stelle e dei buchi neri, l'arricchimento dei metalli, lo sfondo della fotoionizzazione UV, il feedback stellare e AGN, radiativo trasferimento e di alcuni complessi processi fisici che ora sono modellati sottogriglia o in post-elaborazione (es. formazione stellare e feedback). Calcolo ad alte prestazioni

si svilupperà in modo significativo nei prossimi anni in termini di risorse hardware, software e algoritmi, implicando in particolare un aumento della gamma dinamica coperta.

Poiché la risposta a queste domande di solito richiede analisi che coinvolgono set di dati di dimensioni considerevoli, che mostrano una varietà/struttura non banale e coinvolge bootstrap, tecniche di data mining, metodi avanzati di apprendimento automatico, campionamento Monte Carlo Markov-Chain dello spazio dei parametri, affrontare queste domande è interconnesso a le discipline emergenti dell'astro-statistica e dell'astro emettitori-informatica.

Domanda chiave	Metodo	Progetto
Proprietà delle prime galassie e BH.	Tomografia da 21 cm	SKA
Epoca della Reionizzazione Fonti di reionizzazione.	Rilievi di oggetti primordiali nell'IR e submm. Studi multi-lunghezza d'onda di singoli oggetti. Studi di spostamenti verso il rosso bassi analoghi alle sorgenti primordiali. Evoluzione dell'opacità dell'IGM Ali di smorzamento dell'assorbimento QSO Ly- γ Statistiche degli emettitori di Ly- γ	ALMA, JWST, Euclide, VLT, PFU, PRIMA, SPICA
	Spettroscopia ottica-NIR ad alta risoluzione: storia termica dell'IGM	ELT
	Campi profondi di sorgenti di raggi X	Chandra, XMM, Atena
	Simulazioni numeriche. Inclusione di processi fisici attualmente modellati come sottogriglia o in post-elaborazione (trasferimento radiativo, formazione stellare, feedback)	HPC
Origine e destino delle galassie la funzione di massa stellare della galassia e la differenziazione morfologica. Processi di feedback tra le diverse componenti delle galassie (stelle, gas, polvere) e AGN. Ruolo degli aloni DM. Meccanismi esterni ed interni (ambiente e relazione con la Rete Cosmica) che regolano l'efficienza della formazione stellare e i parametri strutturali delle galassie	Osservazioni di dettaglio della cinematica, deflussi, afflussi dei gas. Collegamento con CGM e IGM. Spettroscopia ottica-NIR ad alta risoluzione: osservazioni di elementi pesanti ad alto redshift	SKA, ASKAP, MeerKAT, ALMA VLT, ELT TESSERE HST, SPICA
	Osservazioni di gas molecolari Censimento della formazione stellare e AGN processi	ALMA VLA IRAM NOEMA
	HI contenuto di galassie	SKA
	ISM nel MIR e FIR	JWST SPICA
	Collegamento tra la regione centrale e la crescita delle galassie ad alto redshift	JWST ELT
	Collega i marcatori di evoluzione delle galassie (dimensioni, massa, forma delle galassie, presenza del disco	Euclide LSST

	instabilità) con i meccanismi guida della crescita e trasformazione della galassia. Studi statistici (es. luminosità, massa stellare e funzioni di formazione stellare) in epoche diverse da rilievi a più lunghezze d'onda <u>profonde e ad ampia area.</u>	VST VISTA SPICA
	Assemblaggio (proto)cluster a $z > 2$	VISTA Euclide
	Simulazioni idrodinamiche ad alta risoluzione che sondano gli effetti dei processi fisici su piccola scala e modelli semi-analitici che sondano i volumi cosmologici, entrambi inclusi modelli realistici dell'arricchimento dei metalli, sfondo della fotoionizzazione UV, feedback stellare e AGN, trasferimento radiativo. Analisi di grandi dataset che coinvolgono tecniche di data mining, metodi avanzati di machine learning, campionamento Markov-Chain Monte Carlo.	HPC astro-statistica informatica astronomica
Censimento e distribuzione di massa/energia su larga scala strutture	Osservazioni a raggi X, effetto SZ Aloni radiofonici, reliquie Emissione WHIM	Atena LOFAR SKA

9 Cosmologia e Fisica Fondamentale

Parole chiave: Geometria dell'Universo, Parametri Cosmologici, Materia Oscura, Energia Oscura, Fisica Fondamentale.

Domande chiave:

- La natura della materia oscura
- La natura dell'Energia Oscura
- Comprendere la gravità su grandi scale cosmologiche
- Condizioni iniziali della Cosmologia
- Interazioni e costanti fondamentali della Fisica
- La scala della distanza cosmica e il dibattito costante di Hubble

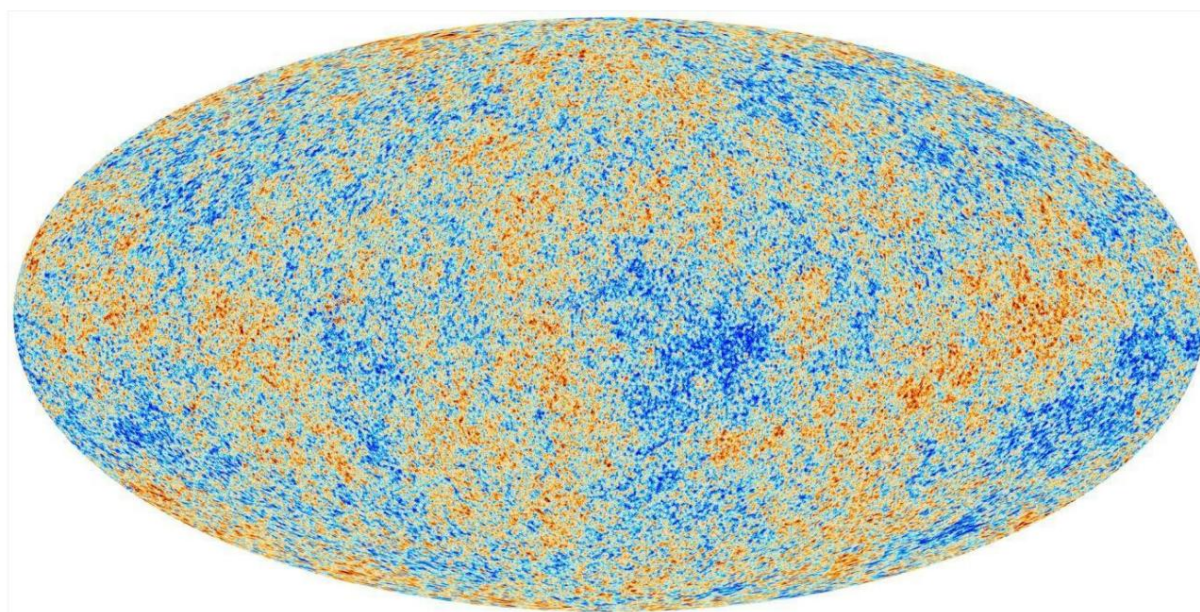


Fig.9.1 - Le anisotropie del fondo cosmico a microonde (CMB) osservate dal satellite Planck. La CMB è un'istantanea della luce più antica del nostro Universo, impressa nel cielo quando l'Universo aveva appena 380.000 anni. Mostra minuscole fluttuazioni di temperatura che corrispondono a regioni di densità leggermente diverse, che rappresentano i semi della futura formazione della struttura. Credito: ESA.

La cosmologia moderna copre un gran numero di questioni chiave riguardanti l'Universo primordiale, la sua geometria globale e la sua evoluzione, la natura e le proprietà dei suoi costituenti, cioè sia delle particelle elementari conosciute che di quelle ancora sconosciute, in una connessione straordinariamente stretta con la fisica fondamentale. L'Universo è un laboratorio che offre l'accesso a regimi non disponibili sulla Terra e continua a essere un banco di prova e di scoperta per le leggi fondamentali della natura: le osservazioni dei pianeti in orbita hanno fornito la verifica delle teorie della gravità di Newton ed Einstein; in anni più recenti, le osservazioni delle pulsar radio e degli oggetti del sistema solare hanno mostrato con squisita sensibilità che la relatività generale è, in effetti, corretta, almeno quando la gravità è debole; la recente osservazione diretta delle onde gravitazionali dalla fusione dei buchi neri è una svolta di enorme slancio.

La conoscenza cosmologica è strettamente legata ai fenomeni astrofisici descritti nei paragrafi precedenti che danno origine alla formazione di oggetti cosmici in varie epoche e a varie scale: dalle prime stelle e dai primi buchi neri che determinano la reionizzazione cosmologica, alla formazione delle galassie, delle galassie a grappolo e la struttura generale a grande scala dell'Universo.

La determinazione precisa dei parametri cosmologici, in scenari standard e non standard, fornisce informazioni fondamentali per rispondere alle domande chiave. Gli ultimi quindici anni hanno visto la conferma dalle misurazioni della scoperta davvero notevole che l'espansione dell'Universo sta accelerando. Nel linguaggio moderno, questa accelerazione è attribuita all'effetto di una misteriosa sostanza chiamata energia oscura che rappresenta il 68% dell'energia di massa dell'Universo oggi causando la separazione delle galassie a velocità sempre più elevate. Il resto della massa-energia è costituito per il 5% da materia regolare e per il 27% da un nuovo tipo di materia, denominata materia oscura, che si ritiene comprenda nuovi tipi di particelle elementari non ancora trovate nei laboratori terrestri.

9.1 La natura della materia oscura

L'evidenza dell'esistenza di una grande e oscura componente dell'Universo (**Dark Matter, DM**) è oggi supportata da un insieme di osservazioni astronomiche, come le curve di rotazione per un gran numero di galassie a spirale, la massa di ammassi di galassie come determinato da osservazioni a raggi X e lenti gravitazionali, il peculiare campo di velocità delle galassie, anisotropie CMB, la crescita osservata di strutture su larga scala.

Questa scoperta ha sollevato molte domande fondamentali. **Qual è la natura del DM?** È di natura particellare o no? Nonostante il fatto che la maggior parte delle soluzioni all'enigma del DM coinvolga nuove particelle, la possibilità che il puzzle del DM venga risolto da altri tipi di nuova fisica, ad esempio la **modifica della gravità a grandi distanze**, è ancora viva.

Recenti misurazioni effettuate sulla fusione di ammassi di galassie hanno posto forti vincoli a questi scenari: ci sono osservazioni che mostrano una netta separazione spaziale tra i barioni che emettono luce e i centri di concentrazione della materia (oscura), identificata attraverso l'uso combinato di immagini a raggi X e mappe ottiche della lente gravitazionale. Se la materia non è dove si trovano i barioni, le modificazioni della gravità hanno difficoltà a spiegare le osservazioni. Non è esclusa la possibilità che il DM sia (almeno in parte) composto da una popolazione di buchi neri primordiali del Big Bang che non partecipano alla nucleosintesi primordiale.

Se il DM è fatto di particelle, quale nuova particella è e quali sono le sue caratteristiche (massa, interazioni, ecc.)?

Le osservazioni delle strutture cosmiche possono rivelare proprietà fondamentali della natura del DM (auto-interagente, pressione, annichilazione, decadimento ecc.) e possibili candidati (WIMP, assioni, neutrini sterili, gravitini...), in particolare studiando il libero scala di streaming ed effetti sull'espansione dell'Universo:

- a) Osservazioni su scala relativamente piccola (<1 Mpc) della dinamica delle galassie nane, dei gruppi e degli ammassi e del lensing forte.
- b) Osservazioni su scala medio-grande (10-100 Mpc): clustering di galassie e lensing debole e tomografia del mezzo intergalattico.
- c) Osservazioni ad alta energia (gamma, raggi X, TeV) possono rivelare il continuo e/e l'emissione lineare risultante dal decadimento o dall'annichilazione delle particelle di DM.

9.2 La natura dell'Energia Oscura

Nel 1998, le osservazioni di supernove di tipo Ia hanno fornito la prova di un'accelerazione dell'espansione cosmica, ritenuta causata da una nuova componente di "energia oscura" (DE).

La comprensione della fisica di DE deve spiegare perché la costante cosmologica assume un valore di gran lunga inferiore al previsto con riferimento alla scala di Planck. L'approccio più diretto è lo studio delle forme parametriche dell'equazione di stato del DE mediante:

a) l'espansione dell'Universo tracciata ad esempio con il SN Ia o con il Sandage Test. b) la misurazione delle oscillazioni acustiche barioniche (BAO), ec) la crescita delle perturbazioni mediante lo studio delle distorsioni dello spazio-rosso (RSD), ammassi di galassie, shear cosmico (lente gravitazionale debole) e foresta di Lyman- γ .

9.3 Comprendere la gravità su grandi scale cosmologiche

L'impatto di DM e DE sulla struttura a larga scala (LSS) e sul fondo cosmico a microonde (CMB) è essenziale per indagare le loro proprietà fisiche, le loro interazioni, la loro evoluzione nel tempo cosmico e per il **comprensione della gravità su grandi scale cosmologiche**. In questo contesto, lo studio del CMB e dell'LSS deve essere considerato, concettualmente e programmaticamente, come un esperimento unico, dal quale è possibile ricavare informazioni di base sui costituenti dell'Universo e sulle leggi fondamentali che ne determinano l'evoluzione.

9.4 Condizioni iniziali della Cosmologia

Recenti osservazioni del fondo a microonde sono coerenti con la teoria secondo cui l'Universo ha subito un'espansione esponenziale (la cosiddetta **inflazione**) nei primi 10-32 s dal big bang e la scala dell'Universo che vediamo oggi è cresciuta dalla sua infinitamente piccoli inizi a pochi centimetri.

L'inflazione è comunemente considerata una strada brillante per risolvere alcuni dei problemi dello scenario di base del Big Bang: la postulata prima espansione esponenziale porta regioni lontane dell'Universo (molto più grandi dell'attuale dimensione dell'orizzonte) in contatto causale in tempi così precoci.

Questa semplice idea porta a due previsioni cruciali:

- 1) l'Universo dovrebbe essere sorprendentemente quasi piatto;
- 2) l'Universo dovrebbe apparire estremamente omogeneo ed isotropo, anche in regioni che nell'Universo attuale non avrebbero mai dovuto essere in contatto causale.

La conseguenza più cruciale del paradigma inflazionistico è nell'implicazione che le perturbazioni primordiali, come osservate nella CMB e successivamente amplificate per diventare non lineari e innescare la formazione di strutture, hanno origine da fluttuazioni quantistiche nell'Universo primordiale. In una fase successiva nello sviluppo del paradigma inflazionistico ci si rese conto che tali fluttuazioni quantistiche amplificate dall'inflazione offrono un modo semplice per spiegare la forma caratteristica dello spettro di potenza primordiale (Harrison-Zeldovich), che senza dubbio dovrebbe essere considerato un successo della teoria.

La planarità, l'isotropia e la forma dello spettro di potenza sembrano essere entrambe confermate dalle misurazioni del CMB su tutte le scale e in misura diversa sono entrambe corroborate dalle osservazioni della struttura su larga scala dell'Universo. Tutto ciò, pur non confermando direttamente lo scenario inflazionistico, fornisce certamente forti argomentazioni a suo favore. In questi primi momenti, la fisica deve essere spinta all'estremo e forse oltre la nostra attuale comprensione di essa, il che rende gli studi cosmologici della massima importanza.

Le osservazioni previste nel prossimo decennio hanno il potenziale per verificare specifiche previsioni di Inflazione e discriminare tra diverse versioni della teoria. Dovrebbe essere possibile testare la scala energetica dell'inflazione, la quantità di onde gravitazionali primordiali generate durante

inflazione, e la loro polarizzazione in modalità B indotta, e, allo stesso tempo, lo spettro delle perturbazioni iniziali, sia di tipo scalare che tensoriale.

Le osservazioni del CMB hanno un potenziale unico nell'indagine sull'inflazione: l'obiettivo principale a lungo termine è il rilevamento diretto dello spettro B-mode associato alle perturbazioni del tensore primordiale nell'Universo primordiale e fornirà una conferma decisiva dell'inflazione.

Tali mappe di polarizzazione profonda possono fornire indicazioni sulla scala dell'energia inflazionistica e sondare la fisica dell'energia ultraelevata a livelli superiori a quelli che possono essere ottenuti con qualsiasi acceleratore di particelle terrestre concepibile. Lo scopo ultimo di questa indagine è testare modelli inflazionistici verificando una sorta di coerenza tra perturbazioni scalari e tensoriali, misurando deviazioni dalla statistica gaussiana e ottenendo una determinazione ancora migliore dello spettro delle fluttuazioni primordiali.

L'ampiezza dei modi B indotti dalle onde gravitazionali è molto difficile da prevedere nel contesto di qualsiasi teoria, ma in genere si prevede che sia $<1\%$ dell'anisotropia della temperatura. Ciò impone nuovi requisiti impegnativi per gli strumenti e le tecniche di osservazione. Un elevato rapporto segnale-rumore, un'immagine del cielo intero richiesta per raggiungere questo obiettivo va oltre il prossimo futuro, ma è importante spostare alcuni passaggi intermedi che possono portare alla tecnologia necessaria.

I progressi nella tecnologia del bolometro e del ricevitore coerente sembrano promettenti, in particolare per i grandi array sul piano focale.

9.5 Interazioni fondamentali e costanti della Fisica

L'Universo è un laboratorio estremamente promettente per studiare la fisica fondamentale, e più specificamente le estensioni della fisica a energie molto elevate o scale spaziali molto piccole, come le proprietà dei neutrini, qualsiasi violazione delle leggi e delle simmetrie della **fisica fondamentale, la variazione dei costanti fisiche**, la scala energetica delle interazioni fondamentali, ecc.

Questi studi, rigorosamente interdisciplinari, hanno una profonda sinergia con la ricerca diretta del DM e di altre particelle effettuata nei nostri laboratori a terra e nell'astrofisica delle alte energie. Inoltre, l'approccio multifrequenza a questi studi cosmologici, possibile grazie alla varietà delle infrastrutture osservative, consente di aumentare significativamente il controllo della sistematica e, quindi, di raggiungere un'elevata affidabilità nelle risposte ai quesiti fondamentali sopra citati.

La cosmologia coinvolge grandi distanze, che ci consentono di indagare piccoli effetti che possono diventare rilevabili se integrati in tempi così lunghi, offrendo un'opportunità unica.

La determinazione di molte caratteristiche fisiche delle strutture nell'Universo (luminosità, massa, scale temporali dinamiche, tasso di formazione stellare, dimensione fisica ecc.) si basa sulla precedente conoscenza di una distanza. Diverse grandezze cosmologiche, come la costante di Hubble e i relativi parametri (ad es. la massa del neutrino), sono anch'esse fortemente legate alle distanze.

Le distanze sono anche un ingrediente chiave per comprendere i flussi di galassie su larga scala, quindi le distribuzioni di massa su larga scala.

9.6 La scala della distanza cosmica e il dibattito costante di Hubble

Determinare distanze accurate per un ampio campione di galassie entro il limite di ~ 200 Mpc è quindi una chiave per comprendere le proprietà delle componenti oscure nell'Universo, per creare un solido ancoraggio per la scala delle distanze extragalattiche, per la determinazione precisa dei parametri cosmologici, e studi sui flussi di galassie e, in definitiva, sulla distribuzione 3D dettagliata delle galassie come particelle di prova della struttura cosmologica su larga scala.

Il prossimo decennio sarà sicuramente un decennio critico per questo argomento. I risultati attesi da Gaia per la scala locale delle distanze, le indagini sulle supernove di tipo Ia (SNIa) per la scala cosmologica e i miglioramenti sugli indicatori di distanza a scala intermedia che colmano il divario tra il regime locale e quello cosmologico, consentiranno un salto di qualità nel campo, probabilmente raggiungendo la precisione dell'1% desiderata da tempo su larga scala tra dieci anni.

Le distanze locali che vengono fissate dalla missione Gaia saranno fondamentali per vincolare le scale di distanza degli indicatori di distanza primari e secondari attualmente adottati che vengono utilizzati per raggiungere distanze cosmologicamente interessanti e, a loro volta, per vincolare la costante di Hubble.

Tra gli indicatori primari di distanza, le Cefeidi classiche e le RR Lyrae sono le candele standard più importanti del Gruppo Locale, associate rispettivamente ai sistemi stellari pop I e pop II, adottati per calibrare diversi indicatori di distanza secondari. Grazie alla loro relazione con la Luminosità del Periodo (PL) e alla loro elevata luminosità intrinseca, le Cefeidi classiche ci consentono di determinare la distanza di sistemi stellari risolti lontani con recenti episodi di formazione stellare.

D'altra parte, la determinazione della distanza dei vecchi sistemi stellari può essere ottenuta dalle stelle RR Lyrae usando la loro relazione PL simile a una Cefeide nelle bande del vicino e medio infrarosso, così come la loro relazione Luminosità-Metallicità.

Gli indicatori secondari più utilizzati (es. Tully-Fisher, Supernovae di tipo Ia, Fluttuazioni di luminosità superficiale, Novae, Funzione di luminosità dell'ammasso globulare) sono calibrati utilizzando Cefeidi Classiche e/o Lire RR. Sulla base di questi indicatori, il valore stimato della costante di Hubble è $H_0 \sim 73$ km/sec/Mpc, in contrasto con il recente valore di 66 km/sec/Mpc ottenuto dall'analisi dei dati di Planck, sulla base del fondo cosmico a microonde. In questo contesto è fondamentale cercare di conciliare l'incongruenza tra i valori di H_0 attraverso calibrazioni più accurate dei diversi gradini della scala cosmica, e/o utilizzando indicatori di distanza direttamente in grado di raggiungere distanze cosmologicamente significative (es. scoperto Cefeidi a periodo ultra lungo, consentendoci potenzialmente di andare oltre 100 Mpc, la cui affidabilità come candele standard è allo studio). Questi studi saranno combinati con lo sviluppo di uno scenario teorico per stelle pulsanti, basato su modelli idrodinamici non lineari che includono un trattamento non locale della convezione dipendente dal tempo per diverse masse, luminosità e composizioni chimiche. Questi modelli ci permetteranno di riprodurre le proprietà osservate e di ricavare informazioni sia sui parametri stellari intrinseci che sulle distanze individuali e medie. Su questa base verrà fornita una calibrazione teoricamente supportata della scala delle distanze extragalattiche.

Per quanto riguarda gli indicatori di distanza secondari, le Supernovae (SNe) sono strumenti chiave per sondare la natura dell'Energia Oscura e saranno i principali bersagli di esperimenti futuri come, ad esempio, DES, Euclid, LSST, WFIRST. Questi esperimenti abatteranno drasticamente sia gli errori statistici (aumentando enormemente il numero di eventi scoperti) sia gli errori sistematici legati alla calibrazione fotometrica.

D'altra parte, per definire la calibrazione assoluta della scala delle distanze cosmiche e per controllare e tenere sotto controllo la possibile evoluzione cosmica delle proprietà SN, dobbiamo osservare in grande dettaglio un gran numero di SN nell'Universo locale. Le grandi differenze tra le SN osservate nei dati osservati richiedono di rivedere e migliorare lo schema di classificazione. A tal fine, le osservazioni spettrofotometriche sono cruciali per caratterizzare i parametri fisici delle esplosioni e le proprietà fisiche dei progenitori.

Nel frattempo, è obbligatorio verificare l'eventuale calibrazione del superluminoso SNe in modo da estendere la scala della distanza cosmica fino al redshift $z \sim 3-8$.

Tutti gli studi di cui sopra richiedono un'elevata frequenza temporale, un'ampia gamma di lunghezze d'onda e una buona risoluzione spettrale. L'indagine pubblica dell'ESO (PESSTO), ad esempio, ha insegnato che un rapido accesso a strumenti specializzati come X-Shooter al VLT, SOXS all'ESO-NTT e NTE al NOT è obbligatorio.

I dati acquisiti verranno utilizzati per rispondere a diverse domande aperte, tra le quali le più urgenti sono: comprendere la natura fisica dei progenitori SNIa (single-degenerato, doppio degenerato o entrambi; vincolare i canali che portano al super- o sub- esplosioni di massa di Chandrasekhar); definire la fonte di energia del superluminoso SNe (instabilità di coppia, collisione shell-shell, magnetar...); e altro ancora.

Nonostante l'indiscutibile potere di questi eventi superluminosi, SNe ha lo svantaggio di aver luogo in galassie imprevedibili e in luoghi imprevedibili nelle galassie. Quindi, sono necessari uno o più indicatori di distanza extragalattici per far corrispondere la scala delle distanze dell'Universo locale, mappato con Gaia, al regime di z alto in cui le SNe sono più efficienti. Una delle tecniche più promettenti per tale intervallo è il metodo SBF (Surface Brightness Fluctuations).

Ad oggi, la tipica incertezza complessiva sulle distanze SBF è $\sim 0,10$ mag ($\sim 5\%$ sulle distanze lineari). Una grande frazione dell'errore totale deriva dalla calibrazione del punto zero ($\sim 0,08$ mag), basata sulle distanze delle Cefeidi. Si prevede che i risultati di Gaia riducano tale componente del budget di errore a un fattore trascurabile ($< 0,02$ mag).

Da qui, nel prossimo decennio, lo studio delle distanze extragalattiche con SBF, accoppiando i piccoli errori statistici e sistematici del metodo, con a) l'ampio range di distanze alla portata con SBF, e b) l'ampio campione di target disponibili grazie ai rilievi in corso (con VST o CFHT) e/o programmati ottici/near-IR (con LSST, o Euclid), ci permetteranno di trovare risposte a molte delle domande aperte relative alla necessità di accuratezza, ovvero $\sim 1\%$ preciso, distanze. Su scale ancora più grandi e distanze spazio-temporali, le oscillazioni acustiche barioniche offrono un altro importante strumento per misurare le distanze angolari. Il metodo si basa sulle impronte lasciate sullo spettro di potenza dipendente dal redshift e sulle funzioni di correlazione delle galassie e sulla trasmissione di IGM da perturbazioni acustiche del plasma durante la ricombinazione.

Questo metodo sarà sfruttato sistematicamente da rilevamenti all-sky (LSST, Euclid).

Domanda chiave	Metodo	Progetto
La natura della materia oscura	Dinamica delle galassie e ammassi di galassie	VLT LBT ELT Euclide LSST JWST
	Crescita della struttura Rilievi di galassie	SKA Euclide VLT VST LSST
	Fluttuazioni di densità del IGM	VLT, ELT

	Emissione da annientamento DM	FERMI, XMM CTA Atena
La natura dell'Energia Oscura	Lente gravitazionale	Euclide LSST
	Crescita della struttura Rilievi di galassie	SKA Euclide VLT VST LSST
Comprendere la gravità su grandi scale cosmologiche	Struttura su larga scala Prova di sabbiatura	Euclide ELT SKA
Condizioni iniziali della Cosmologia	Polarizzazione CMB e distorsioni spettrali Lente forte e debole, taglio cosmico Indagini sulle galassie Dinamica dei cluster	Euclide LSST VST VISTA
Costanti fondamentali e principi della fisica	Variazione di fondamentale costanti	VLT, ELT
	Interazioni ad alta energia Propagazione di fotoni anomali	CTA
La scala della distanza cosmica e il dibattito costante di Hubble	Parallassi Candele/bastoni standard SNIa, BAO	Gaia Euclide TNG HST VLT JWST ELT

10 Tecnologie abilitanti

Oggi siamo entrati nell'era dei progetti estremamente grandi (es. ELTs, SKA, CTA, Euclid, PLATO, ATHENA, JUICE, LISA, ecc.) in astronomia, che coinvolgono sostanzialmente l'intera comunità internazionale. La comunità INAF deve svolgere un ruolo centrale in questo quadro, entrambi scientificamente, accedendo e sfruttando strumentazioni così avanzate, e tecnologicamente, partecipando con ruoli di rilievo alla progettazione, sviluppo e costruzione grazie alle proprie capacità all'avanguardia.

Per raggiungere questi ambiziosi risultati, gli sviluppi e le attività tecnologiche dovrebbero essere incoraggiati, sostenuti e adeguatamente finanziati dall'istituto stesso. Il sostegno non dovrebbe limitarsi ad attività consolidate in progetti già selezionati, ma dovrebbe includere attività di R&S volte a guidare e/o mantenere l'INAF ai massimi livelli nel contesto internazionale. Per questo motivo, il sostegno dovrebbe concentrarsi principalmente sui settori in cui l'INAF ha dimostrato un alto grado di eccellenza.

Anche se il processo non è semplice, le attività di R&S possono comportare il trasferimento di tecnologia alle industrie e, alla fine, alla Società, portando potenzialmente un ampio vantaggio. Tali attività hanno potenzialmente la capacità di attrarre finanziamenti aggiuntivi da fonti esterne e/o di migliorare i fondi ministeriali quando vengono rivendicati risultati importanti.

10.1 Sistema opto-meccanico per l'astronomia VIS/NIR

Poiché i sistemi opto-meccanici sono alla base di ogni nuova strumentazione e telescopio, lo studio e la costruzione in corso di Extremely Large Telescopes (e dei loro analoghi solari, EST e ATST) e delle nuove missioni spaziali richiedono nuove sfide da affrontare in questo campo, con una gamma molto ampia di strumenti diversi da sfruttare e un numero enorme di casi scientifici da realizzare.

10.1.1 Spettrometri e dispersori ad alta efficienza

La spettroscopia nell'ottica e nel vicino IR è uno strumento fondamentale e unico per studiare le questioni chiave dell'astrofisica moderna, dall'analisi chimica delle atmosfere di pianeti extrasolari alla caratterizzazione fisica dei primi oggetti ad alti spostamenti verso il rosso. I nuovi strumenti previsti nella tabella di marcia per telescopi grandi (classe VLT) e giganti (classe ELT) comprendono principalmente **spettrometri ottici e nel vicino infrarosso**. Inoltre, un gran numero di indagini presenti e future, sia terrestri che spaziali, deve essere accompagnato da osservazioni spettroscopiche di follow-up.

L'INAF ha contribuito - e partecipa attivamente - alla progettazione e costruzione di numerosi spettrometri (es. gli strumenti ESO VIMOS, X-SHOOTER, ESPRESSO, MOONS, SOXS). Tali contributi hanno favorito attività di ricerca e sviluppo - in collaborazione con Industrie italiane specializzate - sui sottosistemi e le tecnologie più cruciali relativi alla progettazione e integrazione degli spettrometri, ed in particolare:

nuove tecnologie per dispersori ad alta efficienza
ottimizzazione del sottosistema criogenico
tecnologie di progettazione e allineamento opto-meccaniche di alta precisione

Gli elementi di dispersione svolgono un ruolo fondamentale negli spettrografi astronomici per definire la risoluzione, la capacità di dispersione e l'efficienza complessiva dello strumento. Negli ultimi anni è stato condotto uno studio interdisciplinare sui **grismi di silicio**, che ha coinvolto INAF e CNR. Il silicio è un materiale con un'ampia banda di trasmissione di lunghezza d'onda (da 1 a 100+ μm) ed è il materiale più adatto per realizzare dispositivi di dispersione di trasmissione ad alta efficienza nel

infrarossi, sia per applicazioni terrestri che spaziali. A causa della natura cristallina del silicio, possono essere utilizzate solo le nanotecnologie ed è stata fatta una buona esperienza in questo campo, che alla fine ha prodotto un grism di silicio funzionante in banda H, attualmente installato nella telecamera NICS di TNG. Pochi altri gruppi e laboratori (Penn State University, Università del Texas ad Austin) al mondo possono fornire esperienza e tecnologia per costruire tali dispositivi. Gli spettrografi a bassa e media risoluzione hanno beneficiato negli ultimi 15 anni dell'evoluzione dei **reticoli olografici in fase volume** (VPHG) che mostrano efficienze superiori al 90%, facile personalizzazione e buona stabilità. Più recentemente stanno entrando in questo campo nuove tecnologie, come i **reticoli litografici**. Tale tipo di tecnologia consente in linea di principio di aumentare l'efficienza e, allo stesso tempo, di ridurre l'ingombro complessivo della strumentazione rispetto al classico reticolo, aprendo lo scenario a un nuovo concetto progettuale di spettrografo. L'INAF è oggi riconosciuta come leader internazionale in questo campo tecnologico come dimostrato dalla partecipazione a MOONS, WEAVE, SOXS ed ESPRESSO.

L'INAF vanta un'esperienza ventennale nella progettazione e costruzione di **spettrometri criogenici** funzionanti a lunghezze d'onda dell'infrarosso. Attualmente, l'INAF è leader mondiale nel campo della spettroscopia infrarossa ad alta risoluzione, grazie allo strumento GIANO all'interno del Telescopio Nazionale Galileo. La progettazione e realizzazione di questo spettrometro è stata resa possibile da una profonda e continua collaborazione con Industrie italiane altamente specializzate nel campo della criogenia e dell'ottica. Questa collaborazione ha sfruttato anche la sperimentazione di nuove tecnologie relative alla micro-ottica per fibra-IR e relative interfacce criogeniche. Gli obiettivi futuri dovrebbero essere lo sviluppo di criostati ultra stabili (variazioni di temperatura inferiori a 0,001 K/giorno) e rivestimenti con un'efficienza molto elevata (perdite inferiori allo 0,3% per superficie sull'intera banda dell'infrarosso) per ottiche criogeniche di grandi dimensioni. Tutte queste attività saranno focalizzate all'ottimizzazione delle prestazioni degli spettrometri destinati alla strumentazione per Telescopi di Classe Estremamente Grande dove l'INAF assumerà la Leadership Europea nel prossimo decennio grazie ad HIRES.

Le collaborazioni INAF in molti spettrometri europei, (es. gli strumenti ESO VIMOS, X-SHOOTER, ESPRESSO, MOONS, SOXS) hanno consentito l'espansione del know-how e del patrimonio nelle attività di progettazione, integrazione e test. Nuovi strumenti devono affrontare telescopi più grandi e requisiti tecnici più esigenti (ad es. stabilità, dimensioni, leggerezza). L'INAF sta attualmente svolgendo un ruolo di primo piano nell'implementazione di tecniche innovative sia nel campo della progettazione che in quello dell'Allineamento, Integrazione e Verifica (AIV).

Nuove tecniche di progettazione e ingegneria dei sistemi orientate alla progettazione multidisciplinare integrata accoppiata a modelli parametrici end-to-end in fase iniziale sono state adottate per gli strumenti del passato (X-Shooter e ESPRESSO @ VLT) e si stanno evolvendo verso nuove classi (HIRES @ EELT). Nuove **tecniche di allineamento** sono state sviluppate a partire da precedenti investimenti che hanno consentito l'acquisizione di metrologia all'avanguardia. Nuovi parametri in termini di tempo, efficienza, ripetibilità e stabilità sono definiti nel campo dell'integrazione opto-meccanica.

In dettaglio, l'allineamento opto-meccanico basato sulla **metrologia meccanica fine** può ridurre i tempi di lavoro anche di grandi strumentazioni. L'accoppiamento delle tecnologie di metrologia meccanica con la misura ottica diretta consente un ulteriore passo nella caratterizzazione precisa delle interfacce meccaniche rispetto a quelle ottiche. Una grande strumentazione (es. HIRES, MAORY) trarrebbe grandi benefici dall'uso di queste tecniche in quanto semplifica notevolmente le fasi di integrazione.

10.1.2 Sistemi optomeccanici ad ampio campo

La scienza galattica ed extragalattica spesso richiede un campo visivo notevolmente più ampio di quelli disponibili negli strumenti convenzionali. Ci sono pochi telescopi di classe 8 m oggi dotati di strumenti a campo molto ampio, come LBT (dotato della Large Binocular Camera,

23'x25' FoV), il telescopio Magellan (Megacam, 25'x25' FoV) e il telescopio Subaru (Hyper Suprime Cam, 34'x27' FoV). Inoltre, diversi siti astronomici hanno telescopi di classe 2-3 m dotati di imager ad ampio campo, come l'MPG/ESO da 2,2 m a la Silla (WFI, 34'x33' FoV), il telescopio VST da 2,6 m (1°x1° FoV) e il telescopio VISTA 4.1m (1.5°x1.5° FoV), essendo gli ultimi due situati a Paranal e dedicati rispettivamente all'imaging ad ampio campo nel visibile e nel vicino infrarosso. Il consenso generale è che, nell'era dei telescopi estremamente grandi, ci saranno ancora più telescopi di classe 8-10 m dedicati al Large Field, e questo fatto pone diverse sfide tecnologiche opto-meccaniche. Tali strumenti ad ampio campo richiedono normalmente correttori caratterizzati da **ottiche molto ampie e veloci** (talvolta con **abbassamento asferico**), al limite dell'attuale fattibilità tecnologica e molto impegnative dal punto di vista progettuale opto-meccanico. Questo insieme di problemi deve essere affrontato anche nella strumentazione spaziale come nel caso di PLATO. L'INAF è stata coinvolta negli anni passati in alcuni progetti ad ampio campo, progettando sia telescopi che strumenti dedicati a questo scopo. Il VST del Paranal è un grande telescopio da campo interamente dedicato a rilievi ad ampio campo, ed è stato interamente progettato e costruito in Italia. L'LBC a LBT è uno strumento a doppia telecamera, con i due canali ottimizzati per lavorare uno nella lunghezza d'onda rossa e l'altra in quella blu della banda visibile.

10.1.3 Produzione e collaudo di ottiche asferiche a forma libera e fuori asse

Nell'era dell'Extremely Large Telescope, le dimensioni dell'ottica sia del telescopio che della strumentazione sono state notevolmente aumentate. In aggiunta a ciò, la migliore produzione di **ottiche asferiche a forma libera e fuori asse** consente un design ottico molto più performante da un lato ma più complesso dall'altro. La possibilità di realizzare ottiche così complesse è direttamente correlata alla capacità di misurare le superfici con la giusta precisione. Grazie a numerose sovvenzioni nazionali e internazionali, INAF ha implementato un'attività di ricerca e sviluppo integrata orientata a unire e ottimizzare le tecniche di produzione ottica con diversi approcci di test. L'attività di ricerca su tecniche di lucidatura nuove e/o ottimizzate è orientata sulla combinazione tra lucidatura a cappello e lucidatura fluida con Ion Beam Figuring che consente di ottimizzare gli errori superficiali da centinaia di micron da picco a valle fino a poche decine di nanometri. Questa ottimizzazione delle tecniche di fabbricazione innesca lo sviluppo della relativa metrologia; il test e la calibrazione di ottiche di classe metro con elevata precisione è un compito complesso, poiché sono intrinsecamente difficili da misurare a causa delle dimensioni del raggio di riferimento dell'interferometro e, eventualmente, dell'ottica di riferimento. Sono stati implementati diversi approcci per poter catturare tutte le caratteristiche ottiche a partire dagli ordini bassi (spaziali) fino a quelli alti (e molto alti). Il punto critico è il riferimento da utilizzare per la misurazione. Sono state adottate e implementate diverse soluzioni: oltre al tradizionale sistema di nulling basato su lente, quello basato su un ologramma generato dal computer è in grado di combinare sia una superficie di riferimento accurata che strumenti di autoallineamento, superando il problema dimensionale dell'ottica nulla.

10.1.4 Sviluppo e ottimizzazione dei sistemi coronografici

La ricerca di esopianeti è diventata molto popolare negli ultimi anni, sia perché si tratta di un campo scientifico molto interessante e popolare non solo tra gli astronomi, sia perché la tecnologia sta migliorando molto rapidamente, rendendo possibilmente fattibile, nel prossimo futuro, l'imaging diretto di pianeti rocciosi simili alla Terra. Anche se l'altissima risoluzione richiesta per le osservazioni sarà fornita dalla prossima generazione di ELT, le eccellenti prestazioni dei sistemi AO di ultima generazione e una serie di nuove tecniche coronografiche molto efficienti hanno spinto diversi telescopi di classe 8-10m ad implementare strumenti dedicati alla ritrovamento del pianeta. SFERA@VLT,

GPI@GEMINI e SCEXAO@SUBARU stanno operando regolarmente rilievi per rilevare e caratterizzare esopianeti, eseguendo anche il follow-up di missioni spaziali (come Kepler) che stanno creando cataloghi di pianeti candidati. Questi strumenti sono strategici anche come pathfinder per gli ELT, dove la maggiore risoluzione consentirà di cercare pianeti più vicini alla stella ospitante, aumentando così la possibilità di osservare i pianeti rocciosi. L'INAF sta progettando e realizzando SHARK, uno strumento per LBT dedicato principalmente alla ricerca di pianeti, che eseguirà **l'imaging coronografico** e la spettroscopia a bassa risoluzione sia nella banda ottica che nel vicino IR. Poiché la scala temporale della prima luce degli ELT è di circa 10-15 anni da oggi, tutti i risultati ottenuti in questo campo nei prossimi anni saranno particolarmente preziosi per essere eventualmente retrofit nella progettazione e nello sviluppo opto-meccanici dei cercapianeti degli ELT. Ci sono diverse sfide, riguardanti lo sviluppo opto-meccanico, inerenti agli strumenti coronografici. L'estrema risoluzione necessaria richiede una qualità ottica fornita che deve essere estremamente buona, con un impatto su:

- il design ottico, che deve fornire una qualità ottica intrinseca quasi perfetta • il design meccanico, che deve garantire flessioni molto basse e un'ottima termica stabilità per non deteriorare la qualità dell'immagine
- le tolleranze di fabbricazione molto strette per l'ottica, che richiedono anche un'eccellente planarità e una microrugosità all'avanguardia per ridurre al minimo la luce diffusa
- l'impegnativa procedura AIV, che deve mantenere la qualità ottica finale consegnata a valori estremamente elevati

Per la realizzazione dei componenti opto-meccanici è obbligatoria la collaborazione con le industrie per la produzione di elementi allo stato dell'arte ed eventualmente per spingere alcune caratteristiche ottiche (es. microrugosità) a valori mai raggiunti in passato .

10.1.5 Tecnologie di eliminazione del calore

I prossimi telescopi solari di classe 4m presentano nuovi problemi tecnologici da affrontare. Uno dei più fastidiosi è la dissipazione della grandissima quantità di calore raccolta dagli specchi primari senza influenzare la visione locale. La soluzione adottata prevede la realizzazione di un **dissipatore di calore**, che si basa sul know-how della tecnologia dei reattori nucleari per scambiare efficacemente il calore tra il refrigerante e la superficie riscaldata. Dal 2009 la comunità italiana coinvolta nello studio progettuale EST sta lavorando in stretto collegamento con i partner industriali alla realizzazione di un tale dissipatore di calore. Questo studio è stato finanziato attraverso una sovvenzione UE-FP7 e nel 2013 è stato ulteriormente finanziato attraverso una sovvenzione UE-H2020 per produrre un prototipo funzionante in scala da installare nel focus principale del telescopio GREGOR. Il termoreietto è una parte fondamentale del telescopio solare EST, e sia il caso tecnologico che le soluzioni innovative adottate ne fanno un caso unico al mondo, con la comunità scientifica e tecnologica italiana in prima linea nell'innovazione.

10.1.6 Spettro-polarimetri La

polarimetria è un potente strumento diagnostico per lo studio delle sorgenti astrofisiche. I meccanismi di radiazione che producono un'emissione di radiazione simile possono essere districati per mezzo delle loro firme di polarizzazione. Inoltre, la polarizzazione fornisce intuizioni uniche sulla geometria delle sorgenti irrisolte, anche a distanze cosmologiche, che rimangono nascoste nella luce integrata. In una scienza osservativa come l'astronomia, questo ha un peso ancora maggiore perché la polarimetria va direttamente al cuore del problema, ovvero il processo fisico sottostante. L'INAF ha una grande esperienza nella costruzione di unità polarimetriche, ad esempio SARG, PAOLO, CAOS e HARPS -Nord, e allo studio di Fase A dello spettropolarimetro ad alta risoluzione per ELT con l'obiettivo di implementare un'unità polarimetrica.

La disponibilità di efficienti sistemi di ottica adattiva presso i principali **telescopi solari** ha reso possibile l'uso di routine di strumenti ad alto rendimento basati su più **interferometri Fabry-Perot**, eseguendo spettroscopia di campo integrale (imaging) e polarimetria. In condizioni di visibilità stabili fornite dall'AO, questi strumenti possono superare i limiti degli spettrografi a fessura (copertura spaziale molto limitata) o dei filtri a banda larga (poca discriminazione spettrale). Gli spettrometri di imaging si sono dimostrati molto efficienti nell'ottenere informazioni spettrali e polarimetriche rapide e affidabili su un campo visivo esteso. Questi ultimi

le caratteristiche osservative sono di fondamentale importanza per tenere conto sia dei moti convettivi su larga scala, sia della connettività magnetica di regioni ampiamente separate, di particolare rilevanza nella cromosfera. Al momento, sono disponibili solo quattro spettropolarimetri di imaging basati sull'interferometro Fabry-Perot per le osservazioni solari. Tra questi, IBIS Italian Interferometric Bldimensional Spectrometer (IBIS) è un doppio sistema Fabry-Perot sviluppato all'INAF con il contributo delle Università di Firenze e Tor Vergata.

Date le eccellenti prestazioni, è ormai chiaro che gli spettropolarimetri di imaging rappresenteranno i "cavalli da lavoro" dei futuri telescopi solari di classe 4m. Entrambi DKIST (Daniel K.

Inosouke Telescope) e EST (European Solar Telescope) prevedono di avere diversi strumenti di questo tipo che lavorano in parallelo in diverse gamme spettrali. Nessun altro strumento operatorio di questo tipo, né previsto per i prossimi anni, possiede la stessa potenza diagnostica e versatilità di IBIS. Investire nello sviluppo di questa tecnologia consentirà agli scienziati italiani di mantenere un ruolo di primo piano all'interno della comunità solare interessata alle osservazioni da terra.

Infatti, l'esperienza maturata negli anni passati nella progettazione, assemblaggio e aggiornamento di IBIS è un asset importante per la partecipazione italiana ai telescopi solari del futuro.

Di conseguenza, gli scienziati italiani hanno già un ruolo attivo in gruppi di lavoro internazionali incaricati di studiare la progettazione e il funzionamento di diversi sottosistemi, inclusi simili imager spettropolarimetri, per questi futuri grandi telescopi solari.

10.1.7 Sistemi di optomeccanica meteorologica spaziale

C'è un bisogno crescente di imager sinottici del Sole, in grado di fornire magnetogrammi e dopplergrammi ad alta cadenza per diversi scopi scientifici: ricerca delle onde gravitazionali sulla superficie solare, studi sui transitori veloci dalle regioni attive, l'analisi dettagliata dell'evoluzione del campo magnetico fotosferico durante e prima di razzi e CME, nonché usi meteorologici spaziali.

Oggi, l'Italia ha una leadership riconosciuta nella progettazione e sviluppo di sistemi di optomeccanica basati su Filtri ottici Magneto per acquisire immagini spettro-polarimetriche full disk. Per le loro caratteristiche (stabilità spettrale assoluta, imaging e misura sia del campo magnetico che della velocità LoS associate a diverse altezze dell'atmosfera solare) questi strumenti sono più adatti per acquisire set di dati per l'elenco di attività scientifiche di cui sopra. In particolare, sono di estremo interesse per l'applicazione della meteorologia spaziale, poiché possono essere utilizzati sia per il calcolo di proxy dell'attività solare che per la possibile previsione di eventi di brillamento.

L'Italia ha un ruolo strategico a livello internazionale, come testimoniano le numerose collaborazioni in corso (es. Hawaii University, JPL) e progetti finanziati (es. MAP, ASI). L'Italia dispone dell'unico laboratorio idoneo per il test e la calibrazione delle celle MOF e del know-how per progettare e realizzare sia l'optomeccanica dell'intero sistema di acquisizione che il software di gestione dello strumento e di calibrazione dei dati. Tra i possibili sviluppi futuri, sono già in corso collaborazioni per un'implementazione su mongolfiera, per la realizzazione di un prototipo ad alto TRL per ambiente spaziale (per le prossime missioni meteorologiche spaziali) e anche per un utilizzo in tandem con un interferometro Fabry-Perot per studi ad alta cadenza di onde MHD nell'atmosfera solare.

10.2 Ottica attiva e adattiva

L'ottica attiva e adattiva in astronomia è stata storicamente un affare europeo, con un progresso parallelo e per lo più inapplicabile realizzato all'estero nel contesto dell'applicazione militare e strategica all'epoca della Ronald Reagan Strategic Defense Initiative. Con lo sviluppo di TNG e LBT, tuttavia, l'impronta italiana sul campo è diventata sempre più rilevante dando un sapore unico alla comunità astronomica italiana coinvolta in tale campo, insieme alla scuola francese, che è l'unica altra significativa in quest'area. Mentre all'interno dell'ESO nasce il pioniere dell'ottica attiva (sebbene in connessione con l'industria italiana, tanto che nello sviluppo del TNG c'è stato un percorso privilegiato per acquisire e padroneggiare la relativa tecnologia in Italia) e il primo sistema europeo di ottica adattiva parlava francese, gran parte delle innovazioni, sia in termini di componenti, concetti e realizzazioni, sono contrassegnate da un'insigne bandiera italiana. Grandi specchi sottili, azionati da forza, deformabili (comunemente detti "specchi adattativi secondari") non sono solo sviluppati e oggi sostanzialmente prodotti esclusivamente attraverso lo sviluppo dell'INAF e una rete di industrie italiane, essenzialmente in regime di monopolio, ma il fronte d'onda più apprezzato tecniche di rilevamento (con il sensore piramidale che è il più importante di una lunga lista) con una serie di approcci, in gran parte già dimostrati sul cielo, provengono sempre dall'INAF. Un ruolo chiave è stato svolto dall'INAF nello sviluppo dell'Ottica Adattiva Multi-Coniugata, una tecnica per l'estensione del campo visivo corretto, che si basa sull'uso di molteplici specchi adattativi e molteplici sorgenti di riferimento: in particolare, l'INAF si è occupata di L'ESO nell'esperimento VLT/MAD per la prima dimostrazione in cielo dell'ottica adattiva multiconiugata. Tale leadership è ovviamente contestata, principalmente da altri gruppi europei, con l'attenzione agli approcci non convenzionali nell'ottica adattiva, come l'implementazione dell'ottica adattiva multioggetto, un'area in cui Francia, Paesi Bassi e Regno Unito hanno trascorso un periodo significativo, soprattutto in vista del multiplexing strumenti, un'area dove recentemente poco è stato perseguito da parte italiana. Il collegamento con l'industria a livello di componenti ha reso l'offerta italiana unica, mentre a livello di Prime Contractor non ci sono ancora prove di industrie fortemente coinvolte in tale campo.

10.2.1 Ottica attiva

L' **ottica attiva**, inventata all'ESO e applicata per la prima volta all'NTT (il cui design è stato utilizzato anche per il TNG italiano) ha consentito uno storico miglioramento della qualità dell'immagine dei telescopi ottici, che ora possono fornire immagini limitate anche nei migliori siti astronomici o, in collaborazione con i compagni del sistema di ottica adattiva, scendono al limite di diffrazione.

L'ottica attiva è diventata un componente fondamentale di qualsiasi telescopio moderno con diametri dello specchio pari o superiore a 2 m e, nel futuro a lungo termine, sicuramente sarà ancora uno dei sistemi base di qualsiasi telescopio ottico (e non solo) di prim'ordine. Nei prossimi telescopi estremamente grandi, parte del controllo del fronte d'onda sarà sotto la responsabilità del sistema di correzione a bassa frequenza (attivo) che mirerà a rimuovere la maggior parte degli errori del sistema fisico, lasciando al sistema ad alta frequenza (adattivo) le restanti correzioni. Sebbene l'ottica attiva possa essere considerata una tecnologia matura, il numero dei sistemi esistenti è ancora piuttosto ridotto, limitato ai telescopi da 2 a 10 metri costruiti dopo gli anni Novanta. In realtà, l'implementazione richiede sempre un design personalizzato, dove la combinazione italiana di INAF + industria ha avuto un ruolo di primo piano in progetti come TNG, LBT, VST. Prospettive interessanti per nuovi sviluppi si trovano nella classe emergente dei telescopi ad ampio campo (es. VST, VISTA, il futuro LSST), dove ci sono

requisiti più severi per l'allineamento e quindi per i sistemi di ottica attiva, ponendo nuove sfide e ampliando il paradigma. In tale classe di telescopi, le informazioni sulle aberrazioni del telescopio possono essere ottenute analizzando le variazioni di ellitticità delle stelle attraverso il campo nell'immagine scientifica, eliminando potenzialmente la necessità di un sensore del fronte d'onda "fisico". Tale tecnica, nata nell'ambito del VST, è un esempio del potenziale innovativo italiano nel campo dell'ottica attiva. La combinazione delle competenze INAF e di diverse PMI italiane ha avuto successo in diversi progetti, in cui la progettazione è stata parzialmente o totalmente (come nel caso VST più recente) realizzata in Italia. Grazie anche a una lunga collaborazione con gli inventori dell'ottica attiva dell'ESO, INAF ha sviluppato un enorme know-how e ora padroneggia questa tecnologia. Questa competenza è interessante anche per l'industria italiana che ha bisogno (e talvolta ricerca) della collaborazione INAF per il suo posizionamento nel mercato mondiale della progettazione di sistemi telescopici.

10.2.2 Il sistema di Ottica Adattiva MAORY

MAORY (Multi conjugate Adaptive Optics RelaY) è uno dei quattro strumenti ELT di prima luce approvati per la costruzione: è un modulo di ottica adattiva, progettato per consentire osservazioni ad alta risoluzione angolare nel vicino infrarosso con l'ELT, offrendo due modalità di ottica adattiva: Ottica adattiva multiconiugata e monoconiugata. Il suo sistema di rilevamento del fronte d'onda si basa sull'uso di stelle guida laser mesosferiche e stelle naturali. La compensazione del fronte d'onda viene eseguita dagli specchi adattivi e inclinabili del telescopio M4 e M5 e da specchi adattivi aggiuntivi all'interno del treno ottico dello strumento. I driver di progettazione chiave per la modalità Multi-Conjugate Adaptive Optics sono l'uniformità della compensazione nel campo visivo, la stabilità delle prestazioni al variare delle condizioni esterne e la copertura del cielo, ovvero la capacità di ottenere le prestazioni nominali su un'ampia frazione del cielo osservabile. MAORY è uno strumento di grandi dimensioni: secondo il disegno attuale, occupa un volume cubico di circa 8 metri di lato. Il design dello strumento si basa su tecnologie all'avanguardia in diversi campi come ottica adattiva, specchi adattivi, telecamere ottiche e a infrarossi veloci a basso rumore, calcolo in tempo reale, componenti ottici asferici fuori asse di classe 1 metro e meccanica di precisione. Lo sviluppo di uno strumento così complesso richiede approcci avanzati di gestione del progetto, ingegneria dei sistemi e garanzia del prodotto, simili a quelli richiesti per un progetto spaziale. L'INAF è l'istituto capofila del progetto MAORY: è responsabile della progettazione, costruzione, integrazione e messa in servizio dello strumento. Lo sviluppo tempestivo e di successo di questo strumento rappresenta per l'INAF uno sforzo importante e anche un'opportunità per consolidare le competenze dell'istituto e la sua capacità di gestire grandi progetti strumentali. Il Guaranteed Time Observations sul PFU sarà concesso all'INAF per la costruzione dello strumento. Una stretta sinergia per tutta la durata del progetto tra gli scienziati dell'INAF e il team tecnico che sta progettando e costruendo lo strumento è la porta per garantire l'efficace sfruttamento scientifico dell'ELT e della sua strumentazione.

10.2.3 Caratterizzazione e previsione della turbolenza ottica

La **previsione della turbolenza ottica** (OT) può essere molto critica e impegnativa per supportare le osservazioni Service/Queue Mode che tutti i telescopi e gli ELT di prima classe stanno pianificando di implementare per ottimizzare l'uso di diverse strumentazioni, in particolare quelle supportate da AO e/ o interferometria. L'impatto scientifico delle nuove strutture/tecniche AO dipenderà fortemente dall'efficienza delle osservazioni. Il peggior nemico da battere è la turbolenza. I driver scientifici più importanti sono l'identificazione delle finestre temporali con l'eccellenza condizioni di turbolenza per portare avanti i programmi scientifici più impegnativi e ottimali

gestione delle osservazioni. L'INAF ha raggiunto un ruolo di primo piano a livello internazionale nelle ricerche sulla previsione della turbolenza ottica (OT) per applicazioni all'astronomia da terra. L'INAF ha già implementato un sistema completamente automatico ed operativo (Centro ALTA) per la previsione notturna di OT e parametri atmosferici rilevanti per le osservazioni da terra come parte integrante del sistema Service Mode di LBTO. Un sistema simile è in discussione con l'ESO per VLT (Cerro Paranal) ed ELT (Cerro Armazones). È stato espresso l'interesse di altri telescopi/siti di prim'ordine nel mondo (Cerro Pachon-Gemini, Roque de Los Muchachos-GTC/TMT, Las Campanas-GMT).

Vale la pena menzionare qui un paio di risultati interessanti:

- Sviluppo di algoritmi per la parametrizzazione OT in modelli numerici a mesoscala non idrostatici in regimi stabili e fortemente stabili per migliorare le prestazioni del modello. Questi regimi sono quelli che caratterizzano la notte e corrispondono alle condizioni più difficili dal punto di vista teorico.
- Previsioni d'insieme OT, ovvero fornire informazioni sulla previsione OT in termini di probabilità. Dovrebbe rappresentare un importante cambio di paradigma della previsione OT e ci aspettiamo un impatto molto maggiore sull'applicazione del Queue Mode.

La convalida del modello in condizioni diurne è importante per le applicazioni ai sistemi AO solari, ma può avere importanti applicazioni in contesti diversi dall'astronomia che richiede previsioni del modello sull'intera scala temporale di 24 ore. Tra questi ricordiamo la comunicazione ottica da satelliti in orbita terrestre bassa (LEO) o geostazionaria (GEO) (è in discussione un contratto con ONERA/CNES); cambiamento climatico globale (una questione sociale cruciale) strettamente correlato alla capacità dei modelli di ricostruire bene il flusso atmosferico

idrodinamico in regimi stabili; energie sostenibili e aviazione civile a causa della turbolenza dell'aria limpida. Attualmente esistono diversi strumenti concepiti per le misure OT ma non sono ancora trascurabili importanti incertezze tra le diverse strumentazioni. I principali problemi di sfida strettamente legati allo sviluppo della strumentazione nel prossimo decennio sono qui riassunti. L'INAF è direttamente coinvolta in tutte queste attività di ricerca. È possibile identificare un insieme di obiettivi principali:

- Quantificazione della misura assoluta della turbolenza ottica.
- Sviluppo di profilatori verticali (monitor) con risoluzione verticale più o meno elevata.
- Misure OT fornite dai sistemi AO.
- Effetti della scala esterna.
- Effetti della scintillazione.

10.2.4 Ottica attiva per antenne radio

Il concetto di **ottica attiva** si trova anche nelle moderne **antenne radio di grandi dimensioni**. Le deformazioni termomeccaniche, indotte dalla gravità e dall'isolamento, possono impedire le osservazioni a una data frequenza a causa della distorsione del fronte d'onda. Come nel caso del telescopio ottico, la sagomatura del riflettore deve raggiungere una precisione di circa $\lambda/10$ della frequenza di osservazione. Ad esempio, per osservare un 100 GHz, è necessario raggiungere una sagomatura del riflettore con una precisione di 0,15 mm (tenendo conto della corsa all'indietro dal riflettore principale). Per i radiotelescopi di classe dieci metri è obbligatoria una sagomatura attiva del riflettore per raggiungere il limite di diffrazione. Ciò viene fatto utilizzando fino a centinaia di attuatori lungo l'area della parabola. Mentre per i telescopi nel visibile sono stati sviluppati sistemi di controllo della deformazione indotta (close-loop control) (tra gli altri Shack-Hartmann e sensori piramidali), la controparte in radiofrequenza non è ancora stata sviluppata: infatti una radio-antenna ad ottica attiva opera in regime ad anello aperto. L'INAF possiede il secondo radiotelescopio attivo più grande al mondo (il Sardinia Radio Telescope, SRT, con una parabola principale di 64 metri, mentre il maggiore è il Green Bank Telescope, un 100 metri

piatto situato in WV - USA). La comunità astronomica italiana è quindi direttamente coinvolta nella ricerca di soluzioni per questo problema molto impegnativo e consigliamo di impegnarsi molto per risolvere questa domanda.

10.2.5 Sistemi AO privi di polarizzazione

Negli ultimi dieci anni l'AO solare è diventata una tecnologia affidabile, abitualmente utilizzata per osservazioni spettro-polarimetriche ad alta risoluzione dell'atmosfera solare. Ciò ha permesso di studiare la complessa interazione tra plasma e campo magnetico, necessaria per comprendere i meccanismi che portano all'insorgenza di eventi meteorologici spaziali impulsivi. Questi eventi, che hanno un impatto diretto sulle infrastrutture critiche, come ad esempio operazioni satellitari, reti elettriche, comunicazioni, aviazione e sistemi di posizionamento globale come GPS e GALILEO, possono causare importanti conseguenze economiche. Per questi motivi, molto recentemente, il prossimo European Solar Telescope (EST) di classe 4 metri, la cui fase di costruzione dovrebbe iniziare nel 2019 e la prima luce prevista nel 2026, è stato incluso nella roadmap ESFRI 2016. EST fornirà osservazioni spaziali molto elevate (20-30 km sulla fotosfera), spettrali ($R > 300000$) e temporali (pochi secondi) dell'atmosfera solare, con un'elevata precisione polarimetrica (10^{-6}) e sensibilità senza precedenti. A tal fine, EST sarà dotato di un complesso **sistema MCAO**, integrato nel progetto ottico, che dovrà **ridurre al minimo la polarizzazione strumentale**. Ciò rappresenta una sfida importante, considerando l'elevata precisione polarimetrica necessaria. Tuttavia, questa non è l'unica sfida da affrontare. In effetti, lo sviluppo di etalon di grande formato per la polarimetria ad alta precisione, imager a banda larga di grande formato ad alta cadenza, il controllo dell'infrastruttura e l'identificazione di strategie adeguate per la gestione e l'archiviazione del grande volume di dati atteso dal telescopio, sono altri compiti importanti in cui la comunità italiana ha contribuito dall'inizio della fase di progettazione dell'EST nel 2008. In effetti, lo sviluppo di tali tecnologie è un importante passo avanti non solo nella fisica solare ma anche in altre aree astrofisiche. L'INAF è coinvolta nello studio e nello sviluppo del sistema EST AO, guidando la valutazione delle prestazioni di configurazioni AO prive di polarizzazione e la loro calibrazione polarimetrica. L'INAF contribuisce inoltre alle attività volte allo sviluppo di telecamere di grande formato per la polarimetria ad alta precisione e il rilevamento del fronte d'onda, in collaborazione con tutti i principali istituti di ricerca europei coinvolti nel progetto EST. Nei prossimi anni, il risultato di questi compiti tecnologici dovrebbe avere un impatto significativo anche in altre aree di ricerca astrofisica dove la polarimetria ad alta precisione sta diventando uno strumento importante (es. rilevamento di esopianeti, formazione stellare, ecc.). L'obiettivo per i prossimi anni è il funzionamento e lo sfruttamento di successo di tali complessi sistemi AO privi di polarizzazione e delle relative tecnologie, presso i principali impianti solari di classe 4 metri.

10.2.6 Applicazioni spaziali

Al giorno d'oggi, l'interesse nella comunità internazionale per l'applicazione di **elementi ottici attivi e adattativi** a bordo dello strumento della missione spaziale è in gran parte crescente, stimolato da concetti di prossima generazione per **telescopi spaziali ottici/UV di classe 4m**, previsti in sostituzione dell'HST. INAF si sta concentrando sulla possibilità di utilizzare la tecnologia adattiva dello "specchio secondario" applicata a specchi primari di grandi dimensioni o petali di specchi primari dispiegabili. Lo specchio in questo caso sarà pilotato a bassa frequenza correggendo gli effetti delle deformazioni termoelastiche lungo l'orbita e/o possibili disallineamenti dopo il lancio. Attualmente un primo prototipo è stato testato in INAF in collaborazione con l'Agenzia Spaziale Italiana e l'Industria Italiana raggiungendo un TRL compreso tra 4 e 5.

Nel prossimo decennio l'obiettivo è quello di spingere la tecnologia dell'Ottica Adattiva esistente al fine di superare la principale lacuna storica di questa tecnica, consentendone l'uso in quasi ogni area della ricerca astrofisica. I principali sviluppi attesi sono:

Wide Field Adaptive Optics, un'area in cui l'INAF ha padroneggiato, insieme all'ESO, il primo sistema Multi Coniugato al VLT, e dove l'Italia è coinvolta nell'LBT (con la realizzazione del primo Ground Layer System basato su beacon Raileigh), nel ELT (con la realizzazione di MAORY, il modulo ELT di prima luce Multi-Conjugate Adaptive Optics), e possibilmente con un ulteriore passo verso una lunghezza d'onda più corta al VLT. Oltre allo sviluppo di una strumentazione all'avanguardia, ancora una serie di concetti e di sensori di fronte d'onda dedicati possono ancora fare un grande salto in questo settore. I riferimenti artificiali mesosferici o generati da Rayleigh sono ancora oggi esaminati con variazioni del sensore Wavefront convenzionale mentre è stato dimostrato da diversi studi dell'INAF che un approccio dedicato potrebbe portare a un vantaggio significativo.

Ottiche Adattive verso le lunghezze d'onda più corte, e specialmente nel visibile, poiché ancora oggi la maggior parte dei sistemi di Ottica Adattiva sono di fatto confinate nella regione del Vicino Infrarosso, rendendo meno immediata l'applicabilità ai sistemi più recenti e di grande formato. La spinta verso il visibile pone una serie di sfide, principalmente a causa della piccola area di raccolta equivalente per sottoapertura, che richiede la concezione di un rilevamento del fronte d'onda molto più innovativo ed efficiente, e secondariamente allo sviluppo di compensatori di grande formato e all'implementazione di un enorme controllo sistemi. Grandi aperture combinate con fari generati artificialmente fanno un'interessante fertilizzazione incrociata tra questa e le aree precedenti, dove è probabile che ciascuna tragga beneficio dal ritrovamento dell'altra. Raggiungere regolarmente nella parte più blu dello spettro ciò che oggi si ottiene nel vicino infrarosso è un obiettivo accessibile entro il prossimo decennio, anche se è probabile che richieda ancora alcuni piccoli salti in diverse aree, con una grande interdisciplinarietà per essere efficace. Descriviamo di sfuggita che i gruppi INAF AO hanno perseguito attivamente e con successo l'AO visibile con lo strumento SHARK-VIS per LBT e la proposta ben accolta di un sistema MCAO per la lunghezza d'onda visibile nel contesto degli strumenti VLT supportati da AO di nuova generazione.

Strategia di controllo per il sistema ELT AO. Sistemi di Ottica Adattiva più grandi e accurati renderanno piccoli e sottili effetti (cromatismo differenziale, effetti di secondo ordine in distorsioni, cofase di un gran numero di segmenti o di grandi specchi deformabili segmentati, per citare alcuni esempi di rilevanza nel prossimo decennio) diventino principale nemico residuo da combattere, rendendo lo sviluppo della strategia di controllo un'area in cui l'INAF dovrebbe spendere alcune risorse significative anche in vista della conduzione di grandi programmi che coinvolgono l'Ottica Adattiva. Oltre a MAORY, le aree di interesse coinvolgono altre grandi strutture come EST nella scienza solare, il telescopio GMT da 25 m e altre applicazioni future sugli ELT.

Telescopi spaziali Ottica adattiva. Un altro campo emergente è l'applicazione delle tecniche AO allo sviluppo di telescopi spaziali in cui le prestazioni degli obiettivi non sono più soddisfatte da componenti passive. Questo è il caso della strategia di phasing e di controllo generale che mettono in gioco direttamente i risultati AO a terra già raggiunti, e inoltre la progettazione di specchi deformabili adatti e altri tipi di componenti che ora si stanno muovendo nella direzione già identificata per i telescopi a terra.

Applicazione non astronomica delle tecniche AO. Il campo dell'ottica e della fotonica sta crescendo d'importanza a un ritmo molto alto negli ultimi anni. Tecniche sofisticate come l'ottica adattiva originariamente sviluppate per le massime prestazioni del telescopio terrestre trovano oggi applicazioni in diversi campi della fotonica come la metrologia ottica, le misurazioni biomediche dell'occhio umano, la microscopia, i detriti spaziali, la concentrazione di potenza laser. Il controllo ambientale per citarne solo alcuni. Riteniamo che l'INAF (canalizzando eventualmente attraverso le esistenti nazionali

facility) dovrebbe dedicare alcune risorse allo sfruttamento del trasferimento tecnologico consentito dalla sua esperienza di primo piano in AO.

10.3 Sistema opto-meccanico UV, X, gamma, TeV

Lo sviluppo e la realizzazione dell'ottica di tipo Wolter per l'astronomia a raggi X a incidenza radente, effettuata negli ultimi due decenni, rappresenta un grande successo per la comunità italiana. Quest'area tecnologica è diventata un settore strategico grazie all'ampia e consolidata collaborazione tra ASI e INAF, con l'importante coinvolgimento di partner industriali.

In particolare negli ultimi anni è stata istituita in Italia la tecnologia di elettroformatura Ni. Questo approccio prevede lo sviluppo di mandrini pseudocilindrici superlucidati in Alluminio con placatura electroless in Kanigen, che sono esattamente figurati in modo da assumere la forma negativa degli specchi di incidenza radente da realizzare. I gusci degli specchi vengono quindi fabbricati mediante replicazione, dopo aver prima depositato lo strato riflettente di Au sulla superficie del mandrino e le pareti elettroformate di Ni sui mandrini rivestiti in oro. Molti gusci confocali vengono quindi annidati insieme per formare un modulo specchio completo. Si segnala che la tecnologia è stata sviluppata in collaborazione con la Media Lario. Questa società si è impegnata, non solo da INAF e ASI, ma anche attraverso contratti con altre Agenzie e Istituti Spaziali internazionali, a realizzare le ottiche per diverse missioni a raggi X utilizzando la tecnologia Ni (Beppo-SAX, Spectrum X/Gamma/Swift, XMM-Newton, Simbol x/NHXM, e-Rosita/Spectrum, Einstein Probe, eXTP). Oltre alla consolidata tecnologia Ni, ci sono future missioni di astronomia a raggi X in cui sarà coinvolta la comunità italiana che richiedono processi produttivi alternativi, al fine di ottenere una migliore performance in termini di area effettiva, risoluzione angolare e peso. In particolare INAF, con il supporto di ASI ed ESA, e collaborando anche con altri Istituti ed Agenzie Internazionali come NASA, JAXA e MPE, è impegnata negli sforzi tecnologici per lo sviluppo di:

- Ottica a raggi X basata su sottili segmenti di vetro
- Ottica a raggi X basata su substrati di Si
- Ottica a raggi X basata su sottili gusci monolitici

10.3.1 Tecnologia dei segmenti di vetro

L'INAF ha condotto negli ultimi anni un'estesa attività di sviluppo finanziata dall'ESA finalizzata alla realizzazione di ottiche basate su spessori sottili (frazioni di mm). Il progetto di destinazione iniziale era IXO (Osservatorio internazionale dei raggi X) che si è sviluppato di recente nella missione ATHENA.

L'INAF ha quindi messo a punto metodi proprietari innovativi, insieme a Laboratori e strutture, per la **formatura a caldo dei segmenti di vetro** e la loro integrazione in pile di specchi confocali parabola-iperbole. Il nuovo processo di slumping a caldo (diverso dall'approccio sviluppato negli USA dalla NASA/GSFC) prevede l'applicazione di pressione durante il processo di slumping termico, al fine di aumentare il contatto dei segmenti di vetro con lo stampo di replicazione e, al tempo, evitare l'incollaggio delle due superfici e l'aumento della micro rugosità. L'integrazione viene quindi eseguita in modo semiautomatico, utilizzando un'apposita macchina di integrazione. La figura propria impartita dai mandrini di riferimento viene congelata mediante nervature di rinforzo che collegano ciascun segmento al successivo. Utilizzando questo approccio, sono stati sviluppati prototipi di grandi dimensioni con un gran numero di specchi parabola-iperbole e testati ai raggi X, ottenendo ottimi risultati di risoluzione angolare ($HEW < 20$ arcsec). Il metodo è ora evoluto nell'approccio di **replicazione "a freddo"** di lastre di vetro molto sottili (0,2-0,4 mm). Questa soluzione è particolarmente interessante perché può fornire specchi altamente performanti in termini di risoluzione angolare e peso ma con una grande riduzione dei costi e dei tempi di produzione,

poiché la parte di formatura a caldo non è più necessaria. Dopo aver piegato elasticamente sottili lamine di vetro piano mediante un mandrino, le loro forme vengono poi mantenute impilando i segmenti mediante nervature, partendo da una solida struttura di supporto. La missione obiettivo per l'uso di questa tecnologia è FORCE (Focusing On Relativistic Universe and Cosmic Evolution), allo studio dell'Agenzia giapponese JAXA e delle Università di Miyazaki, Osaka e Nagoya. FORCE sarà un osservatorio a raggi X con una banda di energia operativa fino a 80 keV, con una risoluzione angolare di 15 arcsec. La missione rappresenta di fatto un seguito della missione NASA NUSTAR (caratterizzata da una risoluzione angolare molto peggiore, circa 1 arcmin). La collaborazione con i colleghi giapponesi è già stata avviata. È prevista entro i prossimi due anni la realizzazione, in collaborazione con i colleghi in Giappone, di un prototipo di ottica a raggi X basato su segmenti di vetro slumped a freddo e con rivestimenti riflettenti multistrato.

10.3.2 Tecnologie basate su segmenti di silicio

Le prossime grandi missioni a raggi X allo studio da ESA e NASA, ATHENA e LYNX, si basano su ottiche di grandi dimensioni (linea di base di 3 m di diametro) composte da molti **segmenti di silicio** assemblati insieme. Va notato che il silicio è un materiale molto interessante per le implementazioni spaziali, grazie agli eccellenti parametri termomeccanici, inclusa un'ottima conduttività termica. In particolare, Athena viene realizzata sotto il coordinamento dell'ESA utilizzando la cosiddetta tecnologia Silicon Pore Optics (SPO). I substrati di Si vengono piegati elasticamente per assumere forme paraboliche o iperboliche (come necessario per la realizzazione di ottiche Wolter I) e quindi impilati insieme in molti strati per mezzo di nervature e allineati per formare le cosiddette unità a raggi X. La tecnologia è promettente ma, al momento, non ha ancora completamente dimostrato il raggiungimento della risoluzione HEW di 5 arcsec richiesta dal progetto. L'INAF è coinvolta nel consolidamento del processo attraverso attività di progettazione e simulazione e sviluppando nuovi metodi e strutture per il test e la calibrazione degli elementi ottici (tra cui l'impianto Beatrix). Una soluzione molto promettente allo studio negli USA dalla NASA/GSFC per l'implementazione della missione LYNX è la lucidatura ottica diretta e la figuratura di segmenti di silicio precedentemente rettificati.

Si ottengono così pile di specchi che collegano tra loro i segmenti mediante un sistema di montaggio cinematico.

L'obiettivo finale è ottenere una risoluzione angolare migliore di 1 sec d'arco.

In questo contesto, l'INAF sta collaborando con la NASA/GSFC per la correzione finale della determinazione ionica dei segmenti di Si. I risultati finora ottenuti sono molto promettenti e la collaborazione tra INAF e NASA/GSFC proseguirà nei prossimi due anni con l'obiettivo di sviluppare prototipi rappresentativi. È in corso presso l'INAF la costruzione dell'impianto **BEaTriX** (Beam Expander Testing X-ray), con il supporto diretto dell'ESA e della comunità europea con il programma AHEAD. La struttura genererà un fascio di raggi X ampio (170 x 60 mm²), uniforme e poco divergente (1,5 arcsec HEW) all'interno di un piccolo laboratorio (7 x 14 m²), utilizzando una sorgente microfocale di raggi X, uno specchio parabolico, un sistema di monocromatizzazione del cristallo e un cristallo di diffrazione a taglio asimmetrico. Una volta completato, BEaTriX sarà la struttura di riferimento per testare i moduli Silicon Pore Optics dell'Osservatorio di raggi X ATHENA, in piena illuminazione, senza risentire della distanza finita della sorgente di raggi X. La struttura è progettata per funzionare a 1,5 keV e 4,5 keV, implementando due stadi di monocromatizzazione commutabili e cristalli tagliati in modo asimmetrico. A causa della gamma piuttosto breve richiesta per ottenere un raggio parallelo con questa configurazione, è necessario un basso livello di vuoto (10-2 mbar) per evitare l'estinzione del raggio evidente.

Oltre a un approccio modulare del vuoto, il basso vuoto consentirà di ridurre il tempo necessario per evacuare il serbatoio, consentendo a sua volta una velocità di prova che corrisponderà alla produzione di ATHENA SPO. La struttura sarà completata entro il 2019 e quindi gestita in stretta collaborazione con l'ESA.

10.3.3 Guscio monolitico sottile

L'implementazione di una missione a raggi X con capacità di imaging elevate, simili a quelle raggiunte con Chandra (< 1 arco di seconda metà della larghezza di energia, HEW), ma con un throughput molto più ampio (2,5 m² di area effettiva @1 keV), rappresenta un convincente richiesta della comunità scientifica. A tal fine, come già accennato, la missione LYNX/XRS è allo studio negli USA, con la partecipazione di partner internazionali. Per capire il difficile compito tecnologico della fabbricazione dello specchio, vengono presi in considerazione diversi approcci, basati su gusci monolitici e segmentati. Partendo dall'esperienza fatta sul prototipo di calotta in vetro realizzata negli ultimi anni, l'INAF sta studiando la lucidatura diretta di sottili gusci monolitici di silice fusa (spessore 2 mm) come possibile soluzione, in collaborazione con il supporto dell'ASI e in stretta collaborazione con la NASA /MSFC. Va notato che in questo caso i gusci degli specchi sono circa un fattore 10 più sottili di Chandra. Per rendere fattibile il processo, viene utilizzata una struttura di irrigidimento temporaneo per sostenere il guscio durante le operazioni di figuratura e lucidatura e per gestire la movimentazione fino alla sua integrazione nella struttura del telescopio. Dopo le fasi di molatura e lucidatura (eseguite dall'INAF in collaborazione anche con industrie esterne), al fine di ottenere la precisione superficiale richiesta, è prevista una correzione finale della figuratura del fascio ionico. È in fase di sviluppo un prototipo, da testare entro il 2018 presso la NASA/Marshall.

10.3.4 Spin-off dei continui sviluppi dell'ottica a raggi X in altre applicazioni scientifiche e tecnologiche

Le tecnologie ottiche a raggi X in fase di sviluppo possono avere importanti applicazioni in altri settori della scienza e per uso civile. A questo proposito, è ad esempio interessante per l'INAF la realizzazione di sistemi elioscopici terrestri per l'osservazione di assioni e particelle simili ad assioni (che potrebbero costituire una componente importante della materia oscura nel nostro Universo). Gli assioni potrebbero essere prodotti all'interno del nostro Sole tramite l'effetto Primakov, a causa del campo magnetico solare. A tal proposito è attualmente allo studio il progetto IAXO (International Axion Observatory), con una possibile significativa partecipazione italiana legata principalmente alla realizzazione dell'ottica a raggi X basata sullo slumping del vetro freddo. Altre interessanti applicazioni riguardano l'uso dell'ottica di incidenza radente per muoni focalizzata nel contesto di esperimenti di fisica delle particelle come ad esempio FAMU (Physics with MUI Atoms - RAL R512, contributo italiano guidato dall'INFN Trieste), relativi alla misura del raggio di carica protonica e la persistenza della discrepanza chiamata "puzzle del raggio di protoni". Per quanto riguarda la società civile, l'introduzione di tecniche di imaging a raggi X e di focalizzazione per applicazioni biomediche (in particolare per lo screening mammografico da eseguire con sorgenti X convenzionali quasi monocromatiche e collimate) e per l'identificazione di contaminanti nella le industrie alimentari rappresentano possibili spin-off interessanti. Attività specifiche sono in corso in INAF per esplorare questo tipo di sviluppi e trasferimento tecnologico. A questo proposito, va notato che in passato l'approccio dell'elettroformatura al Ni sviluppato per l'ottica a raggi X è stato trasferito con successo ad altri campi, come la realizzazione di ottiche da collettore in linee di fascio EUV di nanolitografia e ottiche per lo spazio per lo spazio libero comunicazioni e sistemi LIDAR.

10.3.5 Lenti Laue a banda larga per raggi X duri e raggi gamma morbidi

Nella fascia compresa tra poche decine (~ 50) e diverse centinaia (~ 700) di keV, una delle soluzioni più promettenti per la realizzazione di telescopi a campo stretto è rappresentata dalle **lenti Laue a banda larga**. Queste ottiche focalizzanti permetterebbero di ottenere una sensibilità dell'ordine di 100 volte rispetto ai telescopi attuali, e risoluzioni angolari di almeno un ordine di grandezza migliori ($\sim 20''$). Queste caratteristiche ci permetterebbero di risolvere molti dei problemi ancora aperto in questo intervallo di energia e, per la prima volta, aggiungere la misurazione della polarizzazione come an

"modalità standard" di osservazione per il cielo a raggi X/g tenui quando utilizzato in combinazione con innovativi rilevatori sul piano focale. Uno dei grandi vantaggi di un telescopio con lente Laue è che può estendere la larghezza di banda fino ad almeno 600 keV con una lunghezza focale di circa 20 m, che è comunque implementabile in una singola missione satellitare. In Italia l'interesse è stato lo sviluppo di lenti Laue a banda larga per l'osservazione dell'emissione continua di sorgenti e di linee (anche larghe) nella banda di energia compresa tra alcune decine e diverse centinaia di keV. Una decina di anni fa la stessa ESA ha condotto uno studio sull'uso dei telescopi basati su lenti Laue per le missioni satellitari. Questo tipo di sviluppo è attualmente una prerogativa italiana, in quanto a livello europeo e mondiale siamo gli unici ad aver effettuato cospicui investimenti, finanziati principalmente dall'ASI, in questa direzione e ad avere ancora un'intensa attività in corso. Negli ultimi anni, l'attività orientata allo sviluppo di una tecnologia affidabile per la realizzazione di lenti Laue a banda larga ha permesso di ottenere diversi importanti risultati sia sull'assemblaggio di un sistema di lenti Laue sia sullo sviluppo di cristalli per ottimizzare la PSF della lente. Tale sviluppo è stato coordinato dall'Università di Ferrara e vede la collaborazione dell'INAF, dell'IMEM/CNR di Parma e di alcune realtà industriali specializzate (DTM-Modena e Thales-Alenia).

Attualmente la collaborazione, avvalendosi dell'apposita struttura radiografica del laboratorio LARIX di Ferrara, sta realizzando un modulo prototipo di Laue Lens, operante tra 90 e 300 keV e con una focale di 20 metri. La costruzione implementerà una tecnologia avanzata con un errore totale inferiore a 10 arcsec utilizzando cristalli di GaAs (220) e Ge (111) piegati con tecniche innovative sviluppate nell'ambito della stessa collaborazione. Con questa tecnica è possibile migliorare drasticamente le prestazioni dell'obiettivo in termini di messa a fuoco e riflettività, ovvero un miglioramento della sensibilità di almeno un fattore 100 in più rispetto agli strumenti esistenti. All'interno di queste attività, il ruolo dei gruppi di ricerca INAF è stato di fondamentale importanza per la realizzazione del sistema a raggi X per l'assemblaggio e il collaudo dei prototipi di lenti. Attualmente, il gruppo INAF sta contribuendo fortemente alla definizione delle prossime attività che prevedono diversi sviluppi tra cui nuovi supporti curvi per i cristalli ad alta rigidità e stabilità termica, e lo sviluppo e la realizzazione di un sistema attivo per controllare l'orientamento dei moduli base da cui viene costruito un petalo di lente. Ad oggi lo sviluppo tecnologico ha portato alla sperimentazione in laboratorio di vari sottosistemi e componenti (es. adesivi, cristalli e supporti) necessari per la realizzazione di una lente Laue, e si può dire che TRL va da 3 a 4. Lo sviluppo di questa tecnologia offre diverse prospettive all'industria italiana nell'ingegneria meccanica, nella metrologia di precisione e nelle attività legate alla sua qualificazione spaziale. Le prospettive per l'applicazione di questa tecnologia sono legate allo sviluppo di satelliti per l'astronomia nei raggi X duri / g morbidi (10-10000 keV). Con l'elevata sensibilità e risoluzione angolare ottenibili, molti degli obiettivi scientifici (vedi documenti di visione dell'ESA e della NASA) identificati come prioritari per l'osservazione e lo studio dello spazio nei prossimi decenni possono essere raggiunti. Inoltre, l'uso di lenti Laue a banda larga accoppiate a piani focali ad alta risoluzione spettroscopica e spaziale 3D, rappresentano una sfidante opportunità per implementare la polarimetria come metodo di osservazione standard anche in questo intervallo di energia, con evidenti importanti vantaggi per la comprensione dei meccanismi attivi in sorgenti cosmiche di raggi X duri/g morbidi. L'attuale livello di sviluppo delle lenti Laue a banda larga richiede ancora la soluzione di diversi problemi tecnologici in gran parte legati alla qualificazione spaziale dei vari componenti e sottosistemi. Lo sviluppo delle lenti Laue per lo spazio può rappresentare per l'INAF un'importante opportunità per mantenere il ruolo già consolidato di leader nel campo dell'ottica a raggi X e garantire così alla comunità nazionale un ruolo di primo piano nella definizione e attuazione del prossimo (10 - 20 anni) missioni dedicate all'astronomia a raggi X e G.

10.3.6 Filtri sottili ad ampia area per rivelatori di raggi X nello spazio

Filtri sottili ad ampia area vengono utilizzati per proteggere i rivelatori di raggi X da radiazioni fuori banda o particelle cariche a bassa energia, per definire bande passanti e per proteggere l'area sensibile del rivelatore dalla contaminazione. I filtri sottili vengono utilizzati anche per isolare termicamente i telescopi. Per sfruttare appieno le capacità degli osservatori a raggi X ad alte prestazioni, i filtri devono essere accuratamente progettati, costruiti e testati. Pellicole di plastica di grandi dimensioni con spessore inferiore al micron rivestite con un metallo sono state tradizionalmente utilizzate nello spazio per proteggere i rivelatori di raggi X. In particolare, negli ultimi anni, la Poliimmide è stata largamente utilizzata come lamina di plastica e l'Alluminio come rivestimento metallico essendo altamente riflettente dal visibile all'IR. Tale materiale filtrante è stato utilizzato su Chandra, XMM Newton, nonché su esperimenti solari come Hinode dimostrando affidabilità e stabilità a lungo termine. Fogli sottili di poliimmide rivestiti in alluminio sono stati studiati anche per l'esperimento LAD a bordo di LOFT e sono attualmente la linea di base per i rivelatori X-Ray Integral Field Unit (X IFU) e Wide Field Imager (WFI) a bordo della futura grande missione dell'ESA ATHENA.

Il gruppo di ricerca dell'INAF-OAPA e dell'UNIPA-DIFC è stato in gran parte coinvolto con responsabilità chiave nella progettazione e calibrazione dei filtri per alcuni degli strumenti a bordo dei maggiori osservatori di raggi X come l'HRC a bordo Chandra, la fotocamera EPIC a bordo del Newton XMM, il telescopio a raggi X a bordo di Hinode, il rivelatore LAD su LOFT, ed è attualmente responsabile della progettazione e dello sviluppo dei filtri sul piano focale dell'Unità di campo integrale a raggi X (X-IFU) e del campo largo Rivelatori Imager (WFI) a bordo di ATHENA. Per l'X-IFU, l'uso di microcalorimetri a raggi X con tecnologia Transition Edge Sensor e elettronica front-end basata su SQUID pone un requisito aggiuntivo per i filtri per schermare l'EMI RF dal funzionamento e dalla telemetria del veicolo spaziale. Il sottile rivestimento in alluminio non è efficace nell'attenuare la RF e devono essere utilizzate reti metalliche a passo fine con piccoli fattori di blocco.

Le attività di ricerca relative allo sviluppo di filtri sottili ad ampia area per applicazioni spaziali ad alta energia comprendono:

- progettazione meccanica e ottica;
- modellazione e simulazione (Raytracing, trasmissione raggi X, trasmissione UV/VIS/IR, attenuazione RF di reti metalliche, analisi strutturali, stime dei contributi BKG, ecc.);
- prove di laboratorio eseguite all'interno degli istituti o in strutture esterne (Microscopia Elettronica a Scansione, Spettroscopia Fotoelettronica a Raggi X, Microscopia a Forza Atomica, Spettroscopia ad Assorbimento Raggi X, Spettroscopia UV/VIS/IR, imaging a raggi X, termovuoto, vibrazione e prove acustiche, ecc.).

L'attività di ricerca coinvolge diversi gruppi interni all'INAF e all'Università (UNIPA, UNIGE) oltre ad un'ampia collaborazione internazionale. Il gruppo di ricerca guidato da UNIPA e INAF è responsabile della progettazione e sviluppo dei filtri sul piano focale dei due rivelatori di raggi X a bordo della prossima grande missione dell'ESA per l'Astrofisica delle Alte Energie denominata ATHENA ed è attualmente coinvolto nella Fase A attività di studio in qualità di membro dei due consorzi strumentali. Mentre la tecnologia della sottile poliimmide rivestita di alluminio è abbastanza consolidata nello spazio per i rivelatori che funzionano a temperatura ambiente, la necessità di operare a basse temperature, le dimensioni molto grandi dei filtri e la necessità di fornire anche l'attenuazione RF pongono nuove sfide allo sviluppo dei filtri per ATHENA. Oltre alla tecnologia basata su Polyimide e Aluminium, verrà studiata un'altra tecnologia basata su membrane Silicon Nitride in collaborazione con un'azienda finlandese supportata dall'ESA. Anche le reti metalliche con piccoli fattori di blocco devono essere studiate per fornire supporto meccanico e attenuazione RF. Sono attualmente in corso le attività di progettazione e test sui filtri sottili sulla missione sino-europea eXTP, sul Large Area Detector ereditato dal progetto LOFT, e sull'HERMES

progetto cubesat. Per entrambi questi esperimenti sono stati sviluppati filtri in collaborazione con l'istituto IHEP dell'Accademia cinese delle scienze.

10.4 Rivelatori IR/VIS/UV/X/gamma/TeV ed elettronica di lettura

Lo sviluppo di sensori innovativi per la radiazione di tutte le lunghezze d'onda è fondamentale per lo sviluppo di una strumentazione astronomica innovativa. I nuovi sensori (con l'elettronica di lettura associata, in alcuni casi stabilendo un nuovo stato dell'arte) sono spesso le tecnologie abilitanti di nuove tecniche di osservazione, consentendo alla comunità INAF di proporre strumenti o missioni nuovi e innovativi e/o ad acquisire ruoli di primo piano nelle collaborazioni internazionali.

10.4.1 Fotomoltiplicatore al silicio (SiPM)

Nell'ultimo decennio il **Silicon PhotoMultiplier (SiPM)** è diventato una valida alternativa ai PMT in quasi tutte le applicazioni di astronomia. Il SiPM è un sensore fotosensibile originariamente sviluppato in Russia alla fine degli anni '90, che consiste in una matrice ad alta densità di Single Photon Avalanche Diode (SPAD) con un carico di uscita comune. Ogni diodo funziona in una modalità Geiger limitata, al fine di ottenere un guadagno a livello di 10^6 . I fotoni incidenti vengono rilevati da singole microcelle che si riversano e rilasciano una quantità fissa di carica mentre un resistore di spegnimento argina la valanga e ripristina la microcella: l'uscita è la somma di tutte le microcelle. I SiPM, ora disponibili in commercio, mostrano prestazioni molto interessanti per la strumentazione astronomica: eccellente risoluzione del singolo fotone, eccellente timing (centinaia di picosecondi), elevata efficienza di rilevamento dei fotoni, bassa tensione di polarizzazione, nessun danno se esposto alla luce ambientale, insensibilità al campo magnetico. Il SiPM ha anche degli svantaggi: conteggi scuri molto elevati, post-impulsi, diafonia ottica, guadagno fortemente dipendente dalla temperatura e dalla sensibilità alla luce rossa, dove è concentrata la maggior parte dello sfondo del cielo notturno. Di recente, i produttori hanno ridotto il numero di oscurità e il cross-talk ottico. L'uso di cristalli ad alta purezza ha ridotto i post-impulsi, così come la tensione di polarizzazione. I SiPM sono stati studiati per la prima volta all'INAF nel 2011, come sensori del piano focale dell'Imaging Atmospheric Cherenkov Telescope (IACT). ASTRI SST-2M è un prototipo di telescopio Cherenkov proposto dall'INAF come Small Sized Telescope (SST) per l'osservatorio Cherenkov Telescope Array (CTA). I test di caratterizzazione presso i laboratori INAF di SiPM di vari produttori hanno portato Hamamatsu a migliorare notevolmente i propri dispositivi. Due industrie italiane offrono anche SiPM all'avanguardia: AdvanSiD e ST Microelectronics. Sono previsti miglioramenti futuri delle prestazioni del SiPM: riduzione della sensibilità nel campo dell'infrarosso (importante quando l'IR domina lo sfondo) e dipendenza del guadagno rispetto alla temperatura.

10.4.2 Moltiplicatore di foto al carburo di silicio (SiCPM) per l'applicazione di tende solari UV

L'interesse per i rivelatori ciechi sensibili e visibili alla luce UV per applicazioni mediche, militari, industriali e ambientali ha stimolato la comunità di ricerca a miglioramenti nella progettazione e nell'elaborazione dei dispositivi. Tra tutti i materiali semiconduttori sensibili alla luce UV, i **fotodiodi basati su 4H-SiC** rappresentano la scelta più adatta per l'astronomia UV grazie alla loro elevata cecità visibile intrinseca, buona efficienza quantistica, corrente di buio molto bassa, robustezza e tecnologia di processo matura. Recentemente, il CNR-IMM di Catania ha sviluppato rivelatori UV verticali Schottky 4H-SiC con elettrodo frontale Ni₂Si a film sottile continuo di metallo, dimostrando una buona ripetibilità morfologica e uniformità su wafer delle prestazioni dei rivelatori elettro-ottici con elevata resa del wafer. La caratterizzazione ottica dimostra una reattività massima di 0,11 A/W a 280 nm, corrispondente a un'efficienza quantistica del 50%. Il

la reattività misurata su questi nuovi fotodiodi a giunzione è paragonabile o superiore a quella misurata su tecnologie di progettazione simili proposte in passato e ottenute mediante impiantazione ionica. La corrente di oscurità è notevolmente inferiore rispetto ai rivelatori ad area relativamente ampia (1 mm^2). Questi rivelatori sono quindi allo stato dell'arte nel campo di rilevamento della luce UV e possono rappresentare il primo passo verso lo sviluppo di rivelatori 4H-SiC ad alto rapporto segnale-rumore che funzionano in modalità valanga (sia APD che SPAD) per luce estremamente bassa rilevamento dell'intensità. La roadmap prevista al CNR-IMM Catania, in collaborazione INAF e con ST Microelectronics, è simile a quella che ha portato ad un SiPM partendo da un APD. Questa collaborazione è riuscita ad ottenere SiC-APD. Il prossimo passo sarà la realizzazione di un SiC SPAD (tecnologia che permette di far funzionare un SiC-APD in modalità Giger) utilizzando resistori di spegnimento e infine assemblando molti SiC-SPAD in parallelo per ottenere **SiCPM**.

10.4.3 Rivelatori ottici

Al giorno d'oggi tutti i telescopi terrestri e diverse missioni spaziali utilizzano **CCD** o **CMOS** rivelatori. Questi rivelatori sono in continuo miglioramento in termini di dimensioni, rumore di lettura e prestazioni. Sono state risolte le limitazioni del CMOS rispetto al CCD in termini di area, possibilità di realizzare mosaici di grandi dimensioni e fattore di riempimento. L'attuale stato dell'arte offre la possibilità di grandi mosaici di rivelatori CCD e CMOS (ad es. con CCD 9232 X 9216 abutable o CMOS 1920 x 4608). I nuovi rivelatori CMOS raggiungono un fattore di riempimento vicino al 100% e un QE elevato. Le principali differenze tra CCD e CMOS sono nella gamma estesa di QE elevato (400-800 nm) e basso rumore scuro ($4e^-/\text{pix}/\text{ora}$) del CCD rispetto alla gamma limitata del QE, rumore scuro elevato ($1800 e^-/\text{pix}/\text{ora}$) e tempo di lettura veloce dei rivelatori CMOS. Queste caratteristiche rendono il CCD il rivelatore più adatto per esposizioni a lungo termine con un QE elevato esteso in un'ampia gamma (spettroscopia, imaging) e il CMOS ottimale per applicazioni di esposizione a breve termine (imaging veloce, ottica adattiva, applicazioni spaziali). Gli aspetti tecnologici relativi al CCD e al CMOS spaziano dall'elettronica di front end allo sviluppo di FPGA/ASIC fino ai test di laboratorio e alla caratterizzazione dei rivelatori. Mentre i rivelatori sono realizzati dall'industria, lo sviluppo dell'elettronica di front-end, il controller del rivelatore, il test e la caratterizzazione sono effettuati negli istituti INAF. Il patrimonio dell'INAF in termini di know-how nello sviluppo e nel test elettronico è prezioso e richiede risorse. In particolare due grandi temi dovrebbero essere affrontati in futuro: la tecnologia FPGA e ASIC nello sviluppo dell'elettronica CCD/CMOS e le strutture di laboratorio per la caratterizzazione e il test di rivelatori ottici.

10.4.4 Rivelatori IR II

vicino IR e il medio IR (da 0,8 a $28 \text{ }\mu\text{m}$) sono importanti sia per l'astronomia spaziale che terrestre. Le tecnologie per rivelatori pixelati di ampia area si basano tutte su ibridi a basso costo e bassa resa moderata prodotti in fasi separate. Lo strato sensibile, dove vengono prodotte le giunzioni, viene coltivato e ibridato separatamente tramite tecnologie brevettate su un chip di lettura in silicio in grado di indirizzare in modo casuale o sequenziale ed estrarre il segnale da ciascuna giunzione sensibile. Alcune tecnologie a basso costo e prestazioni inferiori fanno la crescita completa dello strato di rilevamento a partire dal multiplexer di lettura del silicio. I parametri chiave per questa classe di rivelatori sono: corrente di oscurità e rumore di lettura specifici per osservazioni spaziali; carica di saturazione dei pixel e velocità di lettura per osservazioni al suolo inferiori a 2-2,5 μm ; Uniformità dell'efficienza quantistica e livello assoluto; Accumulo di carica di persistenza e modalità di realizzazione.

I livelli sensibili con rivelatori già disponibili da 1k x 1k a 4k x 4k pixel sono:

- **HgCdTe** 0,8–10 μm con il vantaggio di una regolazione del cutoff inferiore in fase di costruzione. I rivelatori di questa classe sono alla base dei piani focali per JWST, Euclid e WFIRST per lo spazio per il telescopio terrestre ESO VISTA.
- **SiAs Impurity Banda Conduzione** 3–28 μm . Questa è una velocità di lettura elevata a guadagno commutabile per strumenti VLTI di nuova generazione e per METIS, su ELT.
- **InGaAs** 1–1.7 tecnologia a basso costo rispetto al MeCdTe ibrido proposto per la missione SNAP a energia oscura ma sostituito da HgCdTe.

L'industria nazionale (Leonardo, DRS) su queste tecnologie è in ritardo rispetto ai prodotti standard statunitensi, che offrono scelte limitate. L'ESA ha recentemente cercato di spingere l'industria europea attraverso gare industriali. Il coinvolgimento della comunità astronomica è e sarà basato sulla valutazione delle prestazioni di laboratorio, sull'ottimizzazione e sull'adattamento alle diverse applicazioni. Per l'elettronica direttamente interfacciata ai rivelatori NIR/IR è disponibile un solo fornitore statunitense per l'elettronica basata su ASIC, in grado di far fronte alle prestazioni richieste: questo sta diventando un collo di bottiglia stretto, essendo impossibile gestire nello spazio rivelatori di classe 4kx4k. L'ESA sta spingendo anche l'industria europea e l'Italia è piuttosto attiva (OHB in Euclid, Sitael) su FPGA e ASIC. Un aspetto fondamentale, come per altre tecnologie abilitanti, è la conservazione e il trasferimento generazionale del know-how disponibile negli istituti.

10.4.5 Rilevatori di deriva al silicio (SDD) ad ampia area

I **Silicon Drift Detectors (SDD)** sono stati inventati al Politecnico di Milano e successivamente sviluppati in Italia dall'INFN per esperimenti di fisica delle particelle. Gli SDD sono adatti per diverse applicazioni in astronomia, raggiungendo prestazioni vicine al limite fisico in modalità spettroscopia. Possono funzionare sia come rivelatori diretti di raggi X sia, in strumenti a raggi gamma, come fotodiodi per la lettura di cristalli scintillanti. Gli SDD sono rivelatori a semiconduttore che possono essere progettati in diverse dimensioni e geometrie, in pixel singoli, aree di grandi dimensioni o array o matrici di pixel piccoli.

A causa della piccola capacità degli anodi di raccolta della carica, le grandi dimensioni dell'area attiva provocano un limitato aumento del rumore del rivelatore, in quanto la componente di corrente di dispersione può essere ridotta mediante opportuni processi tecnologici e/o tramite un moderato raffreddamento.

Una collaborazione con INAF ha portato gli SDD nell'astronomia spaziale come tecnologia abilitante per esperimenti di temporizzazione spettrale di grandi aree. Una grande collaborazione tra INAF, INFN, Università (PoliMi, Uni-Pv e UniBo) e FBK (Fondazione Bruno Kessler, Trento) supportata da INFN, ASI e INAF ha sviluppato negli ultimi 10 anni diverse geometrie, che vanno dal più grande SDD di sempre prodotto (77 cm²) a piccoli rivelatori (pochi mm²) ad array di pixel sub-mm². Poiché il pieno sfruttamento delle prestazioni dell'SDD può essere ottenuto solo attraverso un'elettronica di lettura a bassissimo rumore, il progetto di più circuiti (ASIC) è stato sviluppato dallo stesso consorzio, infatti, sia la tecnologia per la produzione dell'SDD sviluppata in Italia da FBK e l'elettronica di lettura a bassa potenza e bassa rumorosità (progettata al PoliMi) hanno raggiunto livelli di rumorosità da record mondiale a temperatura ambiente (vicino al limite di Fano). La tecnologia SDD è in continuo miglioramento affrontando argomenti come l'assottigliamento della finestra di input o la riduzione della sua area inattiva. Il consorzio che coinvolge INAF, INFN, FBK e Università è unico, in grado di progettare, produrre, integrare e implementare in esperimenti SDD e read-out elettronici di ultima generazione. Infatti, il consorzio è riuscito a proporre con successo all'ESA il concetto di missione LOFT (che prevede per la prima volta il dispiegamento di 10 m² di SDD) e ora sta studiando e proponendo altri concetti di missione - eXTP con la Cina, STROBE-X con la NASA, THESEUS ed eASTROGAM con ESA e HERMES con ASI – basati sulla tecnologia italiana SDD. L'INAF è uno dei principali attori nello sviluppo del progetto HERMES, finalizzato al dispiegamento di una costellazione di nano-satelliti dotati di innovativi rivelatori di raggi X e raggi gamma per l'osservazione e la localizzazione di GRB e altri transitori ad alta energia

come le controparti elettromagnetiche degli eventi delle onde gravitazionali. HERMES contribuirà agli obiettivi dello Spazio 4.0, identificando e standardizzando approcci innovativi per la produzione, l'assemblaggio e il collaudo di componenti miniaturizzati. Space 4.0 vuole cambiare il meccanismo di mercato nel settore spaziale, aprendo la possibilità di realizzare applicazioni spaziali anche complesse e ambiziose ad una vasta platea di attori chiave, come Università, istituti di ricerca e PMI.

10.4.6 Diodo a valanga a fotone singolo (SPAD)

Per diverse applicazioni astronomiche sono necessari rivelatori con risoluzione temporale inferiore al nanosecondo. Ad esempio, nell'astronomia spaziale dei raggi gamma nella gamma GeV EGRET, AGILE e Fermi non hanno potuto implementare capacità di tempo di volo per il rifiuto delle particelle cariche, a causa della mancanza di rivelatori molto veloci; a terra, con l'ascesa dei telescopi di classe 40 m, le osservazioni di singoli fotoni ottici con risoluzioni temporali inferiori a un nanosecondo potrebbero aprire la nuova frontiera dell'astronomia quantistica. Ciò consentirà di sfruttare appieno le proprietà quantistiche della radiazione (ad esempio nelle correlazioni tra i tempi di arrivo di ciascun fotone rilevato) come diagnostica indipendente. Per questo sono necessari una risoluzione temporale di circa 50 ps e un'elettronica front-end in grado di acquisire miliardi di eventi al secondo. I dispositivi **SPAD** descritti nelle sezioni precedenti presentano un'elevata efficienza di rilevamento dei fotoni intorno a 490 nm, una notevole precisione di temporizzazione pari a 40 ps, sebbene senza capacità spettroscopiche. L'Italia ha competenze per la progettazione e la produzione su misura: gli SPAD sono sviluppati al Politecnico di Milano e prodotti presso IMM-CNR. La loro applicazione in astronomia è stata studiata nell'ambito di progetti tecnologici finanziati dall'INAF e dall'ASI dove sono stati realizzati SPAD da 50 μm e fino a 500 μm di diametro, caratterizzati e accoppiati a scintillatori plastici veloci per il rilevamento di particelle.

10.4.7 Rivelatori di immagini di spettro 3D CZT/CdTe

Sono disponibili due possibili approcci per le osservazioni X e raggi gamma (50-1000 keV): strumenti a campo largo per sorgenti transitorie e rilievi del cielo (strumenti a maschera codificata e telescopio Compton avanzato) e telescopi a campo stretto ad alta sensibilità (lenti e concentratori di Laue) per le singole fonti. Richiedono caratteristiche molto diverse per i rivelatori: rivelatori ad ampia area con risoluzione spaziale e spettrale moderata e con temporizzazione veloce rispetto a rivelatori compatti con elevata risoluzione spaziale ed energetica e buone proprietà di temporizzazione. Per quest'ultimo, lo sviluppo principale è nei dispositivi a semiconduttore (**CdTe e CZT**) per l'**imaging di spettro 3D** in cui i gruppi di ricerca INAF sono stati tra i primi promotori a livello europeo, collaborando da tempo con gruppi presso DTU-Space, CEA/Saclay e LIP-Coimbra. I ricercatori dell'INAF hanno anche proposto questi rivelatori per la polarimetria di scattering sul piano focale di telescopi con lenti Laue a banda larga e/o concentratori ad alta energia. La loro sensibilità consentirà alla polarimetria ad alta energia di diventare un metodo standard di osservazione per le sorgenti di raggi X e gamma, oltre alla spettroscopia, all'imaging e ai tempi. Attualmente INAF lavora a stretto contatto con IMEM/CNR, DIFC (Università di Palermo), Università di Pavia e INFN. I gruppi INAF contribuiscono alla configurazione e ottimizzazione del progetto e dei sensori 3D di base, oltre alla caratterizzazione e valutazione delle prestazioni sia dei singoli sensori che dei sistemi di rilevamento. In collaborazione con DTU-Space, l'INAF ha testato sensori spettroscopici singoli con capacità 3D. Per realizzare sistemi completi sul piano focale restano aperte diverse questioni tecnologiche: integrazione di sensori singoli con l'elettronica front-end, confezionamento in moduli replicabili e sviluppo di ASIC dedicati. L'imager spettroscopico CZT/CdTe 3D trova applicazione anche in altri campi come la medicina nucleare, il monitoraggio ambientale e il controllo di sicurezza.

10.4.8 Microcalorimetri a raggi X al germanio NTD

I microcalorimetri criogenici **a semiconduttore a base di germanio NTD (Neutron Transmutation Doped)** sono stati largamente utilizzati dalla fine degli anni '80, dimostrandosi robusti, affidabili, con una bassa sensibilità ai campi magnetici statici, facilmente utilizzabili in un ampio intervallo di temperatura e con un'ampia gamma di energia dinamica. Sono in grado di fornire una risoluzione energetica molto elevata, con un'elettronica di lettura basata su componenti a basso rumore, a basso costo e disponibili in commercio. Microcalorimetri singoli microlavorati con termistori al germanio NTD sono stati ampiamente e con successo adottati dall'infrarosso ai raggi soft-gamma. Tuttavia, una tecnologia completamente planare per costruire array scalabili non è mai stata sviluppata. L'obiettivo dell'INAF è sviluppare un processo planare per costruire array scalabili, ottimizzare le prestazioni per il rilevamento dei raggi X e aumentare il tasso di conteggio. Solo pochi gruppi di ricerca stanno attualmente lavorando sui microcalorimetri NTD Ge. L'INAF, in collaborazione con l'Università di Palermo, ha una lunga esperienza sui microcalorimetri NTD Ge a sensore singolo. In particolare, ha recentemente sviluppato alcuni dei processi chiave che consentono la fabbricazione planare di array di sensori. Sono coinvolte diverse collaborazioni internazionali, in particolare l'Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, Cambridge (Boston, MA) e la Alternative Energies and Atomic Energy Commission (CEA), Parigi.

10.4.9 Rivelatori microcalorimetrici TES e criogenia

La tecnologia relativa ai rivelatori **TES** (Transition Edge Sensor) è così suddivisa: **rivelatori microcalorimetrici** e relativa elettronica di lettura (fredda a base di SQUID e calda) e **criogenica**. Il principale driver scientifico è legato alla missione ATHENA ESA. Una collaborazione INAF INFN iniziata 15 anni fa per padroneggiare la tecnologia TES per l'astrofisica a raggi X, e sono stati tra i fondatori di un consorzio internazionale (con SRON, NASA/GSFC e ISAS/Università di Tokyo). Questo consorzio ha ora la responsabilità di costruire lo strumento X-IFU basato su TES a bordo di ATHENA, in cui l'INAF ha la responsabilità della progettazione (requisiti scientifici e specifica del rivelatore) e del test del rivelatore criogenico anti-coincidenza (CryoAC) di X-IFU, volto a ridurre lo sfondo delle particelle, compresa l'elettronica criogenica e di lettura calda. Per il CryoAC INAF ha proposto una nuova applicazione della tecnologia TES che sfrutta un assorbitore pixellato TES sottile e di ampia area e un rivelatore di velocità di conteggio veloce/alto. La criogenia gioca un ruolo fondamentale: progettazione, sviluppo e test di articoli che consentono di raffreddare e lavorare a 0.1K le tecnologie di cui sopra, trattando metalli normali, semiconduttori e superconduttori. Sono necessarie competenze di criogenia (dal punto di vista scientifico a quello tecnologico), strutture basate su Pulse Tubes, frigoriferi a diluizione o ADR (Adiabatic Demagnetization Refrigerators) e tecnologie del vuoto. Il concetto base di CryoAC per missioni a raggi X è stato adattato in Italia da rivelatori di materia oscura. Lo spin-off verso le industrie italiane è abbastanza robusto. TAS-I è stata coinvolta in questa tecnologia (elettronica) sin dall'inizio. Più recentemente, il progetto ha riguardato le problematiche elettroniche e strutturali CGS/FBK. Il CryoAC sarà completamente sviluppato in Italia, offrendo una posizione di primo piano nel contesto dei rivelatori di anticoincidenza di particelle criogeniche TES. Un obiettivo a lungo termine è costruire un rivelatore completo basato su TES a basso fondo per la spettroscopia di raggi X ad alta risoluzione, incluso il CryoAC, un piccolo array TES e l'elettronica criogenica.

10.4.10 Rilevatori di pixel di gas e polarimetria Compton

Il **Gas Pixel Detector (GPD)** è un contatore gas proporzionale per raggi X ed è in grado di produrre immagini delle tracce dei fotoelettroni emessi dopo l'assorbimento di un fotone. Il GPD è stato inventato e sviluppato da una collaborazione tra INAF e INFN come rivelatore a

misurare la polarizzazione dei raggi X per applicazioni di astrofisica. L'attuale versione del GPD è sensibile da ~ 2 keV a ~ 10 keV (a causa dell'efficienza quantistica della miscela di gas, attualmente He – DME). Miscele più "pesanti" (ad esempio, basate su Ar) e piccole modifiche progettuali possono consentire di aumentare l'energia superiore legata fino a ~ 35 keV. Oltre al driver primario come polarimetro, il GPD ha un'applicazione aggiuntiva come imager, con una risoluzione spaziale di ~ 30 μm . Una serie di GPD può essere utilizzata, ad esempio, come rivelatore del piano focale per l'ottica a forma di aragosta o come rivelatore sensibile alla posizione per atomi neutri energetici, che richiederebbero la sostituzione della finestra d'ingresso Be con un materiale meno opaco (ancora in grado di sostenere la pressione), ad es. sottile strato di SiN. Nel contesto internazionale, il GPD è uno dei due strumenti sviluppati per misurare la polarizzazione dei raggi X tramite effetto fotoelettrico. La tecnologia GPD ha consentito la proposta di successo della missione XIPE all'ESA ed è ora lo strumento sul piano focale della missione Imaging X-ray Polarimeter Explorer (IXPE) selezionata dalla NASA e per il Polarimetry Focusing Array a bordo della missione eXTP Sino-Europea. Al di sopra di 20-30 keV è possibile misurare la polarizzazione dei raggi X sfruttando l'anisotropia dell'effetto Compton. Il rivelatore è composto da un elemento di scattering a Z basso (dove si verifica lo scattering Compton) e un assorbitore a Z alto (che rileva il fotone diffuso tramite l'effetto fotoelettrico). Un progetto in fase di studio presso l'INAF è composto da una matrice di scintillatori Z basso e Z alto letti da SiPM, azionati in coincidenza per ridurre lo sfondo. I SiPM sono più leggeri, più piccoli e più compatti dei PMT e non richiedono alta tensione, consentendo di progettare rivelatori con un'area più ampia, composti da un pattern di un array dell'unità di base (scintillatore con SiPM), adatti a rilevare transienti astrofisici in hard Raggi X, come Gamma Ray Bursts. Il **polarimetro Compton** è sviluppato presso l'INAF. Nello sforzo attuale, i SiPM vengono acquistati da Hamamatsu.

10.4.11 Elettronica di lettura

La filosofia che guida lo sviluppo della strumentazione e **dell'elettronica di supporto** è quella di progettare e/o sviluppare elettronica speciale all'interno dei laboratori INAF, compito che difficilmente può essere svolto da società esterne per strumenti scientifici altamente specifici. Ciò è particolarmente vero per l'elettronica che coinvolge circuiti integrati specifici dell'applicazione (ASIC) o logica programmabile, come Field Programmable Gate Array (FPGA). Ad esempio, per quest'ultimo gli scienziati guidano lo sviluppo del firmware FPGA per soddisfare i requisiti scientifici. Durante l'attività di prototipazione, lo sviluppo richiede flessibilità ai cambiamenti nella logica, facilmente (e conveniente) fatti solo a livello di istituto. L'industria entra principalmente nella fase di ingegneria, per satelliti o telescopi da terra. Lo sviluppo dell'elettronica specifica richiede quindi che le competenze siano mantenute nei laboratori INAF, operando in sinergia con le industrie.

10.5 Ottica, ricevitori ed elettronica di back end per strumentazioni radio e microonde

I prossimi esperimenti di radioastronomia richiederanno strumenti con ampio campo visivo, alta sensibilità e alta risoluzione nel tempo e nel dominio spettrale. Alcuni esempi di questi obiettivi scientifici sono la mappatura di sorgenti radio galattiche estese luminose, un'ampia indagine sulle emissioni diffuse, la ricerca del B-Mode della polarizzazione CMB e la ricerca del burst radio veloce (FRB). Una nuova generazione di strumenti che verranno sviluppati sono gli array di apertura, l'alimentazione phased array, gli array criogenici sul piano focale. Questi strumenti avranno bisogno di tecnologie all'avanguardia come i sistemi di antenne e le tecnologie di formazione del fascio, multi-beam e multi-beam

sistemi di frequenza, trasporto di segnali RF e analogici di potenza su fibre ottiche, elettronica di acquisizione e back end di elaborazione del segnale.

10.5.1 Attività Pre-SKA e SKA

Nell'ambito di **SKA**, INAF è membro del Consorzio AADC (Aperture Array Design and Construction), che lavora al pacchetto di lavoro Low Frequency Aperture Array (LFAA). In particolare, INAF in collaborazione con l'Università di Bologna guida la progettazione e lo sviluppo del sistema di ricevitori analogici, partecipa allo sviluppo del sistema di elaborazione del segnale per un pretrattamento dei dati e alla calibrazione e caratterizzazione delle antenne e dell'array di ogni stazione. Inoltre, l'INAF è il leader del pacchetto di lavoro nel compito del ricevitore. Array come MAD (Medicina Array Demonstrator) e SAD (Sardinia Array Demonstrator) sviluppati da INAF permetteranno di studiare sistemi e algoritmi di acquisizione per back-end di ultima generazione, testando le tecnologie per LFAA.

Nel momento in cui SKA entrerà in funzione, le antenne a parabola svolgeranno un ruolo chiave per l'osservazione di ampi campi nel cielo. Questa classe di telescopi avrà un grande vantaggio da **PAF (Phased Array Feeds)**, che consentirà un migliore campionamento sul piano focale e un campo visivo più ampio, rispetto ai tradizionali ricevitori coerenti a raggio singolo e multi raggio. L'INAF è stata coinvolta nello sviluppo di PAF con PHAROS, contribuendo alla progettazione, costruzione e test di criostati e finestre sottovuoto, LNA, VGA MMIC e sfasatori e attenuatori controllati. Tuttavia, nell'ambito dello SKA Advanced Instrumentation Program (AIP)

L'INAF è anche coinvolta nell'aggiornamento del PHAROS PAF a un nuovo strumento, denominato PHAROS2, che riutilizzerà la maggior parte dell'hardware PHAROS esistente. Oltre a contribuire ai test sul campo di PHAROS e PHAROS2 ea definire l'architettura del sistema e le specifiche dettagliate dei sottoassiemi PHAROS2, il contributo INAF mira allo sviluppo del seguente hardware PHAROS2: la distribuzione dell'Oscillatore Locale (LO); la sezione calda RF/IF; la sezione Radio Frequency (RF) over Fiber (RFoF); la sezione di beamforming digitale, correlatore e post-correlazione (PCB) con iTPM e Pcs/GPU.

Le attività di pre-costruzione di SKA nell'INAF sono state ben dotate di risorse e hanno svolto un ruolo significativo in numerosi consorzi di pre-costruzione. Gli sforzi italiani hanno coinvolto partnership tra agenzie di ricerca, università e industria nelle attività di progettazione e prototipazione. Diversi partner industriali sono stati coinvolti durante i lavori dell'AADC. Menzione particolare all'appalto Leonardo Finmeccanica per la fornitura di uno studio di ingegneria e industrializzazione dei sottogruppi **trasmettitori e ricevitori ottici Front End** della catena LFAA RX. Lo studio include anche miglioramenti del design, producibilità e test di massa, affidabilità e manutenzione. Sono inoltre in essere collaborazioni con Optel, Lightech e MWF per lo sviluppo di tecnologie RF over fiber e con SANITAS EG per la progettazione dei sistemi di acquisizione. L'Italia sta valutando la possibilità di ospitare la SKA Integration and Test Facility (ITF) a Medicina. Il team italiano ha progettato e prototipato il controllo su due elementi principali del percorso del segnale SKA-basso, il front end (FE dopo l'LNA alla trasmissione ottica di RF su fibra) e il condizionamento del segnale prima della conversione da analogico a digitale. Entrambi questi elementi sono stati il risultato del design italiano, della prototipazione e del coinvolgimento dell'industria e rappresentano eccellenti opportunità per un contributo in natura italiano al budget SKA-low. Altre aree plausibili in cui l'Italia può investire in SKA-low sono i cavi ibridi e gli assemblaggi di sottocavi.

10.5.2 Tecnologie strumentali CMB

Le principali agenzie e istituzioni di finanziamento statunitensi riconoscono l'importante priorità scientifica degli studi sulla CMB e dei relativi sviluppi tecnologici. In particolare, il Dipartimento dell'Energia degli Stati Uniti (DOE) e la National Science Foundation (NSF) richiedono che l'Astronomy and Astrophysics Advisory Committee (AAAC) istituisca una Cosmic Microwave Background Stage 4 Concept Definition Task force (CMB-S4 CDT) come sottocomitato al fine di sviluppare un concetto per un **esperimento CMB-S4**, ovvero la prossima generazione di esperimenti CMB. Il basso livello atteso del segnale polarizzato richiede uno sviluppo tecnologico al limite delle capacità attuali. Inoltre, il segnale polarizzato è dominato dalle emissioni in primo piano, come dimostrato dalla falsa rilevazione dei B-mode da parte del BICEP. Finora lo stato dell'arte è rappresentato da telescopi con circa 1000 rivelatori. L'obiettivo del CMB-S4 è costruire mezzo milione di array di rivelatori polarizzati montati su telescopi CMB dedicati. Questo enorme numero di rivelatori è necessario per ottenere la sensibilità richiesta per le misurazioni della polarizzazione in modalità B, ma sorgono diverse domande: quanto è possibile mantenere la risposta ottica in termini di simmetria del raggio, polarizzazione incrociata e reiezione del lobo laterale con le antenne planari?

Qual è l'insieme ottimale di frequenze di osservazione per districare il segnale CMB dai primi piani? Qual è il miglior compromesso tra stabilità del rivelatore, sensibilità e ambiente criogenico? Qual è la strategia di calibrazione ottimale per caratterizzare centinaia di migliaia di rivelatori in termini di rumore, stabilità e risposta ottica completa? Inoltre a frequenze inferiori a 100 GHz, dove il minimo di primo piano è, a causa degli elevati effetti di diffrazione, le tecniche a microonde 'tradizionali' (feed horn + OMT + Radiometer) sono ancora preferibili. È il caso del progetto INAF **LSPE/STRIP** costituito da una collaborazione internazionale volta a costruire in due anni un telescopio CMB/Foreground a Tenerife insieme all'esperimento con pallone LSPE/SWIPE.

Grazie all'esperienza riconosciuta a livello mondiale nello sviluppo dell'hardware del satellite ESA Planck e al recente coinvolgimento negli studi di aggiornamento di ALMA, l'INAF è leader a livello internazionale nello sviluppo di **strumenti radiometrici spaziali, su mongolfiera ea terra per CMB**. Le capacità interne coprono la progettazione ottica e lo sviluppo grazie all'esperienza unica nella progettazione e simulazione di telescopi per CMB; lo sviluppo di componenti in Radiofrequenza (RF) e passivi (corni ondulati, OMT, componenti in guida d'onda) grazie anche alla recente progettazione, fabbricazione e collaudo di feed ondulati con larghezza di banda del 50% e trasduttore Orthomode (OMT) per la banda ALMA 2+3 (67- prototipo di cartuccia a 116 GHz); lo sviluppo di calibratori a microonde e onde mm ad alte prestazioni per applicazioni terrestri e spaziali; il test e la calibrazione del radiometro; l'ingegneria termica e la criogenia, che, in questo campo, non è un supporto ma è parte integrante del processo di sviluppo dello strumento poiché determina direttamente le prestazioni finali. Per le attività in questo campo tecnologico all'avanguardia, un approccio di System Engineering e AIV, anche nelle prime fasi di sviluppo, è obbligatorio. Sebbene diverse istituzioni e università italiane lavorino su tecnologie CMB-driven, l'INAF è l'unico istituto italiano in cui l'Ingegneria dei Sistemi (inclusa l'Ingegneria Termica e RF di sistema) e l'AIV vengono applicate per lo sviluppo di esperimenti CMB.

In una prospettiva a lungo termine, la strategia di sviluppo potrebbe includere:

- Sistemi di antenne e tecnologie di beamforming;
- Elettronica di acquisizione e back end per l'elaborazione del segnale;
- Sistemi multiraggio e multifrequenza;
- Trasporto di segnali RF e Power Analog su fibra ottica;
- Criogenica e ingegneria termica.

10.5.3 Sistemi di antenne e tecnologie di beamforming.

Diverse tecnologie sono state sviluppate nel quadro LFAA. **La fibra ottica analogica RF** può essere applicata al trasporto a banda larga a breve e lunga distanza, alla distribuzione di segnali di clock e alla strumentazione di terra di sincronizzazione. La tecnica Power over Fiber consente di alimentare l'elettronica remota senza l'utilizzo di cavi in rame. Le schede di acquisizione sviluppate possono essere utili per una grande quantità di strumentazioni che richiedono compattezza, calcolo integrato ad alta velocità e velocità di trasmissione dati elevata. L' INAF ha sviluppato un **veicolo aereo senza pilota**

(UAV) che fornisce informazioni utili per la messa in servizio e la caratterizzazione delle antenne, complementari a quelle fornite da altri approcci come la calibrazione astronomica o le prove in camera anecoica. Il **PAF** è un ricevitore molto interessante e promettente per migliorare le prestazioni del radiotelescopio in termini di migliore campionamento del piano focale e per aumentare e adattare il suo campo visivo guidando i fasci sintetizzati. I vantaggi scientifici sono principalmente legati alla possibilità di aumentare la velocità dei rilievi e di migliorare la risoluzione dell'antenna. Tutti i più importanti centri di ricerca radioastronomica del mondo stanno investendo in questa nuova tecnologia.

10.5.4 Elettronica di acquisizione e back end di elaborazione del segnale

Le attività legate alla progettazione e produzione di **back-end digitali** per la radio e l'astronomia a microonde, sono concentrate all'interno degli Istituti INAF coinvolti in progetti come SKA, ALMA, VLBI e single dish. Tutti hanno solide e consolidate collaborazioni con istituti di tutto il mondo, non solo relativi ai grandi progetti ambientali, ma anche nel campo delle apparecchiature monodisco che trova in SRT un fertile campo di impiego. Sono principalmente focalizzati nei seguenti campi:

- Progettazione elettronica digitale e produzione hardware (FPGA, ASICs, boarding, housing e raffreddamento);
- Progettazione e ingegnerizzazione del firmware, in particolare per sistemi basati su FPGA;
- Sviluppo e ingegneria del software

Queste attività hanno avuto un grande impatto sull'industria italiana. La collaborazione con INAF ha proiettato le aziende partner alla ribalta delle prospettive internazionali, insieme a opportunità di contratti e future collaborazioni incentrate sullo sviluppo di strumentazioni innovative.

Le aziende di medie e piccole dimensioni sono in grado di sviluppare soluzioni e apparecchiature di back-end digitale, dalla progettazione all'ingegneria, e competere all'interno di consorzi con standard internazionali, creando soluzioni innovative e performanti. La collaborazione nel settore industriale è fondamentale per un istituto come INAF, che ha la vocazione di condividere e guidare grandi progetti in cui la gestione della progettazione, costruzione e ingegnerizzazione dei prototipi coinvolge un numero sempre maggiore di parti, richiedendo una produzione in serie.

Lo sviluppo di sistemi back-end per radioastronomia e microonde è supportato da requisiti scientifici e conseguenti specifiche tecnologiche e talvolta concorrenti tra loro:

- coprire tutte le frequenze del cielo fino e oltre i 100 GHz richiede di disporre di larghezze di banda istantanee in grado di aumentare la sensibilità in continuo e di eseguire un'analisi spettrale a banda larga;
- l'aumento del numero di sensori distribuiti sul piano focale implica lo sviluppo di algoritmi e dispositivi di sintesi numerica per i quali non è adatto un post processing dopo la fase di memorizzazione, come riduzione immediata dei dati, principalmente per la quantità di dati che devono essere elaborati e le esigenze di taratura e messa a punto degli strumenti.

- lo sviluppo di una strumentazione i cui sistemi di controllo tendano ad integrarsi al meccanismo di produzione dei dati, insieme al continuo aumento delle prestazioni in termini di potenza di calcolo e alla riduzione delle dimensioni, implica lo sviluppo di dispositivi più vicini all'elaborazione in tempo reale, in grado di aumentare il ciclo di lavoro osservativo ed efficienza.

Questi fattori contribuiscono oggi a passare a una nuova tipologia di back-end 'on-field' oriented, con prestazioni intermedie in termini di calcolo, bassa potenza e alta programmabilità, collocato nelle immediate vicinanze del front end. Inoltre, richiederà l'utilizzo di una strumentazione orientata ai "big data", dove le alte prestazioni sono il fattore decisivo. Inoltre, lo sviluppo di back-end di nuova generazione (entrambe le due tipologie descritte) è legato al miglioramento delle prestazioni dei dispositivi, in termini di densità di calcolo, riconfigurabilità, programmazione, grado di velocità e consumo energetico:

- ADC (convertitore analogico/digitale), che dovrebbe eseguire più di 100 GSample a milliwatt di consumo energetico;
- FPGA, questa tecnologia è già matura (ora a circa 20 nm) e verrebbe aggiornata al limite della Legge di Moore in pochi anni, come sub-nanometrica;
- GPU verso 100mila core, memory clock a 10 Ghz, etc,
- Soluzioni progettuali 3D Board in grado di ottimizzare le prestazioni a frequenza più elevata (oltre 20 Ghz per la frequenza di clock).

Le prestazioni di questi dispositivi sono sufficienti, per i prossimi 10 anni, a garantire la realizzazione di strumenti informatici e back-end in grado di soddisfare i requisiti osservativi descritti nelle sezioni precedenti. Parallelamente al fine di migliorare le prestazioni dei componenti, il mercato dell'elaborazione digitale si sta evolvendo verso la filosofia dell'integrazione, creando schede ibride in grado di suddividere i compiti tra i diversi componenti (acceleratore di calcolo, lettura e archiviazione dati, I/O digitale, ecc.) e applicare un approccio di calcolo parallelo. Allo stesso tempo, le soluzioni software dovrebbero migliorare le prestazioni utilizzando strumenti che condividono ambienti di sviluppo in grado di programmare dispositivi diversi come uno (come ad esempio la soluzione OpenCL) e fornire quasi le stesse prestazioni raggiunte da una programmazione hardware. Sebbene per i prossimi 10 anni la stessa tecnologia utilizzata oggi possa garantire le prestazioni richieste dai nuovi strumenti di radioastronomia, dobbiamo preparare il terreno per attuare la prossima rivoluzione per l'informatica sistemi, sia hardware che algoritmici, che avverranno nei prossimi anni e che prenderanno il nome di 'quantum computing'.

10.5.5 Sistemi multiraggio e multifrequenza

Cluster di rivelatori rappresenta il futuro per la strumentazione sia per il rilevamento e l'imaging CMB e Radioastronomia. Anche se le esigenze scientifiche sono diverse (elevata sensibilità per gli studi CMB, mappatura ad ampio campo per parabola singola e interferometri), le aree di sviluppo tecnologico sono comuni. Queste aree includono lo studio end-to-end e la caratterizzazione della risposta dell'antenna con una serie di rivelatori, lo sviluppo di **feed multifrequenza compatti e trasduttori Orthomode** utilizzando tecnologie all'avanguardia e di fabbricazione. Le aree in cui INAF possiede le capacità per contribuire allo sviluppo delle tecnologie sono principalmente le seguenti:

- Sviluppo di componenti passivi compatti a banda larga (tromba di alimentazione corrugata, OMT, sistemi di guida d'onda come polarizzatore, filtri, routing WG).
- Calibratori criogenici per array di microonde e lunghezze d'onda in mm.
- Attività di System Engineering applicata allo sviluppo di array complessi.
- Tecnica AIV per integrare, testare e calibrare array complessi (da centinaia a migliaia di catene di rivelatori RF)

- Progettazione dell'accoppiamento array/telescopio, ottimizzazione e verifica RF completa con software EM all'avanguardia (come GRASP).

Tutte queste aree sono affrontate dalle attività all'interno degli Istituti INAF relative a progetti in corso come LSPE/STRIP, sviluppo ALMA banda 2+3, upgrade SRT.

10.5.6 Trasporto di segnali analogici RF e di potenza su fibre ottiche

Negli ultimi anni, **RFoF** ha rivoluzionato il settore delle telecomunicazioni mobili, in particolare per offrire agli utenti mobili una copertura completa, anche in zone d'ombra radio, come gallerie stradali, stazioni della metropolitana o grandi edifici. Questi collegamenti sono implementati per milioni di reti mobili nei paesi in via di sviluppo come la Cina come un modo conveniente per espandere la copertura delle stazioni base. Come risultato di tale produzione di massa e del miglioramento delle strutture di produzione, i collegamenti RFoF che impiegano laser e rivelatori ad alte prestazioni hanno ridotto drasticamente i costi e l'intero settore industriale si è affermato. La prospettiva per il futuro sarà l'aumento della lunghezza totale del collegamento fino a 40Km senza perdere prestazioni e ridurre i costi dei moduli RFoF. RFoF è una tecnologia interessante per l'implementazione nello SKA.

10.5.7 Criogenica e ingegneria termica

La **criogenia** e le microonde sono strettamente correlate poiché la strumentazione a microonde deve essere raffreddata alla temperatura della criogenia per raggiungere le sensibilità richieste dagli ambiziosi obiettivi scientifici. Gli ambienti termici devono essere progettati e sviluppati per garantire la stabilità termica e la durata necessarie per sfruttare al meglio le prestazioni dello strumento. Ciò richiede un'accurata scelta di materiali e strumentazione e un'accurata progettazione termica con software avanzati. La criogenia e gli aspetti termici sono fondamentali anche nella progettazione e nello sviluppo di ambienti di test dedicati per la caratterizzazione e la calibrazione accurate degli strumenti. Negli ultimi anni, la domanda di temperatura ambiente di lavoro criogenica sta coinvolgendo sempre più tecnologie di rilevamento che coprono un'ampia gamma di frequenze di osservazione (dalla radio ai raggi gamma).

Per far fronte alle esigenze di integrazione e test di radiometri criogenici il Cryowaves Lab dell'INAF IASF integra strutture e competenze criogeniche e a microonde, Grazie anche alla condivisione della strumentazione con INAF/IRA il laboratorio è attrezzato per eseguire misure in banda W a temperatura criogenica bassa a 2,5 Kelvin. Le due criostrutture consentono di testare materiali e strumentazione fino a circa 1 metro di dimensione. Attualmente viene utilizzato per integrare e testare il prototipo di cartuccia ALMA Banda 2+3 67-116 GHz e ospiterà lo strumento LSPE/STRIP per i test a livello di sistema. Il laboratorio RF INAF/OAA è dotato di un VNA a 4 porte fino a 116 GHz e consente di testare e sviluppare accuratamente componenti passivi e pattern di antenna a tromba in camera anecoica.

10.6 Tecnologie specifiche per strumentazioni Planetology, Space Weather e Gravitation oriented

Tra le tecnologie abilitanti, particolare attenzione va posta su una linea di sviluppo trasversale che non può essere inquadrata nelle precedenti, poiché raccoglie know-how tecnologico interdisciplinare e si applica a diversi ambiti scientifici. In realtà, questo dominio spazia dall'indagine e monitoraggio dallo spazio dei pianeti (Terra inclusa) a diversi livelli (atmosfera, superficie, gravità) alla simulazione di ambienti planetari e test strumentali effettuati a terra in strutture speciali abilitate ad hoc .

10.6.1 Laboratori e strumentazioni di prova, caratterizzazione, emulatore di ambiente planetario

L' **attività di laboratorio** in INAF ha una consolidata e lunga esperienza. L'attività in laboratorio spazia dalla caratterizzazione di analoghi planetari (meteoriti, minerali rappresentativi della superficie di asteroidi, comete, Mercurio, Marte, ecc.) alla simulazione di condizioni chimico-fisiche caratteristiche di diversi ambienti planetari, in particolare la ionosfera terrestre e campo magnetico, atmosfere di pianeti come Venere, Giove o esopianeti. Insieme allo sviluppo di nuove future missioni spaziali dedicate all'esplorazione del sistema solare esterno e al ritorno del campione, verranno implementate e sviluppate nuove attività di laboratorio. Nuove configurazioni che consentono di caratterizzare le prestazioni ottiche di materiali, rivelatori di plasma e di campo, fibre ottiche e sottosistemi a diverse temperature ed esposti ad ambienti con radiazioni ostili stanno diventando una necessità per basare un solido sviluppo di strumenti in casa o in collaborazione con le industrie. La modellazione del trasferimento radiativo richiede talvolta la caratterizzazione dello stato dell'arte in condizioni estreme, specialmente per mondi esotici che si trovano nei sistemi extrasolari al momento attuale. Questo supporto essenziale all'interpretazione e alla modellazione dei dati dal laboratorio richiede sviluppo tecnologico e competenze in diversi campi con l'obiettivo di creare database spettroscopici a supporto di future missioni spaziali e osservazioni a terra. Lo studio dell'abitabilità di un pianeta, uno dei concetti più innovativi dei nuovi campi di indagine scientifica, richiede nuovi concetti di impostazione per tracciare l'evoluzione dei microrganismi in atmosfera controllata, per monitorare come possono influenzare l'ambiente gassoso e cosa può essere osservabile a distanza. Una lunga e proficua esperienza è stata raggiunta grazie allo sviluppo di **spettrometri nella gamma VIS-IR**, in particolare spettrometri di imaging, tecnologia in cui l'Italia è estremamente competitiva e con un solido riferimento per futuri investimenti. Solo per citare alcuni esempi passati e presenti: VENUS-Express, Cassini-Huygens, Rosetta, Dawn, Juno, ecc. Per il futuro, le missioni pianificate come BepiColombo, ExoMars e JUICE rappresentano un percorso importante per le future generazioni. Oltre all'ESA, la lunga esperienza dell'Italia e del team INAF ha consolidato ottime collaborazioni con NASA, JAXA, CNSA e altre agenzie spaziali. Il lavoro in collaborazione con industrie tecnologiche di alto livello ha costituito anche un importante asset per il sistema italiano in termini di R&S e impatto sociale. Grandi passi in avanti si possono immaginare nei prossimi anni, in particolare nel campo della **miniaturizzazione**, come è stato fatto per MicroMIMA, dell'esplorazione robotica come ad esempio MAMISS e delle strumentazioni dedicate alla raccolta e restituzione di campioni dalla Luna come ad esempio PROSPETTO. La massima priorità nei prossimi decenni sarà lo sviluppo di nuove tecnologie abilitanti per ambienti ostili come quelli incontrati nel campo magnetico di Giove e dei suoi satelliti e per l'esplorazione del sistema solare esterno, in particolare Urano e Nettuno. Molto interesse e coinvolgimento è dedicato alle sonde in situ come lander, palloni, droni e alianti con l'obiettivo di studiare il vulcanismo attivo, la composizione e la dinamica delle atmosfere.

10.6.2 Sistema di misura della contaminazione e Microbilance

Le protezioni planetarie sono regolate da aspetti legali concordati da tutte le agenzie spaziali che guidano la progettazione della missione spaziale per proteggere i corpi del sistema solare dalla **contaminazione** da forme di vita della Terra e proteggere la Terra da possibili forme di vita che potrebbero essere restituite da altri corpi del sistema solare. La protezione planetaria è essenziale per preservare la nostra capacità di studiare pianeti, lune e piccoli oggetti interessanti del nostro Sistema Solare dal punto di vista astrobiologico. La contaminazione dei corpi celesti da parte di organismi terrestri e organici deve essere evitata perché potrebbe portare a risultati falsi positivi. Il secondo aspetto della protezione planetaria mira a proteggere la biosfera terrestre dagli agenti extraterrestri, che potrebbero essere dannosi se rilasciati nell'ambiente

Ambiente terrestre. La prevenzione della contaminazione deve mantenere i campioni restituiti dalle missioni spaziali nel loro stato incontaminato per la conservazione a lungo termine. La prevenzione della contaminazione colpisce l'hardware dei veicoli spaziali, gli strumenti e l'elettronica evitando qualsiasi tipo di rilascio di contaminanti durante la visita del bersaglio della missione. Pertanto, qualsiasi trasferimento di sostanze chimiche, liquidi o particolato di origine terrestre (ambientale, umana, di lavorazione, impianti, attrezzature e attività lavorative) all'obiettivo deve essere ridotto al minimo. **Il laboratorio di astrobiologia dell'INAF** è dotato di camere bianche con camera stagna e zona cambio abiti dove viene eseguita la prevenzione e il controllo della contaminazione per l'hardware spaziale. Presso il laboratorio dell'INAF, i contaminanti noti sulle superfici e sull'aria sono monitorati periodicamente sia da piastre testimoni passive montate in diversi punti della camera bianca che da strumenti di monitoraggio attivo (FTIR, HPLC, LCMS). Per quanto riguarda i contaminanti sconosciuti, vengono eseguiti periodicamente anche test e analisi. I risultati di questi test e analisi vengono utilizzati per calcolare i livelli di contaminazione previsti e i loro successivi effetti sull'hardware spaziale e se sono noti altri parametri rilevanti, fornendo input per il controllo tecnico per rimuovere o ridurre al minimo i contaminanti. L'INAF è coinvolta nelle attività di protezione planetaria delle missioni ExoMars 2016 e 2020 su Marte, è responsabile delle attività di protezione planetaria per la progettazione della struttura internazionale di cura dei campioni restituiti dallo spazio ed è responsabile della politica di protezione planetaria e dei requisiti per le missioni su lune ghiacciate (Europa, Encelado, Titano, ecc.).

Il progetto CAM (**Contamination Assessment Microbalance**), finanziato dall'ESA, è finalizzato allo sviluppo di un modello ingegneristico di un sensore, basato sulla tecnologia Quartz Crystal Microbalance (QCM), in grado di monitorare i processi di contaminazione nello spazio dovuti al degassamento da parte di componenti di veicoli spaziali. CAM è il primo sensore completamente sviluppato in Europa. Tra i sensori basati su QCM, CAM presenta caratteristiche innovative:

- La temperatura dei cristalli può essere misurata direttamente grazie alle resistenze integrate direttamente sui cristalli stessi, aumentando la precisione delle misure
- Ampia gamma dinamica di masse di contaminanti misurate.
- Ampio intervallo di temperatura operativa e capacità di stabilizzazione della temperatura.
- Risoluzione di frequenza all'avanguardia.

Il consorzio CAM è guidato dall'INAF e comprende IAA-CNR e PoliMI. Lo stesso consorzio ha già collaborato al progetto VISTA (Volatile In-Situ Thermo-gravimeter Analyzer), finalizzato alla misura in situ di materiali volatili su superfici planetarie e allo sviluppo dello strumento MOVIDA (MOon Volatile, Ice and Dust Analyzer) per un futuro possibile lander lunare. QCM è adatto come trasferimento tecnologico nell'ambito del monitoraggio delle emissioni di gas e particolato in veicoli a motore civili, processi industriali e vulcani. Il passo successivo per il progetto CAM è lo sviluppo di un modello di volo finalizzato al monitoraggio del degassamento e della contaminazione esterna da parte di elementi sensibili come pannelli solari ed elementi ottici.

10.6.3 Sistemi di rivelazione di atomi neutri L'indagine

dell'interazione dei corpi del Sistema Solare con gli ambienti attraverso la rivelazione di **Atomi Neutri Energetici** (ENA) è una tecnica relativamente recente con ampio sviluppo tecnologico dopo la prima missione dedicata nel 2000 (IMAGE-NASA missione) dedicata all'ambiente terrestre. Gli atomi neutri non interagiscono con i campi elettromagnetici.

Hanno quindi la proprietà di mantenere inalterate le loro caratteristiche (energia, distribuzione e direzione) dal tempo di generazione, se le loro energie sono sufficientemente elevate da considerare trascurabili gli effetti gravitazionali. Quindi abbiamo un buon modo per ottenere le informazioni sul processo di generazione attraverso il rilevamento ENA, in modo simile all'imaging eseguito con i fotoni. Conosciamo tre principali meccanismi di generazione di atomi a energie ben al di sopra della gravitazionale

effetti: processi di scambio di carica, back scattering e ion sputtering da atmosfere e superfici. La gamma di energia va da decimi di eV fino a centinaia di keV. La potenza di questa tecnica è stata dimostrata dai risultati ottenuti da molti imager ENA volati in missioni spaziali ed è dimostrata dall'inclusione di imager ENA in molte delle future missioni del Sistema Solare. I design e le tecnologie dei sensori richiesti sono diversi a seconda della gamma di energia. In particolare la scelta e lo sviluppo di rivelatori di particelle (es. Micro Channel Plate, CEM) è un punto cruciale nella progettazione dello strumento, insieme ai dispositivi utilizzati per la reiezione del rumore, come deflettori di ioni e filtri UV. L'INAF è stata coinvolta nella progettazione e realizzazione di molti sensori ENA sin dai primi sviluppi di questa tecnica (strumento ISENA sulla missione SAC-B nel 1996, ASPERA-3 e ASPERA -4 delle missioni MEX e VEX nel 2003, sensore SERENA-ELENA per la missione BepiColombo prevista nel 2018). In particolare, INAF ha acquisito una posizione di rilievo nel contesto internazionale nella rivelazione a bassa ENA. Il design del sensore ELENA è innovativo in quanto, date le efficienti e innovative tecnologie sviluppate per la reiezione ionica e UV, è in grado di rilevare la particelle neutre senza ionizzazione, così che ELENA può essere considerata una sorta di telecamera pin-hole di particelle. Grazie a questo nuovo design del sensore, è stata raggiunta una risoluzione angolare senza precedenti di rilevamento ENA basso, quindi un'immagine reale del backscattering dalle superfici planetarie attraverso ENA sarà possibile. Le prove dello strumento vengono eseguite nella camera a vuoto dell'INAF dove è disponibile una sorgente di fascio ionico. Il futuro sviluppo tecnologico include nuove prospettive per i rivelatori in esame (es. rivelatore di Gas e APD per il rilevamento di atomi neutri energetici, sistema di shuttering per Time of Flight, rivestimenti dedicati per il miglioramento dell'efficienza MCP, ecc.) insieme all'ottimizzazione delle subunità sensoriali (deflettori di ioni, filtri UV, soluzione Time of Flight).

10.6.4 Stereocamere

La mappatura 3D di una superficie planetaria è diventata quasi obbligatoria nelle missioni spaziali planetarie e ha consentito l'analisi morfologica di qualsiasi caratteristica, fornendo un fondamentale passo avanti per la geologia planetaria. Inoltre, le informazioni 3D sono richieste da molti strumenti a bordo delle missioni planetarie per registrare accuratamente le loro misurazioni. L'INAF ha realizzato la prima **telecamera stereo**, su satellite, basata sull'acquisizione stereo del push-frame e con i due canali convergenti sullo stesso rivelatore. Questo nuovo approccio stereo rende più facile la corrispondenza tra più immagini della stessa regione e, allo stesso tempo, rende più compatto il design dello strumento. INAF è PI di SIMBIO-SYS, a bordo della missione ESA BepiColombo, inclusa la nuova stereo camera. Lo stesso concetto di telecamera stereo è stato poi implementato su CaSSIS a bordo di Exomars TGO, dove INAF è CoPI. I progetti riguardanti le stereocamere sono stati realizzati in collaborazione con i maggiori istituti europei coinvolti nelle missioni planetarie, come l'IAS (Francia), il dept. di Fisica a Berna, la DLR a Berlino. Inoltre, esiste una collaborazione con istituti cinesi nell'ambito del progetto MoonMapping dell'ASI che prevede anche la mappatura 3D della Luna e l'implementazione di una stereo camera per la futura esplorazione cinese dei pianeti terrestri. Le telecamere stereo citate sono state realizzate dalla Leonardo spa che ha acquisito una competenza unica in questo campo, a livello europeo con possibile estensione negli USA. Un'importante evoluzione di STC, che introduce anche l'informazione iperspettrale, ha portato al deposito di un brevetto, nel settembre 2016, per un HYPerspectra Stereo Observing System, (HYPSOS) insieme al Gruppo EIE.

10.6.5 Coronagrafi

Negli ultimi due decenni, l'osservazione della corona solare dallo spazio ha permesso di fare progressi nella comprensione del meccanismo di accelerazione e riscaldamento del vento solare e degli eventi transitori altamente energetici dell'atmosfera solare (es. massa coronale

espulsioni, particelle energetiche solari). L'INAF, insieme all'industria spaziale italiana, ha svolto un ruolo chiave nello sviluppo, test e gestione di coronografi solari spaziali che adottano design e tecnologie innovative. Basato sull'eredità del coronografo UVCS per le missioni SOHO (lancio 1994) e su quella del coronografo SCORE per la missione suborbitale della NASA HERSCHEL (primo lancio 2009), INAF è l'istituzione PI e Thales-Alenia Space, Italia, è il primo contraente, del coronografo Metis per la missione ESA Solar Orbiter. L'innovativo design Metis dello schema di apodizzazione del telescopio include nuove tecnologie ottiche come il rivestimento ottico a lunghezze d'onda multiple, il polarimetro a cristalli liquidi qualificato per lo spazio. INAF è Lead-Col per il contributo italiano al coronografo ASPIICS per PROBA-3. Questa è la prima missione spaziale di volo in formazione. L'INAF è responsabile dello sviluppo dei sensori e degli algoritmi di volo in formazione, nonché dei filtri passa-banda ultra-stretti sviluppati con Optec (MI).

10.6.6 Tecnologie e strumentazioni per la gravitazione sperimentale Negli ultimi anni, lo studio del **campo gravitazionale** dei pianeti effettuato dalle missioni planetarie è diventato un obiettivo sempre più inseguito dalla comunità scientifica. Ciò è dovuto alla sua inestimabile capacità di fornire una comprensione degli interni dei pianeti, un collegamento tra gli interni e le caratteristiche della superficie, una visione della dinamica e dell'evoluzione complessive del pianeta. Nei classici esperimenti di radioscienza un tracciamento ad alta precisione da parte delle stazioni di terra di un veicolo spaziale in orbita attorno a un pianeta, a seguito della sua caduta libera nella gravità del corpo centrale, permette di ricostruire il campo gravitazionale una volta che le forze non gravitazionali che agiscono su di esso sono state attentamente monitorati e valutati attraverso **accelerometri ad alta sensibilità**. Le tecnologie coinvolte alla base di questi sensori ad alta sensibilità intrecciano know-how e competenze notevolmente interdisciplinari: misurazione di spostamenti e forze molto piccoli, sistemi di controllo termico attivi e passivi, riduzione del rumore ambientale, test di nuovi materiali di rilevamento, interfaccia ad hoc e elettronica di controllo, meccanica progettazione e produzione. La **gradiometria gravitazionale**, che consente la ricostruzione del campo gravitazionale dalle misurazioni dei gradienti gravitazionali, rappresenta un metodo innovativo e promettente per spingere l'indagine sui pianeti a risoluzioni spaziali più elevate. Una tale tecnologia di rilevamento consentirebbe la capacità di identificare le caratteristiche della superficie e del sottosuolo sempre più piccole, fondamentali per comprendere i processi geofisici e geologici dei pianeti. La tecnologia comune alla base di questi due tipi di sensori consente la capacità di organizzare ed eseguire esperimenti di fisica fondamentale incentrati sulla verifica della Relatività Generale e le sue connessioni con la gravità quantistica, nonché verifiche del Principio di Equivalenza di Einstein nella formulazione del Principio di Equivalenza Debole e la misura della costante gravitazionale newtoniana. L'INAF ha sviluppato un consolidato know-how e competenze con il primo accelerometro ad alta sensibilità ISA lanciato nel 2018 attraverso la missione ESA BepiColombo. La tecnologia di rilevamento INAF utilizza sensori a sospensione meccanica che hanno la capacità di essere utilizzati anche per applicazioni a terra, come reti di sismometri sulla superficie dei pianeti, oltre che sulla Terra (o sulla Luna), o come strumenti per il monitoraggio vibrazioni a bassa frequenza (indotte ad esempio sul telaio di un telescopio). L'INAF, PI dell'accelerometro ISA a bordo BepiColombo, è coinvolto nella definizione degli esperimenti, nello sviluppo dei prototipi, nella calibrazione dei sensori e nelle metodologie di analisi dei dati. Nasce una collaborazione congiunta con il Laboratorio di Radio Science dell'Università "La Sapienza", Thales Alenia Space e ASI. L'INAF è anche coinvolta in LARASE, un progetto (finanziato dall'INFN) dedicato allo studio dei dati di raggio laser di satelliti geodetici come LAGEOS, LAGEOS II e LARES al fine di testare importanti previsioni relativistiche generali nel campo della Terra, allo stesso tempo porre vincoli a teorie alternative della gravitazione. Prospettive molto promettenti dell'INAF

applicazioni tecnologiche sono previste per i prossimi esperimenti di radioscienza che mirano a inviare veicoli spaziali su Giove e le sue lune ghiacciate, oltre a studi avanzati per Venere e Urano/ Nettuno. Un primo passo verso la sismologia planetaria inizia con la missione InSight della NASA su Marte. In generale, significativi progressi nello studio degli interni dei pianeti deriverebbero da indagini sinergiche dallo spazio e dal suolo.

10.6.7 Camera al plasma SIM.PL.EX La

camera al plasma sviluppata presso l'INAF è una struttura unica in Europa in grado di riprodurre un ambiente ionosferico di grande volume, particolarmente adatto per eseguire studi su una varietà di argomenti di fisica del plasma che possono essere riassunti come segue :

- Taratura di sensori diagnostici al plasma terrestri e spaziali (sonde Langmuir, Retarding Potential Analyser, ecc.);
- Prove funzionali di esperimenti previsti per operare in ambiente ionosferico (sensori esposti al plasma spaziale);
- Prove di caratterizzazione e compatibilità di componenti per applicazioni spaziali (materiali, vernici satellitari, celle fotovoltaiche, ecc.);
- Esperimenti di base di fisica del plasma (interazione di corpi carichi con il plasma, due processi di interazione del plasma, propulsione e generazione di energia nello spazio attraverso legami elettrodinamici);
- Prove su esperimenti attivi che utilizzano catodi e/o sorgenti di plasma (propulsore di ioni, neutralizzatori di fasci di ioni, catodi cavi, emettitori ad effetto di campo, contattori di plasma).

L'impianto è costituito da una camera a vuoto di grande volume (un cilindro di lunghezza 4,5 m e diametro 1,7 m) dotata di una sorgente di plasma di tipo Kaufman. Questa sorgente produce plasma di Argon con parametri (ad es. densità elettronica e temperatura) molto vicini ai valori riscontrati nella ionosfera diurna ad altitudini dello strato F. Una variazione della densità del plasma nella regione sperimentale a valle della sorgente potrebbe essere ottenuta variando la corrente di scarica della sorgente e la portata del gas neutro. Il plasma generato dalla sorgente viene accelerato nella camera a una velocità che può essere sintonizzata per simulare il movimento relativo tra un oggetto in orbita nello spazio e la ionosfera (≈ 8 km/s). Questa caratteristica, in particolare, permette simulazioni in laboratorio dei fenomeni di compressione e deplezione tipici delle regioni di ram e wake attorno ai satelliti ionosferici (es. ISS). Inoltre, è attualmente in fase di sviluppo una nuova sorgente di plasma in grado di simulare il vento solare interplanetario. Inoltre, la struttura è dotata di un sistema di bobine magnetiche a due assi in grado di controllare il campo magnetico ambientale. I componenti del vettore di campo all'interno della camera possono essere controllati indipendentemente lungo le direzioni assiale e verticale. In questo modo, il fascio di plasma e il pattern del campo magnetico possono essere impostati per riprodurre le condizioni incontrate dai satelliti sia in orbita equatoriale che polare. L'intensità del campo può essere variata tra 0 e 10⁻⁴ T. In particolare, gli esperimenti in assenza di campo possono essere eseguiti annullando il campo magnetico terrestre. Infatti il campo terrestre può essere compensato fino ad un valore residuo di 2,5×10⁻⁶ T in un volume di circa 1 m³ posto in prossimità del centro della bobina. Tale campo residuo è sufficiente per considerare il plasma non magnetizzato, essendo il giro dell'elettrone (con $T_e \approx 2000$ K) dello stesso ordine delle dimensioni della camera (cioè il moto dell'elettrone non è dominato dal campo ma piuttosto dalle collisioni con la camera parete). Attualmente, il gruppo Plasma Chamber Research è coinvolto nei test di calibrazione di Electric Field Detector (EFD), sonde Langmuir, Ion Drift Meter, Ion Capture Meter e Retarding Potential Analyzer del satellite CSES (Cina) e nello sviluppo del EFD italiani. Inoltre è in corso un esperimento per una nuova propulsione Magnetica/Plasma.

10.6.8 Strutture (criogenia, calibrazione e test, metrologia)

Uno dei principali punti di forza dell'INAF è la possibilità di utilizzare, in collaborazione con l'industria, diverse **strutture** per testare componenti spaziali e/o strumenti che fanno parte di un carico utile. Tali strutture consentono di assemblare, caratterizzare, testare e calibrare strumenti in diverse condizioni ambientali per applicazioni spaziali e terrestri.

10.7 Software, informatica e gestione dei dati

I progressi dell'astrofisica sono, e nel prossimo futuro, strettamente guidati da una strumentazione di complessità sempre crescente e da una nuova generazione di telescopi e osservatori più grandi. Queste strutture consentono di eseguire osservazioni con una risoluzione spaziale, temporale e spettrale più elevata, su campi più ampi e/o a maggiore profondità. Far fronte a un tale aumento di complessità e dimensioni è possibile grazie ai progressi in diversi campi tecnologici, tra cui l'ottica, i materiali, i rivelatori e il software ad alte prestazioni per il controllo degli strumenti, l'elaborazione dei dati e l'analisi dei dati. In particolare, il **SW embedded real time** (sia per il controllo dello strumento che per l'elaborazione dei dati) dovrebbe essere considerato una componente importante di qualsiasi strumento astronomico. Una caratteristica comune delle future strutture di osservazione è la necessità di controllare accuratamente in (quasi) tempo reale molti dei suoi elementi al fine di ottenere le prestazioni richieste e, in definitiva, i risultati scientifici desiderati. Infatti, una volta finalizzato l'HW dello strumento, l'unico componente che può ancora essere modificato per risolvere problemi e ottimizzare le prestazioni dello strumento è il SW di controllo e pre-elaborazione di bordo. Per quanto riguarda il **SW di analisi** dei dati ad alte prestazioni, i volumi e le velocità di dati prodotti dalle nuove strutture stanno crescendo in modo esponenziale, accelerando notevolmente la nostra comprensione dell'universo fisico, ma ponendo severi vincoli all'efficienza computazionale richiesta, alla ricerca archivistica e all'elaborazione e comprensione dei dati. Inoltre, **le simulazioni numeriche** stanno diventando sempre più il modo dominante o addirittura l'unico in cui è possibile modellare e comprendere vari fenomeni complessi (ad esempio, formazione stellare, lensing o formazione di galassie). Un tipico rilevamento del cielo moderno può produrre centinaia di petabyte di immagini riutilizzabili e può rilevare tra 10⁸ e 10⁹ sorgenti, con uno spazio parametrico associato di circa 10² fino a 10³ attributi per ciascuna sorgente. L'astrofisica può quindi essere considerata parte integrante dei **Big Data** fenomeno. Ciò crea nuove possibilità per svolgere ricerca e condividere le conoscenze all'interno della comunità, per fertilizzare in modo incrociato altre discipline e per riutilizzare le informazioni per l'istruzione e la divulgazione, mentre ci muoviamo rapidamente verso la scienza aperta. Ma sia le opportunità scientifiche che le sfide tecnologiche sono condizionate e dipendenti dalla modellazione dei dati, dall'elaborazione dei dati, dal data mining e dalla fusione, su diverse lunghezze d'onda, scale temporali o spaziali. Di conseguenza, una **e-infrastruttura coordinata ed efficiente**, e il relativo know-how nello sviluppo di SW, è necessaria per consentire ai Big Data di essere sfruttati al massimo delle loro potenzialità. La Commissione europea prevede di creare un nuovo European Open Science Cloud (EOSC) interconnettendo l'infrastruttura di ricerca esistente, con l'obiettivo di offrire ai ricercatori europei e ai professionisti della scienza e della tecnologia un ambiente virtuale per archiviare, condividere e riutilizzare i dati al di là delle discipline e dei confini. La Commissione sta quindi investendo direttamente, complessivamente, 2 miliardi di finanziamenti di Orizzonte 2020 nell'iniziativa Cloud europeo per un periodo di 5 anni, su un totale stimato di 6,7 miliardi a copertura totale dell'iniziativa, che include ulteriori investimenti pubblici e privati. La parte iniziale di questo finanziamento H2020 è già stata assegnata a una serie di progetti di infrastrutture elettroniche: EGI, EUDAT, IndigoDataCloud ed EOSCpilot. Due importanti progetti per la nostra comunità finanziati da H2020, ASTERICS (che si concentra sull'infrastruttura elettronica necessaria per l'ESFRI e altri progetti di livello mondiale in astrofisica e astroparticelle) e AENEAS (concentrandosi sulle esigenze future di SKA)

non hanno legami definitivi con i suddetti progetti generalisti di infrastrutture elettroniche. Ciò che manca alla comunità astrofisica è quindi una connessione tra le capacità di gestire i dati e di eseguirne l'elaborazione all'interno dello stesso ambiente interoperabile, come si aspetta che sia il Cloud. La Commissione europea ha inoltre riconosciuto la necessità di una politica a livello dell'UE in materia di HPC per ottimizzare gli investimenti nazionali ed europei rivolti all'intero ecosistema HPC e ha adottato la sua strategia HPC nel febbraio 2012. La Commissione sottolinea che è strategico sviluppare la prossima generazione di HPC tecnologie, applicazioni e sistemi per raggiungere la capacità di esascala: ciò impegnerà uno sforzo a livello europeo per sviluppare una tecnologia autonoma per costruire sistemi di esascala e nuove applicazioni entro circa 10 anni. La nuova generazione di **tecnologia HPC** coprirà l'intero spettro da processori e architetture di sistema a software e strumenti di alto livello, per fornire prototipi di sistemi exascale e applicazioni associate (H2020 - programma FET). Inoltre, bisogna considerare che l'HPC, utilizzato principalmente negli ultimi anni per grandi simulazioni (es. simulazioni cosmologiche), inizia ora ad essere un'infrastruttura fondamentale per i processi di analisi dei dati di nuovi esperimenti (es. missione Gaia, fase/ simulazioni preparatorie di Euclide, eccetera.). Le condutture di elaborazione dati in fase di progettazione o costruzione per nuove strutture di osservazione a terra e nello spazio si stanno adattando a questa nuova tendenza. Ma è ormai riconosciuto che anche la gestione dei dati deve modificare il proprio approccio: per consentire un corretto sfruttamento dei Big Data, ci si aspetta che siano conformi ai principi FAIR (Findable, Accessible, Interoperable, Reusable). La comunità astronomica è in prima linea nell'adozione della FAIR, grazie all'uso diffuso **dell'Osservatorio Virtuale**

standard definiti da IVOA (International VO Alliance). Negli ultimi anni sono state avviate attività multidisciplinari all'interno della Research Data Alliance (RDA), con l'obiettivo di ottenere una gestione FAIR dei dati nei diversi domini e tra di essi; IVOA partecipa alla RDA.

Una confluenza di due fattori ha spinto l'astronomia in prima linea nella scienza ad alta intensità di dati. In primo luogo, l'astronomia ha adottato **le TIC e il data mining** come potenti mezzi per trattare i dati e come processo evolutivo per soddisfare le sfide scientifiche più impegnative. In secondo luogo, l'avvento di grandi rilievi digitali del cielo ha spinto la comunità astronomica verso le soluzioni proposte dalle iniziative Osservatorio Virtuale e Knowledge Discovery in Databases. Una delle principali conseguenze è la recente comparsa **dell'Astroinformatica e dell'Astrostatistica**, una disciplina che unisce l'astrofisica da un lato e l'ICT e il data mining dall'altro. Al giorno d'oggi c'è una proliferazione esponenziale di servizi e infrastrutture di data mining gratuiti, molti dei quali già scientificamente validati in astrofisica (es. Knime, Orange, Rapid Miner, Weka, VoStat e DAMEWARE). Inoltre, l'Astroinformatica ha portato alla nascita di numerose iniziative internazionali, come l'ASAIP (Astrostatistics and Astroinformatics Portal), simposi dedicati e la prima cattedra europea di Astroinformatica, assegnata allo staff dell'INAF. L'importanza di queste attività per l'astrofisica è stata riconosciuta anche dall'IAU, attraverso la creazione di apposite Commissioni: B1 (Astrofisica Computazionale), B2 (Dati e Documentazione) e B3 (Astroinformatica e Astrostatistica).

Rispetto al problema di **controllare** con adeguata precisione tutti gli elementi di una strumentazione astronomica complessa, va notato che essa è stata trattata diversamente a seconda del dominio (es. ottico/radio) o dei vincoli (es. spazio o ambiente terrestre). È stata adottata un'ampia gamma di tecnologie informatiche (CPU, PLC, FPGA, DSP), a volte privilegiando le prestazioni, altre volte vincolate dagli standard esistenti. Di conseguenza, il contesto di riferimento per questo tipo di attività è da un lato caratterizzato dallo sforzo

realizzato a livello di agenzie spaziali per la standardizzazione di applicazioni software e algoritmi di bordo e dall'altro dallo sforzo profuso da alcune istituzioni scientifiche europee nella definizione di un quadro comune per lo sviluppo di tutte le future applicazioni in tempo reale per il monitoraggio e controllo della strumentazione astronomica. Nel primo caso, entrambi ESA

e la NASA negli ultimi anni hanno sostenuto attività di R&D principalmente dedicate alla costruzione di framework coerenti per lo sviluppo di Software di Controllo a livello satellitare, come, ad esempio, il NASA Core Flight Software System. Nel secondo caso, uno sforzo continuo nell'affrontare i problemi dovuti all'obsolescenza HW e nella costruzione di architetture distribuite efficienti, ha portato allo sviluppo di soluzioni middleware open source integrate in framework multiuso più generali (es. il sistema di controllo TANGO) e ad uno sforzo nell'esplorazione della possibilità di adottare soluzioni standard industriali COTS (es. OPC UA).

La comunità scientifica nazionale è stata coinvolta nello sviluppo **dell'infrastruttura elettronica** europea sin dal suo inizio. L'INFN è stato tra i principali sviluppatori dell'infrastruttura Grid di calcolo distribuito (EGEE) nell'ultimo decennio e attualmente guida il progetto di e-infrastruttura IndigoDataCloud finanziato dal programma EU H2020. CINECA è stata coinvolta fin dall'inizio nello sviluppo della rete HPC europea (DEISA, PRACE). Alcuni ricercatori INAF sono stati coinvolti nello sviluppo e soprattutto nell'utilizzo di queste e-infrastrutture; ci sono recenti partecipazioni minori in IndigoDataCloud, EGI-Engage ed EOSCpilot.

L' **Unità ICT** della Direzione Scientifica ha svolto indagini e consultato più volte la comunità di scienziati INAF coinvolti in diversi aspetti della ricerca come l'astrofisica teorica, l'analisi dei dati, la modellizzazione ecc. Sulla base dei risultati di tali indagini, l'INAF ha recentemente firmato un accordo formale con CINECA per fornire risorse computazionali su infrastrutture di classe Tier-0 e Tier-1 per i bisogni della comunità: l'accordo ha una durata di 3 anni, è rinnovabile ogni anno e prevede anche un supporto specifico per lo sviluppo e porting di applicazioni chiave su sistemi HPC innovativi basati su acceleratori.

Questa infrastruttura è fondamentale anche per iniziare a sviluppare l'infrastruttura SW prototipo per l'analisi di grandi/grandi dati che ci si aspetta dalle sperimentazioni più importanti come sopra menzionate. Ma le esperienze, ei risultati delle suddette indagini, hanno anche dimostrato che i meccanismi Grid e HPC si sono rivelati solo in parte utili per risolvere la varietà di diverse sfide informatiche che la comunità INAF sta affrontando. In particolare, gli scienziati dell'INAF hanno evidenziato la mancanza di un sistema di classe Tier2 in grado di coprire attività informatiche HTC e small-HPC. Un progetto pilota (CHIPP) è iniziato a marzo 2017 e utilizza l'infrastruttura esistente (presso OAT e OACt) con l'obiettivo di verificare se i sistemi interni all'Istituto possono coprire una parte mancante dei bisogni della comunità e se ci sono abbastanza scienziati che desiderano utilizzarlo tipo di strutture. L'INAF, attraverso il finanziamento H2020 ExaNeSt e EuroExa, sta giocando un ruolo centrale anche nel contesto europeo per quanto riguarda i progetti FETHPC, in particolare per la prototipazione di HW e SW e per lo sviluppo di una nuova generazione di codici astrofisici in grado di vantaggio delle capacità di calcolo exascale. Di conseguenza, stiamo lavorando attivamente per avere una nuova generazione di ricercatori ad alta specializzazione da inserire in gruppi di ricerca specifici che richiedono un contributo fondamentale per infrastrutture computazionali innovative e per analisi di dati complessi con insiemi di dati molto grandi.

Per quanto riguarda le attività legate **all'Astroinformatica e all'Astrostatistica**, all'interno dell'INAF sono già attivi progressi in questo ambito. Si basa sulle attività di singoli gruppi di ricerca in collaborazione con grandi progetti di indagine, promuovendo ricerca e sviluppo di data mining, supporto decisionale e soluzioni informatiche per affrontare problemi "data driven" in un ampio spettro di contesti astrofisici, soprattutto quando gli approcci tradizionali possono risultare meno efficienti.

Per quanto riguarda la gestione dei dati, il personale INAF ha lavorato negli ultimi 12 anni alla definizione degli standard VO, e ora guida i WG e i Gruppi di Interesse IVOA. Pertanto gli **archivi dati** INAF installati presso IA2 e in altre strutture, compresi quelli conservati presso ASDC, sono conformi agli standard VO, e questo rappresenta un ottimo trampolino di lancio per lo sviluppo degli archivi FAIR nell'ambito dei progetti futuri. Il gruppo INAF, inoltre, è l'unico al mondo

dominio dell'astrofisica che ha lavorato sull'interoperabilità tra gestione ed elaborazione dei dati e sul portare l'elaborazione ai dati all'interno di un ambiente coerente.

Per quanto riguarda l'attività di sviluppo **SW** (near) real time, la comunità astronomica italiana ha da tempo un forte coinvolgimento in molti progetti per la costruzione di strutture e strumenti di osservazione, sia spaziali che terrestri, e in tutti i domini dello spettro elettromagnetico. In particolare le esperienze passate nello sviluppo di **software di controllo e pipeline di elaborazione dati** per VLT, LBT, VST, TNG, WHT, SRT, ecc. e in strumenti quali FLAMES, X-SHOOTER, SPHERE, GIANO, LBC, VIMOS, ESPRESSO, hanno consentito all'INAF di acquisire le competenze necessarie per diventare un attore competitivo in questo campo a livello europeo e mondiale. La decisione strategica di diventare un membro della collaborazione TANGO fornisce anche la base necessaria per futuri sviluppi di applicazioni di controllo orientate agli oggetti. Analogamente, per la strumentazione spaziale, l'Italia ha svolto ruoli di primo piano nella progettazione e realizzazione di **sistemi di controllo** e del **segmento science ground** per alcune delle missioni spaziali dell'ESA di maggior successo, ad esempio per LFI/Planck, SPIRE, PACS e HIFI per Herschel, Gaia, VIRTIS/Rosetta, ecc. Il know-how acquisito nelle applicazioni spaziali SW real-time, insieme alla conoscenza acquisita degli standard molto rigorosi e rigorosi per lo sviluppo di SW qualificati per lo spazio, possono essere considerati la chiave per simili collaborazioni nella futura missione spaziale di interesse per la scienza INAF. C'è anche un forte e solido know-how sulla gestione dei dati delle missioni spaziali legate all'astrofisica delle alte energie (es. BeppoSAX, Swift, INTEGRAL, NuSTAR, AGILE, Fermi, ecc.). Partendo dall'esperienza di BeppoSAX scienziati e ingegneri INAF hanno sviluppato il software di analisi dei dati per il telescopio a raggi X a bordo Swift, per il telescopio a raggi X a bordo NuSTAR ma anche per gli strumenti a raggi gamma a bordo della missione AGILE. Ora, a partire dalla partecipazione all'esperimento MAGIC, anche il software di analisi dei dati per i telescopi Cherenkov viene sviluppato nell'ambito dei progetti ASTRI e CTA. I dati di Gaia hanno guidato la comunità astronomica nell'era dei Big Data e l'INAF sta contribuendo sia alla riduzione dei dati che all'analisi dei dati di Gaia con ALTEC e alla gestione di grandi database presso l'ASDC. Anche per il prossimo decennio, INAF e la Comunità Astronomica Italiana hanno già messo in campo un forte coinvolgimento in molti progetti che sono attualmente in fase di progettazione o realizzazione. Tra questi possiamo citare il CTA terrestre, ELT, SKA, le missioni spaziali come Euclid, Plato, Athena, più possibilmente ARIEL, SPICA e NASA/OST. Per molti di questi progetti l'Italia contribuisce con parti fondamentali dei **sistemi di controllo** (sia per le strutture di osservazione stesse che per la strumentazione), nonché con **infrastrutture di analisi dei dati** (ad es. segmenti scientifici o condutture di elaborazione dati). Queste collaborazioni, incentrate sugli aspetti SW, forniranno alla comunità INAF un ritorno scientifico garantito, confermando così l'importanza strategica delle competenze di sviluppo SW all'interno dell'INAF. Allo stesso tempo, l'uso dei dati provenienti da grandi rilievi di nuova generazione, come il Large Synoptic Survey Telescope (LSST) a terra, potrebbe far luce sulla natura dell'energia oscura e della materia oscura e forse rivoluzionare la fisica moderna.

Come descritto sopra, il **software di controllo** è uno degli elementi chiave di una struttura di osservazione.

Una corretta connessione tra i requisiti scientifici e la progettazione e implementazione del software di controllo è fondamentale per raggiungere gli obiettivi scientifici. Ciò si ottiene più facilmente se le abilità e le competenze pertinenti sono presenti all'interno dell'Istituto e lavorano fianco a fianco con la comunità scientifica. Questo è ancora più importante se si considera che le soluzioni personalizzate sono costose sia da implementare che da mantenere (soprattutto a lungo termine) e la possibilità di condividere applicazioni già implementate o competenze già acquisite fornisce un mezzo per tenere sotto controllo i costi e aumentare l'efficienza complessiva. Corretto coordinamento

delle competenze esistenti permetterebbe all'INAF di diventare un'istituzione di riferimento a livello europeo per questo tipo di attività.

Le sfide di **elaborazione e calcolo dei dati**, oltre alla preparazione per i grandi progetti sopra menzionati, che coinvolgono a medio termine la comunità INAF, costituiscono sostanzialmente un continuum che richiede una varietà di potenza di calcolo, archiviazione e trasmissione. È quindi ragionevole affermare che non esiste, né è probabile che compaia presto, una soluzione onnicomprensiva. In una prospettiva di 7-10 anni, è probabile che le esigenze della comunità siano soddisfatte da un insieme di diverse infrastrutture elettroniche, come laptop individuali, cluster locali, cloud (EOSC, commerciale), calcolo distribuito, calcolo dedicato, HPC. Tali sistemi devono includere la capacità di utilizzare acceleratori hardware (attualmente GPU, FPGA e altri meccanismi non convenzionali). Sono necessari sforzi per facilitare la transizione da un sistema all'altro, costruendo idealmente un ecosistema integrato, o almeno interoperabile. L'INAF ha bisogno di investire sulle infrastrutture elettroniche che può permettersi, ovvero l'informatica personale e locale, oltre all'informatica "Tier2" a livello di INAF, assicurandosi che i suoi scienziati siano autorizzati e formati per utilizzare le strutture agnostiche del dominio globale (il cloud EOSC, l'HPC Rete). In un'ottica di ottimizzazione delle risorse, infatti, è importante che l'INAF si avvalga delle infrastrutture sostenute dalla Commissione Europea. D'altra parte, è strategico per l'INAF sviluppare la prossima generazione di applicazioni HPC verso la capacità di esascala, unendo lo sforzo a livello europeo per sviluppare una tecnologia autonoma per costruire sistemi di esascala e nuove applicazioni entro circa 10 anni.

I grandi archivi sono invece qualcosa che la comunità astronomica ha bisogno di sviluppare da sola, per la particolarità dei dati, dei metadati e delle tecniche di accesso. Le principali priorità in questo campo sono gli investimenti in nuove tecnologie per un accesso efficiente ai dati online e sistemi veloci di conservazione dei dati. I principi FAIR per i dati enormi devono sempre essere garantiti per garantire il massimo grado di sfruttamento: ciò significa che è necessaria l'estensione e la generalizzazione degli standard IVOA, sia per consentire la copertura di nuovi set di dati attualmente non supportati, sia per trarne vantaggio di infrastrutture elettroniche indipendenti dal dominio sviluppate nel quadro del sostegno dell'UE alla scienza. La chiave in questa visione è lavorare sull'interoperabilità e la federazione tra dati e informatica, estendendo così l'attuale visione VO.

Il vero lavoro della scienza, l'analisi e la comprensione dei dati e la scoperta della conoscenza, inizia dopo l'elaborazione e la consegna dei dati attraverso gli archivi. Il cambiamento profondo e universale nei modi in cui facciamo scienza basata sui dati è stato riconosciuto da oltre un decennio ed è talvolta descritto come e-Science. L'e-Science espressamente adattata all'Astrofisica è **l'Astroinformatica**.

Nata come tipico quadro multidisciplinare, questa disciplina ha natura e vocazione del tutto orizzontali rispetto ai temi della ricerca astrofisica: è quindi il meccanismo più idoneo per sfruttare l'attuale patrimonio di dati. Esistono molti buoni metodi statistici e di data mining, che stanno gradualmente permeando la comunità astronomica, sebbene la loro adozione sia stata più lenta di quanto si possa sperare. Un software efficace e scalabile e una metodologia necessaria per la scoperta della conoscenza in set di dati moderni, grandi e complessi in genere non esistono ancora, almeno nel pubblico dominio. La chiave per ulteriori progressi nello scenario dei Big Data è promuovere e sostenere la ricerca e lo sviluppo di strumenti di data mining ed esplorazione in grado di operare su set di dati su scala tera e oltre.

11 La matrice progetto-domanda-metodo

Nelle sezioni precedenti è stata sviluppata un'analisi dettagliata delle questioni scientifiche più sfidanti per il prossimo decennio, delle tecnologie abilitanti necessarie per rispondervi e del plausibile/possibile contributo INAF ai grandi progetti dello scenario internazionale.

È ora possibile riordinare le tabelle precedenti in un'unica tabella raggruppando domande e metodi in funzione dei progetti (vedi Appendice 1.1 e 1.2).

Questo elenco intende includere tutti i progetti che possono dare un contributo sostanziale per risolvere le “questioni chiave”. Non va inteso come esaustivo di tutti i progetti in cui l'INAF è o dovrebbe essere coinvolta, né di quelli che si stanno discutendo all'interno della comunità astrofisica, per almeno due ragioni. Da un lato, oltre ai grandi progetti qui elencati, è importante sostenere i progetti su piccola scala, estremamente innovativi, ad alto rischio e ad alto guadagno, su cui prospera una comunità scientifica. D'altra parte nella ricerca scientifica l'indagine o anche la soluzione di un problema genera continuamente domande più complesse e affascinanti. Ovviamente nel prossimo decennio verranno proposti concetti e progetti nuovi e imprevisi che dovranno essere valutati ed eventualmente inseriti nel contesto strategico delineato da questo piano e dai suoi futuri aggiornamenti.

Appendice 1.1 Progetti con un significativo coinvolgimento tecnologico futuro dell'INAF

Progetto	Domanda chiave	Metodo	Futuro contributo tecnologico INAF
SKA	Processi che hanno determinato la formazione e l'evoluzione del Solare Sistema	Osservazioni di corpi primitivi, sistemi esoplanetari (processi di aggregazione delle polveri, processi di formazione)	Sistemi di antenne Rifiutatore di calore Feed ad array a fasi Trasmettitore e ricevitore ottico front-end Fibra ottica analogica RF/RFoF UAV Back-end digitale Elettronica di lettura SW in tempo reale SW di controllo Big Data Infrastrutture di analisi dei dati
	Dischi protoplanetari: condizioni iniziali per la formazione dei pianeti	Formazione ed evoluzione dei dischi: solidi dalla polvere ai pianeti, contenuto di gas, dissipazione, evoluzione chimica di molecole organiche complesse, proprietà del vento da linee termiche libere e radio. Orientamento e ampiezza del campo magnetico attorno ai getti/dischi. Interazione disco-stella-pianeta	
	Processi evolutivi che danno origine all'emergere della vita	Osservazione di corpi primitivi (materiale organico e ghiacci)	
	Portare modelli stellari al potere successivo	Confronto delle misurazioni dei campi magnetici con le previsioni del modello	
	Fisica dell'accrescimento e dell'espulsione su/da oggetti compatti	Osservazioni di oggetti compatti galattici ed extragalattici	
	Equazione dello stato della materia nucleare e delle stelle "strane"; Pulsar; sistemi binari compatti	Misure di periodi e derivate di periodo, momenti di inerzia di stelle compatte	

	Proprietà globali di formazione stellare	Tomografia di Faraday, senza termica, HI e RRL. Inventario completo delle specie interstellari accessibili nell'intervallo di cm	
	Origine ed evoluzione delle galassie	HI contenuto di galassie Osservazioni di dettaglio della cinematica, deflussi, afflussi dei gas. Collegamento con CGM e IGM	
	Proprietà delle prime galassie e BH Fonti di reionizzazione	Tomografia da 21 cm.	
	Cosmologia con LSS del Universo: natura del DM e DE, Fisica delle condizioni iniziali (non gaussianità)	Mappatura dell'intensità	
LOFAR	Proprietà globali di formazione stellare nel MW: nubi molecolari e dense gas Formazione ed evoluzione delle galassie Il ciclo di vita della radio AGN	SFR, efficienza di formazione stellare, Meccanismo fisico responsabile dell'inizio della formazione stellare in luoghi molto diversi della Galassia. Creazione di una "teoria fondamentale" di un modello predittivo su scala galattica per la formazione stellare che possa fungere da "modello z=0" per le galassie esterne. Osservazioni in radio-continuum dell'emissione di sincrotrone da galassie e AGN	
	Come si può monitorare e prevedere il tempo spaziale?	Monitoraggio dell'attività solare Sviluppo di strumenti di previsione	

[VISIONE STRATEGICA INAF]

SRT	<p>Proprietà globali di formazione stellare nel MW: nubi molecolari e dense gas</p> <p>Processi di accelerazione delle particelle a tutte le diverse scale</p> <p>Fisica dell'accrescimento e dell'espulsione su/da oggetti compatti</p>	<p>SFR, efficienza di formazione stellare, Meccanismo fisico responsabile dell'inizio della formazione stellare in luoghi molto diversi della Galassia. Creazione di una "teoria fondamentale" di un modello predittivo su scala galattica per la formazione stellare che possa fungere da "modello z=0" per le galassie esterne.</p> <p>Ruolo dei campi magnetici durante il collasso delle varie fasi del mezzo interstellare ea tutte le scale spaziali galattiche</p> <p>Strutture a getto su scale sub-parsec-pc. Punti caldi e lobi radio. Reliquie radiofoniche a grappolo. Resti di supernovae. Pulsar, Gamma-ray burst. Modalità di accrescimento efficienti/inefficienti. Venti e getti.</p>	<p>Ottica attiva</p> <p>Feed ad array a fasi</p> <p>Trasmettitore e ricevitore ottico front-end</p> <p>Fibra ottica analogica RF/RFoF</p> <p>Back-end digitale</p> <p>Elettronica di lettura</p> <p>SW in tempo reale</p> <p>SW di controllo</p> <p>Big Data</p> <p>Infrastruttura di analisi dei dati</p>
	<p>Come si può monitorare e prevedere il tempo spaziale?</p>	<p>Monitoraggio dell'attività solare</p> <p>Sviluppo di strumenti di previsione</p>	
ALMA	<p>Origine ed evoluzione delle galassie</p>		<p>Rifiutatore di calore</p> <p>Back-end digitale</p> <p>Elettronica di lettura</p> <p>Sistemi multifascio e multifrequenza</p> <p>Criogenica e ingegneria termica</p> <p>Infrastrutture di analisi dei dati</p>
	<p>Proprietà globali di formazione stellare</p>	<p>Indagini su diverse migliaia di formazione stellare e ammassi prestellari in una varietà di ambienti galattici</p>	
	<p>Fisica della formazione stellare individuale eventi</p>	<p>Rilievi di nuclei, protostelle e dischi circumstellari. Astrochimica delle prime fasi, formazione di molecole complesse.</p>	

[VISIONE STRATEGICA INAF]

	Dischi protoplanetari: condizioni iniziali per la formazione dei pianeti.	<p>Determinazione robusta del rapporto massa polvere-gas nei dischi. Evoluzione della polvere, dissipazione del disco.</p> <p>Distribuzione del campo magnetico attorno a giovani stelle. Spettro-imaging di getti molecolari e deflussi. Studi sull'evoluzione del momento angolare.</p> <p>Identificazione dei meccanismi che generano le strutture del disco (lacune, anelli, spirali, ecc.), e loro relazione con la presenza di pianeti di nuova formazione.</p>	
	Processi che hanno determinato la formazione e l'evoluzione del Solare Sistema	Osservazioni di corpi primitivi, sistemi esoplanetari (processi di aggregazione delle polveri, processi di formazione)	
	Processi evolutivi che danno origine all'emergere della vita	Osservazione di corpi primitivi (materiale organico e ghiacci)	
	Produzione ed espulsione di getti nei sistemi di accrescimento	Osservazione di spettri multi-lunghezza d'onda e variabilità temporale veloce	
SPICA	Origine ed evoluzione delle galassie	ISM nel MIR e FIR	SW di controllo SW in tempo reale
	Formazione stellare vs. accrescimento gravitazionale in sorgenti ad alto spostamento verso il rosso	Spettroscopia nel lontano infrarosso	Infrastrutture di analisi dei dati
	Fisica dei singoli eventi di formazione stellare	Spettropolarimetria nella FIR	
ARIEL	Chimica e dinamica delle atmosfere esoplanetarie	S/N molto alto, risoluzione bassa e media Trasmissione ed emissione NIR/MIR	Ottica a forma libera/asferica Criogenica e ingegneria termica Elettronica di lettura

		spettroscopia (fino al regime della Super Terra).	Elettronica di bordo SW in tempo reale SW di controllo Segmento di terra Infrastrutture di analisi dei dati
Gaia	Formazione ed evoluzione di strutture subgalattiche nel Latteo Way e il volume locale	Risultati astrometrici anche combinati con dati spettroscopici complementari	Infrastrutture di analisi dei dati
	L'evoluzione chemodinamica degli ammassi stellari nella MW e in altre galassie	Risultati astrometrici anche combinati con dati spettroscopici complementari	
	La storia della formazione stellare (SFH) nella Via Lattea, nelle galassie del Gruppo Locale e oltre	Risultati astrometrici anche combinati con dati spettroscopici complementari	
	Il ruolo delle stelle pulsanti e Fluttuazioni di luminosità superficiale come traccianti di popolazioni stellari risolte e irrisolte	Risultati astrometrici anche combinati con dati spettroscopici complementari	
	Portare modelli stellari al potere successivo	Confronto con informazioni astrometriche , integrate da spettroscopia e asteroseimologia	
	Proprietà globali di formazione stellare nella Via Lattea	Tomografia 3D dell'ISM Galattico. 3D di oggetti pre-MS confrontati con grumi prestellari e protostellari per tracciare SFH attraverso bracci a spirale galattici.	
	Fisica dei singoli eventi di formazione stellare e degli ammassi stellari.	Informazioni astrometriche, integrate con la spettroscopia.	

		Origine del FMI, anche in ambienti a bassa metallicità, e della frazione binaria stellare.	
	Dischi protoplanetari: condizioni iniziali per la formazione dei pianeti.	Misure astrometriche integrate con spettroscopia: parametri di stelle e dischi	
	Architettura e dinamica dei sistemi planetari in funzione di massa, raggio e separazione orbitale	Astrometria: censimento imparziale della massa e delle proprietà orbitali di pianeti giganti a separazioni intermedie	
	Dipendenza dalle stelle ospiti e dalle proprietà dell'ambiente stellare.	Astrometria: proprietà del pianeta in funzione delle caratteristiche stellari (massa, composizione chimica, età, binarietà) e dell'ambiente (dischi, ammassi)	
VLT	La natura della materia oscura	Dinamica delle galassie e degli ammassi di galassie Crescita della struttura Rilievi di galassie Fluttuazioni nel mezzo intergalattico	Dispensori ad alta efficienza Spettrometri NIR/VIS Ottimizzazione del sottosistema criogenico Tecnologie di progettazione e allineamento opto-meccaniche di alta precisione
	La natura dell'energia oscura		Ottica a forma libera/asferica Sistema coronagrafico
	Comprendere la gravità su larga scala		Ottica Attiva Caratterizzazione e previsione della turbolenza ottica
	Condizioni iniziali in Cosmologia		AO ad ampio campo Banda visibile AO
	Proprietà delle prime galassie e BH. Fonti di reionizzazione.	Rilievi di emettitori Ly- γ e oggetti primordiali.	Rivelatori ottici Rivelatori IR

[VISIONE STRATEGICA INAF]

	Origine ed evoluzione delle galassie.	Osservazioni di dettaglio della cinematica, deflussi, afflussi dei gas. Collegamento con CGM e IGM.	Elettronica di lettura SW in tempo reale SW di controllo Infrastrutture di analisi dei dati
	Architettura e dinamica dei sistemi planetari in funzione di massa, raggio e separazione orbitale.	Parametri di massa e orbitali con spettroscopia ad altissima precisione fino a pianeti terrestri in zona abitabile	
	Chimica e dinamica delle atmosfere esoplanetarie.	Spettroscopia di imaging ad alto contrasto, di trasmissione e di emissione a media e alta risoluzione (dalle Super Terre ai giganti gassosi).	
	Fisica della formazione stellare individuale eventi	Grandi indagini spettroscopiche per le proprietà di accrescimento/espulsione di massa in funzione dei parametri stellari. Spettro-imaging di regioni di formazione stellare. Feedback dei deflussi sui cloud principali.	
	Dischi protoplanetari: condizioni iniziali per la formazione dei pianeti	Osservazioni ad alto contrasto e ad alta risoluzione spaziale/spettrale del disco interno e della regione di lancio del getto. Venti fotoevaporati e neutri. Dinamica dei getti atomici, feedback sulle proprietà del disco. Meccanismi che generano le ricche strutture del disco (lacune, anelli, spirali, ecc.), e loro relazione con la presenza di pianeti di nuova formazione.	
	Portare modelli stellari al potere successivo.	Confronto di dati accurati con modelli stellari	

	Formazione ed evoluzione di strutture subgalattiche nel Latteo Way e il volume locale	Spettroscopia ad alta risoluzione, incluso il Rilievo di Gaia ESO, completato da astrometria e fotometria	
	L'evoluzione chemiodinamica degli ammassi stellari nelle galassie.	Spettroscopia ad alta risoluzione compreso il Rilievo di Gaia ESO, completato da astrometria e fotometria	
NTT-SoXS	Scala di distanza Controparti EM di eventi GW	follow-up precoce di eventi transitori	<p>Dispensori ad alta efficienza</p> <p>Spettrometri NIR/VIS</p> <p>Ottimizzazione del sottosistema criogenico</p> <p>Tecnologie di progettazione e allineamento opto-meccaniche di alta precisione</p> <p>Rivelatori ottici</p> <p>Rivelatori IR</p> <p>Elettronica di lettura</p> <p>SW di controllo</p> <p>Infrastrutture di analisi dei dati</p>
VST	Origine ed evoluzione delle galassie	Collega i marcatori di evoluzione delle galassie (dimensioni, massa, forma delle galassie, presenza di instabilità del disco) con i meccanismi guida della crescita e trasformazione delle galassie	<p>Sistema opto-meccanico ad ampio campo</p> <p>Ottica Attiva</p> <p>Rivelatori ottici</p> <p>Elettronica di lettura</p> <p>SW di controllo</p> <p>Infrastrutture di analisi dei dati</p>
	La storia della formazione stellare (SFH) nella Via Lattea, nelle galassie del Gruppo Locale e oltre.	Fotometria accurata ad ampio campo di popolazioni stellari.	
	Controparti elettromagnetiche di GW Large FOV ricerca ottica di scatole di errore GW		

TNG	Chimica e dinamica delle atmosfere esoplanetarie	Spettroscopia di trasmissione ed emissione ad alta risoluzione nel visibile e NIR	Dispensori ad alta efficienza Spettrometri NIR/VIS Ottimizzazione del sottosistema criogenico Sistema opto-meccanico ad ampio campo
	Dischi protoplanetari: condizioni iniziali per la formazione dei pianeti	Spettroscopia con HARPS-N, GIANO (e GIARPS): accrescimento ed espulsione di massa in funzione dei parametri stellari. Venti neutri e atomici, frequenza dei getti e deflussi. Firme di fotoevaporazione.	Spettro-polarimetri Optica Attiva Rivelatori ottici Rivelatori IR Elettronica di lettura SW di controllo
	L'evoluzione chemiodinamica degli ammassi stellari nella MW e in altre galassie	Osservazioni spettroscopiche	
	Formazione ed evoluzione di strutture subgalattiche nel Latteo Way e il volume locale	Spettroscopia con HARPS-N, GIANO (e GIARPS)	
	Architettura e dinamica dei sistemi planetari in funzione di massa, raggio e separazione orbitale	Spettroscopia con HARPS-N, GIANO (e GIARPS)	
	Dipendenza dalle proprietà delle stelle ospiti e dall'ambiente stellare	Spettroscopia con HARPS-N e GIARPS	
	Imaging e follow-up spettroscopico di transitori ad alta energia	Imaging ottico e NIR, spettroscopia e polarimetria	
	Processi che hanno determinato la formazione e l'evoluzione del Solare Sistema	Osservazioni spettroscopiche di corpi primitivi	

[VISIONE STRATEGICA INAF]

LBT	La natura della materia oscura	Dinamica delle galassie e degli ammassi di galassie Crescita della struttura Rilievi di galassie Fluttuazioni nel mezzo intergalattico	Dispensori ad alta efficienza Ottimizzazione del sottosistema criogenico Tecnologie di progettazione e allineamento opto-meccaniche di alta precisione Sistema opto-meccanico ad ampio campo Sistema coronagrafico Ottica Attiva Caratterizzazione e previsione della turbolenza ottica AO ad ampio campo Banda visibile AO Rivelatori ottici Rivelatori IR Elettronica di lettura SW in tempo reale SW di controllo
	La natura dell'energia oscura		
	Portare modelli stellari al potere successivo	Confronto di dati fotometrici accurati con modelli stellari.	
	La storia della formazione stellare (SFH) nella Via Lattea, nelle galassie del Gruppo Locale e oltre.	Rilievi fotometrici	
	Fisica dei singoli eventi di formazione stellare	Test dei modelli dei meccanismi di lancio del jet e collegamento con l'evoluzione del momento angolare. Proprietà del getto ad alta risoluzione angolare come struttura dell'urto, massa e velocità di deflusso della quantità di moto.	
	Dischi protoplanetari: condizioni iniziali per la formazione dei pianeti	Indagini statisticamente significative sulle proprietà dei dischi protoplanetari. Osservazioni ad alto contrasto e ad alta risoluzione spaziale della struttura del disco, identificazione di corpi planetari in dischi evoluti. Proprietà jet alla loro base.	
	Transitori ad alta energia tardivi, fasi deboli, ambienti vicini e galassie ospiti	Imaging tardo profondo e spettroscopia	

[VISIONE STRATEGICA INAF]

ELT	La natura della materia oscura	Dinamica delle galassie e degli ammassi di galassie Crescita della struttura Rilievi di galassie Fluttuazioni nel mezzo intergalattico	Dispensori ad alta efficienza Ottimizzazione del sottosistema criogenico Tecnologie di progettazione e allineamento opto-meccaniche di alta precisione Sistema opto-meccanico ad ampio campo
	La natura dell'energia oscura		Ottica a forma libera/asferica Sistema coronagrafico
	Comprendere la gravità su larga scala		Spettrometri NIR/VIS Spettro-polarimetri
	Condizioni iniziali in Cosmologia		Ottica Attiva Tecnologie simili a MAORY
	Proprietà delle prime galassie e BH. Fonti di reionizzazione.	Rilievi di emettitori Ly- γ e oggetti primordiali	Caratterizzazione e previsione della turbolenza ottica AO ad ampio campo
	Origine ed evoluzione delle galassie	Osservazioni di dettaglio della cinematica, deflussi, afflussi dei gas. Collegamento con CGM e IGM	Strategia di controllo per il sistema ELT AO Rivelatori ottici Rivelatori IR
	Architettura e dinamica dei sistemi planetari in funzione di massa, raggio e separazione orbitale	Imaging e astrometria ad alto contrasto per la determinazione di massa e parametri orbitali	Elettronica di lettura SW in tempo reale SW di controllo
	Chimica e dinamica delle atmosfere esoplanetarie.	Spettroscopia ad alta dispersione e imaging diretto di pianeti in transito e ad ampia separazione	Infrastrutture di analisi dei dati
	Dipendenza dalle proprietà delle stelle ospiti e dall'ambiente stellare.	Spettroscopia ad alta dispersione e imaging diretto di pianeti in transito e ad ampia separazione	
	Processi evolutivi che danno origine all'emergere della vita.	Spettroscopia ad alta dispersione e imaging diretto di pianeti terrestri nella zona abitabile.	

	Fisica della formazione stellare individuale eventi.	Spettroscopia ad alta risoluzione. Dinamica degli YSO nella frammentazione dei cespi e confronto con carote submillimetriche. Origine del FMI, anche in ambienti a bassa metallicità, e della frazione binaria stellare.	
	Dischi protoplanetari: condizioni iniziali per la formazione dei pianeti.	Imaging ad alta risoluzione spaziale di dischi, struttura e interazione disco-pianeta. Spettroscopia ad alta risoluzione: accrescimento ed espulsione di massa in funzione dei parametri stellari, in ambienti solari ea bassa metallicità. Studi ad alta risoluzione spettrale e spaziale della cinematica e della dinamica dei jet: proprietà fisiche, trasporto del momento angolare. Venti fotoevaporati, dissipazione del disco. Connessione stella-disco-jet, magnetosfere.	
	Portare modelli stellari al potere successivo.	Confronto di dati fotometrici e spettroscopici accurati con modelli stellari.	
	Formazione ed evoluzione di strutture subgalattiche nella Via Lattea e nel Volume Locale.	Spettroscopia multiplex massiva.	
	L'evoluzione chemiodinamica degli ammassi stellari nelle galassie.	Spettroscopia multiplex ad alta risoluzione.	
	La storia della formazione stellare (SFH) nella Via Lattea, nelle galassie del Gruppo Locale e oltre.	Dati ad alta risoluzione spaziale.	

	Il ruolo delle stelle pulsanti e delle fluttuazioni della luminosità superficiale come traccianti di popolazioni stellari risolte e irrisolte.	Dati ad alta risoluzione spaziale. Spettroscopia ad alta risoluzione.	
	Transitori ad alta energia in campi molto affollati o con spostamento verso il rosso alto/molto alto; fasi nebulari di supernove e supernove superluminose lontane	Imaging e spettroscopia AO-assistiti	
LSST	Origine ed evoluzione delle galassie	Collega i marcatori di evoluzione delle galassie (dimensioni, massa, forma delle galassie, presenza di instabilità del disco) con i meccanismi guida della crescita e trasformazione delle galassie	Infrastrutture di analisi dei dati
	Portare modelli stellari al potere successivo	Determinazioni precise della distanza. Test di ipotesi fisiche e numeriche in modelli stellari.	
	L'evoluzione chemodinamica degli ammassi stellari nelle galassie	Dati fotometrici e astrometrici profondi.	
	Il ruolo delle stelle pulsanti e delle fluttuazioni della luminosità superficiale come traccianti di popolazioni stellari risolte e irrisolte.	Dati astrometrici accurati, determinazioni della distanza.	
	Dischi protoplanetari: condizioni iniziali per la formazione dei pianeti.	Rilievo e identificazione di giovani oggetti stellari transitori: accrescimento ed espulsione di massa in funzione dei parametri stellari e legame con l'evoluzione del disco.	
	Formazione ed evoluzione di	Dati fotometrici e astrometrici profondi.	

[VISIONE STRATEGICA INAF]

	strutture subgalattiche nel Latteo Way e il volume locale		
	Cielo transitorio	Monitoraggio intensivo, ricerca di SN ed eventi di interruzione delle maree, GRB, bagliori residui	
CHEOPE	Architettura e dinamica dei sistemi planetari in funzione di massa, raggio e separazione orbitale	Fotometria: follow-up di sistemi planetari extrasolari transitanti e non transitanti per una migliore e nuova determinazione del raggio e del periodo.	Tecnologie di progettazione e allineamento opto-meccaniche di alta precisione Ottica a forma libera/asferica Ottica grande/veloce Infrastrutture di analisi dei dati
	Dipendenza dalle proprietà delle stelle ospiti e dall'ambiente stellare	Fotometria: follow-up di sistemi planetari extrasolari transitanti e non transitanti	
Euclide	Natura dell'energia oscura		Elettronica di lettura Rivelatori IR SW in tempo reale SW di controllo Infrastrutture di analisi dei dati
	Natura del DM		
	Origine ed evoluzione delle galassie	Collega i marcatori di evoluzione delle galassie (dimensioni, massa, forma delle galassie, presenza di instabilità del disco) con i meccanismi guida della crescita e trasformazione delle galassie	
	Formazione ed evoluzione di strutture subgalattiche nel Latteo Way e il volume locale	Monitoraggio multi-epoca, tutto il cielo di variabili risolte (MW componenti diversi, galassie esterne) per derivare strutture 3d e vincolare modelli di pulsazione.	
	La produzione di elementi pesanti tramite il processo s e il processo r	Studia le popolazioni irrisolte utilizzando indagini fotometriche.	
	Il ruolo delle stelle pulsanti e Fluttuazioni della luminosità della superficie come	Monitoraggio multiepoca, tutto il cielo	

[VISIONE STRATEGICA INAF]



	traccianti di popolazioni stellari risolte e irrisolte		
	La storia della formazione stellare (SFH) nella Via Lattea, nelle galassie del Gruppo Locale e oltre.	Utilizza indagini galattiche ed extragalattiche su larga scala (fotometriche, astrometriche, spettroscopiche) per mappare la struttura, la composizione, la cinematica e la storia della formazione stellare nelle galassie MW e LG. Testare i meccanismi di formazione delle galassie nei modelli CDM.	
Atena	Fisica dell'accrescimento e dell'espulsione su/da oggetti compatti	Spettroscopia risolta nel tempo	Tecnologia dei segmenti di vetro Struttura di test/calibrazione per ottiche segmentate di grandi dimensioni Filtri sottili ad ampia area per rivelatori di raggi X Rivelatori microcalorimetrici TES e criogenica Infrastrutture di analisi dei dati
	Emissione non termica da transitori ad alta energia; radiazione di supernova termica	Monitoraggio intensivo, soprattutto ad epoche medio/tardive; spettroscopia accurata	
	Materia oscura	emissione continua o/e lineare risultante dal decadimento o dall'annichilazione di particelle di DM.	
	Censimento, distribuzione e proprietà del gas caldo cosmico	Termo e chemodinamica di barioni caldi e caldi diffusi (ICM, WHIM)	
CTA	Origine dei raggi cosmici, accelerazione delle particelle, propagazione e impatto sull'ambiente	Osservazione di residui di SN e potenziali sorgenti di accelerazione fino a 100 TeV	Segmenti di vetro e tecnologia di replica Rivelatori SiPM Elettronica di lettura SW in tempo reale SW di controllo SW di analisi dei dati

	<p>Probing Extreme Environments: processi vicini a stelle di neutroni, buchi neri, getti relativistici, venti ed esplosioni; emissione non termica di sorgenti altamente e ultra relativistiche</p>	<p>monitoraggio e spettroscopia di blazar, pulsar, transitori galattici, resti SN; ricerca dell'emissione di GRB TeV</p>	
	<p>Vincolare le leggi fondamentali della natura (es. Violazione dell'invarianza di Lorentz, particelle simili ad assioni, materia oscura)</p>	<p>Ricerca di correlazioni temporali tra TeV e curve di luce a bassa energia; osservazione di anomalie spettrali e assorbimento cosmico anomalo</p>	
	<p>Controparti TeV di sorgenti di neutrini GW e UHE</p>	<p>Ricerca e follow-up di imaging e spettroscopia</p>	
TESEO		<p>Monitoraggio ad ampio campo con precisione di localizzazione arcmin Misure spettrali a banda larga di Esplosioni di raggi gamma Localizzazione in tempo reale e repointing IR autonomo di sorgenti GRB</p>	<p>Rilevatori di deriva al silicio (accoppiati con rilevatori a scintillatore) Elettronica di lettura Struttura di prova/calibrazione</p>
IXPE	<p>Fenomeni non termici in sorgenti relativistiche, stelle massicce, resti di supernova</p>	<p>Polarimetria a raggi X per immagini; misurazioni simultanee spettrali, spaziali e temporali</p>	<p>Rilevatori di pixel di gas Elettronica di lettura Struttura di prova/calibrazione</p>
	<p>Determinazione della geometria e del meccanismo di emissione di Active Nuclei Galattici e microquasar</p>		
	<p>Trovare la configurazione del campo magnetico nelle magnetar e</p>		

	determinare la grandezza del campo		
	Trovare il meccanismo per la produzione di raggi X nelle pulsar (sia isolate che in accrescimento) e la geometria		
ERMETE	Posizione precisa di GRB di media luminosità e loro sfruttamento per l'astrofisica multi-messaggero e la fisica fondamentale (ad esempio, testare l'invarianza di Lorentz)	Rete di cubesat che trasportano rivelatori GRB con ampia banda di energia (pochi keV – diversi MeV) e risoluzione temporale di ~100 ns	Rilevatori di deriva al silicio (accoppiati con rivelatori a scintillatore) Elettronica di lettura Struttura di prova/calibrazione
eXTP	Materia in condizioni estreme di densità (equazione di stato nelle stelle di neutroni, QCD), gravità (accrescimento in un campo forte di gravità, GR) e magnetismo (magnetari e pulsar, QED). Localizzazione accurata di GRB e transitori di raggi X.	Combinazione senza precedenti di sensibilità temporale, spettrale e polarimetrica nell'intervallo di energia 0,5-30 keV. 4 m ² di superficie effettiva attraverso telescopi a raggi X e collimatori. >900 cm ² polarimetri a raggi X ad area effettiva a 2 keV. Monitor ad ampio campo con campo visivo simultaneo 4sr, in 2-50 keV.	Rilevatori di deriva al silicio di grandi dimensioni Rilevatore di pixel di gas Ottica a raggi X replica nichel
IBIS	Come viene prodotto il campo magnetico solare? Qual è il ruolo della magnetocovezione turbolenta nei meccanismi che danno origine alla dinamica e alla variabilità solare?	Studia il campo magnetico ad alta risoluzione spaziale e capacità spettropolarimetriche più sensibili.	Spettro-polarimetri
	Quali sono i meccanismi fisici che regolano il riscaldamento dei plasmi astrofisici e l'accelerazione delle particelle ad alta energia?	Osservazioni ottiche e IR della bassa atmosfera solare.	

[VISIONE STRATEGICA INAF]

	Quali sono le dinamiche della radiazione delle particelle e dei campi elettromagnetici nell'ambiente planetario (con focus sulla Terra)? E come è guidato da agenti esterni (tempo spaziale)?	Modellazione MHD di strutture magnetiche e simulazioni di idrodinamica radiativa con calcolo ad alte prestazioni.	
DKIST	Come viene prodotto il campo magnetico solare? Qual è il ruolo della magnetoconvezione turbolenta nei meccanismi che danno origine alla dinamica e alla variabilità solare?	Studia il campo magnetico ad alta risoluzione spaziale e capacità spettropolarimetriche più sensibili su un'ampia gamma di altezze atmosferiche, comprese le regioni coronali (coronagrafia).	
	Quali sono i meccanismi fisici che regolano il riscaldamento dei plasmi astrofisici e l'accelerazione delle particelle ad alta energia?	Osservazioni ottiche e IR dell'atmosfera solare, dal photosphere al corona.	
est (Europeo Solare Telescopio)	Come viene prodotto il campo magnetico solare? Qual è il ruolo della magnetoconvezione turbolenta nei meccanismi che danno origine alla dinamica e variabilità solare?	Studia il campo magnetico ad alta risoluzione spaziale e capacità spettropolarimetriche più sensibili.	Rifiutatore di calore Spettro-polarimetri Sistema meteorologico spaziale Sistema AO senza polarizzazione Strategia di controllo per il sistema EST AO SW in tempo reale SW di controllo Caratterizzazione e previsione della turbolenza ottica Ottica Attiva AO ad ampio campo Infrastrutture di analisi dei dati Grandi archivi
	Meccanismi fisici che regolano il riscaldamento dei plasmi astrofisici e l'accelerazione delle particelle ad alta energia	Osservazioni ottiche e IR della bassa atmosfera solare.	
	Quali sono le dinamiche della radiazione delle particelle e dei campi elettromagnetici nell'ambiente planetario (con focus sulla Terra)? E com'è	Osservazioni coordinate da terra e misurazioni spaziali. Modelli numerici globali di espulsione del plasma dal Sole, trasporto e circolazione del plasma.	

[VISIONE STRATEGICA INAF]

	guidato da agenti esterni (tempo spaziale)?		
Orbiter solare	Come viene prodotto il campo magnetico solare? Qual è il ruolo della magnetoconvezione turbolenta nei meccanismi che danno origine alla dinamica e alla variabilità solare?	Studia il campo magnetico ad alta risoluzione spaziale e capacità spettropolarimetriche più sensibili su un'ampia gamma di altezze atmosferiche, comprese le regioni coronali (coronagrafia)	Sistema coronagrafico SW in tempo reale SW di controllo Elettronica di lettura
		Nuove osservazioni dei flussi polari solari e dei campi fuori dall'eclittica.	
	Quali sono i meccanismi fisici che regolano il riscaldamento dei plasmi astrofisici e l'accelerazione delle particelle ad alta energia?	Osservazioni della cromosfera solare e della corona mediante raggi VL, UV, EUV e X.	
		Imaging simultaneo ad alta risoluzione e osservazioni spettroscopiche del Sole e della corona interna dentro e fuori il piano dell'eclittica.	
		Esegui misurazioni in situ del plasma del vento solare, dei campi, delle onde e delle particelle energetiche a diverse distanze dal Sole per studiare il ruolo della turbolenza nell'accelerazione, energizzazione e dissipazione.	
Modellazione MHD di strutture coronali.			
Quali sono le dinamiche della radiazione delle particelle e dei campi elettromagnetici nell'ambiente planetario (con	Osservazioni telerilevate (VL, UV, EUV e raggi X) dallo spazio della corona solare e dell'eliosfera interna.		

[VISIONE STRATEGICA INAF]

	<p>concentrarsi sulla Terra)? E come è guidato da agenti esterni (tempo spaziale)?</p>		
		<p>Osservazioni coordinate da terra e misurazioni spaziali. Modelli numerici globali di espulsione del plasma dal Sole, trasporto e circolazione del plasma.</p>	
Bepi Colombo	<p>Processi che hanno determinato la formazione e l'evoluzione del Sole</p> <p>Sistema</p> <p>Formazione ed evoluzione di Mercurio</p> <p>Collegamento di Mercurio con il suo ambiente</p>	<p>Caratterizzazione di Mercurio, sua esosfera e magnetosfera</p>	<p>Stereo-telecamere</p> <p>fotocamera ad alta risoluzione</p> <p>Spettrometri NIR/VIS</p> <p>Accelerometri</p> <p>Sistema di rilevamento delle particelle neutre</p> <p>SW in tempo reale</p> <p>SW di controllo</p> <p>Elettronica di lettura</p>
ExoMars	<p>Processi che hanno determinato la formazione e l'evoluzione del Sole</p> <p>Sistema</p> <p>Processi evolutivi che danno origine all'emergere della vita</p>	<p>Studio di Marte (suolo e atmosfera)</p>	<p>Spettrometri NIR/VIS</p> <p>stereocamera</p> <p>SW in tempo reale</p> <p>SW di controllo</p> <p>Elettronica di lettura</p>
SUCCO	<p>Processi che hanno determinato la formazione e l'evoluzione del Sole</p> <p>Sistema</p> <p>Formazione ed evoluzione dei satelliti ghiacciati di Giove e comparsa di ambienti abitabili</p>	<p>Analisi di telerilevamento di Ganimede, Europa, Callisto e Giove</p>	<p>Tecnologie di progettazione e allineamento opto-meccaniche di alta precisione</p> <p>Ottica a forma libera/asferica</p> <p>Ottica grande/veloce</p> <p>Spettrometri NIR/VIS</p> <p>SW in tempo reale</p>

	Processi atmosferici dei pianeti giganti		SW di controllo Elettronica di lettura telecamere ad alta risoluzione fusione di dati e banche dati integrate Infrastrutture di analisi dei dati
PLATONE	Portare modelli stellari al potere successivo	Confronto con dati asterosismici accurati	Tecnologie di progettazione e allineamento opto-meccaniche di alta precisione Sistema opto-meccanico ad ampio campo Ottica a forma libera/asferica Elettronica di lettura SW in tempo reale Infrastrutture di analisi dei dati
	Architettura e dinamica dei sistemi planetari in funzione di massa, raggio e separazione orbitale	Fotometria: studio statistico di sistemi planetari extrasolari in transito, con enfasi sulle proprietà dei pianeti terrestri nella zona abitabile di stelle simili al solare.	
	Dipendenza dalle proprietà delle stelle ospiti e dall'ambiente stellare	Fotometria: studio statistico di sistemi planetari extrasolari in transito e caratterizzazione di stelle centrali mediante sismologia	
CHIPP Cloud computing HPC - HPT	Processi che hanno determinato la formazione e l'evoluzione del Solare Sistema	Osservazioni di corpi primitivi, sistemi esoplanetari (processi di aggregazione delle polveri, processi di formazione)	HPC SW in tempo reale Infrastrutture di analisi dei dati Analisi dei dati ad alte prestazioni
	Processi che determinano l'aspetto e le proprietà dei corpi del Sistema Solare	Osservazioni di tutti i corpi del Solare Sistema	
	Processi evolutivi che danno origine all'emergere della vita	Osservazione di corpi primitivi (materiale organico e ghiacci)	

[VISIONE STRATEGICA INAF]

	Portare modelli stellari al potere successivo	Calcolo dei modelli	
	Proprietà globali di formazione stellare	Modelli di trasferimento radiativo di regioni di formazione stellare. Applicazioni di data mining/ machine learning orientate al flusso di lavoro per la classificazione evolutiva delle regioni di formazione stellare che combinano dati e conoscenze dall'ottica alla radio.	
	L'evoluzione chemodinamica degli ammassi stellari nelle galassie	Modellazione chemodinamica, modellazione di formazione e disgregazione	
	Formazione ed evoluzione di strutture subgalattiche nel Latteo Way e il volume locale	Riconoscimento di struttura e pattern	
	Origine ed evoluzione delle galassie	Collega i marcatori di evoluzione delle galassie (dimensioni, massa, forma delle galassie, presenza di instabilità del disco) con i meccanismi guida della crescita e trasformazione delle galassie	
	Parametri cosmologici Natura della gravità	LSS dell'Universo all'interno di modelli cosmologici standard e non standard	
PUNTO	Da dove ha origine il lento vento solare? Qual è la variazione dell'abbondanza di elio nelle strutture coronali? a) deviazioni dalla composizione primordiale; (b) regione di frazionamento dell'elio nell'atmosfera solare	Stabilire ruoli relativi di assestamento gravitazionale e attrito coulombiano nelle regioni con accelerazione del vento solare lento (ad es. stelle filanti, confini del foro coronale, strutture fini)	Sistema coronografico Rilevatore VL SW in tempo reale SW di controllo Elettronica di lettura Struttura di prova/calibrazione

	<p>Facilitare future indagini su CME, cinematica ed evoluzione del ciclo solare della corona di elettroni, protoni ed elio</p>	<p>Misurare il profilo di abbondanza dell'elio nella corona estesa (distanze eliocentriche 1,25 - 3,5 raggi solari)</p> <p>Stabilire il patrimonio di volo tramite l'indagine suborbitale delle tecniche di telerilevamento per il coronografo ESA/NASA Solar Orbiter: Metis</p>	
<p>PROBA-3/ ASPICI</p>	<p>Qual è la natura della corona solare su scale diverse?</p> <p>Quali processi contribuiscono al riscaldamento della corona?</p> <p>Quali processi contribuiscono all'accelerazione del vento solare?</p>	<p>Osservazioni FOV complete della corona</p> <p>Determinazione della densità elettronica con osservazioni in luce polarizzata e della temperatura con filtri a banda stretta in diversi regimi di temperatura</p> <p>Osservazioni ad alta cadenza di caratteristiche su piccola scala</p> <p>Osservare le strutture coronali alla cadenza temporale e alla risoluzione spaziale più elevate possibili in luce bianca (densità elettronica) e diversi regimi di temperatura. Sismologia coronale</p> <p>Misura la velocità di movimento corretta e i profili di accelerazione delle strutture solari ("blob") alla massima risoluzione temporale e spaziale possibile in luce bianca (densità di elettroni) e diversi regimi di temperatura per mappare il deflusso del vento solare lento</p> <p>Indagini su strutture dinamiche su piccola e scala nella regione della sorgente eolica solare in</p>	<p>Struttura di prova/calibrazione</p>

[VISIONE STRATEGICA INAF]

		particolare all'interfaccia tra flussi veloci e lenti	
Antartide Cor	<p>In che modo la topologia e l'evoluzione temporale del campo magnetico della corona solare interna (cioè altezze eliocentriche: 1,15-2,0 raggi solari) determinano l'origine del vento solare lento e veloce?</p> <p>Qual è la natura della corona solare su scale diverse?</p> <p>Facilitare le future indagini sulla diagnostica del campo magnetico coronale. Proof-of-concept della rete di strumentazione a terra e su mongolfiera per il monitoraggio continuo della meteorologia spaziale</p>	<p>Misurare le componenti del piano del cielo dei vettori del campo magnetico coronale con osservazioni polarimetriche passa-banda strette della polarizzazione lineare sensibile al campo nelle linee di emissione dal ferro ionizzato.</p> <p>Osservare le strutture coronali alla cadenza temporale e alla risoluzione spaziale più elevate possibili in luce visibile (densità di elettroni) con le osservazioni al suolo di lunga durata rese possibili dall'estate antartica</p> <p>Convalida tramite test a terra in ambienti estremi le tecniche di telerilevamento per il coronografo ESA PROBA-3 ASPIICS e i carichi utili del pallone HEMERA</p>	<p>Sistema coronagrafico</p> <p>SW di controllo</p> <p>Struttura di prova/calibrazione</p>

Appendice 1.2 Progetti senza un significativo coinvolgimento tecnologico futuro dell'INAF

Progetto	Domanda chiave	Metodo
VLA, ASKAP, MeerKAT Origine ed	evoluzione delle galassie	Osservazioni di gas molecolari Processi non termici nelle strutture cosmiche
	Proprietà globali di formazione stellare	Processi non termici, emissione da getti radio, linee termiche free-free, HI e Radio Recombination
IRAM PdBI & NOEMA Origine ed	evoluzione delle galassie	Osservazioni di gas molecolari
	Proprietà globali di formazione stellare	Indagini di diverse migliaia di ammassi di formazione stellare e pre-stellari in una varietà di ambienti galattici
	Fisica dei singoli eventi di formazione stellare	Formazione del disco circumstellare e generazione di deflussi. Rilievi di dischi/getti/deflussi intorno a protostelle di piccola massa. Astrochimica dei dischi protostellari e protoplanetari interni (scala 10au). Molecole organiche complesse come mattoni prebiotici.

APICE	Proprietà globali di formazione stellare nella Via Lattea Galassia: nubi molecolari e gas denso.	Osservazioni millimetriche/centimetriche a piatto singolo da terra
JWST e HST	Proprietà delle prime galassie e BH. Fonti di reionizzazione.	Rilievi di emettitori Ly- γ e oggetti primordiali
	Origine ed evoluzione delle galassie	
	Chimica e dinamica delle atmosfere esoplanetarie	Spettroscopia di trasmissione ed emissione NIR/MIR ad altissima risoluzione (fino al regime della Super Terra).
	Processi evolutivi che danno origine all'emergere della vita	Atmosfere di Super Terre rocciose abitabili attorno a stelle di piccola massa
	Proprietà globali di formazione stellare	Forma del continuum 1-20 μ m con NIRCам e MIRI Spettroscopia di imaging di ghiacci e specie molecolari con MIRSPEC e MIRI. Feedback dinamico e radiativo nella frammentazione di massicci ciuffi
	Fisica dei singoli eventi di formazione stellare.	Morfologia e condizioni di eccitazione del gas (MIRI) e suo ruolo nel processo di formazione stellare. Identificazione di molecole biologicamente importanti intorno alla formazione stelle. Misurazione della frazione di dischi che accrescono attivamente materia sulla stella. Proprietà dei getti derivati dall'emissione NIR e MIR

		linee. Spettro-imaging ad alta risoluzione angolare del disco interno e della regione di lancio del getto. Feedback di getti e deflussi sulle proprietà del disco.
	La storia della formazione stellare (SFH) nella Via Lattea, nelle galassie del Gruppo Locale e oltre.	Esplorazione di porzioni di galassie molto affollate e inaccessibili.
	Dischi protoplanetari: condizioni iniziali per la formazione dei pianeti.	Imaging e spettroscopia a diffrazione limitata nel NIR/MIR.
	Il ruolo delle stelle pulsanti e delle fluttuazioni della luminosità superficiale come traccianti di popolazioni stellari risolte e irrisolte.	Relazioni MIR PL e PW ed estensione della calibrazione della distanza delle Cefeidi.
	Processi che hanno determinato la formazione e l'evoluzione del Sistema Solare	Osservazioni di corpi primitivi, sistemi esoplanetari (processi di aggregazione delle polveri, processi di formazione)
	Processi che determinano l'aspetto e le proprietà dei corpi del Sistema Solare	Osservazioni di tutti i corpi del Sistema Solare
	Processi evolutivi che danno origine all'emergere della vita	Osservazione di corpi primitivi (materiale organico e ghiacci)
	Resti e ambienti vicini di esplosioni ad alta energia: supernove e GRB ad alto redshift; fusioni binarie e kilonovae	Deep imaging in UV, ottico, NIR

[VISIONE STRATEGICA INAF]

PRIMA	Proprietà delle prime galassie e BH. Fonti di reionizzazione.	Rilievi di emettitori Ly- γ e oggetti primordiali.
	Chimica e dinamica delle atmosfere esoplanetarie	Osservazioni di atmosfere di esopianeti con imaging ad alto contrasto
	Architettura e dinamica dei sistemi planetari in funzione di massa, raggio e separazione orbitale.	Astrometria: rilevamento delle stelle più vicine con sensibilità a Nettuno e Super Terre.
	Formazione ed evoluzione di strutture subgalattiche nella Via Lattea e nel Volume Locale.	Studio dettagliato della nostra Galassia e delle galassie vicine. Cinematica dei flussi stellari nel nostro gruppo locale di galassie.
	La storia della formazione stellare (SFH) nella Via Lattea, nelle galassie del Gruppo Locale e oltre.	Studio dettagliato della nostra Galassia e delle galassie vicine. Cinematica dei flussi stellari nel nostro gruppo locale di galassie.
VISTA	Origine ed evoluzione delle galassie	Collega i marcatori di evoluzione delle galassie (dimensioni, massa, forma delle galassie, presenza di instabilità del disco) con i meccanismi guida della crescita e trasformazione delle galassie
	La storia della formazione stellare (SFH) nella Via Lattea, nelle galassie del Gruppo Locale e oltre.	Fotometria ad ampio campo di popolazioni stellari e osservazioni in serie temporali di stelle pulsanti.
	Controparti elettromagnetiche di GW	Ricerca ottica FOV di grandi dimensioni di caselle di errore GW

XMM-Newton	Fisica dell'accrescimento e dell'espulsione su/da oggetti compatti	Fotometria e spettroscopia risolte nel tempo
	Emissione non termica da transitori ad alta energia; radiazione di supernova termica	Monitoraggio intensivo, soprattutto ad epoche medio/tardive; spettroscopia accurata
	Continuo non termico di sorgenti altamente relativistiche	Monitoraggio GRID e spettroscopia di blazar, pulsar, Transitori galattici, resti SN
Chandra	Fisica dell'accrescimento e dell'espulsione su/da oggetti compatti	imaging profondo e spettroscopia di deboli sorgenti
	Emissione di raggi X da PWNe e residui di supernova, transienti ad alta energia e supernove	Imaging e spettroscopia ad alta risoluzione, soprattutto in epoche tardive
Veloce	Fisica dell'accrescimento e dell'espulsione su/da oggetti compatti	Monitoraggio di sorgenti galattiche luminose e AGN
	Emissione non termica da transitori di alta energia e fenomeni esplosivi; radiazione di supernova termica	Osservazioni della prima epoca di GRB e supernove; monitoraggio intensivo dei transitori galattici
NuStar	Fisica dell'accrescimento e dell'espulsione su/da oggetti compatti	Imaging profondo e spettroscopia accurata di emettitori continui di raggi X duri (sorgenti galattiche, AGN)

	Emissione continua non termica da transitori ad alta energia	Spettroscopia di GRB, supernove, Transitori Galattici in fase iniziale/media
	nucleosintesi	Spettroscopia di linee di raggi X hard di novae, supernovae
INTEGRANTE	Fisica dell'accrescimento e dell'espulsione su/da un oggetto compatto	Spettroscopia di sorgenti galattiche e AGN luminosi
	Ricerca e follow-up di controparti elettromagnetiche di onde gravitazionali e di sorgenti di neutrini	Analisi temporale dei segnali ACS; immagini FOV di grandi dimensioni; spettroscopia di controparti ad alta energia
	nucleosintesi	Spettroscopia di linee di raggi MeV di novae, supernovae
	Ricerca e follow-up di GRB e altri fenomeni esplosivi	Imaging e spettroscopia rapidi
Fermi	Ricerca e follow-up di GRB e sorgenti GW	Imaging precoce e spettroscopia
	Continuo non termico di sorgenti altamente relativistiche Rilevazione,	localizzazione e spettroscopia di GBM di GRB; Monitoraggio LAT e spettroscopia di blazar, pulsar, transitori galattici, resti SN

AGILE	Ricerca di controparti elettromagnetiche di GW e sorgenti di neutrini	Imaging di scatole di errore GW, imaging e follow-up spettroscopico
	Continuo non termico di sorgenti altamente relativistiche Monitoraggio	GRID e spettroscopia di blazar, pulsar, Transitori galattici, resti SN
HXMT	Fisica dell'accrescimento e dell'espulsione su/da oggetti compatti; Emissione continua non termica da hard Sorgenti di raggi X; osservare le binarie a raggi X per studiare la dinamica e il meccanismo di emissione in forti campi gravitazionali o magnetici	Osservazioni puntuali di sorgenti di raggi X celesti con una serie di strumenti collimati che coprono la banda di energia da ~1 a ~300 keV, con un'area senza precedenti (5100 cm ²) in 20-300 keV
	Monitoraggio della Galassia nei raggi X duri, scoperta e caratterizzazione di nuovi transitori di raggi X duri, censimento senza precedenti di sorgenti di raggi X duri nel Galassia	Rilievo del cielo a raggi X duri con una sensibilità senza precedenti sfruttando la tecnica della demodulazione diretta
	Fisica dell'emissione rapida di GRB; uso delle proprietà spettrali di emissione di GRB per la cosmologia; rilevamento e caratterizzazione di controparti di sorgenti GW (es. brevi GRB).	Funzionamento dello strumento HE in modalità GRB, fornendo così un'area effettiva senza precedenti di oltre 200 cm ² nella banda di energia 300 keV – 3 MeV
SST	Come viene prodotto il campo magnetico solare? Qual è il ruolo della magnetoconvezione turbolenta nei meccanismi che danno origine alla dinamica e alla variabilità solare?	Studia il campo magnetico ad alta risoluzione spaziale e capacità spettro-polarimetriche più sensibili.
	Quali sono i meccanismi fisici che regolano il riscaldamento dei plasmi astrofisici e l'accelerazione delle particelle ad alta energia?	Osservazioni ottiche e IR della bassa atmosfera solare.

	Quali sono le dinamiche della radiazione delle particelle e dei campi elettromagnetici nell'ambiente planetario (con focus sulla Terra)? E come è guidato dall'esterno agenti (tempo spaziale)?	Modellazione MHD di strutture magnetiche e simulazioni di idrodinamica radiativa con calcolo ad alte prestazioni.
INODO	Quali sono i meccanismi fisici che regolano il riscaldamento dei plasmi astrofisici e l'accelerazione delle particelle ad alta energia?	Osservazioni della cromosfera solare e della corona attraverso VL, UV, EUV e raggi X.
	Quali sono le dinamiche della radiazione delle particelle e dei campi elettromagnetici nell'ambiente planetario (con focus sulla Terra)? E come è guidato da agenti esterni (tempo spaziale)?	Modellazione MHD di strutture coronali.
STEREO	Quali sono i meccanismi fisici che regolano il riscaldamento dei plasmi astrofisici e l'accelerazione delle particelle ad alta energia?	Osservazioni della corona solare attraverso VL, UV, EUV e raggi X.
	Quali sono le dinamiche della radiazione delle particelle e dei campi elettromagnetici nell'ambiente planetario (con focus sulla Terra)? E come è guidato da agenti esterni (tempo spaziale)?	Esegui misurazioni in situ del plasma del vento solare, dei campi, delle onde e delle particelle energetiche a diverse distanze dal Sole.
SDO	Quali sono i meccanismi fisici che regolano il riscaldamento dei plasmi astrofisici e l'accelerazione delle particelle ad alta energia?	Osservazioni della cromosfera solare e della corona attraverso VL, UV, EUV e raggi X.
		Modellazione MHD di strutture coronali.
IRIS	Quali sono i meccanismi fisici che regolano il riscaldamento dei plasmi astrofisici e l'accelerazione delle particelle ad alta energia?	Osservazioni della cromosfera solare e della corona tramite UV e EUV.

[VISIONE STRATEGICA INAF]

		Modellazione MHD di strutture coronali.
Sonda solare Parker	Quali sono i meccanismi fisici che regolano il riscaldamento dei plasmi astrofisici e l'accelerazione delle particelle ad alta energia?	Osservazioni VL telerilevate della corona e dell'eliosfera interna.
	Quali sono le dinamiche della radiazione delle particelle e dei campi elettromagnetici nell'ambiente planetario (con focus sulla Terra)? E come è guidato da agenti esterni (tempo spaziale)?	Esegui misurazioni in situ del plasma del vento solare, dei campi, delle onde e delle particelle energetiche a diverse distanze dal Sole per studiare il ruolo della turbolenza nell'accelerazione, energizzazione e dissipazione.
TESS	Proprietà delle prime galassie e BH. Fonti di reionizzazione.	Campi profondi di sorgenti di raggi X.
	Architettura e dinamica dei sistemi planetari in funzione di massa, raggio e separazione orbitale	Fotometria: Studio statistico di sistemi planetari extrasolari in transito, con enfasi sulle proprietà dei pianeti terrestri nella zona abitabile di stelle di piccola massa.
	Dipendenza dalle proprietà delle stelle ospiti e dall'ambiente stellare	Fotometria: Studio statistico di sistemi planetari extrasolari in transito
	Portare modelli stellari al potere successivo	Confronto con dati asterosismici accurati
CINECA PRATICA Strutture HPC e HTC	Origine ed evoluzione delle galassie	Collega i marcatori di evoluzione delle galassie (dimensioni, massa, forma delle galassie, presenza di instabilità del disco) con i meccanismi guida della crescita e trasformazione delle galassie

[VISIONE STRATEGICA INAF]

	Formazione ed evoluzione di strutture subgalattiche nel Via Lattea e Volume Locale	Riconoscimento di struttura e pattern
	L'evoluzione chemodinamica degli ammassi stellari nelle galassie	Modellazione chemodinamica, modellazione di formazione e disgregazione
	Processi che hanno determinato la formazione, l'evoluzione, l'aspetto e le proprietà del Sistema Solare Processi evolutivi che danno origine all'emergere della vita Portare modelli stellari al potere successivo	Calcolo dei modelli
	Proprietà globali di formazione stellare	Modelli di trasferimento radiativo di regioni di formazione stellare. Applicazioni di data mining/machine learning orientate al flusso di lavoro per la classificazione evolutiva delle regioni di formazione stellare che combinano dati e conoscenze dall'ottica alla radio.