



**Dipartimento Strutture  
Unità Organizzativa Programmazione**

**ANNESSO AL PIANO TRIENNALE INAF  
2009-2011**

**SCIENZA DI BASE**

**MACROAREA 1.  
GALASSIE E COSMOLOGIA**



**Sommario:**

**1. IL NOSTRO UNIVERSO: GEOMETRIA E PROPRIETÀ FONDAMENTALI DELL'UNIVERSO DA WMAP E PLANCK, AGLI ESPERIMENTI MIRATI ALLE SN 5**

- 1.1. Background a livello internazionale ..... 5
  - 1.1.1. Verifiche dell'inflazione tramite le anisotropie del CMB in temperatura e polarizzazione ..... 6
  - 1.1.2. La natura della materia oscura..... 8
  - 1.1.3. L'enigma dell'energia oscura: test cosmologici e ruolo delle supernovae ..... 11
- 1.2. La ricerca Italiana nel settore ..... 13
- 1.3. Esperimenti in attività..... 14
- 1.4. Programmi di ricerca Italiani ..... 14
- 1.5. Esperimenti futuri..... 15
- 2. STRUTTURA SU GRANDE SCALA E COSMOLOGIA ..... 17**
  - 2.1. Background scientifico ..... 17
    - 2.1.1. Clustering e parametri cosmologici ..... 18
    - 2.1.2. Ammassi di galassie..... 19
    - 2.1.3. Simulazioni cosmologiche ..... 21
  - 2.2. Il contributo Italiano ..... 22
    - 2.2.1. Modelli cosmologici ..... 22
    - 2.2.2. Clustering e parametri cosmologici ..... 23
    - 2.2.3. Ammassi di galassie..... 25
    - 2.2.4. Simulazioni..... 27
  - 2.3. Principali programmi futuri a livello internazionale (esclusi quelli a guida o forte partecipazione Italiana) ..... 28
  - 2.4. Progetti tecnologico/scientifici a leadership o forte partecipazione italiana (dal 2007 in avanti) e relativi finanziamenti ..... 30
  - 2.5. Maggiori dettagli su alcuni progetti con il contributo Italiano determinante (alcuni ancora in fase di studio)..... 33
  - 2.6. Altri progetti potenziali giudicati importanti ..... 35
  - 2.7. Utilizzo di grandi strutture nazionali e internazionali: pregi, difetti, proposte ..... 36
- 3. IGM E REIONIZZAZIONE..... 40**
  - 3.1. Background scientifico internazionale ..... 40
  - 3.2. Ricerche in Italia ..... 42
  - 3.3. Programmi ed attività nei prossimi 3 anni ..... 45



3.4.	Partecipazione a programmi a livello internazionale .....	47
3.5.	Partecipazione a programmi con importante partecipazione italiana.....	48
3.6.	Progetti da intraprendere.....	48
3.7.	Problemi.....	49
1.	<b>MODELLI DI FORMAZIONE ED EVOLUZIONE DELLE GALASSIE .....</b>	<b>51</b>
3.8.	Situazione internazionale della modellistica sulla formazione delle galassie e delle strutture.....	52
3.9.	Situazione in Italia (ultimi 3-5 anni).....	55
3.10.	Obbiettivi e priorità per programmi nei prossimi 3 anni .....	58
3.10.1.	Modelli dell'insorgere delle prime strutture e delle prime luci.....	58
3.10.2.	Studi della struttura su grande scala dell'Universo e della sua evoluzione con il tempo. 58	
3.10.3.	Storia evolutiva dei barioni diffusi. ....	59
3.10.4.	Modelli di formazione di galassie e buchi neri nucleari. ....	59
3.10.5.	Modellistica empirica dell'evoluzione di sorgenti cosmiche e fondi di radiazione. Modellistica di sintesi spettrofotometrica di galassie e AGN.....	60
4.	<b>PROPRIETÀ, FORMAZIONE ED EVOLUZIONE DELLE GALASSIE: OSSERVAZIONI .....</b>	<b>62</b>
4.1.	Background scientifico internazionale .....	62
4.1.1.	Galassie a $z \geq 2$ : varie tecniche di selezione a $z=3$ , e gli studi a $z=6-7$ .....	62
4.1.2.	Galassie fino a $z=1-2$ : il declino della formazione stellare, la mass assembly e la crescita della red sequence.....	64
4.1.3.	L'Universo locale: la dipendenza delle proprietà galattiche dalla massa galattica e dall'ambiente a $z=0$ .....	66
4.2.	Ricerche svolte in Italia negli ultimi 3-5 anni.....	67
4.2.1.	Studi ad alto redshift .....	67
4.2.2.	Galassie ellittiche e sferoidi .....	69
4.2.3.	Proprietà ed evoluzione di galassie in funzione dell'ambiente.....	70
4.3.	Programmi internazionali dei prossimi 1-3 anni .....	73
4.4.	Programmi finanziati dei prossimi 1-3 anni con PI in Italia .....	76
4.5.	Altri programmi con PI in Italia non finanziati al momento della stesura del Piano triennale .....	77
4.6.	Bello e impossibile?.....	77
4.7.	Utilizzazione delle grandi strutture nazionali ed internazionali.....	78



5. AGN E BUCHI NERI SUPERMASSICCI E LA LORO CONNESSIONE CON LE GALASSIE OSPITI ..... 81

- 5.1. Background scientifico a livello internazionale ..... 81
- 5.2. Ricerche in Italia svolte negli ultimi 3-5 anni..... 85
- 5.3. Programmi di attività nei prossimi 1-3 anni a livello internazionale ..... 88
- 5.4. Programmi di attività nei prossimi 1-3 anni a livello Italiano ..... 91
- 5.5. Progetti importanti ma non realizzabili al momento ..... 92
- 5.6. Utilizzazione delle grandi strutture nazionali ed internazionali..... 92



# **1. IL NOSTRO UNIVERSO: GEOMETRIA E PROPRIETÀ FONDAMENTALI DELL'UNIVERSO DA WMAP E PLANCK, AGLI ESPERIMENTI MIRATI ALLE SN**

*Preparato da N. Mandolesi con il contributo di C. Baccigalupi, C. Burigana, G. De Zotti, P. Natoli e M. Turatto*

## **1.1. Background a livello internazionale**

La scoperta dell'espansione dell'Universo avvenuta nel 1929 ad opera di Edwin Hubble aprì la via agli straordinari progressi della Cosmologia del XX secolo. Oggi, 80 anni dopo, abbiamo raggiunto traguardi notevoli nella comprensione delle proprietà fisiche, della struttura e dell'evoluzione dell'Universo, ma, allo stesso tempo, emergono nuovi interrogativi fondamentali a cui sarà possibile dare risposta solo con nuove osservazioni. Una varietà di osservazioni indipendenti (fra cui spiccano le misure sempre più precise del fondo cosmico a microonde e le osservazioni di Supernove ad alto redshift) sono consistenti nell'identificare il cosiddetto "modello di concordanza" ("concordance model"): un Universo compatibile con una geometria spaziale piatta e un contributo al contenuto globale di energia del  $4\pm 5\%$  in materia barionica e del  $20\pm 25\%$  in materia oscura (Dark Matter, DM) non barionica. Una forma sconosciuta di Energia Oscura (Dark Energy, DE), forse associata all'energia del vuoto, costituisce il rimanente  $\sim 70\%$  del contenuto globale di energia. In questo scenario l'espansione cosmica è accelerata invece che rallentata, contrariamente a quanto ritenuto dalla maggior parte dei cosmologi fino a circa una decina d'anni fa. La struttura cosmica su grande scala che oggi osserviamo si è formata per amplificazione gravitazionale di piccole perturbazioni nella distribuzione primordiale di energia, a loro volta, originatesi da fluttuazioni quantistiche proiettate a livello macroscopico durante le fasi primordiali dell'Universo. Le perturbazioni cosmiche sono descritte statisticamente dalla forma e dall'ampiezza del loro spettro di potenza, che quantifica il livello di disomogeneità alle diverse scale. La loro forma può essere predetta teoricamente specificando la costante di Hubble,  $\Omega$ , la densità globale di materia e quella di materia barionica,  $\Omega_m$  e  $\Omega_b$ , la natura del contenuto di DM non barionica, la densità di energia in DE ( $\Omega_\lambda$ ) e le proprietà di quest'ultima. L'ampiezza dello spettro di potenza è comunemente espressa tramite il parametro  $\sigma_8$ , definito come lo scarto quadratico medio (r.m.s.) della perturbazione di densità entro una sfera di raggio comovente pari a 8 Mpc. I dati del satellite WMAP, dopo cinque anni di osservazioni, indicano  $\sigma_8 \sim 0.75\pm 0.85$ .

Le perturbazioni di densità nell'Universo primordiale sono tracciate dalle fluttuazioni angolari ("anisotropie") della radiazione di fondo cosmico nelle microonde (CMB). Le recenti misure da pallone e dallo spazio delle anisotropie del CMB hanno fornito contributi di rilievo al "concordance model" ed hanno permesso di misurare parametri cosmologici, quali  $H_0$ ,  $\Omega_m$ ,  $\Omega_b$  e la densità totale di energia  $\Omega_0 = \Omega_m + \Omega_b + \Omega_\Lambda$ .

L'ultima *release* dei dati di ARCADE (che rimarrà operativo verosimilmente fino a settembre 2009), gli esperimenti attualmente in corso e la nuova generazione di strumenti in fase di progettazione o sviluppo garantirà al CMB il suo ruolo centrale nella Cosmologia per il prossimo decennio e, verosimilmente, porterà alla determinazione dei parametri cosmologici con un'accuratezza senza precedenti. Una lista in ordine alfabetico dei principali progetti da terra, pallone e dallo spazio include, ARCADE, BICEP, BIMA, B-Pol, CMB-Pol, BRAIN, CBI, CLOVER, COSMOSOMAS, DASIS, EBEX, OCRA, OVRO, QMAP, QUaD, QUEST, QUIJOTE-



CMB, Spider, SPUD, SZA, VSA, WMAP, tutti dedicati ai vari aspetti del CMB: anisotropie in temperatura alle grandi e piccole scale angolari, polarizzazione dell'anisotropia, nuove misure di temperatura assoluta ed esperimenti di particolare rilievo per lo studio dei *foreground* di origine galattica o dovuti alle galassie esterne e agli ammassi di galassie (per dettagli sui vari progetti si rimanda alle rispettive pagine web). Una menzione particolare va riservata alla missione dell'ESA Planck, che dal 2009 per due anni osserverà tutto il cielo in 9 bande di frequenza da 30 a 857 GHz, con una sensibilità e risoluzione angolare senza precedenti, permettendo di migliorare significativamente la stima dei parametri cosmologici e avrà la possibilità di rivelare i modi B indotti dalle onde gravitazionali primordiali e quelli indotti dal lensing.

### **1.1.1. Verifiche dell'inflazione tramite le anisotropie del CMB in temperatura e polarizzazione**

La teoria dell'Inflazione risolve elegantemente alcuni problemi dello scenario base del Big Bang: essa postula una fase di espansione esponenziale dell'Universo primordiale, a scale di tempo dell'ordine di  $t \approx 10^{-35}$  s, e spiega come regioni dell'Universo ancora oggi fuori dal rispettivo orizzonte, siano in realtà state in contatto causale ad epoche remote. Questa semplice idea giustifica, senza far ricorso ad un improbabile *fine tuning*, due aspetti cruciali: 1) la geometria dell'Universo essenzialmente piatta ( $\Omega_{\text{tot}} = 1.0052 \pm 0.0064$ ); 2) l'estrema isotropia dell'Universo su regioni che, in assenza di una fase di inflazionaria, non dovrebbero essere mai state in contatto causale. La piattezza e l'isotropia appaiono entrambe confermate dalle misure di CMB su tutte le scale angolari e dalle osservazioni della struttura su larga scala dell'Universo. Sebbene ciò non rappresenti una conferma diretta dello scenario inflazionario, certamente lo supporta. Lo studio dei primi istanti dell'Universo, durante la fase inflazionaria, ci conduce ai confini della nostra attuale comprensione, rendendo la cosmologia una disciplina capace di gettar luce su aspetti ancora ignoti di fisica fondamentale.

Se la piattezza e l'isotropia hanno in realtà motivato la formulazione dello scenario inflazionario, la previsione più cruciale della teoria riguarda la natura e la caratterizzazione delle perturbazioni primordiali, così come vengono osservate nel CMB e amplificate più tardi fino alla non linearità e alla formazione delle strutture.

Le osservazioni delle anisotropie di temperatura del CMB ci forniscono un'opportunità unica di indagine sull'Inflazione e sui parametri cosmologici: la posizione del primo picco dello spettro di potenza delle anisotropie di CMB, così come è stato misurato e confermato da diversi esperimenti, indica chiaramente che la geometria dell'Universo è pressoché piatta. Il secondo e terzo picco forniscono un'informazione sull'abbondanza di barioni e di DM. In generale, l'analisi dello spettro di potenza delle anisotropie di CMB dà risultati compatibili con le predizioni del modello inflazionario riguardo alle perturbazioni primordiali, evidenziando la predominanza delle perturbazioni di tipo adiabatico caratterizzate da uno spettro vicino a quello invariante in scala ( $n_s \sim 1$ ).

I recenti dati di CMB hanno rappresentato un successo per lo scenario inflazionario. Tuttavia, esistono ancora diversi punti da chiarire. Planck migliorerà i risultati di WMAP, estendendo l'analisi accurata dello spettro di potenza del CMB fino all'ordine di multipolo  $\ell \sim 2500$ , grazie alla sua migliore sensibilità, risoluzione e capacità di sottrazione del *foreground*, resa possibile dalla più estesa copertura in frequenza. Al tempo stesso, Planck renderà disponibili nuove e più affidabili misure della CMB anche ai multipoli bassi ed intermedi, dove WMAP ha evidenziato alcune anomalie statistiche (il valore e l'allineamento peculiari dei bassi multipoli, la presenza di *cold spot* di ampiezza inattesa) il cui significato rimane da chiarire.

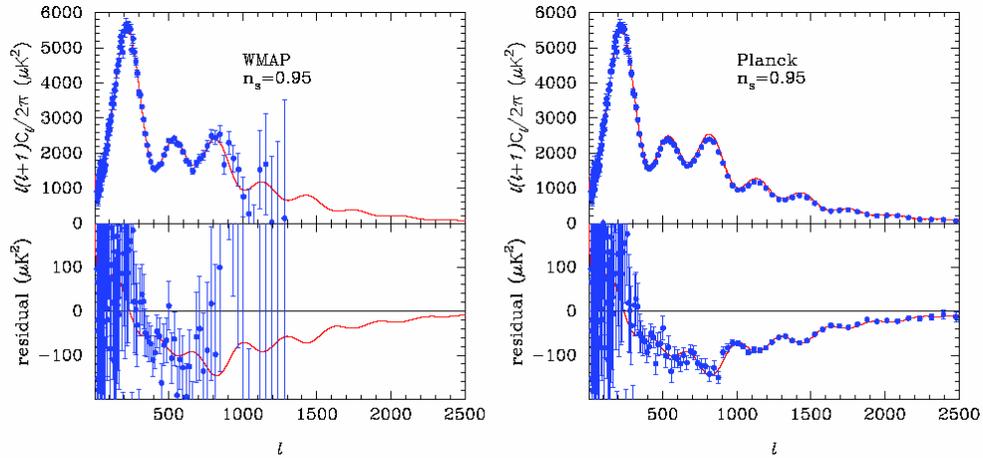


Figura 1.1 – Le linee continue nei riquadri superiori di queste figure mostrano lo spettro di potenza del  $\Lambda$ CDM concordance model con uno spettro esattamente invariante in scala,  $n_s=1$ . Le linee punteggiate si riferiscono invece ad un modello con  $n_s=0.95$  ma con tutti gli altri parametri identici al caso precedente. I riquadri inferiori mostrano i residui fra il modello con  $n_s=0.95$  e quello con  $n_s=1$  e le linee continue mostrano i valori teorici di aspettazione per questi residui. I riquadri a sinistra e a destra si riferiscono rispettivamente a WMAP e *Planck*. (Da: *Planck – The Scientific Programme, Planck Collaboration, ESA-SCI(2005)1*).

Grazie ad una capacità senza precedenti di *imaging* delle anisotropie sulla quasi totalità del cielo, *Planck* permetterà di svolgere analisi statistiche di grande precisione sul campo di CMB, per ricercare quelle minuscole deviazioni dalla statistica gaussiana che permettono di distinguere tra i vari possibili scenari inflazionari.

Ciò che possiamo dedurre dall'intensità del CMB è tuttavia solo un'informazione parziale: misurando anche la polarizzazione dell'anisotropia si possono “rompere” alcune degenerazioni intrinseche nella stima dei parametri cosmologici. DASI, CBI, BOOMERANG, QUAD e WMAP hanno provato l'esistenza del “modo E” nello spettro di anisotropia del CMB, mostrando che la sua ampiezza è solo di pochi  $\mu$ K, a conferma delle previsioni teoriche. L'accuratezza sulle misure del “modo E” previste per *Planck* consentirà in pochi anni di migliorare la stima dei parametri cosmologici, conseguendo così un ulteriore traguardo nella cosmologia di precisione.

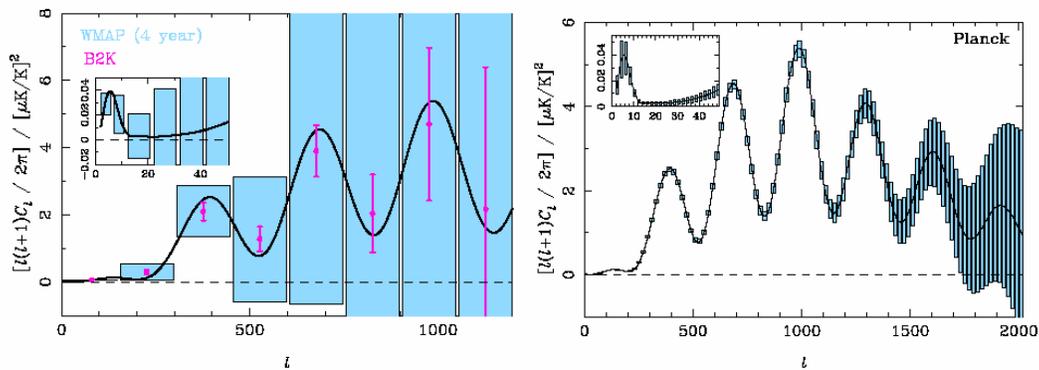


Figura 1.2 – Errori a  $\pm 1 \sigma$  sullo spettro di potenza del modo E di polarizzazione  $C_l^E$  per WMAP (sensibilità a 4 anni) e B2K (riquadro a sinistra) con potenze in banda piatta stimate con  $\Delta l=150$  (e maggiore risoluzione alle grandi scale nel riquadro interno) e previsioni per *Planck* (due survey, riquadro a destra) assumendo  $\Delta l=20$  e ( $\Delta l=2$  nel riquadro interno). Il modello  $\Lambda$ CDM considerato assume parametri cosmologici, cruciali per la polarizzazione,  $r = 0.1$  e  $\tau = 0.17$ . (Da: *Planck – The Scientific Programme, Planck Collaboration, ESA-SCI(2005)1*).



Le osservazioni previste per il prossimo decennio hanno la capacità di poter verificare alcune previsioni specifiche dell'inflazione e distinguere tra diversi scenari della teoria. Sarà possibile indagare sulla scala di energia a cui si è accesa l'inflazione, sullo spettro delle perturbazioni iniziali, sia di tipo scalare che tensoriale, e, come menzionato, sulla loro statistica, nonché sull'esistenza di onde gravitazionali primordiali eventualmente generate durante l'Inflazione vincolando il valore del "modo B" di polarizzazione del CMB. Il principale obiettivo di lungo termine è l'identificazione diretta dello spettro del "modo B" delle anisotropie di polarizzazione associato alle perturbazioni tensoriali primordiali dell'Universo, che costituirebbe una conferma definitiva dell'inflazione primordiale. Mappe di polarizzazione così profonde quali quelle necessarie per tali ricerche darebbero indicazioni dirette sulla scala di energia inflazionaria e verifiche sulla fisica ad altissima energia, ben al di là di quanto concepibile con gli acceleratori di particelle presenti o futuri. L'ampiezza dei modi B indotti dalle onde gravitazionali è di difficile previsione nel contesto di ogni teoria, ma si ritiene tipicamente che sia meno dell'uno per cento di quella dell'anisotropia di temperatura, anche alla luce dei limiti superiori ottenuti in 5 anni da WMAP. Essi implicano (al 95% CL) un rapporto,  $r$ , fra perturbazioni tensoriali e scalari minore di  $\sim 0.2 \div 0.6$ , il cui valore esatto dipende dal modello cosmologico e dal set di dati cosmologici ausiliari considerati nell'analisi. Questo risultato impone nuove sfide per raggiungere i requisiti strumentali e osservativi necessari ad una rilevazione affidabile dei modi B primordiali. L'alto livello segnale/rumore delle mappe a tutto cielo richieste per raggiungere questo obiettivo è al di là di ciò che si ritiene raggiungibile nel futuro prossimo, ma è estremamente importante realizzare passi intermedi in questa direzione finalizzati allo sviluppo della tecnologia necessaria. I progressi nella tecnologia appaiono promettenti per i rivelatori sia bolometrici sia coerenti, in particolare nel caso di grandi "array" su piano focale. La validità delle tecnologie sperimentate in questa direzione sarà verificata dapprima tramite esperimenti da terra e da pallone, che avranno una buona chance di rivelare il modo B della polarizzazione per arrivare infine alla realizzazione di missioni spaziali, quali B-Pol o CMB-Pol proposte rispettivamente all'ESA e alla NASA, in grado di osservare l'intero cielo con grande sensibilità ed un estremo controllo degli effetti sistematici e di foreground.

L'analisi e l'interpretazione accurata dei dati sul CMB richiede, sia per le mappe in temperatura sia, a maggior ragione, per quelle in polarizzazione, una separazione estremamente precisa ed affidabile delle varie componenti di foreground, che tipicamente deriva da approcci multifrequenza basati su osservazioni nelle microonde e in altre bande, in particolare nelle bande contigue (radio e IR), e sullo sviluppo di modelli astrofisici accurati delle varie sorgenti di foreground. Queste linee di ricerca, connesse per molti versi a quelle di CMB, hanno altresì una loro specifica rilevanza, data la preziosa informazione cosmologica, oltre che prettamente astrofisica, che può essere estratta dallo studio delle proprietà delle varie classi di sorgenti extragalattiche, dell'effetto Sunyaev-Zeldovich su ammassi di galassie e delle sorgenti di emissione diffusa e discreta della Galassia.

### **1.1.2. La natura della materia oscura**

L'esistenza di una grande frazione di DM nell'Universo è evidenziata da un vasto insieme di osservazioni astronomiche, quali le curve di rotazione di un grande numero di galassie a spirale, la massa degli ammassi di galassie così come viene determinata da osservazioni in banda X e dal *lensing* gravitazionale, il campo di velocità peculiari delle galassie, le anisotropie del CMB, l'evoluzione osservata delle strutture su larga scala.

Questa scoperta solleva molte questioni fondamentali. Qual è la natura della DM? È particellare oppure no? Nonostante la pletora delle soluzioni al problema della DM basate su nuove particelle, sopravvive la possibilità che il mistero della DM sia risolto da un altro tipo di teoria, che coinvolga la modifica della gravità su scale di distanza cosmologiche. Misure recenti effettuate su ammassi di

galassie in “merging” hanno posto severi vincoli su questi scenari: tramite l’uso combinato dell’astronomia X e del *lensing* gravitazionale, si sono ottenute indicazioni di situazioni con una ben distinta separazione spaziale tra i barioni responsabili dell’emissione luminosa e i centri di concentrazione della materia oscura. Se la maggior parte della materia non è collocata dove risiedono i barioni, diviene più difficile spiegare le osservazioni introducendo modifiche alla gravità.

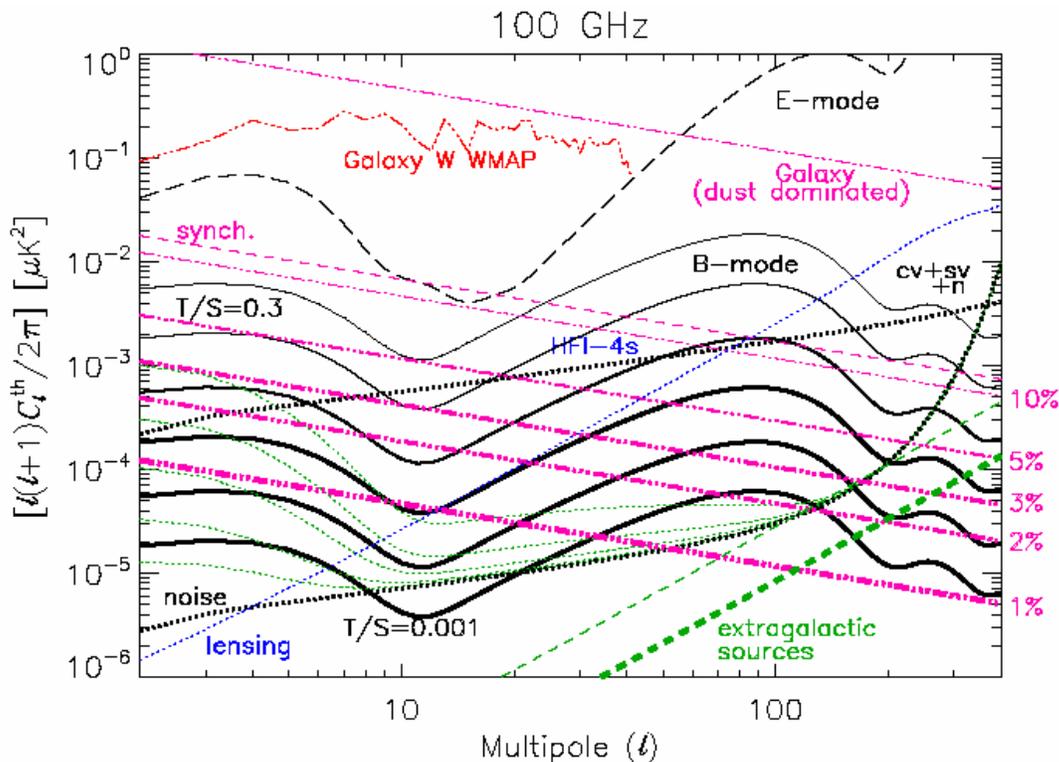


Figura 1.3 – Modi di polarizzazione E e B del CMB compatibili con i dati a 3 anni di WMAP confrontati con i foreground galattici ed extragalattici in polarizzazione (modi B). Stime di residui di foreground vengono confrontate con il modo primordiale B del CMB e la sensibilità di B-Pol e il modo B indotto dal lensing (linea punteggiata blu). Le curve di sensibilità assumono un binning in multipoli del 30% ed includono la varianza cosmica e campionaria più il rumore strumentale (linee verdi punteggiate denotate con  $cv+sv+n$ ) o solo il rumore strumentale (linee nere spesse punteggiate). Si considera il canale di B-Pol a 100 GHz. La corrispondente sensibilità strumentale di *Planck*–HFI a 100 GHz viene riportata per confronto (quattro survey, linee nere punteggiate spesse superiori). Il modo E del CMB è riportato dalla linea nera a tratti lunghi. Il modo B del CMB (linee nere continue) viene riportato dall’alto al basso per  $T/S = 0.3, 0.1, 0.03, 0.01, 0.003, 0.001$ , a spessore crescente. Si noti che la varianza cosmica e campionaria (copertura del cielo al 74%) implica una dipendenza da  $T/S$  della sensibilità globale ai bassi multipoli (ancora, le linee verdi punteggiate si riferiscono a  $T/S = 0.3, 0.1, 0.03, 0.01, 0.003, 0.001$  dall’alto al basso), che è rilevante nella stima dei parametri cosmologici mentre il rumore strumentale da solo determina la capacità di B-Pol di rivelare il modo B. Le emissioni di polarizzazione del sincrotrone galattico (linee porpora tratteggiate) e della polvere galattica (linee porpora a tratto-punto) producono il foreground galattico polarizzato globale (linee porpora a 3 punti-tratto), che a 100 GHz è dominato dalla polvere. Per confronto si mostrano i risultati di WMAP a 3 anni in banda W derivati direttamente dalle mappe di foreground per un certo intervallo di multipoli: i fit a legge di potenza forniscono limiti superiori (generosi) della potenza a bassi multipoli. Le contaminazioni residue da foreground galattico (linee porpora a 3 punti-tratto) sono mostrate assumendo una contaminazione dal 10% all’1% del segnale originario a livello di mappa, come identificato dai valori sul bordo destro della figura. I contributi residui da sorgenti galattiche non risolte  $C_{\ell}^{\text{resPS}}_1$ , e la corrispondente incertezza  $\delta C_{\ell}^{\text{resPS}}_1$ , calcolata assumendo un’incertezza relativa  $\delta\Pi/\Pi = \delta S_{\text{lim}}/S_{\text{lim}} = 10\%$  nella conoscenza del loro grado di polarizzazione e nella determinazione della loro soglia di identificazione, sono mostrati dalla linea verde tratteggiata, rispettivamente sottile e spessa. (Da: de Bernardis et al. 2008, Exp. Astron., in press, astro-ph/0808.1881v1).



Se la DM consiste di particelle, di che tipo di nuova particella si tratta? Con quale forza interagisce oltre all'interazione gravitazionale? Con l'interazione forte, debole, o con un nuovo sconosciuto tipo di interazione? Quale è la sua massa? Al livello della scala elettrodebole, o molto al di sotto o al di sopra di essa? Tutte queste domande sono strettamente correlate a problematiche estremamente attuali di fisica fondamentale e delle particelle elementari.

La maggior parte della DM potrebbe essere di tipo "freddo" (*Cold DM* ovvero CDM), cioè non sarebbe stata relativistica al tempo del suo disaccoppiamento dal plasma termico nell'Universo primordiale. Fra le varie candidate suggerite, la meglio motivata è una particella postulata con insistenza nell'ambito della fisica delle alte energie: la particella supersimmetrica più leggera (LSP), chiamata neutralino, membro di una generica famiglia di particelle con massa debolmente interagenti (WIMPs). Tali particelle sono previste naturalmente alla densità attesa per la DM da teorie supersimmetriche, in un intervallo di massa da  $\sim 100$  GeV a  $\sim 1$  TeV. Altre candidate (non termiche) sono particelle che, sebbene immerse nel minestrone cosmico durante l'evoluzione dell'Universo, non sono mai state in equilibrio termico con esso. Fra queste, vi sono gli assioni, introdotti per risolvere il problema della violazione CP forte, particelle "superheavy" ("WIMPZILLAs"), solitoni topologici, e DM da extra-dimensioni. È importante notare che le distribuzioni spaziali della DM negli aloni potrebbero dipendere dalla natura della particella; ciò apre possibili scenari per indagare sulla natura della DM tramite osservazioni astronomiche.

Si possono adottare due metodi fondamentali per la ricerca della DM: diretti e indiretti. Le ricerche dirette tentano la rivelazione delle particelle di DM che interagiscano con i rivelatori di un esperimento. Le ricerche indirette studiano i prodotti secondari ottenuti quando le particelle di DM si annichilano una con l'altra. Tali analisi sono finalizzate allo studio di eventuali segnature da WIMPs termiche e non termiche e sono divise in ricerche di neutrini di alta energia dal centro del Sole o della Terra e ricerche dei prodotti di annichilazione delle WIMPs nell'alone della Via Lattea o delle galassie esterne. Questi potrebbero manifestarsi in una varietà di fenomeni a frequenze radio, X, fino ai raggi gamma. Vi è grande aspettativa per i risultati di questi esperimenti, alcuni dei quali (in particolare Pamela e ATIC) hanno misurato segnali potenzialmente interpretabili come decadimento di DM, anche se i risultati sono ancora da confermare. Riguardo all'identificazione indiretta di DM "super-heavy", i loro prodotti di annichilazione possono originare raggi cosmici ultraenergetici che possono essere rivelati studiando i raggi cosmici ad altissima energia attraverso la rivelazione degli Sciami Estesi dei Raggi Cosmici.

Un'altra forma di caratterizzazione indiretta della DM passa attraverso la detezione dei suoi effetti gravitazionali tramite osservazioni astronomiche. Una possibilità aperta in questa direzione è la misura accurata della massa del neutrino tramite vincoli da *lensing* del CMB, potenzialmente in grado di esplorare la regione al di sotto dell'eV.

Nel prossimo decennio, gli ulteriori contributi dalle osservazioni astronomiche consisteranno verosimilmente nel raffinamento del Modello Cosmologico Standard grazie a nuovi dati osservativi sulle anisotropie di CMB e sulle strutture su larga scala dalle survey di galassie in redshift, dal raffinamento dei modelli N-body per la formazione ed evoluzione delle galassie e della struttura su larga scala, come pure dal microlensing o da osservazioni infrarosse e submillimetriche delle "small clouds".

Le ricerche della materia oscura sono appannaggio principale della fisica delle particelle, con una rilevante partecipazione astronomica principalmente da osservazioni nella banda  $\gamma$ , X, ottica e millimetrica, in grado di fornire informazioni complementari. Elenchiamo in ordine alfabetico i principali esperimenti per la ricerca diretta di DM : ArDM, ANAIS, CASPAR, CDMS, COUPP, CRESS T, CUORE, DAMA, Drift, Edelweiss, Genius, HDMS, IGEX, LIBRA, MIMAC, Majorana,



NAIAD, NEWAGE, ORPHEUS, Picasso, ROSEBUD, UKDMC, Ultima, XENON, XMASS, WARP, Zeplin; e quelli per la ricerca indiretta: AMANDA, AMS, ANTARES, ATIC, BAIKAL, BESS, CAPRICE, GAPS, GLAST, HEAT, IceCube, IMAX. MACRO, Nestor, NINA, Pamela, Super-K. Dettagli sui singoli esperimenti possono essere reperiti nelle rispettive pagine Web.

### 1.1.3. *L'enigma dell'energia oscura: test cosmologici e ruolo delle supernovae*

Nel 1998 le osservazioni delle supernovae di tipo Ia fornirono l'evidenza dell'accelerazione dell'espansione cosmica, che si ritiene dovuta ad una componente di DE che contribuisce con una frazione  $\Omega_\Lambda \approx 0.7$  alla densità di energia totale, un risultato questo complementare a quelli basati sul CMB e con essi compatibile. In alternativa al concetto "classico" di costante cosmologica, che prevede una densità di energia associata al vuoto che non scala con l'espansione, sono stati introdotti modelli dinamici di DE che potrebbero fornire una spiegazione "naturale" del valore osservato della densità di DE. Definendo con  $p$  e  $\rho$  rispettivamente la pressione e la densità di energia della DE, la corrispondente equazione di stato è descritta da  $w=p/\rho$ . Un'espansione accelerata richiede  $w < -1/[3(1-\Omega_m)]^{-1}$ , dove  $w=-1$  identifica il caso di non evoluzione per la costante cosmologica. Attualmente le osservazioni indicano  $w < -0.8$ . In generale, diversi modelli di DE prevedono diverse evoluzioni dell'equazione di stato, che vengono spesso descritte parametricamente tramite un'espansione al primo ordine:  $w(z)=w_0+w_1z$ . Fino ad oggi, le osservazioni non forniscono forti indicazioni per una possibile evoluzione della DE e le recenti osservazioni di HST suggeriscono  $w_1 \approx 0$ .

È da rilevare che sono state proposte interpretazioni alternative dell'accelerazione osservata: ad esempio, l'accelerazione potrebbe derivare dalla "back-reaction" delle perturbazioni cosmologiche anziché dall'effetto di pressione negativa della DE. Molte ipotesi teoriche riguardo la natura della DE collegano questa componente ad una nuova fisica. L'accelerazione cosmica potrebbe essere allora un effetto di extra dimensioni grandi o "warped", un segnale di effetti di stringhe, una modifica effettiva della gravità a grandi scale, o, infine, una nuova forza rilevante a grandi distanze. Inoltre, indicazioni che l'equazione di stato potrebbe richiedere  $w < -1$  stimolano nuove indagini alla frontiera della fisica. Nel prossimo decennio, misurazioni accurate di sorgenti standard a diverse scale di distanza cosmologica, insieme a misure di alta precisione delle fluttuazioni del CMB, ad osservazioni X, di weak lensing e ad altri metodi potrebbero fornire nuovi vincoli ai modelli di DE.

Test geometrici. Lo studio più diretto della DE si basa sull'identificazione del suo effetto sulla dimensione apparente e sulla distanza di luminosità. Ciò richiede la calibrazione di candele standard ultraluminose, quali le supernove (SNe) di tipo Ia. Vari progetti e proposte dedicate a ricerche sistematiche di SNe Ia, sia da terra sia dallo spazio (la lista include progetti quali DES, DESTINY, ESSENCE, SHOES, SNAP, EUCLID, SNLS) e varie "facilities" astronomiche (quali, ad esempio, E-ELT, LCOGT, LSST, PanSTARRS, OSIRIS) potranno essere utilizzate proficuamente per tali studi. Sicuramente essi accresceranno notevolmente nei prossimi anni la mole di dati sulle SNe lontane, portando nuova luce sulla natura dell'accelerazione cosmica. La ricerca e la calibrazione di nuove candele standard (quali SNe "core-collapse" e gamma-ray bursts) è un'altra area di ricerca a cui dedicare un'attenzione crescente.

Al tempo stesso, la maggior parte di questi esperimenti realizzerà grandi surveys di weak lensing, ovvero debole distorsione delle immagini di galassie lontane ad opera della distorsione gravitazionale indotta da addensamenti lungo la linea di vista. Tale distorsione introdotta sulle galassie di "background" dalla concentrazione di massa di "foreground" dipende dalla distanza fra



le sorgenti e le lenti e dalla crescita gravitazionale delle fluttuazioni. Tutte queste dipendono a loro volta dai parametri cosmologici. Lo scopo finale di queste surveys è la realizzazione di mappe di “shear”, ovvero deflessione da weak lensing, realizzate in diversi intervalli di redshifts, in modo da realizzare una tomografia delle strutture e quindi misurare il rate di formazione di struttura in epoche recenti, il quale dipende dalla storia dell’espansione, e quindi dall’abbondanza di energia oscura.

Un metodo complementare ma sempre riguardante la formazione di struttura è basato sul confronto delle scale fisiche coinvolte nelle fluttuazioni barioniche dello spettro di potenza del CMB e nello spettro di potenza della distribuzione delle galassie. Le signature osservate negli spettri di potenza della radiazione e della materia coinvolgono la stessa scala fisica. Quindi, confrontandole a  $z \sim 1000$  (con il CMB) e a  $z \sim 1$  e  $z \sim 3$  (con le distribuzioni di galassie) è possibile effettuare un test geometrico standard di cosmologia. Il volume cosmico che è necessario esplorare per misurare il clustering nel regime lineare è elevato, dell’ordine di 1 Gpc al cubo. Questo corrisponde, ad un redshift di circa 0.5, ad una scala angolare di circa 10000 gradi quadrati. Sono in preparazione survey di galassie su un’area di tali dimensioni, in grado di fornire una misura accurata di  $w_0$ . Per misurare  $w_1$  si dovrebbe realizzare un’ampia survey di galassie a redshift più alti. In attesa di queste survey, una via già praticata per studiare l’effetto dell’energia oscura sulla dinamica dell’universo è l’effetto Sachs & Wolfe integrato (ISW), che consiste nell’analisi delle correlazioni delle mappe CMB con la distribuzione della tracciatori della distribuzione della materia oscura su grande scala di cui è sufficiente conoscere la distribuzione bidimensionale più una stima statistica della distribuzione in redshift e del fattore di bias.

Un ulteriore test geometrico per vincolare i parametri cosmologici è basato sullo studio dell’evoluzione della frazione di gas negli ammassi di galassie. Richiedere che la frazione di barioni non evolva con il redshift porta a vincolare la dipendenza dal redshift della distanza di dimensione apparente. Gli errori sistematici potenziali da mantenere sotto controllo in questo test geometrico sono associati allo “scatter” intrinseco nel valore della frazione di barioni, che è dovuto alla complessità della storia dinamica degli ammassi. Per minimizzarlo, dovrebbero essere considerati solo ammassi sufficientemente “rilassati”.

Test dinamici. L’evoluzione delle perturbazioni dalla loro fase iniziale al regime non lineare e infine al collasso gravitazionale che porta alla formazione di oggetti gravitazionalmente legati dipende assai sensibilmente dallo scenario cosmologico. Ne consegue che, dati i parametri cosmologici non riguardanti l’energia oscura, il confronto fra le predizioni teoriche e le osservazioni sull’abbondanza delle strutture su larga scala a redshift diversi fornisce informazioni preziose appunto sull’equazione di stato della DE. Questa linea di pensiero è attualmente applicata in modo sistematico agli ammassi di galassie, in particolare attraverso osservazioni della loro emissione in banda X. Infatti la luminosità X correla con la massa della DM dell’ammasso e ciò permette di inferire la funzione di luminosità degli ammassi e di studiarne l’evoluzione temporale.

Oltre alle osservazioni X, una potenzialità osservativa di estremo interesse è costituita dall’effetto Sunyaev-Zeldovich (S-Z), ovvero la distorsione locale dello spettro del CMB causata dall’interazione dei fotoni con il gas caldo ( $T \approx 10^6 \div 10^9$  K) negli ammassi di galassie. I progressi delle tecniche di rivelazione dell’effetto S-Z aprono la possibilità di effettuare survey di ammassi su grande area. In virtù dell’indipendenza dal redshift della distorsione S-Z dello spettro del CMB, le osservazioni S-Z ci consentono in principio di scoprire ammassi a distanze arbitrariamente grandi, fino all’epoca della loro formazione, essendo limitati solo dalla confusione delle sorgenti e dalla contaminazione da sorgenti presenti lungo la linea di vista o entro l’ammasso stesso. Le survey X ed S-Z sono fra loro ben complementari: le prime forniscono un “mapping” dettagliato della



struttura del mezzo intracluster (ICM) e dei piccoli ammassi a redshift  $z < 0.5$ , mentre le seconde ci consentono di scoprire ammassi molto massicci a più alto redshift.

Un contributo osservativo fondamentale sarà fornito dalla missione Planck che per la prima volta effettuerà una survey su tutto il cielo rivelando qualche migliaia di sorgenti S-Z mentre esperimenti dedicati su aree limitate di cielo (quali ACBAR, AMI, AMBA, APEX-SZ, Bolocam, CBI, SPT, SZA) consentiranno la realizzazione di survey più profonde.

Avendo a disposizione una mappa accurata dell'effetto S-Z, nelle regioni non contaminate da esso o da altre emissioni di foreground sarà possibile la ricerca di signature secondarie più deboli, quali quelle originate dal collasso gravitazionale delle strutture su larga scale, dai "bulk motion" del plasma (effetto Ostriker-Vishniac), quelle indotte sui fotoni del CMB dall'evoluzione dei potenziali gravitazionali (effetti Sachs-Wolfe e Rees-Sciama), quelle indotte dal lensing associato agli ammassi, dai fenomeni di ionizzazione locali e dai dettagli della storia di ionizzazione dell'Universo.

### **HIGHLIGHTS**

- 1) Misure di altissima precisione dei parametri cosmologici e vincoli sugli scenari di inflazione cosmica, grazie alle osservazioni del CMB, in temperatura e polarizzazione, presenti o operative a breve (in particolare Planck). Necessità di preparare una missione post Planck orientata allo studio dettagliato della polarizzazione del CMB.
- 2) Caratterizzazione della dark matter, grazie a sinergie tra misure dirette, indirette di tipo particellare e cosmologiche.
- 3) Vincoli sulla natura e sull'equazione di stato della dark energy, tramite indagine complementare di effetti geometrici (SN, weak lensing, CMB) e dinamici (evoluzione della struttura su grande scala).

## **1.2. La ricerca Italiana nel settore**

L'Italia gioca un ruolo di primissimo piano nello studio delle anisotropie e della polarizzazione del CMB. La lunga tradizione di osservazioni da terra e da pallone, che ha portato negli ultimi anni al successo missioni quali BOOMERanG, ha contribuito in maniera fondamentale a preparare il futuro prossimo del campo: dei due strumenti che voleranno su Planck, quello a bassa frequenza (LFI) è a guida e principale partecipazione italiane.

Al tempo stesso la comunità del settore si è già ritagliata un ruolo di leadership nella definizione della ricerca post-Planck volta, come su evidenziato, ad un esperimento di elevatissima sensibilità capace di vincolare il background stocastico di onde gravitazionali (previsto dall'inflazione primordiale) tramite la sua segnatura nella polarizzazione del CMB.

Obiettivi tanto ambiziosi presuppongono l'attuazione di un salto tecnologico, in particolar modo nella produzione di rivelatori di nuova generazione.

Un importante passo avanti in campo tecnologico si è ottenuto con lo sviluppo di array di antenne corrugate costruite a lamelle con lo scopo di compattare le dimensioni e contenere costi di fabbricazione. Questa attività è inserita nell'ambito del bando Prin-Miur 2006 (progetto WCAM) che prevede lo sviluppo di array di svariate centinaia di antenne e rivelatori di nuova concezione in banda W e, come proposta per il futuro (proposta Prin-Miur 2008), anche operanti a 200GHz.

La comunità astronomica italiana ha inoltre un ruolo fondamentale nella realizzazione delle prossime survey dallo spazio. Essa ha infatti la guida principale di uno dei due strumenti della



missione EUCLID, selezionata dall'ESA nel 2007 nell'ambito di Cosmic Vision ed in fase di *architect study* sotto il controllo di ESA da ottobre 2008: lo spettrometro nel vicino infrarosso (NIS), precedentemente proposto come missione autonoma (SPACE) e successivamente unito dall'ESA a strumenti fotometrici (DUNE) nel payload EUCLID. Obiettivo primario di EUCLID è lo studio della DM e della DE, ovvero di fornire una risposta ad una delle più cruciali domande della cosmologia moderna.

I dati verranno ottenuti per mezzo di una *survey* di una grande area del cielo (almeno 20,000 gradi quadrati) effettuata sia in *imaging* che in spettroscopia nel vicino infrarosso, dove il background è fino a 1000 volte minore rispetto a osservazioni fatte da terra. Attraverso la misura del redshift spettroscopico (ovvero della distanza) e della posizione di ogni galassia nel cielo sarà possibile ricostruire la distribuzione tridimensionale di circa mezzo miliardo di galassie realizzando una mappa tridimensionale dell'Universo negli ultimi 10 miliardi di anni (corrispondente a  $0 < z < 2$ ). Sarà possibile così studiare la formazione ed evoluzione delle strutture a larga scala e delle galassie in esse contenute ed osservare e misurare le oscillazioni acustiche della materia barionica, uno dei metodi più accurati per porre vincoli sull'equazione di stato della DE e sulla sua eventuale evoluzione cosmica.

Con lo spettrometro NIS si utilizzerà per la prima volta nel contesto di osservazioni dallo spazio i Digital Micromirrors Devices (DMD), sistemi che permettono di controllare in modo indipendente milioni di piccoli specchi che possono essere orientati in modo da raccogliere o meno la luce di ogni galassia e convogliarla verso lo spettrografo o verso la camera usata per le osservazioni di imaging.

**HIGHLIGHTS**

- 1) Partecipazione italiana a Planck.
- 2) Sviluppo tecnologico e acquisizione del know how per preparare una missione satellitare orientata alla polarizzazione del CMB (in particolare ai modi B)
- 3) EUCLID: ricostruire la struttura tridimensionale della distribuzione di galassie per porre vincoli a DM e DE.

**1.3. Esperimenti in attività**

*WMAP: operativo fino a settembre 2009*

*Planck: operativo da aprile 2009*

**1.4. Programmi di ricerca Italiani**

Titolo	Leader/PI	Partecipanti	Finanziamento	Inizio	Fine
COFIS	P. De Bernardis	IASF-Bo, Univ. La Sapienza, Univ. Tor Vergata, Univ. Padova....	ASI	2006	2009
WCAM	P. De Bernardis	IASF-Bo, Sapienza	Univ. La MIUR	2007	2011



## **1.5. Esperimenti futuri**

Planck: survey a tutto cielo mirata alla CMB e all'astrofisica galattica ed extragalattica nel millimetrico (da 30 a 900 GHz, con risoluzione FWHM da 30 a 5 arcmin). Fortissima partecipazione italiana.

EBEX: osservazione di una regione di cielo di circa 350 gradi quadrati centrata nella regione RA=60, dec=-45, nelle frequenze: 150, 250, 410 Ghz, con FWHM 8 arcminuti, sensibilità di circa 0.5 micro-Kelvin per elemento di risoluzione. Lo scopo di questa missione è di investigare la possibilità di detezione dei modi B della polarizzazione CMB prodotti da onde gravitazionali di origine cosmologica. La partecipazione italiana è situata presso la SISSA, che ha l'incarico di sviluppare tecniche di rimozione della contaminazione dei dati dal segnale diffuso dovuto alla nostra Galassia.

B-Pol: missione ESA per l'identificazione dei modi B dell'anisotropia di polarizzazione del CMB. Piano focale con K-array di rivelatori bolometrici da 70 a 500 GHz. PI-ship italiana. Nell'ambito di Cosmic Vision va validata la tecnologia di array estesi di rivelatori. Scala temporale posteriore a 2020.

BB-Pol: esperimento da Pallone per la validazione delle tecnologie per la missione B-Pol e tentativo di rivelazione dei modi B con K-array di bolometri sensibili alla polarizzazione.

## **BIBLIOGRAFIA**

- Bartolo N. et al., 2007, arXiv:0711.4263  
Bonaldi et al. 2007, MNRAS, 382, 4, pp. 1791-1803  
Burigana et al. 2007, arXiv:0712.1913  
Cabella et al. 2007, Phys.Rev.D76:123014  
Calabrese E. et al., 2008, Phys.Rev.D77:123531  
Carbone, C. et al., 2008, arXiv:0810.4145  
Cerioni et al., 2008, Phys.Rev.D78:021301  
de Bernardis P. et al., 2008, Exp. Astron., in press, arXiv:astro-ph/0808.1881v1  
De Bernardis, F. et al. 2008, Phys.Rev.D78:083535  
De Troia, G. et al., 2007, ApJ, 670, L73  
Finelli F., et al. 2007, Phys.Rev.D76:103528  
Finelli F., et al. 2008, Phys.Rev.D78:023510  
Gruppuso, 2007, Phys.Rev.D76:083010  
Gruppuso et al. 2007b, Mon.Not.Roy.Astron.Soc.376:907-918  
La Vacca G. et al., 2007, arXiv:0804.0285  
Leach et al. 2008, Astron.Astrophys.491:597-615  
Mainini R. et al., 2007 JCAP0709:017  
Masi S., et al., 2006, A&A, 458, 687  
Marinucci et al. 2007, MNRAS, 383, 2, pp. 539  
Matarrese S. et al., 2008, arXiv:0801.4826  
Melchiorri et al. 2008, arXiv:0810.5133  
Melchiorri, A. et al. 2007, Phys.Rev.D76:041301  
Pagano L. et al., 2007, JCAP, 04-009  
Paoletti D., 2008, arXiv:0811.0230  
Pettorino V. & Baccigalupi C., 2008, Phys.Rev.D77:103003  
Pietrobon D. et al. 2008, Phys.Rev.D78:083510  
Piacentini F. et al., 2006, ApJ, 647, 833



Raccanelli et al. 2008, arXiv:0802.0084

Stompor et al. 2009, MNRAS, 392, 216

The *Planck* Collaboration, 2005, “The Scientific Program of Planck”, ESA-SCI(2005)1, arXiv:astro-ph/0604069



## 2. STRUTTURA SU GRANDE SCALA E COSMOLOGIA

Preparato da L. Guzzo, con il contributo di: L. Amendola, S. Borgani, S. Etori, M. Radovich

### 2.1. Background scientifico

La distribuzione della materia su grande scala fornisce uno degli osservabili principali per testare il modello cosmologico. La disomogeneità nella distribuzione delle galassie e della materia oscura, la dipendenza di questa dalla scala e la sua evoluzione nel tempo dipendono strettamente dal valore dei parametri di quest'ultimo. La combinazione di misure del tasso di espansione dell'Universo nel suo complesso con quelle del tasso di crescita delle fluttuazioni di densità permettono, in linea di principio, di testare le basi stesse della teoria, verificando l'esattezza della teoria della Relatività Generale. Questi aspetti hanno assunto grande rilevanza nell'ambito dell'attuale Modello Cosmologico Standard, un modello dominato da due ingredienti non visibili: la *Materia Oscura* e l'*Energia Oscura*. Quest'ultima, in particolare, è rappresentata da un "fluido" con equazione di stato tale da indurre una ri-accelerazione dell'espansione cosmica ( $w = p/\rho c^2 = [-1, -1/3]$ ) e fornisce il 75% del budget totale in massa-energia. Il diagramma di Hubble delle supernove lontane e tutti i dati complementari al momento disponibili puntano al caso più semplice di energia oscura, quello descritto da una *Costante Cosmologica*, in cui  $w=-1$  (per una review si veda ad es. Frieman et al 2008).

Per molti versi, tale semplice modello appare fisicamente difficile da accettare e la possibilità che  $w$  sia variabile con il tempo cosmico è auspicata da diversi sviluppi teorici, come ad es. il caso in cui l'energia oscura sia legata a un campo scalare primordiale (*quintessenza*) (si veda ad es. Copeland et al. 2006). Esiste però l'affascinante possibilità che l'energia oscura sia una manifestazione di una modifica della gravità, ovvero di una deviazione dalle equazioni di Einstein. E' questa una delle alternative all'energia oscura più attivamente esplorate al momento. Sono stati quindi proposti modelli di interazioni scalari aggiuntive a quelle tensoriali, modelli basati su extra-dimensioni, modelli di gravità di ordine superiore e altri. Lo studio della dinamica dell'espansione e della crescita delle perturbazioni in questi modelli ha evidenziato numerosi e interessanti effetti osservabili sullo spettro di potenza, sull'evoluzione del clustering, sull'epoca di accelerazione. Inoltre, una gravità modificata permette di giustificare anche valori "phantom" dell'equazione di stato ( $w<-1$ ), l'esistenza di energia oscura anche in epoche remote, e quello che è uno dei problemi fondamentali dell'energia oscura, la coincidenza tra accelerazione e inizio della formazione di struttura non lineare.

La misura dell'equazione di stato in funzione del tempo cosmico  $w(z)$  è divenuta quindi uno degli obiettivi principali dell'attuale cosmologia osservativa. E' inoltre piuttosto chiaro come una comprensione completa dell'origine dell'accelerazione cosmica richieda di misurare contemporaneamente anche il tasso di crescita delle strutture cosmiche, che può fornire una cartina di tornasole della gravità modificata (si veda per una recente discussione tecnica Albrecht et al. 2009). Assieme all'osservazione del fondo cosmico nelle microonde (trattato specificamente nel contributo di N. Mandolesi), la caratterizzazione quantitativa della struttura a grande scala dell'Universo attraverso le survey di redshift di galassie e ammassi di galassie e la misura del *weak lensing* è sicuramente il filone che promette i maggiori risultati in quest'ambito.



### 2.1.1. *Clustering e parametri cosmologici*

La caratterizzazione della struttura a grande scala dell'Universo si basa in modo preponderante sulla misura del *redshift* di grandi campioni di galassie, ovvero sulla ricostruzione tridimensionale della distribuzione degli oggetti luminosi attraverso l'utilizzo delle relazioni distanza-redshift. Questo filone di ricerca ha conosciuto uno sviluppo esponenziale dalla fine degli anni '70 del secolo scorso, arrivando all'epoca attuale a costruire campioni di un milione di redshift nell'Universo "locale" ( $z < 0.15$ ), come nel caso della Sloan Digital Sky Survey (SDSS, [www.sdss.org](http://www.sdss.org)). L'estrazione di informazioni cosmologiche dalla distribuzione a grande scala si basa a sua volta sul paradigma accettato di formazione delle stesse, il cosiddetto *halo model* (White & Rees 1978). In questo scenario le galassie si formano per raffreddamento e contrazione della componente barionica entro le buche di potenziale (*aloni*) create dalla materia oscura fredda dominante. La teoria, anche attraverso simulazioni numeriche di cui parleremo più avanti, è in grado di fornire predizioni molto precise e robuste sulla densità media e sulle proprietà di clustering degli aloni di materia oscura e sulla loro evoluzione, tutte quantità che dipendono dai parametri cosmologici fondamentali. E' quindi possibile ricavare vincoli molto forti sui valori di questi parametri, nel momento in cui siamo in grado di collegare queste statistiche con quelle analoghe misurate sulle popolazioni di oggetti luminosi nelle nostre surveys. Sulle scale fortemente non-lineari ( $< 5-10 h^{-1} \text{ Mpc}$ ) questo richiede una descrizione completa della cosiddetta *Halo Occupation Distribution* (HOD, Cooray & Sheth 2002). A grandi scale, in regime lineare, tutto diviene più semplice e il rapporto tra fluttuazioni di densità galassia-galassia e la massa si riduce con buona approssimazione ad un semplice fattore di scala lineare, il *bias*. Le redshift surveys di galassie non solo ci permettono di calcolare misure statistiche a grande scala (come lo spettro di potenza  $P(k)$ ) per vincolare i parametri cosmologici, ma anche di comprendere le relazioni astrofisiche tra le galassie e i loro aloni oscuri (ad es. Zheng et al. 2007). Lo studio della struttura a grande scala e dell'evoluzione delle galassie (e dei barioni in generale) sono perciò profondamente legate, specialmente nel caso di survey profonde: per testare il modello cosmologico, dobbiamo necessariamente capire come gli oggetti luminosi che usiamo come traccianti si collegano alla distribuzione di massa nel suo complesso e come questa relazione (il bias) evolve nel tempo.

Sotto le ipotesi discusse, la forma globale dello spettro di potenza  $P(k)$  delle galassie fornisce informazioni dirette sulle proprietà della materia: queste includono in particolare la densità totale di materia  $\Omega_m$ , un possibile contributo da neutrini con massa e la densità di barioni  $\Omega_b$ . Da quest'ultima, in particolare, dipendono le caratteristiche *Baryonic Acoustic Oscillations* (BAO) che, ben note nello spettro della CMB, sono state rivelate solo in tempi recenti anche nello spettro di potenza della distribuzione delle galassie (e.g. Eisenstein et al. 2005). Le BAO forniscono una "lunghezza standard" comovente di circa 110 Mpc che è identificabile nella distribuzione delle galassie a qualsiasi redshift con campioni sufficientemente grandi. Questo permette di tracciare il tasso di espansione  $H(z)$  a diverse epoche cosmiche e fornisce uno dei metodi più promettenti con cui misurare  $w(z)$  nelle redshift surveys della prossima generazione (si veda e.g. Percival et al. 2007).

Oltre all'espansione cosmologica, i redshift contengono informazione sulla dinamica della struttura a grande scala, tramite il contributo Doppler provocato dal moto proprio della galassia. Tale moto riflette semplicemente il processo di crescita delle strutture e quindi dipende a sua volta dalla distribuzione delle disomogeneità. L'effetto è statisticamente rilevabile nelle redshift surveys come una distorsione della distribuzione spaziale apparente delle galassie lungo la visuale (*redshift-space distortion*) e la sua misura fornisce una stima del tasso di crescita delle strutture nell'Universo,  $f(z)$  (si veda ad es. Hamilton 1997). Tale misura assume particolare importanza nel compito fondamentale di spiegare l'origine dell'espansione accelerata dell'Universo (Guzzo et al. 2008). Il



confronto tra le misure di  $H(z)$  e  $f(z)$  è infatti in grado di evidenziare la possibilità che l'accelerazione apparente non sia dovuta alla presenza di *energia oscura*, ma richieda in realtà una modifica della teoria della gravità.

Un metodo per misurare direttamente la distribuzione di massa è fornito dal *lensing gravitazionale* (WL) ovvero l'effetto relativistico di deflessione della luce da parte del campo gravitazionale. Osservativamente, si basa sulla misurazione della deformazione di galassie “di fondo” da parte di altri oggetti massicci “in primo piano”, e permette di ricostruire la distribuzione della materia oscura nelle strutture su grande scala (*cosmic shear*, Hoekstra et al. 2006, Fu et al. 2008) negli ammassi di galassie (Hoekstra et al. 2007) e in aloni di galassie singole (*galaxy-galaxy lensing*, Parker et al. 2007). L'effetto di *shear* su grande scala è talmente debole da poter essere rivelato statisticamente solo su grandi campioni e quindi richiede surveys su grandi aree di cielo. Fuori dall'atmosfera terrestre le condizioni osservative sono chiaramente ottimali ma, per il motivo appena menzionato, limitate dal campo di vista degli strumenti a disposizione, che si riducono al solo Hubble Space Telescope (la cui camera a più grande campo, l'ACS, ha un'area limitata). L'area contigua più estesa mai coperta con HST (il campo COSMOS, 1.77 gradi quadrati osservati nella sola banda F814W) ha richiesto ben 270 orbite per essere completata, producendo però quella che è probabilmente la migliore misura *tomografica* della struttura a grande scala tramite weak lensing finora realizzata (Massey et al. 2007).

### 2.1.2. *Ammassi di galassie*

Invece di studiare l'intera popolazione di galassie, cosa che richiede redshift surveys molto estese e costose in termini di tempo al telescopio, ci sono diversi vantaggi nel concentrarsi unicamente sui “picchi” del campo di densità, ovvero su quelle rare fluttuazioni che eccedono di molte volte la varianza tipica del campo. Questi picchi, considerati su scale comoventi dell'ordine di  $10 h^{-1}$  Mpc, corrispondono all'epoca attuale agli *ammassi di galassie*, gli oggetti gravitazionalmente legati più massicci e di maggiori dimensioni nell'Universo. Il numero di ammassi a diversi redshift è un'altra quantità osservabile che dipende sensibilmente dal modello cosmologico e dal possibile contributo dell'energia oscura. Più precisamente, la densità media di questi oggetti dipende sia dal tasso di crescita delle strutture (attraverso il numero di oggetti osservati con massa superiore a una data soglia), sia dal tasso di espansione dell'Universo (attraverso il volume occupato). Per un'introduzione generale si vedano le reviews di Borgani & Guzzo (2001), Rosati et al. (2002) e Voit (2005). A sua volta, il clustering degli ammassi racchiude informazioni sui parametri cosmologici, con il vantaggio rispetto alle galassie di tracciare scale molto grandi e totalmente in regime lineare. Inoltre, gli ammassi di galassie sono molto più vicini al concetto di “alone” di materia oscura e in linea di principio quindi più facili da collegare alle predizioni teoriche. Per questo la combinazione di densità media e clustering degli ammassi e la loro evoluzione rappresentano un metodo potenzialmente molto potente per vincolare i parametri cosmologici (si veda ad es. Schuecker et al. 2003 e Majumdar & Mohr 2004).

La formazione ed evoluzione degli ammassi è dominata dalla gravità, ovvero dal collasso gravitazionale della materia oscura a partire dalle fluttuazioni primordiali. Gli aloni oscuri che vanno a formarsi raccolgono i barioni cosmici diffusi che, per la maggior parte, vengono riscaldati per compressione a temperature dell'ordine dei KeV. Questo plasma caldo emette nei raggi X rendendo gli ammassi di galassie identificabili come sorgenti estese in questa banda. Esso interagisce inoltre per Compton inverso con i fotoni della radiazione cosmica di fondo, producendo un segnale nella banda millimetrica (effetto Sunyaev-Zeldovich) che rappresenta un ulteriore metodo di identificazione degli ammassi come singole sorgenti. I restanti barioni, freddi e



dell'ordine del 20% del totale, costituiscono le galassie la cui densità e dinamica permettono anch'esse una stima della massa del sistema.

Le proprietà osservative di gruppi e ammassi di galassie evolvono dunque sia per l'azione della dinamica gravitazionale complessiva, sia per il contributo di processi astrofisici non-gravitazionali nella componente barionica, quali la formazione stellare, l'evoluzione galattica, i nuclei galattici attivi (AGN) e i fenomeni radiativi legati al depositarsi di plasma nell'alone di materia oscura (vedi Voit 2005). Nonostante le enormi quantità di energia depositate dall'attività delle supernove e dei nuclei galattici attivi presenti nelle galassie membri, grazie al loro alto potenziale gravitazionale gli ammassi sono in grado di trattenere la materia gassosa. Questa diventa dunque tracciate dell'insieme di processi che hanno luogo nell'*Intra-Cluster Medium* (ICM), attraverso la sua distribuzione radiale e le sue proprietà globali. Grossi passi avanti negli ultimi anni sono stati fatti: (i) nello studio sistematico delle relazioni di scala tra osservabili in banda X, radio, SZ e ottica, e della loro evoluzione col redshift (e.g. Maughan 2007); (ii) nella misura risolta spazialmente delle proprietà termiche dell'ICM in banda X e sua eventuale relazione con la componente non termica indotta dall'attività di un AGN centrale o del *merging*, entrambe ben mappate in banda radio (e.g. Fabian et al. 2006); (iii) nella misura spazialmente risolta dell'abbondanza di diversi elementi chimici nell'ICM, con una misura delle righe di emissione del Ferro interamente ionizzato a  $z \sim 1.2$  (e.g. Balestra et al. 2007, vedi Sez. 2). Questi risultati rappresentano forti vincoli per i modelli che descrivono l'evoluzione delle proprietà fisiche dell'ICM (come il budget energetico e l'arricchimento metallico) in connessione con il tasso di supernove prodotte e la co-evoluzione della popolazione galattica. Formandosi per aggregazione di sottostrutture, gli ammassi sono inoltre soggetti a energie in grado di amplificare i campi magnetici e originare flussi di particelle relativistiche nell'ICM. Questa attività non termica si manifesta nell'interazione tra galassia centrale e *cool core* dell'ICM e nella formazione di aloni e residui fossili (*relics*) nella banda radio (e.g. Brunetti et al. 2008, vedi Sez. 2).

Appare quindi chiaro come, vista la complessità di questi fenomeni astrofisici nell'ICM, l'utilizzo degli ammassi di galassie come *probes* del modello cosmologico richieda in realtà anch'essa una profonda comprensione dei meccanismi fisici che collegano la massa totale dell'alone di materia oscura con le quantità osservabili, quali ad es. luminosità e temperatura X. Gli importanti risultati degli ultimi 5 anni in questa direzione hanno beneficiato in particolare delle eccellenti capacità di risoluzione spaziale e spettrale dall'ultima generazione di satelliti X (si veda ad es. Boehringer et al. 2007). La distribuzione radiale di materia oscura negli ammassi è ora conosciuta per gli oggetti di grande massa fino a  $z \sim 1$ . Ciò ha permesso di verificare le predizioni sul profilo radiale dei modelli CDM (ad es. Buote et al. 2007) e di ottenere una stima dei parametri cosmologici principali ( $\Omega_m$ ,  $\Omega_b$ ,  $w$ ), con incertezze tra il 15 e il 30%, misurando (i) la frazione in massa di gas caldo a diversi redshift (Allen et al. 2008), (ii) la funzione di massa (Rozo et al. 2007, Vikhlinin et al. 2009). Mentre il primo metodo è limitato soprattutto dalla capacità di risolvere anche ad alto redshift i profili radiali di densità e temperatura del gas in oggetti massivi e rilassati, il secondo metodo risente dei bias osservativi e della dispersione nelle relazioni osservabili-massa gravitazionale. A questo proposito, un importante passo avanti si è ottenuto utilizzando la nuova quantità  $Y_X$ , definita dal prodotto di massa e temperatura del gas emittente nei raggi X in modo formalmente simile a quanto si misura con l'effetto SZ (Kravtsov et al. 2006). Come confermato dalle osservazioni (e.g. Arnaud et al. 2007),  $Y_X$  risulta essere un robusto indicatore di massa, con ridotta dispersione.

Infine, l'applicazione del *lensing gravitazionale* già citato agli ammassi di galassie è di particolare utilità perché rende possibile una stima della massa indipendentemente da ipotesi sullo stato dinamico e termodinamico dell'ammasso, al contrario degli altri metodi (dispersione di velocità, luminosità e temperatura X, effetto SZ). Nelle zone centrali degli ammassi si può osservare il



cosiddetto regime di *lensing forte*, in cui la distorsione di una galassia di background è così accentuata da formare spettacolari “archi gravitazionali”. Nel regime di *lensing debole*, invece, le immagini delle galassie distanti sono debolmente allungate parallelamente alle curve equipotenziali dell'ammasso (analogamente al cosmic shear) e forniscono informazioni sulla distribuzione di massa nelle regioni intermedie ed esterne. La progressiva disponibilità di camere a grande campo, come ad esempio WFI al 2.2m ESO o MEGACAM, utilizzata per la survey CFHTLS, ha consentito in questi ultimi anni notevoli progressi in questo campo, arrivando alla misura della massa per più di 150 ammassi. Le applicazioni più recenti si stanno indirizzando sulla ricerca “cieca” di ammassi in immagini panoramiche (Hamana et al. 2004, Schirmer et al. 2004, Gavazzi et al. 2007) e su studi tomografici delle sottostrutture e della loro distribuzione tridimensionale (Taylor et al. 2004).

### 2.1.3. *Simulazioni cosmologiche*

Le simulazioni numeriche cosmologiche hanno assunto grande rilevanza nello studio della struttura su grande scala dell'Universo per quanto riguarda la modellistica teorica, l'interpretazione dei dati osservativi e la pianificazione di progetti osservativi futuri. Date le notevoli esigenze in termini di potenza di calcolo, RAM, velocità di inter-connessione tra processori, capacità di archiviazione e gestione di grandi moli di dati, la comunità cosmologico/numerica internazionale è senza dubbio tra i principali utilizzatori delle grandi strutture di supercalcolo per uso civile sparse per il mondo. In parallelo, i continui miglioramenti tecnologici, negli algoritmi e nella trattazione dei processi fisici hanno portato ad un enorme aumento della capacità predittiva di tali simulazioni (si veda ad es. Dolag et al., 2009 per una review).

Le simulazioni per la formazione di strutture cosmiche si possono classificare in due grandi categorie: (1) simulazioni a N corpi (N-body) per la descrizione dell'instabilità gravitazionale della componente non-collisionale di materia oscura; (2) simulazioni idrodinamiche, che trattano contemporaneamente sia l'evoluzione gravitazionale sia le forze idrodinamiche cui è soggetta la componente barionica. Ciascuna di queste categorie generali può essere ulteriormente suddivisa tra simulazioni su larga scala di volumi cosmologici di diverse centinaia di Mpc e quelle che invece si focalizzano sullo studio ad alta risoluzione di singoli oggetti (come galassie e ammassi di galassie).

Le simulazioni idrodinamiche cosmologiche si prefiggono lo scopo di seguire in dettaglio i processi fisici che guidano l'evoluzione dei barioni. Oltre all'instabilità gravitazionale, che ne determina l'evoluzione sopra la scala di Jeans, una serie di fenomeni astrofisici diventano assolutamente rilevanti al di sotto di scale tipiche dell'ordine del Mpc. La formazione stellare, le esplosioni di supernove, il rilascio di energia da accrescimento su buchi neri super-massicci, i campi magnetici, l'iniezione di raggi cosmici sono esempi di fenomeni, inclusi nelle simulazioni oggi giorno più avanzate, assolutamente fondamentali nel determinare l'evoluzione delle galassie e la loro interazione con il gas diffuso nel mezzo inter-galattico (IGM) e intra-cluster (ICM) (per delle review, si vedano Borgani et al. 2008 e Mayer et al. 2008). Anche se l'effetto di tali fenomeni si manifesta su scale relativamente grandi e ben risolte nelle simulazioni, essi hanno origine su scale dell'ordine del parsec che nelle simulazioni cosmologiche sono assolutamente inaccessibili per semplici limiti computazionali. Per questo motivo, tali fenomeni fisici vengono trattati con i cosiddetti modelli efficaci *sotto-griglia*: anziché essere esplicitamente risolti, essi vengono descritti tramite il loro effetto sulle scale che sono esplicitamente risolte. Sulle scale galattiche, i processi astrofisici trattati sotto-griglia hanno ricevuto particolare attenzione negli ultimi anni. Uno dei problemi storici della formazione di galassie a disco in simulazioni numeriche è, infatti, quello della perdita di momento angolare del gas, che produce galassie con dischi troppo poco estesi o rapporti di massa bulge/disco troppo elevati. Mentre nelle prime simulazioni questo era parzialmente dovuto a mancanza di risoluzione numerica, è ora chiaro che il problema si risolve solo con un'adeguata



trattazione della formazione stellare e del relativo feedback energetico delle supernove.

Chiaramente, sebbene le simulazioni permettano di catturare la complessità degli effetti dinamici, il loro costo computazionale in genere non permette un'accurata esplorazione dello spazio dei parametri da cui tali modelli sotto-griglia dipendono. In tale contesto, i modelli semi-analitici (SAM) per la formazione galattica rappresentano un approccio assolutamente complementare alle simulazioni numeriche dirette (per una review, si veda Baugh 2006). Nella loro versione più moderna, essi utilizzano l'assemblaggio gerarchico degli aloni di materia oscura prodotto da simulazioni N-body contenenti fin oltre  $10^{10}$  particelle, mentre utilizzano dei modelli fenomenologici per descrivere l'evoluzione dei barioni, la formazione stellare e l'effetto dei vari meccanismi di feedback (De Lucia & Blaizot 2006). Sebbene tali modelli forniscano una descrizione dei processi gas-dinamici assai più approssimata di quella fornita dalle simulazioni, essi presentano l'indubbio vantaggio di avere un costo di calcolo assai limitato, così da permettere un'esplorazione più accurata dello spazio dei parametri nel confronto con le proprietà statistiche osservate delle popolazioni di galassie.

Infine, lo studio dell'IGM sia attraverso le fasi della re-ionizzazione che nella successiva evoluzione richiede di tener conto in modo dettagliato dell'interazione tra gas e radiazione elettromagnetica emessa da sorgenti astrofisiche e che in tale mezzo si propaga. La trattazione di un tale problema richiede l'utilizzo di codici di trasporto radiativo che trattino esplicitamente l'interazione tra radiazione e materia, e che siano esplicitamente accoppiati ad un codice idrodinamico (e.g., Iliev et al., 2008). L'elevato costo computazionale dei codici di trasporto radiativo ha sinora limitato tali studi a situazioni idealizzate o facendo delle assunzioni semplificative che necessariamente limitano l'accuratezza della descrizione numerica. Tale campo è da considerarsi ancora relativamente giovane e quindi suscettibile di notevoli sviluppi nel futuro prossimo.

## **2.2. Il contributo Italiano**

Nel precedente capitolo introduttivo abbiamo già fatto menzione di alcuni risultati italiani di primo piano in questo campo. In questa sezione presentiamo in modo più sistematico il ruolo dei gruppi italiani nei sotto-filoni di ricerca e nei progetti in corso.

### **2.2.1. Modelli cosmologici**

Il contributo italiano alla ricerca in cosmologia teorica si articola su molti fronti. Particolarmente forte è l'attività nello studio delle basi teoriche e delle conseguenze osservative di vari modelli di energia oscura (DE): a) DE come campo scalare interagente con la materia ordinaria; b) DE come modifica della gravità; c) DE come fluido perfetto con equazione di stato non-lineare. Alcuni di questi modelli sono motivati in generale nelle superstringhe e negli scenari a *brane* extradimensionali. Tra i nuovi fenomeni dovuti all'interazione sono state esaminate la possibile violazione a grande scala del principio di equivalenza, la generazione di non-gaussianità osservabile nella struttura a grande scala, la presenza di attrattori di tipo stazionario, la crescita delle perturbazioni lineari e non-lineari. Per molti modelli esaminati sono stati identificati i vincoli indotti dalle osservazioni del CMB, dallo spettro delle fluttuazioni a grande scala, dalla cinematica di espansione etc. (vedi ad es. Amendola et al. 2003; Baccigalupi et al. 2001; Balbi et al. 2001; Macciò et al. 2004; Lazkoz & Majerotto 2007).

Tra le altre aree attive, e in cui l'interazione tra fisica particellare e astrofisica è fortissima, va segnalata la fisica del neutrino. E' noto che i dati più recenti di WMAP assieme a quelli delle SNIa e della LSS, pongono un limite alla somma delle masse dei 3 neutrini, fissandola a 0.61 eV (95% c.l.). Attualmente il limite inferiore alla massa del più pesante tra i neutrini è  $\sim 0.05$  eV, tale essendo



la differenza tra l'autostato di massa più pesante e quello più leggero. Tuttavia, già tra un anno, l'esperimento KATRIN entrerà in funzione e, raffinando le misure sul decadimento beta, potrà fornire una stima diretta della massa del neutrino, se essa è  $>0.2$  eV. La prospettiva di una discrepanza tra dati cosmologici e di laboratorio è perciò reale. Se ad esempio, si misurasse una massa di 0.3 eV, la somma delle masse dei tre neutrini si collocherebbe attorno a 0.8 eV, contraddicendo non solo il modello  $\Lambda$ -CDM, ma anche qualsiasi modello con  $w > -1$  e costante. Tra le vie di uscita che si prospetterebbero ci sono i modelli in cui DM e DE sono mutuamente accoppiate (Casarini et al. 2008; La Vacca et al. 2008).

Infine, l'ipotesi che il neutrino stesso sia accoppiato all'energia oscura ha motivato interessanti scenari cosmologici (Amendola et al. 2008). La possibilità che l'espansione accelerata sia dovuta a forme di gravità modificata ha riaperto anche lo studio dei fondamenti quantistici della gravità. In effetti nello schema rinormalizzabile a livello non-perturbativo di Wilson applicato alla gravità (per una rassegna, vedi Niedermaier and Reuter 2006) la costante di gravitazione di Newton e la Costante Cosmologica dipendono dalla scala di energie e di distanze a cui vengono misurate secondo una dinamica determinata dal gruppo di rinormalizzazione. Risultati recenti hanno mostrato che questo approccio permette di spiegare l'entropia dell'Universo come un effetto di Coarse-Graining (RG-flow) nel settore quanto-gravitazionale che è responsabile dell'espansione dell'Universo. Inoltre le nuove equazioni di campo modificate possiedono soluzioni di tipo inflazionario immediatamente dopo la singolarità iniziale. L'inflazione in questo schema è generata dalla costante cosmologica e termina automaticamente dopo che l'energia del vuoto ha raggiunto il livello della densità di energia della materia (Bonanno et al. 2007).

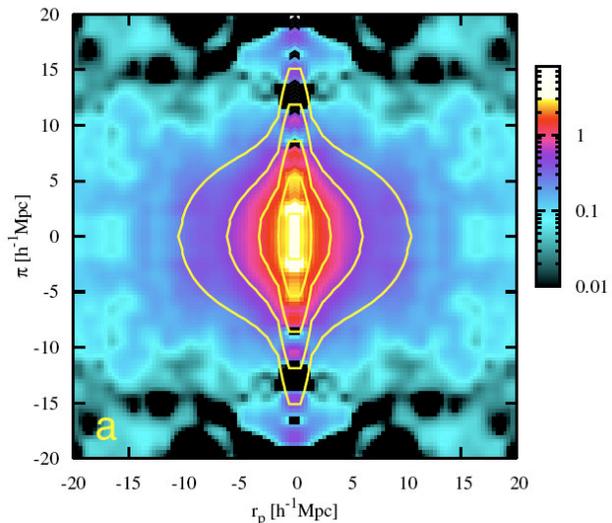
### 2.2.2. *Clustering e parametri cosmologici*

Il ruolo italiano nello studio osservativo della struttura a grande scala dell'Universo ha assunto sempre maggior peso dall'inizio del nuovo millennio. Il contributo primario nel progetto di costruzione dello spettrografo VIMOS al VLT e lo sviluppo parallelo delle conoscenze teoriche e delle tecniche di analisi e interpretazione di grandi moli di dati hanno permesso alla comunità italiana di giocare un ruolo primario nelle due maggiori surveys di redshifts europee degli ultimi 10 anni. Con la VIMOS-VLT Deep Survey (co-PI P. Vettolani), ormai conclusa, e la survey Z-COSMOS, tuttora in corso, l'Italia si è potuta porre alla frontiera di questo tipo di studi, in precedenza appannaggio unico dei gruppi americani e britannici e privo di una vera tradizione nell'Europa continentale. La crescita in questo settore è stata confermata con la recente approvazione del progetto VIPERS (VIMOS Public Extragalactic Redshift Survey), la nuova survey di redshift a guida italiana recentemente accettata dall'ESO come Large Programme. La survey si propone di caratterizzare con precisione la struttura a grande scala a  $\langle z \rangle \sim 0.8$ , misurando più di 100,000 redshift a  $0.5 < z < 1.2$ , in un volume analogo a quello esplorato localmente dalla 2dFGRS (vedi sezione 5 per maggiori dettagli). Accanto a questo, l'approvazione in Fase A della missione spaziale EUCLID (che progetta di coprire 20,000 gradi quadrati sia in imaging sia in spettroscopia, mappando la struttura a grande scala rispettivamente usando il weak lensing e la distribuzione delle galassie) rappresenta un'ulteriore riprova del livello di eccellenza raggiunto in Italia in questo settore. Per quanto riguarda i risultati ottenuti fino ad ora in questo campo, riassumiamo qui di seguito i principali contributi.

- Utilizzando i dati VVDS-Deep ( $I_{AB} < 24$ ) si è potuta per la prima volta studiare la dipendenza del clustering delle galassie dalla loro luminosità (Pollo et al. 2006) e massa stellare (Meneux et al. 2008) a diverse epoche cosmiche, mostrando importanti trend rispetto alle misure della SDSS all'epoca attuale.

- Sempre utilizzando i dati VVDS è stata studiata l'evoluzione dei momenti di ordine superiore con il redshift, mostrando come la componente non-lineare del fattore di bias, per quanto piccola, è necessaria per spiegare il trend osservato nella varianza e skewness della distribuzione di probabilità (Marinoni et al. 2008).
- La VVDS ha reso pubblici i circa 10,000 redshifts raccolti nel campo F22 della sua parte Wide ( $I_{AB} < 22.5$ ), l'area contigua più grande finora osservata in spettroscopia a questa profondità (Garilli et al. 2008).
- Utilizzando questi dati, Guzzo et al. (2008) hanno misurato il tasso di crescita delle fluttuazioni a  $z \sim 0.8$  utilizzando il metodo delle *redshift distortions* sulla funzione di correlazione a due punti (Fig. 1) ed evidenziando come questa tecnica abbia grandi potenzialità nello studio dell'accelerazione cosmica.
- Le performance dei futuri esperimenti (come BOSS e EUCLID) nel vincolare l'evoluzione dell'equazione di stato  $w(z)$  sono state stimate utilizzando il formalismo delle Matrici di Fisher (Rassat et al. 2008), confrontando i risultati da terra e dallo spazio.
- Grazie alla copertura senza precedenti dell'intero spettro elettromagnetico sul campo COSMOS, in quest'area si sono potuti realizzare (e sono tuttora in corso) studi della struttura a grande scala che combinano la distribuzione 3D delle galassie (ricostruita tramite redshift fotometrici di grande accuratezza), l'emissione X diffusa (da XMM) e la distribuzione di massa ricostruita con il lensing (McCracken et al. 2007, Scoville et al. 2007, Guzzo et al. 2007).

Figura 2.1: La funzione di autocorrelazione  $\xi(r_p, p)$  misurata dal campo F22 della survey VVDS-Wide, che mette in evidenza l'effetto di distorsione dovuto ai moti peculiari di crescita delle strutture (*redshift-space distortions*). I contorni corrispondono al livello di correlazione in funzione della separazione perpendicolare (asse X) e parallela (asse Y) alla visuale. Lo schiacciamento lungo l'asse Y, evidente a scale  $r_p \sim 10-15 h^{-1} \text{ Mpc}$  e' proporzionale al tasso di crescita delle strutture a  $\langle z \rangle = 0.77$  e ne permette la misura.



- Per quanto riguarda ancora le applicazioni cosmologiche del weak lensing, vanno senz'altro menzionati il grosso sforzo teorico-predittivo legato a EUCLID (Amendola et al. 2008b), e i tentativi significativi di recuperare terreno sul versante osservativo da terra, sia partecipando a grandi collaborazioni internazionali (DUEL, KIDS), sia unendo le competenze esistenti nella comunità nazionale (OACn, OABo, OARm, OACt).

### 2.2.3. *Ammassi di galassie*

Come testimoniato sia dall'introduzione generale, sia dalla lista di progetti e finanziamenti (vedi più avanti), anche in questo sotto-settore l'attività italiana è intensissima e ci qualifica tra le nazioni leader in questo campo. Aggiungiamo a quanto già citato i seguenti risultati e progetti.

- I profili di massa sia barionica sia oscura negli ammassi di galassie sono stati ricostruiti tramite l'utilizzo di tecniche complementari, quali le caustiche che definiscono la regione di infall sull'ammasso, (e.g. Rines & Diaferio 2006) e l'uso di galassie (Biviano et al. 2006) e ICM (Gastaldello et al. 2007, Rasia et al. 2006) come traccianti del potenziale. Questi studi si sono focalizzati in particolar modo sull'efficienza e affidabilità dei rispettivi estimatori, con una stima degli effetti sistematici tra le più complete in letteratura.
- Un'altra tecnica che sta conoscendo uno sviluppo significativo in questi anni nella descrizione della distribuzione della massa negli ammassi è quella del *lensing gravitazionale*. Sia *lensing forte* (e.g. Rzepecki et al. 2007, Miranda et al. 2008), sia *debole* (e.g. Paulin-Henriksson et al. 2007, Radovich et al. 2008), sia la combinazione dei due metodi (Cacciato et al. 2006, Merten et al. 2008) vengono utilizzati con sempre maggiore confidenza. Questa è rinforzata da confronti positivi con altre tecniche di stima della massa totale, quali l'analisi X. Le incertezze di origine sistematica sono state investigate da Meneghetti et al. (2008) con un nuovo codice che permette la simulazione del *lensing* prodotto da ammassi in osservazioni ottiche.

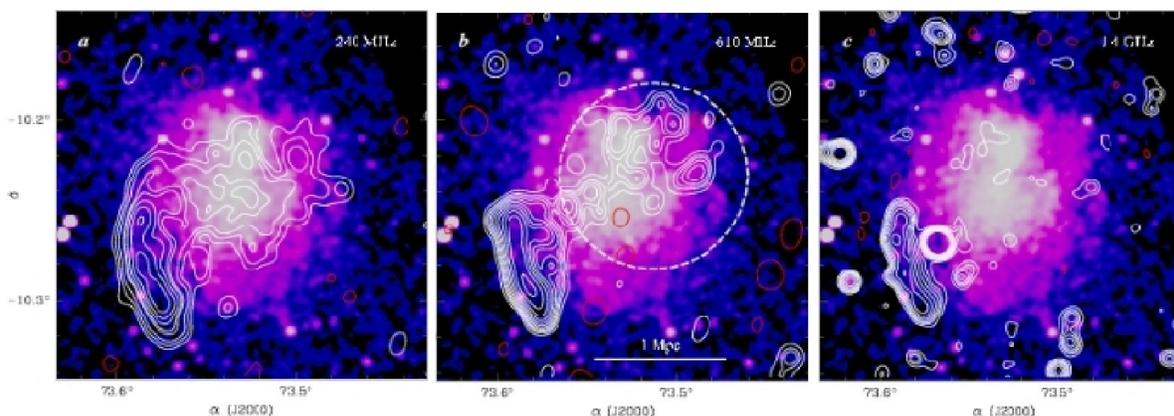


Figura 2.2: Contorni di emissione radio sovrapposti a un'immagine Chandra in banda X dell'ammasso in interazione A521 (da Brunetti et al. 2008). L'emissione radio diffusa nella regione centrale dell'ammasso è ben visibile nell'immagine a bassa frequenza (sinistra: GMRT 240 MHz), e tende a scomparire gradualmente spostandosi a frequenze più alte (centro: GMRT 610 MHz, destra: VLA 1.4 GHz). Questo indica uno spettro radio molto ripido, consistente con un'accelerazione degli elettroni relativistici da parte della turbolenza, un modello che però prevede molti più aloni radio a basse frequenze di quanti se ne osservino.

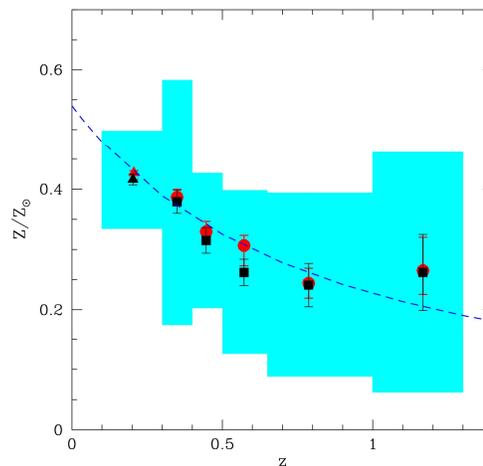
- Utilizzando spettroscopia e fotometria ottica e analisi spaziale e spettrale nei raggi X, sono state investigate la dinamica e l'interazione fra sottostrutture (Girardi et al. 2008), mentre osservazioni radio e VIMOS-IFU sono usate per studiare il legame delle galassie *dumbbell* con i *mergers* tra ammassi (IRA).



- Attraverso osservazioni a bassa frequenza radio, Brunetti et al. (2008) hanno messo in evidenza come gli aloni non-termici degli ammassi abbiano uno spettro molto ripido che ne rende difficile la rivelazione a frequenze superiori al GHz (Fig. 2.2.) Le proprietà di aloni e relics radio, in particolare la variazione spaziale del loro indice spettrale, permettono di ricostruire l'energetica delle particelle relativistiche e la distribuzione del campo magnetico al loro interno. Queste sono informazioni importanti per comprenderne la possibile formazione durante i *mergers* (Orrù et al. 2007).
- Si sono completati diverse analisi sulla formazione delle galassie centrali degli ammassi, dell'eventuale feedback sull'ICM prodotto da un AGN in esse contenuto e della relazione tra proprietà termiche e non-termiche. Molendi & Gastaldello (2009) non confermano con dati XMM la presenza in Perseus della componente termica recentemente trovata con Chandra. Cassano et al. (2008) mostrano l'esistenza di una forte correlazione tra potenza radio e  $L_X$  (già conosciuta per gli aloni radio giganti), anche nei mini-aloni nei core degli ammassi. Mazzotta & Giacintucci (2008) suggeriscono la possibilità che l'emissione radio diffusa possa essere connessa al moto gassoso responsabile dei *cold-front* recentemente osservati in ammassi senza significativi evidenze di merging. Gitti et al. (2007) presentano la scoperta con nuovi dati VLA di un mini-alone in RXJ1347-1145, l'ammasso più luminoso tra quelli noti in banda X.
- Leccardi & Molendi (2008a,b; vedi anche Baldi et al. 2007, Bourdin & Mazzotta 2008) hanno ottenuto misure spazialmente risolte delle proprietà termiche e dell'abbondanza chimica dell'ICM in ammassi a  $z < 0.3$ , dove i profili di temperature e densità dell'ICM possono essere studiati nelle loro variazioni fornendo evidenza diretta sulla struttura dei *cool cores* e sullo stato dinamico degli ammassi fino a circa il 60 per cent del raggio del viriale.
- Balestra et al. (2007) hanno stimato, per la prima volta fino a  $z=1.3$ , la metallicità media dell'ICM in un campione statisticamente significativo, trovando evidenza d'una forte evoluzione probabilmente legata ai tempi scala e ai processi fisici coinvolti nell'arricchimento chimico dell'ICM (vedi Fig. 2.3).
- Si sono completati diversi studi delle regioni centrali con analisi della formazione, evoluzione ed emissione delle galassie centrali, dell'eventuale feedback prodotto dall'AGN centrale sull'ICM circostante e della relazione tra le proprietà termiche e non-termiche del core degli ammassi (e.g. Molendi & Gastaldello 2009; Cassano et al. 2008; Gitti et al. 2007).
- Molto attivi sono i progetti di ricerca di ammassi in survey X, SZ e ottico-infrarosse. Dalla survey XMM del campo COSMOS è stato costruito il più profondo catalogo X mai realizzato su un'area contigua così estesa (più di 100 ammassi su  $\sim 2$  gradi quadrati, Finoguenov et al. 2007). Usando invece i dati della UKIDSS survey, è stato recentemente individuato (Andreon et al. 2009) un ammasso (confermato dall'osservazione di emissione X diffusa) con chiara presenza di galassie early-type e con un redshift stimato record di  $z=1.9$ . Questa scoperta estende altri risultati già ottenuti a  $z \sim 1$  usando la tecnica della *red sequence* (Andreon et al. 2008). In modo analogo, Trevese et al. (2007) hanno sviluppato ed applicato al CDFS un algoritmo di ricerca di ammassi basato su redshift fotometrici multi-banda.
- Gli effetti di selezione delle survey SZ e X sono stati invece studiati da Pace et al. (2008) attraverso simulazioni cosmologiche e idrodinamiche, mostrando come parametri quali la completezza, la densità e il limite inferiore di massa possano essere opportunamente calibrati.
- Altri studi si sono occupati della definizione delle proprietà X, in particolare a  $z > 0.3$ , studiando l'evoluzione delle relazioni di scala e i bias osservativi che contribuiscono alla dispersione delle stesse. Per esempio, Branchesi et al. (2007; 2007a) hanno utilizzato dati Chandra per risolvere e

sottrarre la contaminazione da sorgenti puntiformi, costruendo una relazione  $L_X-T_X$  ripulita dal contributo degli AGN che mostra una chiara evoluzione con il redshift, con un raddoppio ad alto redshift della luminosità a parità di temperatura. Morandi et al. (2007) e Morandi & Ettori (2007) hanno studiato, in un campione di ammassi massicci e luminosi in banda X, sia le relazioni di scala con il segnale SZ sia i profili di entropia per la prima volta ricostruiti fino a  $z=0.8$ , trovando forti evidenze di evoluzione rispetto ai modelli auto-similari e divergenze rispetto ai modelli di feedback. Bignamini et al. (2008) hanno investigato le proprietà X di ammassi selezionati dalla Red Sequence Cluster Survey a  $0.6 < z < 1.2$ , osservando emissione X nel 70% degli oggetti, una relazione  $L_X-T_X$  di un fattore 2 più bassa di quella stimata in oggetti selezionati in banda X allo stesso redshift e una metallicità invece comparabile.

Figura 2.3. Abbondanza media del ferro in funzione del redshift per un campione di 56 ammassi estratti dall'archivio Chandra. Le barre d'errore indicano le incertezze al 68% di confidenza. Le zone ombreggiate mostrano la dispersione intorno al valore medio. La linea tratteggiata mostra il miglior fit con una legge di potenza con indice di -1.25 (da Balestra et al. 2007).



#### 2.2.4. Simulazioni

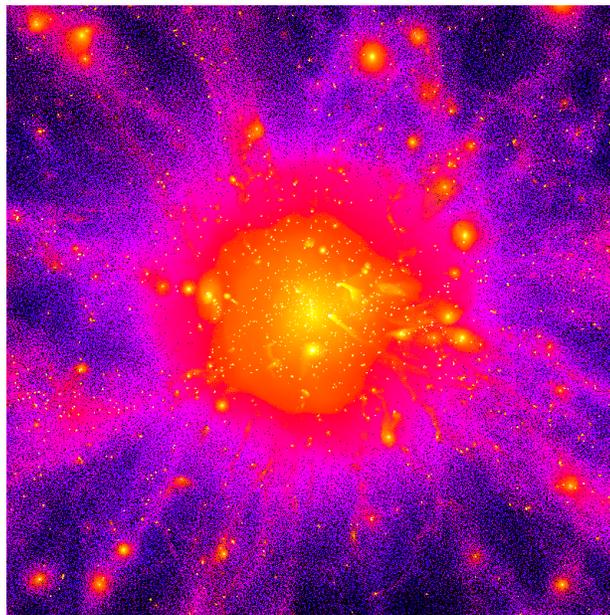
La comunità cosmologico-numerica italiana è relativamente giovane e, sebbene suddivisa tra diverse sedi, è caratterizzata da un'attività di ricerca coordinata e di forte collaborazione [Bologna (OABO, IRA, UniBO), Catania (OACT, UniCT), Milano (UniBicocca), Roma (UniRoma3), Torino (OATO, UniTO), Trieste (OATs, UniTS)]. I risultati di maggior spicco sono elencati di seguito.

*Simulazioni idrodinamiche* (utilizzando prevalentemente il codice Tree-SPH GADGET e in alcuni casi codici a griglia quali ENZO e FLASH).

- Studio numerico degli ammassi di galassie: proprietà termodinamiche e arricchimento chimico del mezzo intra-cluster (ICM) (Borgani et al. 2004), proprietà delle popolazioni galattiche in ammassi (Murante et al. 2007), confronto con i dati osservativi sia in banda X che in banda ottica e del vicino infrarosso, ruolo del feedback da supernove e da AGN; proprietà non termiche degli ammassi collegate al ruolo di popolazioni di particelle relativistiche (raggi cosmici) generate dagli shock di accrescimento (Vazza, et al. 2008) e dagli AGN centrali.
- Studio del mezzo inter-galattico ad alto redshift ( $z > 2$ ) (Viel et al. 2004, Pierleoni et al. 2008): arricchimento chimico e ruolo dei processi di feedback nel determinare la distribuzione di metalli, confronto di tali simulazioni con i risultati osservativi sulle proprietà delle strutture in assorbimento (foresta Lyman- $\alpha$ , DLAS); studio della formazione delle prime stelle, loro ruolo per la re-ionizzazione ed il pre-arricchimento dell'IGM (Tornatore et al. 2007).

- Simulazioni di formazione di singole galassie in contesto cosmologico: ruolo di diversi modelli sotto-griglia per la descrizione del mezzo interstellare, della formazione stellare e del ruolo del feedback da supernove e da AGN; implementazione modelli sottogriglia che descrivano il processo di formazione stellare in un mezzo multi-fase ed il corrispondente effetto del feedback da supernove.
- Simulazioni di aloni isolati in contesto non-cosmologico per effettuare esperimenti controllati sull'effetto del feedback da AGN nel regolare il "cooling flow" sulla scala di galassie ellittiche ed ammassi di galassie (p.es., Brighenti & Mathews 2006; 120; Etori & Brighenti 2008).

Figura 2.4: Mappa di densità del gas in una simulazione idrodinamica in cosmologia Lambda-CDM di un ammasso di galassie con massa finale di  $2 \times 10^{15} M_{\text{sun}}/h$  (Borgani et al. 2006). La mappa copre una regione di circa 2 raggi viriali intorno all'ammasso. La simulazione, realizzata con il codice TreePM-SPH GADGET-2 (Springel 2005) include i processi di raffreddamento radiativo del gas, formazione stellare, feedback in energia da supernove, e arricchimento chimico (come introdotto da Tornatore et al. 2007). Sono evidenti le strutture filamentari lungo le quali l'ammasso accresce massa dalla cosmic web, le galassie che corrispondono alle strutture con alta densità di gas ed i gruppi in fase di merging che lasciano dietro di se code di gas a causa dell'effetto di ram-pressure stripping.



### *Simulazioni in cosmologie non-standard*

- Simulazioni sia N-body che idrodinamiche in presenza di perturbazioni non Gaussiane (Grossi et al. 2007). Tali simulazioni sono volte a caratterizzare il ruolo di deviazioni dal paradigma standard di Gaussianità nelle proprietà degli aloni di materia oscura e del mezzo inter-galattico.
- Formazione di strutture cosmiche in vari modelli di Dark Energy (Casarini et al. 2008, Crociani et al. 2008) e di Gravità Modificata (Diaferio & Ostorero 2008). Scopo di tali simulazioni è di predire l'evoluzione in regime non lineare di tali due modi alternativi per modificare le Equazioni di Einstein, onde calibrare con accuratezza i corrispondenti test osservativi basati sull'evoluzione delle strutture cosmiche.

### **2.3. *Principali programmi futuri a livello internazionale (esclusi quelli a guida o forte partecipazione Italiana)***

Elenchiamo qui di seguito una lista, il più completa possibile, dei presenti e futuri progetti legati alla struttura a grande scala in cui non vi è una sostanziale partecipazione italiana. L'eventuale piccola partecipazione è notata esplicitamente.

- **Pan-STARRS (*Panoramic Survey Telescope And Rapid Response System*)**: userà 4 telescopi da 1.8 metri di diametro e camere CCD da più di 1 Gigapixel per osservare a  $m=24$  circa 6000  $\text{deg}^2$  ogni notte, in diverse bande. Obiettivi del progetto sono lo studio della struttura a grande



scala attraverso l'uso dei redshift fotometrici e il lensing: statistiche di clustering, misura delle BAO per stimare  $w(z)$ , rivelazione e studio di un grande numero di ammassi di galassie. Il primo dei 4 telescopi (PS-1) sta per entrare in attività a Mauna Kea.

- **SDSS3-BOSS**: una delle quattro surveys che costituiscono l'estensione della Sloan Digital Sky Survey, sempre utilizzando il telescopio SDSS di Apache Point con uno spettrografo a fibre rinnovato (1000 fibre,  $R \sim 2000$ ). Tra l'autunno 2009 e la primavera 2014 si propone di (a) misurare il redshift di un milione e mezzo di "Luminous Red Galaxies" fino a  $z \sim 0.7$ , su un'area di  $10,000 \text{ deg}^2$ ; (b) misurare la foresta Lyman- $\alpha$  per 160,000 quasars con  $2.2 < z < 3$ . Il goal scientifico principale è utilizzare il picco delle BAO nel power spectrum delle galassie e degli assorbitori Lyman- $\alpha$  come "standard ruler" per misurare la distanza di diametro angolare a  $z=0.3$  e a  $z=0.6$  con un errore dell'1% e a  $z = 2.5$  con un errore dell'1.5%. Questa è una misura diretta del rate di espansione  $H(z)$  a questi redshifts, direttamente legato a  $w(z)$ .
- **APEX (Atacama Pathfinder Experiment)**: è un telescopio radio da 12 metri, prototipo per l'array di ALMA. E' finanziato da ESO e istituti tedeschi e svedesi, operativo dal 2005. Utilizzando il ricevitore bolometrico a onde millimetriche sviluppato dall'Università di Berkeley e dal Max-Planck per la Radioastronomia, dovrebbe identificare fino a 1000 nuovi ammassi tramite l'effetto SZ.
- **SPT (South Pole Telescope)**: è un telescopio di 10 metri di diametro finanziato da NSF e posto in Antartide per ottimizzare l'osservazione di onde con frequenza tra i 70 e i 300 GHz. Obiettivo primario di SPT è la scoperta ex-novo di diverse migliaia di ammassi utilizzando l'effetto Sunyaev-Zeldovich. Il campione così costruito verrà utilizzato per investigare l'equazione di stato dell'Energia Oscura (si veda Staniszewski et al. 2008 per i primi risultati).
- **Fermi (già GLAST, Gamma-ray Large Area Space Telescope)**, è un satellite NASA (con partecipazione di istituti francesi, tedeschi, giapponesi, svedesi e italiani) sensibile ad energie comprese tra 8 keV e 300 GeV. Se gli ammassi producono segnale a queste energie, come alcuni modelli prevedono, ne sarà possibile la rivelazione per la prima volta.
- **DES: (Dark Energy Survey)**: coprirà  $5000 \text{ deg}^2$  in multibanda con una camera da 500 Megapixel e  $2.2 \text{ deg}^2$  di campo di vista installata al telescopio Blanco da 4 m di CTIO. Di questi,  $4000 \text{ deg}^2$  saranno in comune con SPT. Tra gli altri obiettivi, la survey punta ad ottenere una stima di  $w$  con errori del 5-15% usando la densità e la distribuzione spaziale degli ammassi nell'intervallo di redshift 0.1-1.3. Il progetto vede coinvolte università americane, spagnole, britanniche e brasiliane.
- **LSST (Large Synoptic Survey Telescope)**: telescopio ottico da survey con specchio primario di 8.4 m e campo di vista di  $9.6 \text{ deg}^2$ , associato ad una camera di 3.2 Gigapixel. Sarà in grado di coprire  $10^4 \text{ deg}^2$  a una profondità di  $r=24.5$  in un tempo medio di 3 notti. E' un progetto americano, da cui si attendono grosse ricadute nello studio della struttura a grande scala e degli ammassi utilizzando i redshift fotometrici ( $P(k)$  e BAO) e il lensing gravitazionale.
- **LOFAR (Low Frequency Array)**: rivelerà anche ammassi di galassie nelle bande radio 40-80 e 120-240 MHz studiando le proprietà della popolazione non-termica il cui contributo all'energetica complessiva degli ammassi è ancora da comprendere nei dettagli. Già operativo in una prima configurazione minimale, prevede una partecipazione italiana nella definizione delle strategie scientifiche.
- **eROSITA (Extended ROentgen Survey with an Imaging Telescope Array)** : è un satellite tedesco per osservazioni in banda X atteso per il lancio con un razzo russo Soyuz-2 nel 2011.



Scopo della missione è realizzare la prima all-sky survey a energie fino a 10 keV con buona risoluzione spettrale e spaziale; permetterà di studiare l'ICM di ~50-100 mila gruppi e ammassi di galassie.

- **JDEM (Joint Dark Energy Mission):** è il programma combinato della NASA e del Department of Energy (DOE) degli USA per lo studio dell'energia oscura. Attualmente ha completato la fase di definizione della Call for Proposals, la cui pubblicazione è attesa entro le prime settimane del 2009. Analogo come obiettivi alla missione EUCLID dell'ESA, non ha al momento ancora definito quali tecniche sperimentali utilizzerà. E' stato recentemente pubblicato lo studio preliminare del "JDEM Figure of Merit Survey Working Group", che ha aggiornato il ben noto "Dark Energy Task Force Report" allo scopo di fornire le linee guida per la valutazione delle proposte JDEM (Albrecht et al. 2009). Tre dei membri di questo comitato sono stati indicati dall'ESA, tra cui due italiani (L. Amendola e L. Guzzo)
- **SKA (Square Kilometer Array)** (in fase di studio): è un ambizioso progetto per la costruzione di un radiotelescopio con sensibilità di un fattore ~100 maggiore di qualsiasi altro strumento mai realizzato (area colletttrice ~30 volte più grande). Tra i diversi goal scientifici, lo studio della LSS è particolarmente interessante in quanto lo strumento sarà in grado di rivelare e misurare il redshift di galassie attraverso la riga dell'Idrogeno neutro a 21cm fino a redshift cosmologici. Le simulazioni mostrano che nell'ipotesi di un campo di vista di ~10 gradi quadrati sarà possibile per SKA coprire l'intero cielo visibile in un anno, arrivando a misurare redshifts per un miliardo di galassie con redshift fino a  $z \sim 1.5$ . Il completamento della prima parte dell'array con inizio delle prime osservazioni scientifiche è previsto per il 2016. Lo strumento completo dovrebbe essere on-line nel 2021.

**2.4. Progetti tecnologico/scientifici a leadership o forte partecipazione italiana (dal 2007 in avanti) e relativi finanziamenti**

PI	Titolo/Topic	Istituti	Fondi	Inizio	Fine
Renzini	The Cosmic Evolution Survey	OAPd, OABo, OABr., IASF-Mi, Uni- BO/PD + partner stranieri	ASI - Cosmologia	2006	2009
Brunetti	Non thermal components in galaxy clusters	IRA et al.	PRIN- INAF	2008	2010
Zamorani	VVDS/zCOSMOS: Measuring the Joint Evolution of Galaxies and the Large-Scale Structure of the Universe	OABo, OABr, IASF-Mi	PRIN- INAF	2008	2010



Borgani	Observing and modelling the properties of diffuse baryons in clusters of galaxies	Uni-TS et al.	PRIN-INAF	2007	2009
Andreon	Analysis of the bivariate Lx-Lopt distribution of XMM-LSS Clusters	OABr, IASF-Mi	ASI I/023/05/0	2006	2009
Feretti	Radio relic/merger connection in the clusters A548b and A1664	IRA, et al.	ASI I/023/05/0	2006	2009
Molendi	Clusters of Galaxies in X-rays	IASF-Mi, OABo, et al.	ASI I/023/05/0	2006	2009
Brunetti	Acceleration of high energy particles in galaxy clusters and non thermal emission	IRA et al.	ASI I/088/06/0	2007	2009
Ettori	Tracing the evolution of the physical properties in X-ray galaxy clusters	OABo et al.	ASI I/088/06/0	2007	2009
Giovannini	The interplay between thermal and non-thermal components in galaxy clusters	IRA, OABo	ASI I/088/06/0	2007	2009
Colafrancesco	Studying the nature and the origin of high-energy particles in galaxy clusters through multi-frequency space observations	OARm et al.	ASI I/088/06/0	2007	2008
Tagliaferri	Clusters of galaxies and IGM	OABr, Ts	ASI I/088/06/0	2007	2009
Borgani	I barioni diffusi nella storia dell'Universo (simulazioni e osservazioni di ammassi di galassie, IGM e WHIM)	Uni-TS et al.	PRIN-MIUR 2007	2007	2009
Moscardini	Modelling the properties of baryon gas in the large scale structure of the universe	Uni-BO et al.	ASI I/088/06/0	2007	2009
Moscardini	Simulazioni numeriche "Metodi Teorici" (WP coord. Borgani)	Uni-BO et al.	ASI-COFIS	2007	2009
Brunetti	Acceleration of high energy particles in galaxy clusters and non thermal emission	IRA et al.	ASI-AAE Teoria	2007	2009



Viel	The Galaxy-Intergalactic Medium interplay: CINECA KP (200,000 ore di CPU)	OATs et al	CINECA	2007	
Borgani	High-resolution simulations of the Warm-Hot Universe: CINECA KP (400.000 ore di CPU)	Uni-TS et al	CINECA	2008	
Moore (Borgani)	ASTROSIM: simulation network European Science Foundation	Vari stranieri	+ ESF	2006	2010
Masiero (Bonometto)	PRIN “Costituenti fondamentali dell’Universo”	Uni-MIBic, OARm et al.	PRIN-MIUR	2006	2008
Amendola	working packages ASI 2006 (2450 e 2570)	OARm et al.	ASI	2006	2009
Cimatti	EUCLID Near Infrared Spectrograph (NIS): Dark Energy and Cosmology with a massive spectroscopic survey	Uni-BO, OABr, OABo, OATs, IASF-Mi + partner stranieri	ASI / ESA	2009	2010+
Scaramella	EUCLID Imaging Channels (EIC): weak lensing and cosmology	OARm et al.	ASI	2009	2009+
Palumbo	IXO	Un. BO et al.	ASI	2009	2010+
Guzzo	VIPERS: the VIMOS Public Extragalactic Redshift Survey. ESO Large Programme (423 VLT hrs)	OABr, OABo, OATs, IASF-Mi, Un. RM3, Un. BO	-	2008	2010+
ASI	Simbol-X: satellite per la detezione spazialmente risolta di raggi X duri (0.5-80 keV)	Vari Francia	+ ASI/CNES	2008	



Taylor (Radovich)	DUEL: network europeo di weak lensing; ottimizzazione uso dati da survey in corso e future (CFHTLS, KIDS, PAN-STARRS, EUCLID) per ridurre incertezze sistematiche; galaxy-galaxy lensing; massa degli ammassi di galassie; cosmic shear.	OACn partner stranieri	+	Marie-Curie Research Training Network	2006	2010
Kuijken (Radovich)	KIDS (Kilo Degree Survey): Follow-up ottico <i>ugri</i> della 2dFGRS (1500 gradi quadrati); struttura degli aloni galattici con weak lensing; ricerca di QSO; effetti di ambiente.	OACn partner stranieri	+	-	2009?	
Sutherland (Radovich)	VIKING (VISTA Kilo Degree Galaxy Survey): come KIDS, ma in ZYJHK; accurati photo-z dalla combinazione con KIDS	OACn partner stranieri	+	-	2009	?
Baugh (Borgani)	COSMOCOMP: network europeo di cosmologia computazionale finalizzato al training di alto livello di giovani ricercatori	OATs partner stranieri	+	FP7 International Training Network	2009	2012
De Lucia	Galaxies through the cosmic ages: the role of primordial conditions and environmental effects (simulations and observations of galaxies and LSS)	OATs		ERC Young Investigator Grant	2009	2014

### 2.5. *Maggiori dettagli su alcuni progetti con il contributo Italiano determinante (alcuni ancora in fase di studio)*

- **zCOSMOS** (2006-2011, PI S. Lilly; IASF-Mi, OABo, OABr, OAPd): Large Programme ESO (550 ore con VIMOS al VLT) che sta realizzando una survey di redshifts profonda del campo COSMOS, tuttora in corso, con una fondamentale partecipazione italiana. L'obiettivo scientifico primario riguarda l'evoluzione delle galassie e il legame di questa con la struttura a grande scala e l'ambiente. La comunità italiana gioca un ruolo fondamentale nel progetto, che ha beneficiato di tutte le competenze e conoscenze acquisite con la VVDS. Per maggiori dettagli si veda il contributo di B. Poggianti sull'evoluzione delle galassie.
- **VIPERS** (2008-2012, PI L. Guzzo; OABr, IASF-Mi, OABo, IRA): nuovo Large Programme ESO a guida italiana (423 ore con VIMOS) iniziato con il Periodo 82. Il progetto si propone di costruire un campione di 100,000 redshifts con  $0.5 < z < 1.2$ , esplorando un volume analogo a quello coperto a  $z \sim 0$  dalla 2dFGRS. I goal scientifici sono fortemente focalizzati sulla struttura a grande scala e la cosmologia e includono la misura (ad un'epoca che è circa metà dell'età



dell'Universo) del fattore di crescita con una precisione  $<10\%$ , della dipendenza del clustering dalle proprietà delle galassie e delle funzioni di luminosità e massa con precisioni paragonabili a quelle ottenute dalla SDSS e 2dFGRS nell'Universo locale. La survey permetterà inoltre di selezionare un campione importante di gruppi e ammassi di galassie e produrrà inoltre un database senza precedenti di spettri a bassa risoluzione a  $\langle z \rangle \sim 0.8$ , su cui effettuare studi di evoluzione delle galassie.

- **LBC-LENSING** (2008-, OACn, OABo, OARm, OACT): programma di imaging con la LBT Camera (LBC) (Giallongo et al. 2008), per misurare tramite lensing gravitazionale la massa e il profilo di massa di un campione esteso di ammassi per cui sono già disponibili osservazioni HST, in banda X e di effetto SZ. Il campo di vista di LBC permette di combinare misure in regime debole nelle zone esterne con quelle HST delle zone centrali in regime forte.
- **EUCLID** (2016, ESA-led; coinvolge Uni-BO, IASF-Bo, OABr, IASF-Mi, OABo, OATs, Uni-TS, OARm et al.).

Un grosso sforzo è stato dedicato durante l'ultimo anno e mezzo al satellite cosmologico EUCLID. L'Italia ha un ruolo leader in questa missione, essendo stata la promotrice della proposta originale per "Cosmic Vision" denominata SPACE e – come conseguenza naturale – capofila del consorzio per la costruzione del payload spettroscopico di EUCLID. Accanto a questo, l'Italia ha una qualificatissima partecipazione anche al corrispondente payload di imaging, che invece origina dalla proposta parallela DUNE, a guida francese. EUCLID nasce dall'indicazione di ESA di unire i due concetti e rappresenta potenzialmente la più importante missione per la cosmologia e lo studio della Dark Energy del prossimo decennio, assieme all'americano JDEM.

Lo strumento spettroscopico di EUCLID (denominato NIS, PI A. Cimatti) si propone l'obiettivo di realizzare una redshift survey di galassie senza precedenti, misurando 200 milioni di spettri nella banda infrarossa su un'area totale di 20,000 gradi quadrati. Il breakthrough tecnologico è basato sull'uso dei DMD, arrays di micro-specchi con cui si possono configurare rapidamente un gran numero di fenditure nel piano focale dello strumento (Cimatti et al. 2009). Selezionando le galassie nel vicino infrarosso ( $H < 22$ ), la distribuzione in redshift attesa ha un picco attorno a  $z=0.8$  e una significativa coda sino a  $z \sim 2$ , coprendo pertanto un intervallo di grande importanza non solo per la cosmologia, ma anche per l'evoluzione delle galassie. Da questi dati, sarà possibile misurare  $H(z)$  attraverso le BAO e  $f(z)$  attraverso le redshift distortions in  $\sim 10$  bins di redshift tra 0.5 e 2, con precisioni che ci si aspetta possano arrivare all'1%. Le misure parallele ottenute con il weak lensing dal canale di imaging, forniranno misure indipendenti delle stesse quantità fornendo inoltre la possibilità di misurare il bias luce/massa delle galassie a diversi redshifts. La survey spettroscopica, inoltre, con una risoluzione attesa  $R=400$ , costruirà un database spettroscopico inestimabile per la comprensione definitiva dell'origine ed evoluzione delle galassie.

Lo strumento di imaging di EUCLID (EIC, PI A. Refregier) si propone invece di coprire in imaging 20,000 gradi quadrati di cielo, per misurare il segnale di weak lensing su grande scala e produrre un altro vincolo indipendente sull'evoluzione di  $w(z)$  e  $f(z)$  da combinare con quelli ottenuti dalle BAO e dalle redshift distortions (si veda Refregier et al. 2009, per una descrizione del concetto DUNE originale). Lo strumento si compone in realtà di una camera a grande campo nel visibile (EUCLID-VIS) per misurare il segnale di lensing in una banda ultra-larga (550-920 nm, corrispondenti circa a  $R+I+z$ ) unita ad una camera infrarossa capace di osservare in 3 bande (Y, J, H) la cui fotometria verrà utilizzata assieme a



fotometria ottica multi-banda da terra per stimare redshift fotometrici sufficientemente accurati da permettere la “tomografia” della distribuzione di materia oscura in funzione del redshift. Ricercatori italiani sono intensamente coinvolti in tutti gli working groups scientifici dell’ESA per la definizione delle caratteristiche della missione e l’ottimizzazione dei parametri tecnici (Rassat et al. 2008).

- **PLANCK** (2009-): scelto come missione Medium-Sized nel programma scientifico ESA "Horizon 2000", sarà messo in orbita nell'aprile 2009 con Herschel. Lo menzioniamo qui in connessione con gli ammassi di galassie. Per le fondamentali implicazioni cosmologiche (anisotropie, etc.) rimandiamo al contributo di N. Mandolesi. Quali sorgenti di anisotropie secondarie, ovvero fluttuazioni generate nella radiazione di fondo dopo la ricombinazione, gli ammassi saranno studiati nelle immagini di Planck tramite l'effetto SZ. Le stime nel quadro del presente modello cosmologico predicono ~30000 ammassi rivelati, con un migliaio di oggetti a  $z > 1$ .
- **IXO** [in fase di studio come EUCLID]: l'International X-ray Observatory è un osservatorio X che prevede la partecipazione di ESA, NASA e JAXA ed è stato selezionato da ESA tra le missioni L del programma Cosmic Vision 2015-2025 per ulteriori studi di fattibilità con lancio possibile nel 2017-2018. Tra i molti obiettivi, IXO, grazie alla sua grande area efficace ed eccezionale capacità di risoluzione spettrale, si prefigge lo studio dell'evoluzione delle strutture su grande scala e di come ha avuto luogo l'arricchimento in metalli osservato nel plasma caldo ed emittente in banda X. In particolare, la sua grande area di raccolta accoppiata alla buona risoluzione angolare dell'imager permetterà di studiare ammassi e gruppi di galassie fino a redshift 2. L'alta risoluzione spettrale del microcalorimetro consentirà di investigare moti del gas con velocità fino a circa un decimo la velocità del suono e di effettuare misure delle abbondanze di elementi quali O Mg Si S Ar Fe e Ni per gruppi e ammassi fino a redshift 1-2. L'Italia vi partecipa a vario titolo, sia attraverso ESA, sia per gli studi di fattibilità tecnologici, sia per la definizione e caratterizzazione delle priorità scientifiche.
- **SIMBOL-X** (2014-, coinvolge molte strutture INAF): missione spaziale per osservazioni nei raggi X, sostenuta dal CNES francese e dall'ASI, è attualmente in fase A, con un lancio atteso nel 2014. Ci si attende un forte contributo nella rivelazione e caratterizzazione della componente non termica da ammassi e gruppi di galassie. Si veda la sezione progetti tecnologici per maggiori dettagli.
- **SAGACE** (2014-, PI P. De Bernardis, Piccole missioni ASI, in fase di studio): missione spaziale con obiettivo principale l'analisi spettroscopico dell'effetto SZ, finalizzato a: (a) studio della fisica e geometria delle strutture cosmiche; (b) misura dei parametri cosmologici; (c) costruzione di un campione completo nelle microonde di AGN e galassie starburst; (d) mappatura delle regioni di formazione stellare e nubi molecolari nelle regioni esterne della Galassia.

## 2.6. *Altri progetti potenziali giudicati importanti*

- Aumentare l'efficienza di multi-plexing spettroscopico su uno dei telescopi della classe 8m accessibili alla comunità italiana, con uno strumento MOS che sia complementare a VIMOS (>2000 spettri al colpo su un'area ~1 grado quadrato).
- Survey in banda X a grande campo e ad alta sensibilità per costruire campioni di ammassi di galassie nuovi e più estesi e misurare le proprietà fisiche dell'ICM (i) nelle regioni esterne per caratterizzarne la componente barionica e di materia oscura fino al raggio viriale, calibrando gli



ammassi come strumenti cosmologici, (ii) in sistemi ad alto redshift per lo studio della formazione ed evoluzione delle strutture cosmiche e dei modelli cosmologici. Questi aspetti sono parte degli obiettivi scientifici di missioni in fase di studio quali EDGE/XENIA e WFXRT. WFXRT (Wide-Field X-Ray Telescope), in particolare, rappresenta purtroppo un'occasione ripetutamente mancata per la cosmologia X italiana che da tempo possiede sia le competenze tecniche per realizzare le ottiche a grande campo originariamente concepite da R. Giacconi, sia quelle scientifiche sull'uso degli ammassi come traccianti del modello cosmologico. EDGE/XENIA è invece una rielaborazione del progetto EDGE originariamente proposto per Cosmic Vision dell'ESA ed è dedicata allo studio del Warm-Hot Intergalactic Medium diffuso nella struttura a grande scala, attraverso spettroscopia X ad alta risoluzione e imaging a grande campo con background molto. Entrambi questi progetti sono in corso di preparazione per essere presentati alla Decadal Survey della NASA, con forte contributo italiano in entrambi i casi (vedi il contributo di G. Pareschi sulla tecnologia).

- Ricerche in banda millimetrica sull'effetto SZ quale metodo complementare e potenzialmente più efficace per la sua indipendenza dal redshift alla rilevazione degli ammassi in banda X e ottica [mancanza di expertise, nessuna partecipazione in grandi progetti]
- Ricerche radio, in particolare a bassa frequenza per la caratterizzazione della popolazione di particelle di origine non termica il cui ruolo nell'energetica complessiva degli ammassi è ancora da definirsi nei dettagli [partecipazione italiana in LOFAR, ma mancanza di infrastrutture]

## ***2.7. Utilizzo di grandi strutture nazionali e internazionali: pregi, difetti, proposte***

Per quanto riguarda le facility osservative, come i grandi telescopi o satelliti in orbita, la comunità cosmologica italiana ha sicuramente dimostrato una capacità di utilizzo in forte crescita, come testimoniato dall'uso del VLT per grandi survey e dei satelliti X per osservazioni di ammassi e struttura a grande scala. Gruppi italiani hanno potuto partecipare e contribuire in modo significativo alla survey COSMOS, nata attorno ad un Treasury Program con HST, in particolare con le osservazioni spettroscopiche (zCOSMOS) e il follow-up nella banda X con i satelliti XMM e Chandra.

Per quanto riguarda i progetti di cosmologia computazionale, il sostegno maggiore viene sicuramente dalle strutture del CINECA. Negli ultimi anni la convenzione-quadro tra INAF e CINECA ha assicurato alla comunità italiana la possibilità di eseguire simulazioni su piattaforme di calcolo di dimensioni critiche. Sebbene tale disponibilità di tempo di calcolo abbia permesso ad alcuni gruppi di acquisire un sicuro riconoscimento a livello internazionale, tale disponibilità è assai inferiore rispetto a quella accessibile ai gruppi attivi in Istituti esteri. Tale limitatezza di risorse si riflette sia nella scarsa disponibilità del monte-ore di calcolo, sia nella conseguente scarsa flessibilità con cui tali risorse sono necessariamente allocate. Ricordiamo a tal proposito che la cifra spesa da INAF ogni anno per la convenzione con CINECA è di 150.000 Euro, che corrisponde all'allocazione di circa 800.000 ore di CPU, disponibili per tutta la comunità.

Non c'è dubbio che il processo di "peer review" adottato per allocare il tempo di calcolo all'interno della comunità INAF ha permesso un utilizzo ottimale di tali risorse. Vale tuttavia la pena ricordare che i gruppi competitori attivi in Europa, in Nord America ed in Giappone hanno generalmente accesso o a macchine dedicate o a strutture di calcolo talmente "ridondanti", per cui il tempo di calcolo disponibile è pressoché illimitato ed ottenibile in modo assolutamente flessibile, senza dover passare attraverso processi di "peer review" capillari come quello adottato dalla comunità



INAF. Tali maggiori risorse consentono non solo di programmare progetti più ambiziosi, ma anche di avere quella flessibilità che permette di intraprendere progetti esplorativi.

Tale limitatezza di risorse disponibili per INAF è tuttavia il riflesso della scarsa disponibilità di risorse di calcolo per tutte le comunità numeriche attive in Italia: CINECA è l'unico Centro di Calcolo Nazionale dotato di strutture di alto livello e malgrado questo troppo spesso le sue risorse di punta non sono di ultima generazione, né sono state acquisite pensando specificamente alle esigenze di calcolo scientifico. A titolo di esempio, la macchina di punta è attualmente un cluster Linux con circa 5000 core, acquistato da ENI oltre due anni or sono e ceduto all'utenza scientifica da circa un anno.

Se da un lato la limitatezza di infrastrutture rappresenta sicuramente un "collo di bottiglia", dall'altra vale la pena enfatizzare che la comunità italiana ha sin qui dato un contributo allo sviluppo di codici di simulazione sicuramente non all'altezza della qualità dei risultati scientifici ottenuti dall'utilizzo di codici sviluppati altrove. Risulta evidente che avere una comunità che sia attiva anche nella parte di sviluppo, e non solo di utilizzo, è un prerequisito per facilitare lo sviluppo di progetti scientificamente innovativi e che sfruttino appieno le architetture di calcolo in continua innovazione. A tutt'oggi il numero di ricercatori con posizioni permanenti che possono essere considerati sviluppatore di codici per simulazioni cosmologiche è in Italia piuttosto limitato, mentre esiste una nuova generazione di giovani con posizioni non permanenti, attivi sia in Italia che presso Istituti esteri, che hanno sviluppato delle notevoli conoscenze in questo senso. La possibilità di inserire tali giovani nei gruppi già attivi in INAF ed aventi sia tradizione che visibilità internazionale è sicuramente il prerequisito per mantenere il livello di competitività fin qui raggiunto nel campo della cosmologia computazionale.

## **BIBLIOGRAFIA**

- Allen, S., et al. 2008, MNRAS, 383, 879  
Albrecht, A., et al. (JDEM-FoMSWG), 2009, "Findings of the Figure of Merit Science Working Group", arXiv:0901:0721  
Amendola, L., et al. 2003, JCAP 0307, 005  
Amendola, L. et al. 2007, Phys. Rev. Lett. 98, 131302  
Amendola, L. et al. 2007, Phys. Rev. D 75, 083504  
Amendola, L. et al. 2008, Phys. Rev. D 78, 02301  
Amendola, L. et al. 2008b, JCAP 0804, 013  
Andreon, S. et al., 2008, MNRAS, 383, 102  
Andreon, S., et al., 2009, MNRAS, submitted (arXiv:0812.1699)  
Arnaud, M. et al., 2007, AA, 474, L37  
Baccigalupi, C., et al., 2000, Phys. Rev. D, 62, 123510  
Balbi, A., et al., 2001, ApJ, 547, L89  
Baldi, A., et al., 2007, ApJ, 666, 835  
Balestra, I., et al., 2007, AA, 462, 429  
Baugh, C.M., 2006, RPPH, 69, 3101  
Bignamini, A., et al., 2008, A&A, 489, 967  
Biviano, A., et al., 2006, AA, 456, 23  
Bohringer, H., et al., 2007, AA, 469, 363  
Bonanno A. et al. 2007, JCAP 08, 024  
Borgani, S. & Guzzo, L., 2001, Nature, 409, 39  
Borgani, S., et al. 2004, MNRAS, 348, 1078  
Borgani, S. et al., 2006, MNRAS, 367



- Borgani, S., et al. 2008, SSRv, 134, 269  
Bourdin, H., & Mazzotta P., 2008, A&A, 479, 307  
Branchesi, M., et al., 2007, AA, 472, 727  
Branchesi, M., et al. 2007a, AA, 472, 739  
Brighenti, F., & Mathews, W.G., 2006, MNRAS, 643, 120  
Brunetti, G., et al., 2008, Nature, 455, 944  
Buote, D., et al. 2007, ApJ, 664, 123  
Cacciato, M., et al., 2006, AA, 458, 349  
Capozziello S. et al. 2003, IJMP D12, 1969  
Casarini L., et al. 2008, arXiv:0810.0190 (JCAP in press)  
Cassano, R., et al., 2008, AA, 486, 31  
Cimatti, A., et al., 2009, Experimental Astronomy, in press (arXiv: 0804:4433)  
Cooray, A., & Sheth, R., 2002, Phys. Rep., 372, 1  
Copeland, E.J., et al., 2006, Int. J. Mod. Phys. D ,15, 2006  
Crociiani, D., et al., 2008, MNRAS, 385, 728  
De Lucia, G., & Blaizot, G., 2006, MNRAS, 375, 2).  
Diaferio, A. & Ostorero, S., 2008, MNRAS, in press (arXiv:0808.3707)  
Di Porto, C., Amendola L., 2008, Phys. Rev. D 77:083508  
Dolag, K., et al., 2009, SSRv, 134, 229  
Ettori, S., & Brighenti, F., 2008, MNRAS, 387, 631  
Fabian, A., et al., 2006, MNRAS, 366, 417  
Frieman, J. A., Turner, M. S., & Huterer, D., 2008, Ann. Rev Astron. and Astrop. 46, 385  
Fu, L., et al., 2008, A&A, 479, 9  
Garilli, B., et al., 2008, AA, 486, 683  
Gastaldello, F., et al., 2007, ApJ, 669, 158  
Gavazzi, R. & Soucail G., 2007, A&A, 462, 459  
Giallongo E., et al., 2008, A&A, 482, 349  
Girardi, M., et al., 2008, AA, 491, 379  
Gitti, M., et al., 2007, AA, 470, 25  
Grossi, M., et al., 2007, MNRAS, 382, 1261  
Guzzo, L., et al., 2007, ApJ, 172, 254  
Guzzo, L., et al., 2008, Nature, 451, 541  
Hamana, T., et al. 2004, MNRAS, 350, 893  
Hamilton, A. J. S., 1998, in *The Evolving Universe* ,Vol. 231, 185, ASSL Series, Kluwer Academic, Dordrecht  
Hoekstra, H., et al., 2006, ApJ, 647, 116  
Hoekstra, H., 2007, MNRAS, 379, 317  
Iliev, I., et al., 2008, MNRAS, 361, 1057  
Kravtsov, A.V., et al., 2006, ApJ, 650, 128  
La Vacca G. 2008, arXiv:0810.0127 (NewAstr. subm.)  
Lazkoz, R., & Majerotto, E., 2007, JCAP, 07, 015  
Leccardi A., Molendi S., 2008a, AA, 486, 359  
Leccardi A., Molendi S., 2008b, AA, 487, 461  
Macciò, A., et al., 2004, PhRvD, 69, 123516  
Majumdar, S., & Mohr, J.J., 2004, ApJ, 613, 41  
Marinoni, C., et al., 2008, AA, 487, 7  
Massey, R., 2007, Nature, 445, 286  
Maughan, B., 2007, ApJ, 668, 772



- McCracken, H.J., et al., 2007, ApJS, 172, 314  
Mayer, L., et al. 2008, ASL, in press (arXiv:0801.3845)  
Mazzotta, P., & Giacintucci, S., 2008, ApJ, 675, L9  
Meneghetti, M., et al. 2008, A&A, 482, 403  
Meneux, B., et al. 2008, A&A, 478, 299  
Merten, J., et al., 2008, A&A, submitted (arXiv:0806.1967)  
Miranda, M., et al., 2008, MNRAS, 385, 511  
Molendi, S. & Gastaldello F., 2009, AA, 493, 13  
Morandi, A., et al., 2007, MNRAS, 379, 518  
Morandi, A., & Etori S., 2007, MNRAS, 380, 1521  
Murante, G., et al., 2007, MNRAS, 377, 2  
Niedermaier, M., & Reuter, M., 2006, Living Reviews in Relativity, 9, 5  
Orrù, E. et al., 2007, AA, 467, 943  
Pace, F. et al., 2008, AA, 483, 389  
Parker, L.C., et al., 2007, ApJ, 669, 21  
Paulin-Henriksson, S., et al., 2007, A&A, 467, 427  
Percival, W.J., et al., 2007, MNRAS, 381, 1053  
Pierleoni, M., et al., 2008, 388, 282  
Pollo, A., et al., 2006, A&A, 451, 409  
Radovich, M., et al., 2008, A&A, 487, 55  
Rasia E. et al., 2006, MNRAS, 369, 2013  
Rassat, A. et al. 2008, submitted (arXiv:0810.0003)  
Refregier, A., et al., 2009, Experimental Astronomy, in press (arXiv:0802.2522)  
Rines, K. & Diaferio A., 2006, AJ, 132, 1275  
Rosati, P., Borgani, S., & Norman, C., 2002, ARAA, 40, 539  
Rozo, E. et al., 2009, ApJ, submitted (astro-ph/0703571)  
Rzepecki, J., et al. 2007, A&A, 471, 743  
Schirmer, M., et al. 2004, A&A, 420, 75  
Schuecker, P., et al., 2003, AA, 398, 867  
Scoville, N., et al., 2007, ApJS, 172, 150  
Springel, V., 2005, MNRAS, 364, 1105  
Staniszewski, Z., et al. 2008, arXiv:0810.1578  
Taylor, A., et al., 2004, MNRAS, 353 1176  
Trevese, D., et al., 2007, A&A, 463, 853  
Tornatore, L., et al. 2007, MNRAS, 382, 945  
Tornatore, L., et al. 2007, MNRAS, 382, 1050  
Vazza, F., et al., 2008, MNRAS, in press (arXiv:0808.0609)  
Viel, M., et al. 2004, MNRAS, 354, 684  
Viel, M, et al., 2007, MNRAS, 360,1110  
Vikhlinin A. et al., 2009, ApJ, in press (arXiv:0812.2720)  
Voit, G.M., 2005, Rev.Mod.Phys., 77, 207  
White, S.D.M, & Rees, M.J., 1978, MNRAS, 183, 341  
Zheng, Z., et al., 2007, ApJ, 667, 760

### 3. IGM E REIONIZZAZIONE

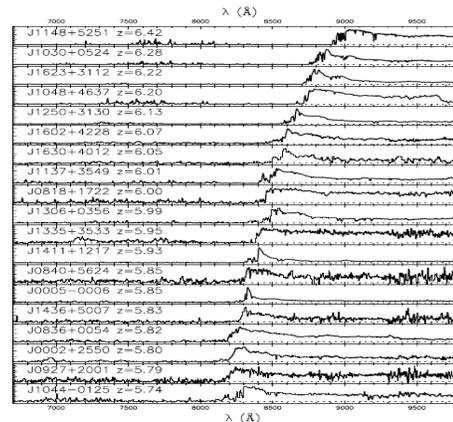
Preparato da M. Viel, con il contributo di: R. Schneider, L. Zappacosta, V. D'Odorico, S. Cristiani, G. Vladilo, E. Branchini, S. Borgani, G. Brunetti

Il mezzo intergalattico (IGM), materiale diffuso gassoso che occupa lo spazio tra le galassie, è divenuto un osservabile cosmologico fondamentale nell'ultima decina di anni soprattutto grazie alla spettroscopia ad alta risoluzione e ai progressi teorici/numerici che hanno permesso di riuscire a modellare alcuni processi fisici rilevanti. L'IGM occupa una frazione significativa del volume dell'universo ad alto redshift e si ritiene che circa l'80% (in massa) del materiale barionico sia sotto questa forma a  $z \sim 3$ . Esso riveste pertanto il duplice ruolo di deposito di materiale galattico (arricchito e non) e di fonte di gas per i processi fisico-chimici a scale sub-galattiche, per una frazione pari ai 2/3 o più dell'età attuale dell'Universo (per una review recente si veda Meiksin 2007).

#### 3.1. Background scientifico internazionale

Figura 3.1: Spettri di 19 SDSS QSOs a  $z \sim 6$ . Osservati con Keck ESI e MMT [3].

In questa figura riportiamo gli spettri che mostrano l'assorbimento di Gunn-Peterson ed il flusso trasmesso. L'analisi di questi assorbimenti permette di ottenere informazioni quantitative sulla reionizzazione dell'Universo e di poter confrontare tale misura con quella ottenuta da altre prove cosmologiche come il fondo cosmico di microonde.



**Quasar ad alto redshift per studiare la reionizzazione cosmica.** I Quasars (QSOs) ad alto redshift sono importanti per riuscire a misurare lo stato di ionizzazione del mezzo intergalattico in epoche vicine alla reionizzazione cosmica. Grazie agli enormi sforzi osservativi condotti negli ultimi anni (in particolare le surveys SDSS e le osservazioni Keck / VLT) è stato possibile stabilire una mancanza di assorbimento completo (Gunn-Peterson) a  $z < 6$  dimostrando un alto grado di ionizzazione dell'IGM a questi redshift e suggerendo che  $z \sim 6$  indichi la fine dell'epoca di reionizzazione (Fan et al. 2003, 2006). Questi risultati dimostrano che: i) la frazione di idrogeno neutro aumenta considerevolmente a  $z > 6$ ; ii) le dimensioni delle regioni ionizzate attorno ai QSOs sono consistenti con modelli basati su sfere di Stromgren che si espandono in un mezzo neutro; iii) l'evoluzione in temperatura dell'IGM a redshift  $z < 5$  è consistente con un redshift di reionizzazione attorno a  $z \sim 8$ .

**Arricchimento metallico del mezzo intergalattico.** La spettroscopia ad alta risoluzione ha permesso di investigare in modo quantitativo l'arricchimento metallico ad alto redshift ( $z=2-4$ ), utilizzando sia statistiche di righe di assorbimento sia dei metodi basati o sul flusso trasmesso o



sulla tecnica “pixel-optical depth” che ricostruisce la profondità ottica. In particolare, sono state investigate l'evoluzione di alcune specie ioniche: CIV, OVI e SiIV che sono le più osservate nell'IGM. Si sono stabiliti vincoli su modelli di arricchimento chimico (venti galattici, feedback da supernovae), studiando in modo accurato la correlazione tra linee di assorbimento metalliche ed HI e popolazioni galattiche Lyman-break attraverso immagini profonde (Adelberger et al. 2005), sulla natura ed evoluzione del fondo cosmico ultravioletto, sulla quantità di arricchimento metallico in regioni alla densità media (Schaye et al. 2003). L'arricchimento metallico dell'universo è stato investigato anche a redshift molto più elevati focalizzandosi in particolare sulla relazione IGM-prime stelle. L'esistenza di una popolazione primigenia di stelle (Popolazione III) è stata invocata in passato per spiegare diversi problemi astrofisici: la sovrabbondanza di elementi  $\alpha$  osservata in stelle povere di metalli, la reionizzazione dell'Universo, l'elio cosmologico, la formazione dei buchi neri massicci ecc. Sono stati sviluppati modelli sofisticati di formazione di strutture e galassie spii raffinati grazie al crescente numero di informazioni sui primi stadi dell'evoluzione chimica del cosmo, provenienti dalle osservazioni di stelle a bassa metallicità e/o e da osservazioni a redshift intermedi ed alti. Le stelle di Popolazione III segnano il primo passo nel processo di reionizzazione del mezzo intergalattico e nell'evoluzione chimica dell'Universo dato che rappresentano le prime sorgenti di fotoni ionizzanti e che arricchiscono la miscela di gas primordiale con nuovi elementi di sintesi. Le prime stelle non sono solo responsabili della produzione di elementi pesanti, ma anche delle prime particelle solide che si sono condensate da questi, i grani di polvere. Una volta presenti nell'ISM (mezzo interstellare), la polvere ed i metalli hanno importanti conseguenze sulla formazione delle prime stelle di piccola massa. Negli ultimi anni, simulazioni numeriche sofisticate (Abel et al. 2002, Bromm et al. 2002; Yoshida et al. 2006) e modelli semianalitici (Omukai & Nishi 1998, Omukai 2000, Nakamura & Umemura 2002) hanno mostrato che, a causa della composizione primordiale del gas, le prime stelle erano in preferenza molto massicce, con masse di 100-1000  $M_{\odot}$ .

**Il mezzo intergalattico come strumento cosmologico.** L'osservabile principale dell'IGM è la foresta di assorbimento Lyman- $\alpha$  dovuta alla presenza di idrogeno neutro lungo la linea di vista del QSO distante. La relazione tra assorbimento Lyman- $\alpha$  e densità di materia totale è stata investigata in dettaglio negli ultimi anni facendo affidamento soprattutto a simulazioni idrodinamiche ad alta risoluzione che incorporano i processi fisici rilevanti. In particolare, è stata studiata la potenzialità dello spettro di potenza del flusso trasmesso di tracciare quello (lineare) della materia oscura sottostante, riuscendo così ad ottenere vincoli cosmologici su parametri quali l'ampiezza e la curvatura dello spettro di potenza, la presenza di materia oscura tiepida e dando dei vincoli su parametri astrofisici quali il fondo ultravioletto e la storia termica dell'IGM. Tra i risultati più rilevanti ci sono sicuramente i vincoli sullo spettro di potenza della materia oscura (Seljak et al., 2005, McDonald et al. 2006, Viel et al. 2005, Viel & Haehnelt 2006), i neutrini massivi (Seljak et al., 2005), la materia oscura tiepida (Viel et al. 2005), modelli di materia oscura che decade e l'impatto della radiazione sulla fisica dell'IGM (Mapelli et al. 2006). In particolare risulta importante la sinergia tra l'osservabile Lyman- $\alpha$ , a scale tra 1 e 100 Mpc comoventi e a  $z=2-4$ , ed altre osservazioni cosmologiche a grandi scale e a redshift diverso come il fondo cosmico e le galassie o il lensing debole. Tali sinergie sono fondamentali per riuscire a dimostrare la validità del modello cosmologico standard basato sulla costante cosmologica e per evidenziare eventuali sistematiche presenti. Dati i risultati particolarmente rilevanti si riscontra comunque l'esigenza di poter studiare gli errori sistematici (arricchimento metallico, continuum del QSO) in modo più esaustivo per poter quantificare il loro impatto sul flusso trasmesso e sui vari parametri derivati. Sforzi teorici ed osservativi sono stati compiuti in questa direzione.



### 3.2. *Ricerche in Italia*

**Stelle di popolazione III e arricchimento metallico ad alto redshift.** La presenza dei metalli favorisce il raffreddamento e la frammentazione della nube pre-stellare, rendendo possibile la formazione di stelle di massa solare o sub-solare quando la metallicità iniziale del gas raggiunge un valore critico,  $Z_{cr}$ . Malgrado la sua importanza, gli studi teorici non sono riusciti a definire questa quantità fondamentale se non entro alcuni ordini di grandezza,  $10^{-6} < Z_{cr}/Z_{sun} < 5 \cdot 10^{-3}$ , con il limite inferiore ricavato in presenza di raffreddamento da polvere (Schneider et al. 2002, 2003; Omukai et al. 2005; Tsuribe & Omukai 2006) ed il limite superiore suggerito da studi dove il raffreddamento da metalli è considerato il processo dominante (Schneider et al. 2006a, Bromm et al. 2001). Stelle di composizione primordiale e con masse di  $100-1000 M_{sun}$  emettono, nel corso della loro vita (2-5 Myr), un numero di fotoni ionizzanti per barione trasformato in stelle fino a 20 volte superiore a quanto prodotto in media da una popolazione stellare più evoluta, composta in genere di stelle di metallicità quasi solare e con masse nell'intervallo  $0.1-100 M_{sun}$ . Il ruolo svolto dalle prime stelle nel processo di reionizzazione e nell'evoluzione chimica dell'Universo dipende in maniera fondamentale da quanto a lungo persistono nel corso della storia dell'Universo le condizioni adatte alla loro formazione (regioni di formazione stellare con metallicità  $Z < Z_{cr}$ ). Negli ultimi anni questo studio ha ricevuto particolare attenzione attraverso lo sviluppo di modelli semi-analitici (Schneider et al. 2006b) e di sofisticate simulazioni numeriche (Tornatore et al. 2007): i risultati ottenuti sembrano indicare che, a causa della natura fortemente disomogenea del processo di arricchimento chimico, stelle di Popolazione III non sono confinate a formarsi solo nell'universo ad alto redshift ( $z > 10$ ) ma anche a redshift intermedi ( $z \sim 3$ ). Pertanto una frazione non trascurabile di sorgenti osservabili a questi redshift può essere alimentata dalla radiazione (emettitori Lyman- $\alpha$ ) o dall'energia cinetica (esplosioni di supernovae) prodotta da stelle di Popolazione III. Gli studi più recenti, che implementano in codici semianalitici la transizione da stelle di Popolazione III a stelle di Popolazione II/I, indicano che il contributo delle stelle di Popolazione III al processo di reionizzazione sia richiesto dalle osservazioni dell'evoluzione della frazione di idrogeno neutro osservata negli spettri di quasars a  $z < 6$  e dallo spessore ottico per scattering Thomson misurato dal satellite WMAP (Choudhury & Ferrara 2005, 2006, 2007). Dal momento che il feedback chimico "confina" le stelle di Popolazione III a formarsi nelle galassie più piccole, il progredire del processo di reionizzazione esercita un feedback negativo sulla formazione di queste stelle: infatti, l'aumento della temperatura del mezzo intergalattico causa una foto-evaporazione del gas dalle galassie più piccole e riduce fortemente la loro efficienza di formazione stellare (Schneider et al. 2008). Osservazioni dell'emissione della riga a 21 cm dell'idrogeno neutro presente nel mezzo intergalattico con i telescopi di prossima generazione (LOFAR, 21CMA, MWA, SKA) consentiranno di distinguere il contributo delle stelle di Popolazione III al processo di reionizzazione (Burigana et al. 2008). Inoltre, future osservazioni della polarizzazione del fondo cosmico a micro-onde con il satellite Planck nell'intervallo di multipoli  $1 \sim 5 - 15$  potrebbero permettere di valutare l'impatto del processo di reionizzazione sulla formazione delle stelle negli aloni più piccoli (Bromm & Loeb 2003). L'interazione tra feedback chimico e radiativo ha anche altre conseguenze rilevanti: ad esempio, se alcune delle prime protogalassie (massa totale  $10^8 M_{sun}$  a  $z=10$ ) sono rimaste di composizione primordiale e sono sottoposte ad un intenso fondo di radiazione nella banda Lyman-Werner, la foto-dissociazione dell'idrogeno molecolare causa una forte inefficienza del processo di raffreddamento delle nubi protostellari. In queste condizioni il gas raffredda molto lentamente grazie all'idrogeno atomico, la frammentazione è fortemente inibita e il risultato finale dell'evoluzione è la formazione di un buco nero di circa  $10^6 M_{sun}$ , eventualmente a seguito di un passaggio attraverso la formazione di una stella supermassiccia di massa confrontabile (Burigana et al. 2008). Tuttavia, se il gas è arricchito, a valori  $Z \sim Z_{cr}$ , come più probabile per



protogalassie vicine all'epoca della reionizzazione, l'evoluzione è completamente diversa: il gas frammenta e si forma un ammasso di stelle di massa sub-solare, che potrebbero dare vita (attraverso processi di coalescenza) ad un buco nero di massa intermedia,  $\sim 10^3 M_{\text{sun}}$  (Omukai et al. 2008). Tali ricerche sono state sviluppate principalmente da ricercatori dell'OAAr e della SISSA.

**Foresta di assorbimento Lyman- $\alpha$ .** La foresta di righe Lyman- $\alpha$  osservata negli spettri di quasar ad alto redshift è la traccia osservativa del gas diffuso nello spazio cosmico. Tale mezzo intergalattico è caratterizzato da fluttuazioni della densità originatesi dalla crescita gravitazionale delle perturbazioni cosmologiche primordiali.

Tomografia: Lo studio dell'IGM avviene principalmente utilizzando spettri di quasar singoli dai quali si ricavano informazioni sulla distribuzione e la profondità ottica del gas in funzione del redshift lungo la linea di vista. La distribuzione spaziale così determinata può risultare distorta dall'effetto delle velocità peculiari che contribuiscono al redshift osservato. L'utilizzo di linee di vista multiple verso coppie e gruppi di quasar vicini nello spazio angolare (e, possibilmente, anche con redshift di emissione simile) costituisce un approccio alternativo con grandi potenzialità per lo studio della distribuzione tridimensionale del gas nell'IGM, molto meno affetto dalle distorsioni dovute alle velocità peculiari. Questo studio è fortemente limitato dal fatto che i quasar a redshift 2-3 che formano coppie con separazioni angolari dell'ordine di pochi arcmin sono, nella maggior parte dei casi, troppo deboli per l'osservazione ad alta risoluzione con telescopi della classe 8-10m. Un gruppo di ricerca all'OATs ha ottenuto le osservazioni UVES-VLT di un campione di 21 coppie di quasar con separazioni angolari crescenti fra  $\sim 1$  e 14 arcmin e foreste Lyman- $\alpha$  al redshift medio  $\langle z \rangle = 1.8$ . Il risultato principale ottenuto dall'analisi di questi dati è stato il confronto fra la funzione di correlazione del flusso trasmesso nella foresta Lyman- $\alpha$  lungo la linea di vista e trasversalmente alla linea di vista. Le due funzioni di correlazione sono in buon accordo quando si utilizzano i parametri del modello cosmologico con costante cosmologica. Tale accordo pone un limite superiore dell'ordine di  $\sim 100$  km/s per le velocità peculiari presenti nell'IGM (D'Odorico et al. 2009).

Ricostruzione del campo di densità nell'IGM: sviluppo di un nuovo metodo (algoritmo FLO, From Lines to Overdensities) per la ricostruzione del campo di densità nell'IGM dalle densità di colonna di HI delle righe in assorbimento nella foresta Lyman- $\alpha$ . L'ipotesi alla base del metodo è che le fluttuazioni dell'IGM abbiano una dimensione caratteristica data dalla lunghezza di Jeans locale. L'affidabilità della ricostruzione con FLO è stata testata con spettri ottenuti da simulazioni idrodinamiche. FLO è stato applicato ad un campione di 22 spettri di quasar ad alta risoluzione per calcolare la funzione di correlazione e lo spettro di potenza del contrasto di densità nell'IGM. Inoltre, sfruttando l'effetto di prossimità dei quasar sulla distribuzione in redshift delle righe Lyman- $\alpha$  è stato possibile con FLO dimostrare per la prima volta in modo incontrovertibile che i quasar risiedono in regioni significativamente sovradense estese pochi Mpc propri (Saitta et al. 2008, D'Odorico et al. 2006).

**Sistemi di assorbimento Damped e metallicità dell'IGM.** E' stato rivelato per la prima volta il segnale medio di arrossamento dei quasar dovuto alla polvere in sistemi Damped Lyman- $\alpha$  (DLA) lungo la visuale, ottenuta dall'analisi del database fotometrico e spettroscopico della SDSS con metodologia originale applicata a un campione di circa 5000 quasars a redshift  $> 2.2$  (Vladilo et al. 2008). Inoltre, è stata effettuata la prima rivelazione dell'assorbimento dei silicati a 9.7 micron in un sistema DLA, ottenuta mediante spettrografo IRS a bordo dello Spitzer Space Telescope per un assorbitore a redshift  $z=0.52$  (Kulkarni et al. 2007). Altre linee di ricerca in questo campo hanno



riguardato: i) investigazione delle caratteristiche dell'arricchimento chimico dell'IGM e implicazioni sull'evoluzione chimica dell'universo e sulla natura delle prime stelle; ii) studio delle abbondanze chimiche del gas associato a quasars di alto redshift e GRB come diagnostici della storia evolutiva delle popolazioni stellari della galassia ospite; iii) studio della natura dei venti galattici ad alto redshift dall'associazione fra righe in assorbimento in spettri di quasars e galassie-assorbitori; iv) misura di rapporti di ionizzazione, al fine di studiare le proprietà fisiche del mezzo interstellare e le sue interazioni con il mezzo intergalattico ad alto redshift; v) misure di interesse cosmologico, e in particolare abbondanza del deuterio primordiale e determinazione della temperatura della radiazione fossile ad alto redshift da spettri di sistemi DLA.

**Mezzo intergalattico tiepido (WHIM) e barioni mancanti.** I modelli cosmologici di formazione di strutture su grande scala mostrano che a basso redshift ( $z < 1$ ) una frazione consistente (circa il 50%) dei barioni mancanti (es. Persic & Salucci 1992, Fukugita et al. 1998) è intrappolata nella struttura filamentare su larga scala di materia oscura che connette tra loro gli aloni virializzati (Cen & Ostriker 1999, 2006). Questa tenue ( $n \sim 10^{-6} - 10^{-5} \text{ cm}^{-3}$ ) fase gassosa, riscaldata tramite shock a temperature medio-calde ( $T \sim 10^{5-7} \text{ K}$ ), e chiamata per questo Warm-Hot Intergalactic Medium (WHIM), viene considerata al giorno d'oggi la maggiore riserva dei barioni mancanti a  $z=0$ . La ricerca dei barioni mancanti nella struttura su larga scala dell'universo è un campo relativamente nuovo. Finora in Italia a livello osservativo gli unici tentativi di rivelare il WHIM in emissione nei raggi X si sono avuti da parte del gruppo di ricerca extragalattico di Arcetri (es. Zappacosta et al. 2005a, 2005b, Mannucci et al. 2007). Tali studi si sono basati su dati ROSAT e XMM con l'ausilio di osservazioni ottiche (sia in imaging che spettroscopiche) per la determinazione delle strutture su larga scala. Tentativi di rivelare il WHIM tramite osservazioni con spettroscopia di alta risoluzione sia nell'X (con Chandra/LETG ed XMM/RGS) che nel lontano UV (con HST/FUSE) sono stati condotti principalmente da ricercatori dell'OARm. Tali tentativi finora si sono conclusi per lo più con rivelazioni del controverso WHIM locale e dell'ancora più controverso WHIM nello spettro del blazar Mkn 421 (Nicastro et al. 2005, Kaastra et al. 2006, Rasmussen et al. 2007). Dal punto di vista teorico studi condotti su simulazioni di strutture su grande scala da gruppi di ricercatori degli OATs e OABo hanno fatto luce su vari aspetti del WHIM dagli eccessi soft negli ammassi di galassie (Cheng et al. 2005), alle proprietà del background diffuso nei raggi X (Roncarelli et al. 2006), fino alla determinazione della tracciabilità del WHIM tramite spettri X (Viel et al. 2005). E' necessario sottolineare l'importanza di studiare il WHIM sia in emissione che in assorbimento. Infatti, poiché i due processi avvengono in differenti regioni del WHIM essi forniscono indicazioni complementari sulle proprietà dei barioni mancanti. In assorbimento il WHIM può essere rivelato negli spettri X di sorgenti lontane e brillanti. Da questo punto di vista i cosiddetti lampi gamma, o Gamma Ray Bursts [GRBs], costituiscono dei candidati ideali che però richiedono, per essere utilizzati efficacemente, di un satellite X capace di riposizionarsi velocemente per inquadrare l'oggetto nel campo di vista.

**Simulazioni di mezzo intergalattico.** Negli ultimi anni, in Italia, in particolare all'OATs, sono stati sviluppati codici idrodinamici per la simulazione delle strutture cosmiche e dell'IGM che incorporano i processi fisici più rilevanti: fisica delle nubi Lyman- $\alpha$  (raffreddamento, riscaldamento da background ultravioletto); storie termiche diverse dell'IGM e processi di non equilibrio durante la reionizzazione di Elio ed Idrogeno; venti galattici e impatto di buchi neri supermassicci sullo stato fisico e chimico dell'IGM; modificazione dello spettro di potenza e dei parametri cosmologici e conseguenze per l'IGM (Regan et al. 2007; Viel et al. 2008; Tornatore et al. 2007). Si sono sviluppati inoltre modelli semi-analitici e idrodinamici che simulano gli spettri di QSOs ad alto redshift. Attualmente sono stati osservati ~20 QSO a  $z \sim 6$ . L'aumento del campione disponibile



consentirebbe una più precisa determinazione dell'epoca di reionizzazione tramite il confronto degli spettri di assorbimento con modelli teorici (Gallerani et al. 2006, 2008; Maselli et al. 2007).

### **3.3. Programmi ed attività nei prossimi 3 anni**

**Foresta di assorbimento Lyman- $\alpha$ .** Si prevede di continuare nell'applicazione e nello sviluppo di algoritmi per la determinazione della temperatura dell'IGM alla densità media. Inoltre, verrà analizzato il contributo in metalli in spettri di QSO ad alto redshift ( $z \sim 6$ ) con lo spettrografo X-shooter. Si effettuerà inoltre una survey di coppie di quasar a piccole separazioni angolari (dell'ordine di 1-pochi arcmin) con X-shooter al VLT. Questo campione di dati permetterà per la prima volta l'applicazione del test di Alcock-Paczynski (confronto fra funzione di correlazione lungo la linea di vista e trasversalmente a questa) per la determinazione indipendente del valore di  $\Omega_\Lambda$  (densità di energia della costante cosmologica o di una componente di energie oscura). Infine, si procederà all'analisi di coppie e gruppi di quasar in campi in cui vi siano anche osservazioni fotometriche profonde e follow-up spettroscopici delle galassie presenti per studiare gli effetti di feedback delle galassie sull'IGM, con particolare riferimento all'arricchimento metallico. In particolare, verranno studiati: sistemi di CIV e OVI in coppie e gruppi di QSOs come indicatori di venti galattici, analisi di densità di distribuzioni colonnari per sistemi deboli e forti, parametri Doppler per stimare la temperatura dell'IGM. Queste tematiche verranno affrontate da OATs in collaborazione con altri osservatori INAF e istituti internazionali.

**Mezzo intergalattico tiepido (WHIM) e barioni mancanti.** I principali progetti riguardanti il WHIM nel corso dei prossimi anni riguardano futuri satelliti X equipaggiati con rivelatori criogenici e grating la cui risoluzione e sensibilità permetterà di superare agevolmente le enormi difficoltà, che si hanno con i satelliti odierni, nell'osservare il WHIM. Con tali strumenti si potrà fare spettroscopia ad alta risoluzione sia in assorbimento lungo le linee di vista di AGN luminosi che in emissione andando a tracciare spazialmente la distribuzione del WHIM. I progetti più importanti a partecipazione italiana sono IXO (ex Xeus) e Xenia. IXO, acronimo di International X-ray Observatory, è uno studio di missione da parte della collaborazione tra le agenzie spaziali dei paesi europei (ESA), gli USA (NASA) e il Giappone (JAXA). Sarà una missione di grandi dimensioni (già selezionata come candidata a missione di classe L nell'ambito del programma Cosmic Vision dell'ESA) che tra i vari scopi ha anche quello di scoprire i barioni mancanti nell'universo locale. Il fulcro di tale missione è il possesso di un'area efficace di  $3 \text{ m}^2$  a  $1.25 \text{ keV}$  (oltre due ordini di grandezza superiore rispetto a Chandra ed XMM). Il punto focale di tale missione per quanto riguarda lo studio del WHIM è uno spettrometro composto da microcalorimetri (TES) con  $5 \text{ arcmin}$  di campo di vista e risoluzione spettrale inferiore ai  $10 \text{ eV}$  che nei due arcmin centrali arriva fino a  $2.5 \text{ eV}$ . Si prevede che il satellite, se supportato anche dal contributo dei programmi spaziali delle altre agenzie coinvolte, potrà venir lanciata dopo il 2018 e dovrebbe avere una durata di 5 anni. L'altro studio di missione che prevede una partecipazione italiana (co-PI: L. Piro) è Xenia (sempre da una collaborazione di ESA/NASA/JAXA). La missione è di dimensioni compatte ed è stata concepita e ottimizzata per lo studio del WHIM, degli ammassi di galassie e dei GRBs in modo da poter investigare la formazione e l'evoluzione di strutture su varie scale dall'universo lontano a quello locale. Essa consta di 4 strumenti tra cui un array di 1024 calorimetri TES ( $0.2\text{-}2.2 \text{ keV}$ ) su un campo di vista molto largo di  $1 \text{ grado}^2$  (essenziale per rivelare filamenti in emissione) e risoluzione spettrale di  $3 \text{ eV}$  (a  $0.5 \text{ keV}$ ) e due monitor (nei raggi X e gamma) con ampio campo di vista. Nel caso del WHIM la strategia di tale missione è quella di utilizzare i GRB osservati dai monitor ed osservarli rapidamente (ripuntando con una velocità di  $1 \text{ grado/s}$ ) per poter ottenere nel loro spettro misure da X-ray Forest analogamente a quanto normalmente si cerca di fare



con gli AGN. Tramite tale missione potranno essere studiate strutture barioniche con densità di  $10^{-5}$   $\text{cm}^{-3}$  e potrà essere investigato il legame tra i barioni diffusi e la formazione stellare. La missione dovrebbe avere una durata di 3 anni. La missione di classe M, denominata EDGE/XENIA, sarà in grado di centrare questi obiettivi permettendo di rivelare e caratterizzare lo stato fisico dei barioni mancanti attraverso spettroscopia X di alta risoluzione, grazie al ridotto background strumentale e alla capacità di inquadrare i GRBs poco dopo l'arrivo del lampo gamma. Questa missione verrà proposta nell'ambito della NASA Decadal Survey da un team internazionale di scienziati nei quali il ruolo della componente italiana sarà molto importante. Grazie infatti all'esperienza maturata durante la presentazione della proposta all'ESA del satellite EDGE (a leadership italiana), nella proposta XENIA/EDGE l'Italia avrà un ruolo preminente, avendo co-PI-ship della missione e PI-ship o co-PI-ship dei vari strumenti a bordo. Il Science-Team di EDGE/XENIA si baserà essenzialmente sul lavoro svolto nei tre anni precedenti dal Science-Team di EDGE i cui gruppi di lavoro erano guidati o composti da scienziati italiani. Per la parte WHIM, il lavoro svolto è stato principalmente di carattere modellistico-teorico, basato sull'utilizzo estensivo di sofisticate simulazioni idrodinamiche che hanno investigato non solo le proprietà del WHIM ma anche l'interazione galassie-IGM. Le principali caratteristiche di EDGE/XENIA sono: *Obiettivi Scientifici Principali*: Barioni mancanti nel WHIM. Cosmologia con i GRBs. Struttura dell'universo su grande scala. Ammassi di galassie. *Altri Importanti Obiettivi Scientifici*: Fisica dei GRBs. Equazione di stato delle stelle di neutroni. Oggetti compatti. Surveys. *Principali caratteristiche degli strumenti a bordo*: Alta risoluzione spettrale. Grande campo di vista per osservare oggetti a bassa brillantezza superficiale e surveys. Sky monitor. Puntamento veloce. *Stato attuale*: verrà proposta per la NASA Decadal Survey come missione di classe M - Luigi Piro (IASF) è uno dei P.I. del progetto. *Istituti coinvolti*: IASF-Rm, IASF-Bo, IASF-Mi, Università di Roma Tre, OABr, OATs, OARm, Università di Bologna

**Sistemi di assorbimento Damped Lyman- $\alpha$ . Polvere nei DLA:** si studierà in maniera dettagliata l'evoluzione della composizione chimica della polvere in galassie primordiali da misure di abbondanze di elementi chimici volatili e refrattari in sistemi damped. In particolare, si metteranno alla prova modelli di polvere classici, basati su studi interstellari, in cui i silicati giocano un ruolo determinante. Risultati preliminari da noi ottenuti suggeriscono che nelle prime fasi di evoluzione chimica la polvere sarebbe composta principalmente da elementi refrattari del gruppo del ferro, mentre i silicati si formerebbero solo in una fase successiva. Se confermato, questo tipo di risultato dovrebbe essere incluso nei modelli di evoluzione galattica che includono la polvere in maniera autoconsistente. Il lavoro sarà basato su dati UVES/VLT originali e di archivio e sarà svolto in stretto contatto con esperti di evoluzione chimica galattica e come parte di un lavoro di tesi specialistica condotta presso l'Università di Trieste. (P.I. G. Vladilo OATs). Simulazioni cosmologiche: Si quantificheranno effetti di estinzione dei quasar dovuti alla presenza di polvere nei sistemi DLA allo scopo di interfacciare risultati di simulazioni cosmologiche con surveys osservative. Per confrontare simulazioni e osservazioni si useranno diversi strumenti diagnostici, come la distribuzione metallicità-densità colonnare di HI e altre distribuzioni di osservabili fisiche (per esempio dispersione delle velocità e temperatura di spin). Gli effetti della polvere saranno quantificati mediante una relazione tra estinzione e metallicità precedentemente ricavata e testata in DLA/QSOs con misure di arrossamento (Vladilo et al. 2006). Si utilizzeranno simulazioni idrodinamiche SPH ad alta risoluzione con una implementazione autoconsistente dell'arricchimento da metalli e di diversi modelli di venti galattici e di meccanismi di feedback (OATs). Parte di questo lavoro sarà svolta nell'ambito del PRIN "I barioni diffusi nella storia dell'Universo" (P.I. S. Borgani).



**Simulazione idrodinamiche di IGM.** Lo studio dell'IGM sia attraverso le fasi della reionizzazione che nella successiva evoluzione richiede di tener conto in modo dettagliato dell'interazione tra gas e radiazione elettromagnetica emessa da sorgenti astrofisiche e che in tale mezzo si propaga. La trattazione di un tale problema richiede l'utilizzo di codici di trasporto radiativo che trattino esplicitamente l'interazione tra radiazione e materia, e che siano esplicitamente accoppiati ad un codice idrodinamico. L'elevato costo computazionale dei codici di trasporto radiativo ha sinora limitato tali studi a situazioni idealizzate o facendo delle assunzioni semplificative che necessariamente limitano l'accuratezza della descrizione numerica. Tale campo è da considerarsi ancora relativamente giovane e quindi suscettibile di notevoli sviluppi nel futuro prossimo.

### **3.4. Partecipazione a programmi a livello internazionale**

Partecipazione al network ASTROSIM, approvato dalla European Science Foundation, per il periodo 2006-2010 (P.I. Ben Moore, University of Zurich; rappresentante italiano: S. Borgani); European Network CosmoComp (2009-2013), raccomandato per finanziamento (P.I. Carlton Baugh, nodo italiano a TS P.I. S. Borgani)

#### CODEX (E-ELT)

ESO, IAC, IoA, Observatoire de Geneve, Univ. Porto, Univ. Lisboa (ESO, Portogallo, Spagna, Svizzera, UK, OATs, OABr)

CODEX è uno strumento di prima generazione per l'ESO Extremely Large Telescope (E-ELT) per effettuare il test cosmologico proposto da Sandage (1962) per la misura dell'espansione differenziale dell'Universo osservando la foresta Lyman- $\alpha$  con uno spettrografo ad altissima precisione nella misura delle velocità radiali. ESPRESSO è un suo prototipo/precursore da installare al fuoco combinato VLT, in grado di sfruttare quattro unità contemporaneamente. Per entrambi è iniziato lo studio di fattibilità. OATs è stato chiamato ad assumersi la responsabilità della progettazione e realizzazione dell'elettronica, del software di controllo e di analisi dati, oltre alla leadership del caso scientifico di ESPRESSO. L'attuale schedula prevede l'approvazione di ESPRESSO da parte di ESO nel 2009 e di CODEX nel 2010.

#### Espresso ESO/VLT (precursore CODEX)

ESO, IAC, Observatoire de Geneve, Univ. Porto, Univ. Lisboa (ESO, Portogallo, Spagna, Svizzera, OATS)

#### X-shooter ESO/VLT

ESO, Univ. Copenhagen, Inst. for Physics and Astronomy Aarhus, Astrophysikalisches Institut Potsdam, GEPI Obs. De Paris, AstroParticule et Cosmologie Inst. Univ. Paris VII, Univ. Amsterdam, ASTRON, Univ. Nijmegen, OATs (ESO, Danimarca, Francia, Olanda)

Partecipazione ad un consorzio internazionale per la realizzazione di X-shooter, uno spettrografo di seconda generazione per VLT, in grado di coprire un ampio intervallo in  $\lambda$  ad alta efficienza, diviso in tre rami (UVB, VIS, NIR). A OATs/ATG è assegnata, su esplicita richiesta dell'ESO, la responsabilità in toto della progettazione e realizzazione del software di controllo di X-shooter, anche per i rami dello strumento contribuiti dai partner europei (Italia, Danimarca, Olanda). Il commissioning dello strumento è iniziato nell'ultimo trimestre del 2008.



### **3.5. Partecipazione a programmi con importante partecipazione italiana**

Progetti approvati per finanziamento su simulazioni numeriche per la formazione di strutture cosmiche.

1. *Progetto PRIN-MIUR 2007: "I barioni diffusi nella storia dell'Universo"* (P.I. S. Borgani). Progetto che comprende sia una parte di simulazioni di ammassi di galassie, IGM e WHIM, sia una parte osservativa.

2. *Progetto PRIN-INAF 2006: "Observing and Modeling the Properties of Diffuse Baryons in Clusters of Galaxies"* (P.I. S. Borgani). Progetto sullo studio del mezzo intra-cluster, che comprende sia una parte di simulazioni che una parte osservativa.

3. *Progetti ASI-AAE Teoria 2007-2008: "Modeling the properties of baryon gas in the large scale structure of the universe"* (P.I. L. Moscardini).

4. *Progetti ASI-AAE Teoria 2007-2008: "Acceleration of high energy particles in galaxy clusters and non thermal emission"* (P.I. G. Brunetti).

5. Progetto su simulazioni numeriche finanziato all'interno del contratto ASI-COFIS (responsabile: L. Moscardini), nell'ambito del Work Package di "Metodi Teorici" (coordinatore: S. Borgani).

Key-project di supercalcolo approvati presso CINECA: 1) "A Tree-SPH high-resolution simulation of the cosmic web" (P.I. S. Borgani): 40.000 ore di CPU assegnate nel 2003; 2) "Formation and evolution of Substructures and MiniHalos" (P.I. A. Ferrara): 40.000 ore di CPU assegnate nel 2004; 3) "A Tree-SPH high-resolution resimulation of a galaxy cluster" (P.I. G. Murante): 40.000 ore di CPU assegnate nel 2004; 4) "The formation of the Milky Way" (P.I. F. Governato): 80.000 ore di CPU assegnate nel 2006. 5) "The Galaxy-Intergalactic Medium interplay" (P.I. M. Viel): 200.000 ore di CPU assegnate nel 2007; 6) "High-resolution simulations of the Warm-Hot Universe (P.I. S. Borgani)": 400.000 ore di CPU assegnate nel 2008.

### **3.6. Progetti da intraprendere**

Elenchiamo qui i progetti che andrebbero intrapresi e che sono potenzialmente molto interessanti per la comunità di IGM/reionizzazione: 1) **SDSS** ([www.sdss3.org](http://www.sdss3.org)): la partecipazione alla Sloan Digital Sky Survey è fondamentale, i progetti scientifici affrontati dalla SDSS-III (farci parte comporta dei costi sia individualmente che come gruppo) sono molto rilevanti in particolare per quanto riguarda gli spettri di QSOs per lo studio della foresta Lyman- $\alpha$ ; lo studio delle oscillazioni barioniche acustiche e della struttura su grande scale (BOSS) attraverso le galassie; l'analisi degli spettri per capire l'evoluzione dei sistemi di assorbimento Damped Lyman- $\alpha$  col redshift; 2) **LOFAR** ([www.lofar.org](http://www.lofar.org)): è uno strumento già operativo, che riuscirà a mappare il contenuto di idrogeno neutro ad altissimi redshift fornendo preziosi vincoli sulla reionizzazione cosmica e sulle sorgenti astrofisiche che la determinano, inoltre vi sono progetti di natura cosmologica paralleli (test di Alcock-Paczynski, misura dello spettro di potenza della materia ad altissimo redshift). Attualmente INAF non è coinvolta in nessuno di questi due progetti per *manca di fondi* (in LOFAR per ora solo qualche ricercatore dell'IRA, OACa, OARm è coinvolto a costo zero nel Key Project Surveys), sebbene i ricercatori abbiano a più riprese manifestato il loro interesse a riguardo. Gruppi europei (Spagna e Francia per esempio) sono già molto attivi e partecipano a SDSS-III mentre altri paesi (Germania, Inghilterra, Francia, Svezia) sono pesantemente coinvolti nel progetto extended-LOFAR che prevede l'installazione di antenne in tali paesi. L'Italia rischia di rimanere indietro e fortemente penalizzata dal punto di vista scientifico. Si ritiene opportuno un



coordinamento maggiore (che parzialmente per LOFAR si è già verificato con dei meeting nazionali) per i ricercatori realmente interessati in tali progetti ed un supporto da parte di INAF per finanziare la loro partecipazione.

### **3.7. Problemi**

*La mancanza manpower per l'analisi dati e per l'analisi degli output numerici rischia di vanificare lo sforzo modellistico/osservativo in questo settore. Inoltre si riscontra una notevole mancanza di risorse per il calcolo computazionale: la maggior parte del supporto di calcolo ai progetti di cosmologia computazionale é sicuramente offerto dalle strutture di CINECA. Negli ultimi anni la convenzione quadro tra INAF e CINECA ha assicurato alla comunità italiana la possibilità di eseguire simulazioni su piattaforme di calcolo di dimensioni critiche. Sebbene tale disponibilità di tempo di calcolo abbia permesso ad alcuni gruppi di acquisire un sicuro riconoscimento a livello internazionale, tale disponibilità è assai inferiore rispetto a quella accessibile ai gruppi attivi in istituti esteri.*

### **BIBLIOGRAFIA**

- Abel T., Bryan G. L., Norman M. L. 2002, *Science*, 295, 93  
Adelberger K.L., et al, 2005, *ApJ*, 629, 636  
Bromm V. & Loeb A. 2003, *ApJ*, 596, 34  
Bromm V., Ferrara A., Coppi P., Larson R. B. 2001, *MNRAS*, 328, 969  
Bromm V., Coppi P. S., Larson R. B. 2002, *ApJ*, 564, 23  
Burigana C., Popa L., Salvaterra R., Schneider R., Choudhury T. R., Ferrara A. 2008, *MNRAS*, 385, 404  
Cen & Ostriker 1999, *ApJ*, 514, 1  
Cen & Ostriker 2006, *ApJ*, 650, 560  
Cheng et al. 2005, *A&A*, 431, 405  
Choudhury T. R. & Ferrara A. 2005, *MNRAS*, 361, 577  
Choudhury T. R. & Ferrara A. 2006, *MNRAS*, 361, 577  
Choudhury T. R. & Ferrara A. 2007, *MNRAS*, 380, L6  
D'Odorico V., Viel M., Saitta F., Cristiani S., Bianchi S., et al. 2006, *MNRAS*, 372, 1333  
D'Odorico V., Bruscoli M., Saitta F., Fontanto F., Viel M., et al., 2008, *MNRAS*, 89, 1727  
Fan X. et al, 2003, *AJ*, 125, 1649  
Fan X. et al, 2006, *AJ*, 132, 117  
Fukugita, Hogan & Peebles 1998, *ApJ*, 503, 518  
Gallerani S. et al., 2006, *MNRAS*, 370, 1401  
Gallerani S. et al., 2008, *MNRAS*, 386, 359  
Kaastra et al. 2006, *ApJ*, 652, 189  
Kulkarni, York, Vladilo, Welty 2007, *ApJ*, 663, L81  
Mannucci F. et al. 2007, *A&A*, 468, 807  
Mapelli M., Ferrara A., Pierpaoli E., 2006, 369, 1719  
Maselli et al., 2007, *MNRAS*, 376, L34  
McDonald P. et al., 2006, *ApJ*, 635, 761  
Meiksin A.A., 2007, *Reviews of Modern Physics* in press  
Nakamura F. & Umemura M. 2002, *ApJ*, 569, 549  
Nicastro et al. 2005, *ApJ*, 629, 700  
Omukai K. 2000, *ApJ*, 534, 809  
Omukai K. & Nishi R. 1998, *ApJ*, 508, 141



- Omukai K., Tsuribe T., Schneider R., Ferrara A. 2005, ApJ, 626, 627  
Omukai K., Schneider R., Haiman Z. 2008, ApJ, 686, 801  
Persic M., Salucci P., 1992, MNRAS, 258, 14  
Rasmussen et al. 2007, ApJ, 656, 129  
Regan J., Haehnelt M.G., Viel M., 2007, MNRAS, 374, 196  
Roncarelli et al. 2006, MNRAS, 368, 74  
Saitta F., D'Odorico V., Bruscoli M., Cristiani S., Monaco P., Viel M., 2008, MNRAS, 385, 519  
Schaye J. et al, 2003, ApJ, 596, 768  
Schneider R., Ferrara A., Natarajan P., Omukai, K. 2002, ApJ, 571, 30  
Schneider R., Ferrara A., Salvaterra R., Omukai K., Bromm V. 2003, Nature, 422, 869  
Schneider R., Omukai K., Inoue A. K., Ferrara A. 2006a, MNRAS, 369, 1437  
Schneider R., Salvaterra R., Ferrara A., Ciardi B. 2006b, MNRAS, 369, 825  
Schneider R., Salvaterra R., Choudhury T. R., Ferrara A., Burigana C., Popa L., 2008, MNRAS, 384, 1525  
Seljak U. et al., 2005, PhysRevD, 71, 10 3515  
Tornatore L., Ferrara A., Schneider R. 2007a, MNRAS, 382, 945  
Tornatore L., Borgani S., Dolag K., Matteucci F., 2007b, MNRAS, 382, 1050  
Tsuribe T., Omukai K. 2006, ApJ, 642, L61  
Viel M., Haehnelt M.G., 2006, MNRAS, 370, L51  
Viel M. et al., 2005a, PhysRevD, 71, 063534  
Viel M. et al., 2005b, MNRAS, 360, 1110  
Viel M. et al, 2008, PhRvL, 100, 041304  
Vladilo G. et al. 2006, A&A, 454, 151  
Vladilo, Prochaska, Wolfe 2008, A&A, 478, 701  
Yoshida N, Omukai K., Hernquist L., Abel T. 2006, ApJ, 652, 6  
Zappacosta L. et al. 2005a, MNRAS, 357, 929  
Zappacosta L. et al. 2005b, A&A, 434, 801



## 1. **MODELLI DI FORMAZIONE ED EVOLUZIONE DELLE GALASSIE**

*Preparato da Alberto Franceschini, con il contributo di A. Bressan, P. Monaco, N. Menci, G. Murante, F. Matteucci*

L'Universo oggi è costituito da una enorme varietà di strutture che si manifestano sulle più diverse scale. Sulla scala cosmologica, l'elemento strutturale fondamentale sono le galassie, raggruppamenti di stelle, gas, polveri e materia oscura caratterizzate da una limitata varietà di morfologie – ellittiche, spirali, irregolari – e dimensioni. A loro volta alcune galassie ospitano Nuclei Galattici Attivi (AGN) con diverse fenomenologie (quasars, radiogalassie, blazars, galassie ultraluminose nell'IR). Sulla base di recenti osservazioni, soprattutto di HST, si ritiene che la maggior parte, se non tutte, le galassie massive abbiano ospitato nel loro passato un AGN.

L'Universo, nelle sue varie costituenti, appare assai lontano da una condizione di omogeneità spaziale. La densità di strutture risulta estremamente elevata in prossimità di rari addensamenti (gli ammassi ricchi di galassie, includenti tutte le varie componenti cosmiche, dalle galassie, a plasmii caldi diffusi, alla materia oscura), mentre al contrario la maggior parte del volume universale è caratterizzato da regioni sotto-dense, se non vuote (i grandi vuoti cosmici, di dimensioni lineari sino ad oltre 100 Mpc). Tali strutture rivelano chiara tendenza all'aggregazione gerarchica, dalla scala degli ammassi stellari galattici sino ad almeno le dimensioni dei grandi vuoti – oltre le quali le evidenze osservative dimostrano l'instaurarsi di un regime di omogeneità nelle componenti cosmiche.

Come l'Universo sia evoluto dalla condizione di quasi perfette omogeneità e termalizzazione della maggior parte delle sue componenti, testimoniata da osservazioni della CMB, a questo elevatissimo grado di strutturazione, e i processi fisici che l'hanno regolato, hanno costituito il tema fondamentale della cosmologia osservativa e teorica dagli anni '60. Nonostante rilevanti progressi siano stati ottenuti in questo campo, particolarmente nell'ultimo decennio, vari aspetti rimangono privi di una chiara comprensione fisica. L'impressione attuale è che ci si stia progressivamente avvicinando alla definizione di un modello fisico globale della formazione delle strutture cosmiche, ma che alcuni passi cruciali siano ancora da compiere. Quando ciò avverrà (forse entro il prossimo decennio, con l'avvento dei grandi osservatori *planetari*, ALMA, JWST, E-ELT) si parlerà di una delle maggiori conquiste del pensiero umano.

Con riferimento agli scorsi 5-10 anni, i principali progressi in questo settore sono stati compiuti lungo tre direzioni. Innanzitutto, e grazie in particolare a dettagliati studi della struttura delle anisotropie della CMB, l'emergere di uno scenario cosmologico *concordante* ha finalmente posto fine al programma di ricerca sulla struttura geometrica e sui parametri fondamentali dell'Universo: ciò ha fornito precisi tempi-scala per l'evoluzione e la definizione delle proprietà dinamiche delle sue componenti fondamentali (materia oscura, energia oscura, barioni). In secondo luogo, sorgenti cosmiche – quali galassie, AGN, gas e plasmii caldi diffusi – sono state rivelate lungo un intervallo di tempo corrispondente a più del 90% dell'età dell'Universo (sino a  $z \sim 7$ ), cosa che ha permesso di investigarne direttamente e in profondità le proprietà fisiche e astrofisiche e porre a confronto le caratteristiche di sorgenti osservate a diverse epoche. In terzo luogo, è stata realizzata una modellistica sempre più dettagliata del processo di formazione delle galassie e delle strutture cosmiche, sia sulla base di sempre più sofisticate tecniche di analisi numerica (sia di componenti di



materia oscura che di barioni) che di sempre più dettagliate procedure analitiche del complesso comportamento dei barioni.

Si è in questo modo consolidato uno scenario fisico e cosmologico che prevede, a grandi linee, la formazione di tutte le strutture cosmiche per effetto della crescita di piccole perturbazioni nel fluido cosmico primordiale di materia oscura e barioni, verosimilmente generate da processi micro-fisici durante l'era inflazionaria. Tali piccole fluttuazioni sarebbero quindi cresciute con il tempo cosmico per effetto dell'auto-gravità principalmente della materia oscura. Sulle scale spaziali più grandi (oltre 10 Mpc al tempo attuale) l'evoluzione dovuta all'instabilità gravitazionale è avvenuta in un regime lineare, relativamente semplice da modellare, e ha prodotto il collasso di regioni sovra-dense che porta alla formazione di aloni auto-gravitanti e alla loro progressiva aggregazione in strutture sempre più grandi al trascorrere del tempo (processo di *clustering gerarchico*).

Sulle scale inferiori ad alcuni Mpc, che includono ovviamente le più interessanti strutture cosmiche, si sommano due fondamentali complicazioni: da una parte la dinamica non è più trattabile con le semplificazioni utilizzabili nel regime lineare, dall'altra inizia a manifestarsi, sino a dominare alle piccole scale, la componente barionica, con la complessa fisica che la caratterizza. Dal momento che i barioni, a differenza della materia oscura, si scaldano, raffreddano, dissipano energia e momento angolare in modo molto efficiente, essi si strutturano con modalità estremamente complesse e varie. Una frazione sostanziale (almeno il 50%) è predetta permanere in una fase calda ( $10^5$ - $10^6$  K), molto difficilmente osservabile e verosimilmente associata alla struttura filamentare su grande scala. Il resto contribuisce al mezzo intra-cluster di ammassi e gruppi, o è condensato in stelle di galassie e gas più freddo, atomico e molecolare.

### **3.8. Situazione internazionale della modellistica sulla formazione delle galassie e delle strutture**

Grazie allo straordinario sviluppo delle tecniche di osservazione diretta di sorgenti a qualunque tempo cosmico e al parallelo raffinamento dell'indagine modellistica, è stato possibile porre a confronto in un modo sempre più stringente i dati osservativi con le nostre interpretazioni fisiche e con predizioni modellistiche dell'emergere della struttura cosmica basate sullo scenario di materia oscura fredda in un Universo dominato dall'energia oscura (scenario  $\Lambda$ CDM del *clustering gerarchico*).

Lo sviluppo della modellistica della formazione di galassie e strutture cosmiche è proseguita seguendo sia l'approccio numerico che quello analitico. Lo sforzo principale si basa su sempre più elaborate simulazioni numeriche N-corpi, integrando la fisica dei barioni con codici idrodinamici (tipicamente SPH o Adaptive Mesh). Le simulazioni numeriche N-corpi/idrodinamiche forniscono in linea di principio una indagine completa, inclusi gli effetti ambientali che sono ritenuti rilevanti (evoluzione in funzione dell'ambiente cosmico - da quello d'ammasso, al "*field*"), ma i risultati possono risultare di non ovvia interpretazione. A loro volta i modelli analitici, basati ad es. sul modello di Press-Schechter per la trattazione della materia oscura e su ricette analitiche e semi-empiriche per i barioni, non hanno sensibilità ai parametri ambientali, ma forniscono il vantaggio di una più diretta e facilmente interpretabile esplorazione dei processi fisici che riguardano i barioni. L'approccio di recente maggiormente seguito è stato quello di una integrazione di ricette analitiche della fisica dei barioni sul campo evolutivo di densità di materia oscura fornito da simulazioni N-corpi.

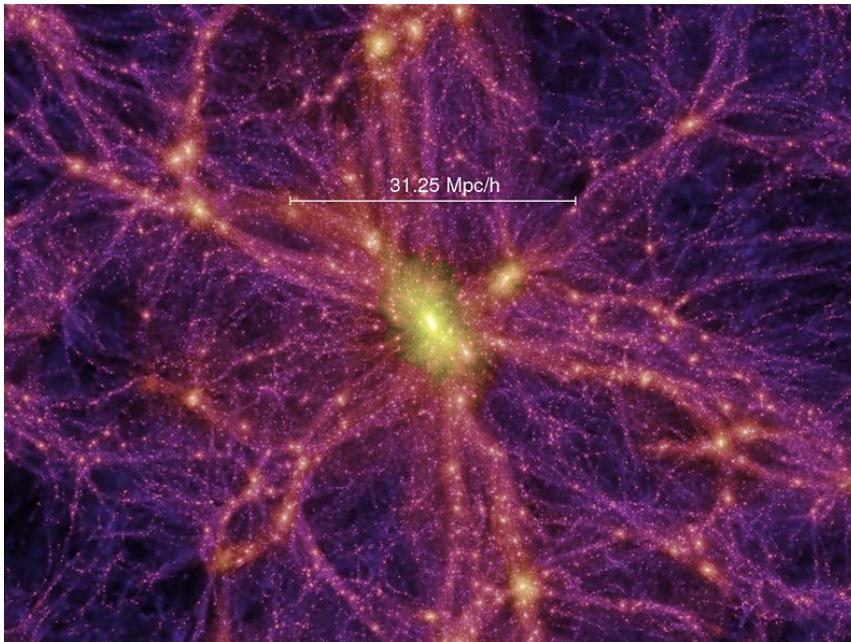


Figura 4.1. Risultati di una simulazione numerica di un grande volume d'universo (1 Gpc cubico, vedi scala), la *Millenium Simulation* da parte del Consorzio di istituti *Virgo*, che include tra gli altri il gruppo di MPA, Garching. La simulazione ha coinvolto 10 miliardi di particelle di materia oscura e barioni.

Vari gruppi a livello planetario, principalmente in Europa (Durham, MPA Garching) e negli Stati Uniti (University of California S.C., CfA, Princeton, Stanford, ecc.), hanno prodotto risultati con sempre migliore risoluzione in massa e maggiore dettaglio nella trattazione dei barioni. Uno sforzo particolare è stato recentemente dedicato ad un confronto sistematico dei risultati dei vari codici, che ha dato i seguenti risultati. La trattazione della materia oscura ha fornito un quadro ormai preciso e consistente (tra l'altro in buon accordo con la modellistica analitica basata sulla teoria di Press-Schechter) ed è oggi considerata standard (vedasi ad es. Figura 4.1). Come illustrato in Figura 4.2, l'accordo tra teoria e osservazioni della LSS sulle grandi scale è straordinario (incluso l'effetto, già identificato in surveys spettroscopiche al tempo attuale, delle cosiddette "*baryon oscillations*" nello spettro di potenza della densità, residuo delle perturbazioni primordiali del fluido cosmico).

Sulle più piccole scale, ove si manifestano o dominano i barioni, la situazione appare invece ben diversa e più incerta. I risultati dei vari codici dipendono qui in maniera critica dal tipo di assunzioni operate riguardanti la varietà di fenomeni fisici cui sono soggetti i barioni, che si traduce ovviamente in un grande numero di parametri fisici essenzialmente liberi. Le capacità predittive della modellistica dei barioni sono recentemente apparse assai limitate, esempio classico l'effetto osservato di "*downsizing*" nell'evoluzione delle sorgenti cosmiche (che evidenzia un'evoluzione anticipata nel tempo cosmico per sorgenti massive e luminose - sia galassie che AGN - e posticipata per oggetti di piccola massa/luminosità) e contrario alle predizioni originarie della modellistica a *clustering gerarchico*  $\Lambda$ CDM. Altri problemi riguardano i profili di densità nei nuclei delle galassie, che non rivelano una cuspidale come previsto dalle simulazioni numeriche, il numero di galassie satelliti della Via Lattea, il numero di galassie a disco non barrate ed in generale di galassie bulgeless, ecc. La complessità dei processi implica quindi che la modellistica serva piuttosto ad una progressivamente sempre più raffinata interpretazione fisica dei fenomeni osservati con la strumentazione attuale su un amplissimo intervallo temporale, ma guidata appunto dalle osservazioni.

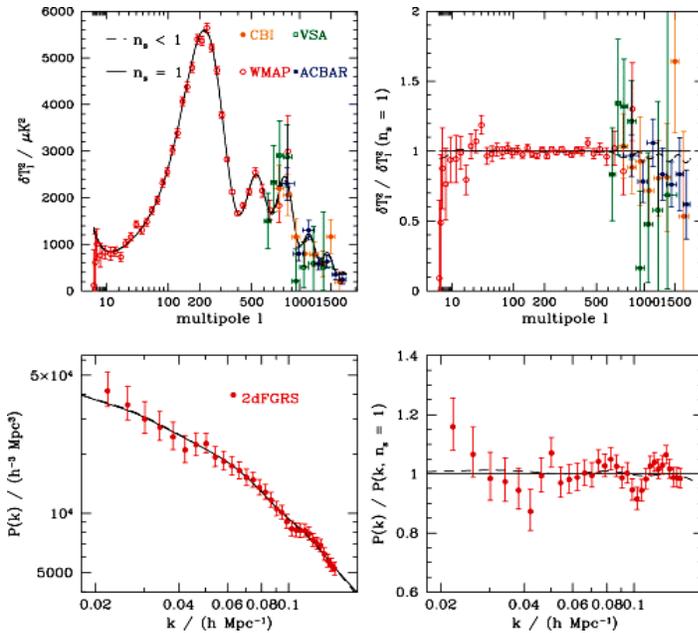


Figura 4.2. Illustra un confronto dettagliato tra le previsioni di un modello di sviluppo di perturbazioni iniziali del fluido cosmico (manifestate nella struttura di anisotropie  $\delta T$  della CMB - pannello sopra) che porta alla struttura di disomogeneità nella distribuzione di galassie al tempo cosmico attuale (definita dallo spettro di potenza  $P(k)$  del campo di densità mappato dalla grande survey spettroscopica di galassie 2dFGRS, pannello sotto). Si noti l'eccellente accordo di dati e modello [da Sanchez et al. 2006].

Uno dei temi centrali nei quali si è sviluppato il recente dibattito teorico sulla formazione delle galassie (e conseguentemente dei BH supermassivi nucleari, origine dell'attività AGN) ha riguardato l'evoluzione cosmologica della funzione di massa stellare. Recenti surveys multi-banda (specificamente con Spitzer) ne hanno fornito determinazioni assai precise e attendibili, che indicano come la forma esponenziale di Schechter, osservata per le popolazioni di galassie locali, si mantenga piuttosto inalterata anche risalendo di una decina e oltre di Gyrs indietro nel tempo. Al contempo, galassie massive ed evolute nella coda esponenziale della LF sono egualmente osservate sino a redshifts molto elevati, ove semmai si nota una carenza di oggetti di piccola massa. La modellistica  $\Lambda$ CDM non appare del tutto a suo agio nello spiegare queste osservazioni (ad es. il *clustering gerarchico* naturalmente produrrebbe un gran numero di galassie di piccola massa ad alti  $z$ , non osservato). Un acceso dibattito è attualmente teso a identificare processi fisici in grado di produrre funzioni di massa stellare di galassie a tutte le epoche cosmiche di forma esponenziale entro aloni di materia oscura caratterizzati invece da funzioni di massa essenzialmente a legge di potenza (vedi Fig. 4.3). La modellistica suggerisce vari effetti come responsabili (ad es. effetti di *feedback* da supernovae e AGN, riscaldamento di gas per collasso gravitazionale, ecc), ma non ha ancora fornito una chiara e quantitativa risposta.

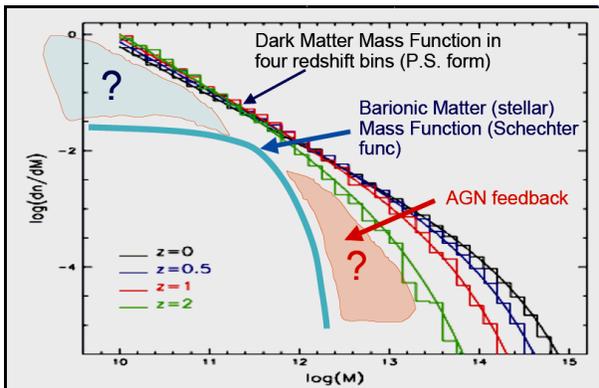


Figura 4.3. Lo schema illustra uno dei problemi chiave della modellistica teorica sulla formazione delle galassie, che è quello di riprodurre una forma esponenziale per la funzione di massa stellare delle galassie (curva azzurra) entro aloni di materia oscura con funzione di massa essenzialmente a legge di potenza. Effetti di *feedback* da AGN agli alti valori della massa sono indicati, ma non dimostrati.



Oltre alla fase *fredda* del gas barionico in galassie, l'altra componente barionica fondamentale dell'Universo sono i plasmi caldi presenti come aloni in tutte le grandi strutture gravitanti, dalle galassie massive agli ammassi ricchi di galassie. Anche qui, diverse evidenze sperimentali, quali le relazioni di scala (L-T, M-T) e l'assenza del raffreddamento (*cooling flow*) previsto nelle zone di massima densità degli aloni e a  $T < 1-2$  keV, indicano inequivocabilmente che la fisica e l'evoluzione dei barioni nella fase *calda* non sono determinati solo dal potenziale gravitazionale e dal raffreddamento del gas, ma richiedono il contributo di fenomeni astrofisici complessi, quali la formazione stellare e i fenomeni di *feedback* associati a supernovae e AGN. Il quadro attuale emerso dall'intensa attività di ricerca osservativa (radio e X) e modellistica (codici numerici), pur indicando che la fase *calda* diffusa contiene non solo una frazione maggioritaria dei barioni ma anche una notevole parte dei metalli prodotti dalle stelle nell'intero tempo di Hubble, non ha ancora chiarito quando e come questa attività stellare e l'assemblaggio di galassie e plasmi siano avvenuti.

Questione a parte riguarda, invece, le "prime luci", l'epoca della re-ionizzazione ( $z \sim 10-20$ ) e l'insorgere della struttura cosmica dall'epoca oscura post-ricombinazione. In questo caso le osservazioni (se si escludono importanti vincoli sulla re-ionizzazione ottenuti dai limiti sull'opacità di scattering da analisi della CMB e limiti dall'effetto Gunn-Peterson in quasar ad alti  $z$ ) non sono state ancora in grado di identificare direttamente oggetti primordiali. In questa situazione e in vista di progetti osservativi estremamente promettenti per il futuro (surveys con VISTA e JWST), l'analisi modellistica teorica ricopre un ruolo di fondamentale interesse. L'approccio qui tipicamente seguito da alcuni gruppi, principalmente negli Stati Uniti (Stanford, Princeton), si basa su codici idrodinamici avanzati che integrano in dettaglio soluzioni del trasporto radiativo. La previsione modellistica indica l'attività di stelle molto massicce ed isolate (Pop III) entro mini-aloni ( $M \sim 10^5 M_\odot$ ) primordiali in grado di fotoionizzare il loro *environment* e costituire i semi di successivo collasso di gas e formazione delle prime strutture.

### **3.9. Situazione in Italia (ultimi 3-5 anni)**

Sinora, con poche eccezioni, l'attività di modellistica teorica in Italia, data la scarsa disponibilità di super-computers necessari per lavori di frontiera nel campo dei codici numerici, si è principalmente concentrata su codici semi-analitici, anche utilizzando come descrittori della materia oscura i risultati di simulazioni di collaboratori esteri e/o quelli di codici e simulazioni pubbliche. Altri gruppi italiani hanno collaborato producendo analisi statistico/fisiche di simulazioni *state-of-art*. Riassumiamo nel seguito di questa sezione alcune delle principali ricerche degli ultimi anni risultate eccellenti a livello mondiale.

- **Modelli semi-analitici della formazione delle galassie, funzioni di massa e luminosità galattiche.** Vari gruppi includenti personale INAF e universitari associati hanno partecipato da protagonisti all'intenso dibattito sul confronto tra previsioni dello scenario a *clustering gerarchico*  $\Lambda$ CDM e l'insieme degli osservabili [gruppi di INAF Roma, Trieste, Padova, in particolare]. Si è chiaramente mostrato che tali modelli, con ricette standard per raffreddamento, collasso, formazione stellare, frizione dinamica e cannibalismo galattico, non sono in grado di riprodurre gli effetti osservati del "*downsizing*" cosmologico (che corrisponde ad una sorta di capovolgimento dello schema gerarchico quando si passa dallo studio della materia oscura a quello dei barioni).
- **Modellistica di plasmi e galassie in ammassi.** [OABo, OATs, OAPd, OATo e Università di Bologna, Trieste, Padova, Torino]. In questo campo la comunità di ricercatori afferenti a INAF ha svolto un ruolo di primo piano e di grande impatto nel contesto internazionale. Sofisticata simulazioni idrodinamiche (tipicamente con codici SPH) sono state effettuate per la formazione di ammassi di galassie, in grado di trattare, oltre alla materia oscura, il

raffreddamento radiativo, la formazione stellare, i fenomeni di feedback e il loro impatto sulla termodinamica del plasma. Queste ricerche modellistiche sono avvenute in stretto contatto con dati osservativi numerosi e di alta qualità (Chandra & XMM-Newton) e hanno curato dettagliati confronti (anche tramite codici dedicati, e.g. X-Ray Map Simulator, XMAS, [UNIPD e UNIBO]) dei risultati delle simulazioni con quelli osservativi ottenuti da spettroscopia X spazialmente risolta (relazioni di scala, profili di temperatura e metallicità, "cool cores"). Tali simulazioni hanno fatto principalmente riferimento a codici *state-of-art* (e.g. GADGET-2) per quanto riguarda il contesto cosmologico, nell'ambito dei quali una tecnica utilizzata con buon successo è quella della *ri-simulazione*, con la quale una piccola zona all'interno di una grande simulazione (ad es. la *Millenium*, Fig. 4.1) viene rianalizzata a maggiore risoluzione. Interessante notare che i risultati riguardanti le galassie in ammasso sono del tutto consistenti con quelli della popolazione generale accennata nell'*item* precedente.

- **Effetti di feedback da AGN sulla funzione di massa galattica.** Vari gruppi [particolarmente a Padova, Trieste, Roma, Torino] hanno investigato gli effetti di ritorno energetico da AGN sulla galassia ospite, un tema già considerato a partire dalla fine anni '90 a seguito delle scoperte di importanti relazioni di scala tra proprietà di BH supermassivi, galassia ospite, e persino alone di DM. Allo stato attuale i modelli includono il collasso e la virializzazione degli aloni di materia oscura; i processi radiativi da parte del gas contenuto; la formazione stellare; l'evoluzione delle popolazioni stellari e la loro emissione; i processi di aggregazione gerarchica degli aloni di materia oscura e del relativo contenuto di gas e di stelle; l'inclusione degli aloni di materia oscura in strutture gerarchiche via via più grandi (gruppi ed ammassi di galassie); gli starbursts associati ai merging e alle interazioni tra galassie; la crescita di buchi neri supermassivi per accrescimento e merging, e la corrispondente attività di AGN; il feedback operato dalla radiazione emessa dagli AGN sul mezzo interstellare delle galassie. La modellistica semi-analitica sviluppata su queste ipotesi ha conseguito notevoli e apprezzati miglioramenti del modello gerarchico ed è attualmente considerata *state-of-art*.
- **Modelli di trasporto radiativo in cosmologia, stelle di Pop. III e re-ionizzazione.** [Trieste SISSA, INAF/Arcetri, UNITS]. Si tratta di modellistica (basata su codice *ray-tracing* Monte Carlo) di interesse per applicazioni in vari settori della cosmologia, e applicata con risultati particolarmente importanti allo studio teorico dell'emergere delle prime strutture e sorgenti cosmiche dopo le *dark ages*, la re-ionizzazione, la produzione delle prime stelle e dei primi metalli. In assenza di dati significativi su queste prime fasi, tale modellistica ha assunto un ruolo fondamentale nell'elaborazione di previsioni per future osservazioni in grado di aprire questo nuovo dominio della cosmologia.
- **Modelli di lensing gravitazionale da strutture cosmiche.** [Bologna, Padova] Modellistica di lensing gravitazionale basata su *ray-tracing* e includente effetti strumentali e condizioni osservative. Gli effetti di lensing cosmologico hanno fornito importanti misure della quantità totale di materia gravitante nelle strutture e vincoli sull'energia oscura. Modelli dettagliati di lensing hanno costituito e costituiranno quindi fondamentali metodi di indagine cosmologica.
- **Modelli empirici dell'evoluzione delle sorgenti cosmiche e origine delle radiazioni di fondo in X, ottico, IR.** [Bologna, Roma, Padova, Trieste]. Grande mole di dati si è accumulata negli scorsi anni riguardanti sorgenti cosmiche osservate a tutte le lunghezze d'onda e radiazioni diffuse extragalattiche in X, infrarosso e ottico. Tali emissioni



costituiscono un veicolo fondamentale d'informazione riguardante le varie trasformazioni che il gas barionico ha subito durante la storia dell'universo, in particolare trasformazioni termo-nucleari in stelle e di collasso gravitazionale in buchi neri, origine dell'attività AGN. E' essenziale che questa informazione sia censita, coordinata e interpretata sulla base di modellistica empirica, prima di essere posta a confronto con le previsioni della modellistica "fisica" *ab-initio*. Negli ultimi anni particolare rilievo hanno avuto i modelli sintetici del fondo X e loro recenti revisioni, che interpretano il fondo X come l'emissione integrata X dell'attività AGN, nonché gli studi interpretativi del fondo scoperto da COBE nel lontano IR e che confrontano tale emissione diffusa con quella delle sorgenti IR rivelate da IRAS, ISO e Spitzer. Le bande del lontano IR, solo recentemente aperte all'indagine cosmologica, contengono rilevanti informazioni sulle fasi più attive della formazione stellare (quelle ad es. che hanno portato alla generazione di galassie sferoidali massive) e dell'accrescimento gravitazionale, che avvengono per la maggior parte in ambiente oscurato da polveri.

- **Modelli di evoluzione spettro-fotometrica e chimica di galassie e popolazioni stellari.** [Padova, Univ. Ts, OATs]. Si tratta della modellistica di sintesi spettrale di popolazioni stellari complesse e galassie. Ha costituito negli scorsi decenni uno strumento fondamentale per l'interpretazione di sorgenti cosmiche, ed ha avuto, e continua ad avere, un proficuo e ben riconosciuto sviluppo in Italia. La modellistica spettrale ha fornito tra l'altro un input decisivo ad un recente importante progresso della cosmologia, la determinazione di redshift fotometrici per grandi campioni di sorgenti deboli, per non parlare del supporto teorico a procedure di selezione da più tempo consolidate quali la tecnica *Lyman-Break*. Una recente applicazione ha riguardato lo studio modellistico di fasi di violenta formazione stellare oscurata da polveri che hanno verosimilmente originato le galassie sferoidali e si è basata sul confronto di modelli dettagliati di formazione stellare e accrescimento su AGN con dati multi-banda dall'ottico al radio. Recenti sviluppi di questa modellistica ha riguardato anche la produzione di polveri e applicazioni ai sistemi DLA ad alto redshift e alle galassie *Lyman-Break*
- **Modellistica di galassie locali.** [Padova, Bologna, Univ. Ts, OATs]. Una ricerca a questa collegata si occupa di studiare la formazione ed evoluzione di galassie di diverso tipo morfologico mediante un approccio astro-archeologico, costruendo modelli dettagliati di evoluzione chimica e fotometrica che riproducano le principali caratteristiche delle galassie locali. Ciò è risultato essenziale: per ottenere campioni di riferimento rispetto ai quali misurare l'evoluzione cosmologica di popolazioni lontane, e, non meno importante, ottenere condizioni al contorno che ogni modello di formazione di galassie deve soddisfare. Sono stati così ottenuti importanti vincoli sulla storia di formazione stellare delle galassie ed anche sul meccanismo di formazione (infall, outflow, inflow). Il tempo scala di formazione di galassie è stato determinato attraverso lo studio dei rapporti di abbondanze tra elementi (ad es. alfa/Ferro, azoto/ossigeno) formati su tempi scala diversi da SNe di diverso tipo..

Complessivamente, possiamo concludere che la modellistica teorica in Italia riguardante la formazione ed evoluzione delle galassie, strutture e sorgenti cosmiche negli ultimi anni ha prodotto alcuni risultati di ottimo e ben riconosciuto interesse. Si è distinta in particolare una attitudine *critica* dei gruppi italiani nei confronti dello scenario standard  $\Lambda$ CDM, sottoponendo le sue predizioni modellistiche ad un serrato confronto con le osservazioni. Ciò è stato reso possibile, tra l'altro, sfruttando le notevoli esperienze maturate in Italia nello studio di popolazioni di galassie e AGN ad alti redshifts osservate in tutte le bande dello spettro elettromagnetico. Sono stati così posti in luce notevoli problemi riguardanti trattazioni standard della fisica dei barioni e sono state di conseguenza suggerite importanti modifiche e l'implementazione di nuovi effetti/processi fisici



potenzialmente in grado di spiegare le inconsistenze osservate. Appaiono decisamente all'avanguardia, inoltre, le ricerche teoriche sulle "prime luci" nel cosmo e sulla re-ionizzazione, quelle riguardanti la fisica dei plasm caldi in ammassi e la modellistica empirica di sorgenti e fondi cosmici. Mantiene la sua storica posizione di eccellenza la modellistica di sintesi spettrofotometrica ed evoluzione chimica.

### **3.10. Obiettivi e priorità per programmi nei prossimi 3 anni**

La modellistica della formazione ed evoluzione delle galassie e delle strutture nell'Universo avrà nei prossimi anni un ruolo cruciale nell'interpretazione fisica del grande flusso di dati in questo campo cui stiamo assistendo e, al tempo stesso, un ruolo di ispirazione e guida per la programmazione di nuovi decisivi test e progetti osservativi. Assolutamente da sottolineare questo secondo aspetto in considerazione del fatto che il prossimo passo di programmi osservativi, al fine di permettere un progresso significativo sui molti interrogativi ancora aperti, richiederanno finanziamenti sempre più ingenti e complesse e ben coordinate collaborazioni globali. Un elenco di obiettivi per tale modellistica è di seguito riportato, assieme ad alcuni progetti già identificati.

#### **3.10.1. Modelli dell'insorgere delle prime strutture e delle prime luci.**

Si tratta certamente di tematiche alla frontiera per la cosmologia teorica e osservativa, nelle quali, per quanto riguarda le *prime luci*, ci aspettiamo decisive scoperte nei prossimi anni grazie a surveys profonde nel vicino IR su grande area (menzione speciale per *VISTA*) e soprattutto grazie al grosso investimento di *JWST*. Sarà in questo modo rilevante verificare il contributo al processo di re-ionizzazione del gas primordiale da parte di queste prime sorgenti, verosimilmente stelle prive di metalli, molto massive, in ammassi di  $10^5$ - $10^6 M_{\odot}$  a  $z \sim 10$ -20, che hanno probabilmente lasciato al termine della loro attività buchi neri fossili, possibili semi per successiva aggregazione, accrescimento di gas ed emissione da mini-AGN. Le prime strutture di materia oscura e gas in fase di condensazione durante la "*dark ages*" potrebbero a loro volta divenire osservabili indirettamente, se parzialmente ionizzate, come anisotropie su piccole scale angolari ( $<1$  arcmin) della CMB, ovvero direttamente tramite osservazioni radio di emissioni in riga (21 cm da HI o molecolari) con grandi collettori radio e interferometri radio di nuova generazione (*LOFAR*, una volta completato, e soprattutto *SKA*). E' stato anche suggerito che decadimenti di particelle di materia oscura, contribuendo eventualmente alla fase della reionizzazione, possano aver lasciato tracce nelle mappe a 21 cm del HI e possano quindi essere utilizzate per vincolare la natura della materia oscura.

In vista di questi cruciali progressi, si ritiene essenziale mantenere, se non potenziare, le rilevanti capacità già sviluppate da ricercatori e associati INAF nel settore della modellistica teorica della formazione delle prime strutture [Trieste SISSA, INAF/Arcetri, si veda Sez. 3].

#### **3.10.2. Studi della struttura su grande scala dell'Universo e della sua evoluzione con il tempo.**

Nonostante la comprensione della struttura evolutiva su grande scala del campo di materia oscura si possa considerare già relativamente avanzata, i test attuali si limitano in realtà essenzialmente all'Universo locale (Fig. 4.2). Sulla base delle grandi surveys spettroscopiche di galassie e delle surveys di *weak lensing*, in corso e future, si avranno a breve molti più dati sull'evoluzione nel tempo cosmico di tale struttura. Una importante menzione riguarda poi future campagne osservative, sia in *imaging* che in spettroscopia, previste con strumentazione spaziale (*DUNE*, *EUCLID*). Il confronto con previsioni modellistiche dettagliate, basate su codici numerici avanzati,



tipicamente a *N-corpi*, forniranno test importanti dello schema modellistico fondamentale a *clustering gerarchico* dominato dalla materia oscura fredda. [Bologna Università, Padova Università, Trieste INAF, Torino Università].

### **3.10.3. Storia evolutiva dei barioni diffusi.**

Una frazione largamente dominante dei barioni cosmici è tuttora sotto forma diffusa, e tanto maggiore lo è stata nelle epoche passate. La fase gassosa e molecolare è da tempo oggetto di indagini basate principalmente su spettroscopia ottica in assorbimento di quasar ad alti redshifts, fornendo tra l'altro dati essenziali sulla contaminazione di metalli diffusi su grande scala da parte di sorgenti primordiali. I plasmi caldi nelle strutture cosmiche (dai gruppi, agli ammassi, sino ai filamenti cosmici), invece, contengono non solo una rilevante frazione dei barioni nell'Universo, ma soprattutto una grande quantità di metalli, che supera quelli contenuti in stelle e nel ISM. Per tale motivo lo studio di queste componenti, sia in strutture locali che ad alti redshift, fornisce informazione cruciale sulla storia cosmica della formazione delle popolazioni stellari e della produzione degli elementi pesanti. Oltre a ciò, l'addensamento di plasma in queste strutture facilita l'investigazione tramite spettroscopia X, in particolare, dei complessi processi fisici di interrelazione tra sorgenti cosmiche e gas. La ricerca di plasmi diffusi a temperatura intermedia ( $T \sim 10^5 - 10^6$  K) e correlati con la struttura filamentare su grande scala, che rappresentano verosimilmente la componente che include la maggior parte dei barioni cosmici, costituirà nei prossimi anni una continua sfida per programmi (in raggi X) dedicati alla loro rilevazione.

Per tutti questi diversi motivi, la modellistica del collasso dei barioni, raffreddamento e successiva formazione stellare costituisce quindi una delle grandi priorità dell'attività di INAF nei prossimi anni, così come lo è stata negli anni recenti. [OATs, OABo, OAPd, OATo e Università di Trieste, Bologna, Padova, Torino]. Modellistica connessa con quanto riportato al punto 4.4 seguente.

### **3.10.4. Modelli di formazione di galassie e buchi neri nucleari.**

Attese le ancora sostanziali inconsistenze tra previsioni modellistiche sulla formazione delle galassie e dei nuclei galattici attivi e osservazioni, si tratta di una tematica di rilevante e sicuro interesse nel medio termine. Sarà del tutto naturale per i vari gruppi INAF già ben attivi in questo campo mantenere e ulteriormente potenziare la loro leadership, in stretta collaborazione con i gruppi osservativi. In questo ambito un aspetto nuovo, ma essenziale, riguarderà gli effetti dell'ambiente cosmico nell'influenzare formazione ed evoluzione delle sorgenti, che sarà possibile analizzare osservativamente con le grandi surveys di cielo, e teoricamente con i modelli numerici.

**Modellistica semi-analitica.** [Roma] Il modello sviluppato presso OARm costituisce in questo contesto uno strumento teorico allo stato dell'arte, e verrà sviluppato in stretta sinergia con gruppi di ricerca osservativi leader nel campo delle galassie di alto redshift (OARm, OATs) e degli ammassi di galassie (ESO-Garching). L'attività di ricerca nel triennio intende sfruttare le capacità predittive del modello semi-analitico per investigare, attraverso il confronto con le osservazioni, i seguenti problemi: 1) *il ruolo degli AGN* nel determinare le proprietà delle galassie, e in particolare il meccanismo responsabile della soppressione della formazione stellare in galassie massive. 2) *il ruolo dell'ambiente* (gruppi o ammassi di galassie) nel determinare le proprietà delle galassie; una fase importante consisterà nello studio dei processi responsabili della dipendenza dall'ambiente della frazione di galassie blu e delle proprietà della *red sequence*. Poiché, in un contesto cosmologico, l'ambiente nel quale si formano le galassie si origina in ultima analisi dal campo densità primordiale, questo studio costituisce una sonda particolarmente importante per le teorie "ab-initio" di formazione delle galassie. 3) *i meccanismi alla base della formazione delle galassie centrali* di gruppi ed ammassi. Le proprietà di queste costituiscono un test fondamentale per gli



attuali modelli  $\Lambda$ CDM, che predicono particolari storie di *merging* e di formazione stellare per questi oggetti.

**Modellistica di formazione di galassie.** [Trieste, Torino, Bologna, Padova]. Il gruppo intende affrontare il problema della formazione delle galassie utilizzando in modo congiunto modelli semi-analitici e simulazioni numeriche. I due metodi verranno utilizzati per affrontare alcuni dei nodi fondamentali della formazione di galassie: 1) se sia possibile riprodurre le proprietà delle grandi galassie ellittiche nell'ambito del paradigma cosmologico  $\Lambda$ CDM; 2) quali processi di *feedback*, stellare e da AGN, siano alla base del “*downsizing*” osservato; 3) quali futuri test osservativi potranno vincolare l'emergere della popolazione delle galassie nel primo Gyr di vita dell'Universo. Per quanto riguarda i modelli semi-analitici, il progetto è quello di confrontare diversi modelli (ad es. *MORGANA*), e il modello di MPA Garching. Questa parte del progetto verrà realizzata anche in stretta collaborazione con OARm. Contemporaneamente, la potenza di calcolo a disposizione (ora e nell'immediato futuro) e lo sviluppo di nuovi codici *sotto-griglia* per la formazione stellare e il *feedback* da SNe renderanno la simulazione di grandi campioni di galassie finalmente possibile. Il gruppo di Trieste, in stretta collaborazione con OATo, sta sviluppando uno di questi codici *sotto-griglia* (*MUPPI*), all'interno del codice N-body+SPH GADGET2, che implementa una modellistica multi-fase del mezzo interstellare all'interno della particella di gas. Dopo un'approfondita fase di test, questo codice verrà utilizzato sia per simulare galassie singole a risoluzione piuttosto spinta (oltre la quale l'implementazione stessa del modello diventa dubbia, dato che si comincia a risolvere la fisica sotto-griglia) che per simulare volumi d'Universo, in modo da avere a disposizione interi campioni di galassie. Il progetto coinvolge personale OATo e OATs e dell'Università di Trieste, ed è in stretta relazione con le simulazioni di struttura a grande scala e di mezzo intergalattico menzionate in Sez. 4.2. Il progetto si avvarrà di risorse disponibili nell'ambito della convenzione INAF-CINECA. Il modello utilizzerà il codice spettro-fotometrico e di trasporto radiativo *GRASIL* (OATs), e collaborerà con il gruppo osservativo GOODS di Trieste e GOODS-MUSIC di Roma. Si prevedono applicazioni al problema della formazione di galassie a disco, per determinare l'impatto del *feedback* energetico sulla sua struttura, applicazioni alla formazione ed evoluzione di ammassi di galassie, in particolare per determinare l'impatto del *feedback* da supernovae sulla termodinamica del gas nel *core* degli ammassi e sulla formazione ed evoluzione della galassia centrale, più brillante, dell'ammasso, e confronti tra la cinematica della componente stellare diffusa in simulazioni numeriche con osservazioni nell'ammasso di Coma di nebulose planetarie intracluster (collaborazione con ESO-Garching).

### 3.10.5. **Modellistica empirica dell'evoluzione di sorgenti cosmiche e fondi di radiazione. Modellistica di sintesi spettrofotometrica di galassie e AGN.**

Nuove implementazioni osservative, tra cui *VISTA*, *Herschel Space Observatory*, la prolungata operazione di *Spitzer* nel modo *warm*, sperabilmente le nuove camere a grande campo su HST, strumentazione avanzata su telescopi di 10m, il nuovo interferometro radio *LOFAR* e la maggiorazione di VLA, nonché la progressiva messa in opera di *ALMA*, garantiranno nei prossimi 3-5 anni un flusso sempre più sostenuto di dati sull'universo ad alti redshift. Acquisiremo sempre maggiori dati sulla storia delle trasformazioni che il gas barionico ha subito e sui loro svariati prodotti, in relazione sia all'attività stellare che a quella AGN. Tra i problemi fondamentali e più complessi che si dovrà continuare a monitorare è quello di distinguere i due tipi di attività, per comprenderne appieno la loro inter-relazione. La comprensione e la metabolizzazione di questi dati richiederanno uno sforzo coordinato di modellistica spettrale di sorgenti e modelli empirici di evoluzione multi-banda di popolazioni di sorgenti e fondi cosmici, prima di un confronto critico e consapevole con la modellistica delle strutture “*ab-initio*”.



**Modellistica spettrofotometrica di galassie e AGN.** [Padova, Trieste] E' sempre più forte l'evidenza, già precedentemente menzionata, che fasi cruciali sia della formazione stellare che dell'accrescimento gravitazionale si verificano in ambienti fortemente oscurati da polveri. Il paradigma attuale per l'origine di galassie sferoidali è quello di un violento *burst* di formazione stellare e probabilmente *merging* tra oggetti ricchi di gas e polveri, con concomitante attività AGN (prototipi locali potrebbero essere le galassie IRAS Ultraluminose, ULIRG). Questi fatti richiedono che continui lo sforzo modellistico di sintesi di popolazioni stellari in ambiente polveroso, e al contempo quello di modelli dell'emissione di AGN oscurati, tipicamente nell'IR. Per quanto riguarda il primo aspetto, è in programma la costruzione di modelli di sintesi spettrofotometrica di popolazioni stellari semplici basati su tracce evolutive di adeguata composizione chimica e librerie di atmosfere stellari ad alta risoluzione (2A). Questi modelli dovranno: i) estendere il range spettrale, sia nell'UV che nell'IR, utilizzando sia librerie spettrali osservative che teoriche; ii) introdurre la dipendenza da abbondanze chimiche tipiche degli sferoidi locali, ma poco campionate nelle librerie osservative; iii) avere una accurata copertura delle fasi evolutive stellari che dominano la luce delle galassie ad alto redshift. Nella regione UV dovrà essere accuratamente considerato il contributo delle popolazioni stellari giovani, sia per quanto riguarda l'effetto dei venti stellari che per il contributo dell'emissione nebulare (quest'ultima presente anche nelle altre regioni spettrali). Nella regione del vicino e medio IR verranno ri-considerati sia i modelli di emissione fotosferica che i contributi degli involucri circumstellari, delle stelle di ramo asintotico. Particolare riguardo sarà dato ai differenti tipi di polvere che caratterizzano le stelle di differente massa e composizione chimica.

Tale modellistica fornirà strumenti per separare i contributi stellare e AGN in sorgenti deboli e lontane e permettere quindi l'acquisizione di un quadro completo dell'evoluzione delle sorgenti cosmiche.

**Modellistica empirica di evoluzione di galassie e AGN oscurati, confronto con il fondo IR.** [Bologna, Padova, Roma, Trieste] L'ampio programma di survey cosmologiche con Herschel in bande (70-400 $\mu$ m) sinora quasi completamente inesplorate dal punto di vista cosmologico, osservazioni coordinate con dati esistenti di Spitzer, di telescopi millimetrici e a breve ALMA, fornirà un quadro per la prima volta completo del ruolo dell'assorbimento di polveri in sorgenti cosmiche ai vari redshift. Uno studio interpretativo e l'elaborazione di schemi evolutivi per galassie e AGN a queste lunghezze d'onda, confrontati con i risultati di selezioni a diverse lunghezze d'onda, saranno essenziali per l'elaborazione di uno scenario finalmente completo ed esauriente della storia delle trasformazioni dei barioni.

**Modellistica evolutiva di AGN e fondo X.** [Bologna, Roma] Il tema è ovviamente di pertinenza della Sezione *High-Energy Astrophysics*, ma ha connessioni profonde con quello dell'origine delle strutture galattiche, per i motivi precedentemente enunciati. E' per questo auspicabile che la comunità INAF mantenga l'alto profilo di competitività in questo settore che l'ha storicamente contraddistinta e le già attive collaborazioni con gruppi di cosmologia osservativa e teorica.



## **4. PROPRIETÀ, FORMAZIONE ED EVOLUZIONE DELLE GALASSIE: OSSERVAZIONI**

*Preparato da Bianca Maria Poggianti, con il contributo di: S. Andreon, S. Bianchi, M. Bondi, A. Bressan, E. G. Brocato, Busarello, S. Di Serego-Alighieri, B. Garilli, G. Gavazzi, L. Guzzo, A. Iovino, F. Mannucci, P. Merluzzi, P. Parma, L. Pentericci, A. Pizzella, A. Renzini, P. Saracco, D. Trevese, G. Trinchieri, G. Zamorani*

### **4.1. Background scientifico internazionale**

Come le galassie si formino ed evolvano è una domanda centrale dell'astronomia moderna. I progressi recenti in questo campo sono stati straordinari e si sono susseguiti a ritmi vertiginosi, guidati dalle numerose osservazioni dedicate delle migliori facilities osservative da terra e dallo spazio. I risultati interessano tutti e tre i grandi regimi di redshifts (alto redshift a  $z$  maggiore di 2, redshifts intermedi tra 0.2 e 2, e Universo locale), che sono in qualche modo distinti per le tecniche osservative richieste e naturalmente le epoche evolutive investigate.

#### **4.1.1. Galassie a $z \geq 2$ : varie tecniche di selezione a $z=3$ , e gli studi a $z=6-7$**

Gli ultimi cinque anni sono stati caratterizzati dai successi ottenuti in due grandi filoni: la caratterizzazione delle proprietà galattiche a  $z=2-3$  su campioni che iniziano ad essere significativi per studi statistici, e l'avvento degli studi di galassie che si spingono fino all'epoca di reionizzazione a  $z=6-7$  e oltre.

Tecniche diverse e complementari hanno fornito larghi campioni di galassie a  $z$  tra 2 e 3.5: galassie selezionate nel rest frame UV con la tecnica Lyman break (LBGs), galassie sub-mm, galassie selezionate sulla base di una combinazione di filtri che includono l'IR (DRG Distant Red Galaxies, galassie BzK, Extremely red Objects EROs, ed altre). Ciascuna di queste classi di galassie è stata oggetto di studi multiwavelength dettagliati che hanno permesso di determinare le loro distribuzioni di massa, tasso di formazione stellare attuale ed età stellare, morfologie, proprietà di clustering, distribuzione in redshift, contributo al budget totale di massa stellare e formazione stellare.

Il legame e le differenze tra le varie classi sono ancora oggetto di studio, per superare la visione parziale che ciascuna di queste può fornire e arrivare a un censimento completo delle popolazioni galattiche a  $z=3$ . Ad esempio, usando un campione senza alcuna pre-selezione in colore basato sulla VVDS e la sua estensione UltraDeep, si è trovato che la popolazione di galassie ad alto redshift è almeno un fattore due maggiore rispetto alle stime ottenute da campioni pre-selezionati (LeFevre et al. 2005). Di conseguenza, il tasso di formazione stellare a redshift 3-4 misurato senza pre-selezione è sensibilmente più alto di quanto misurato in precedenza.

Studi di dinamica di galassie spazialmente risolti con spettroscopia integral-field nel vicino infrarosso hanno mostrato che galassie star-forming a  $z=2.5$  mostrano talvolta dischi massicci rotanti con alte dispersioni di velocità (Fig.5.1, Genzel et al. 2008, Forster Schreiber et al. 2006), suggerendo che più del 50% dei sistemi star-forming a questi redshifts contengono un singolo disco rotante. Questi sistemi possono diventare instabili ed evolvere in sferoidi, presumibilmente bulges.

Questo ed altri risultati hanno evidenziato che l'evoluzione secolare e l'accrescimento regolare di gas lungo "streams" di gas freddo probabilmente giocano un ruolo fondamentale nella formazione di dischi e sferoidi massicci ad alto redshift.

Infine, studi osservativi di galassie si stanno ormai spingendo fino a  $z=7$  (Bouwens et al. 2007, 2008). La visione a  $z=4$  e oltre è ancora incompleta e frammentaria, limitata a galassie star-forming: ad esempio, l'evoluzione della funzione di luminosità UV è ancora incerta tra  $z=6$  e  $z=3$ , nonostante che decine di migliaia di galassie siano ormai state identificate, a causa di effetti sistematici e di selezione. Il quadro attuale suggerisce un andamento come quello mostrato in Fig.5.2, nel quale la densità di formazione stellare decresce verso  $z$  più alti per  $z$  maggiore di 3. Altri grandi programmi osservativi di imaging profondo da terra e dallo spazio sono in corso, e dovrebbero fornire dei limiti più dettagliati a  $z$  maggiori di 7 già a partire dal 2009.

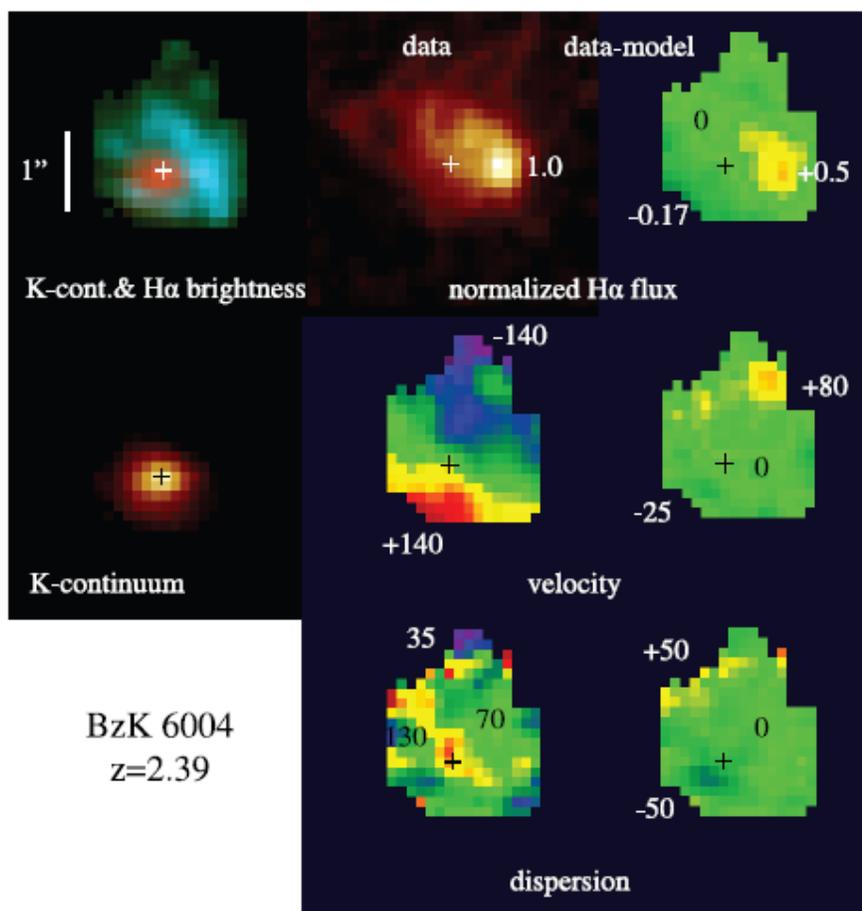


Fig. 5.1 Sinistra: Densità di brillantezza superficiale nel continuo in banda K (rosso) e H $\alpha$  (blue) con SINFONI di una galassia star-forming a  $z=2.4$ . Centro: emissione H $\alpha$  (alto) mappa di velocità (centro) e dispersione di velocità (basso). Destra: Mappa residua avendo sottratto il modello dai dati. (Genzel et al. 2008). I dati mostrano in galassie a  $z=2$  la presenza di anelli esterni/dischi star-forming rotanti e di una componente di bulge centrale/disco interno.

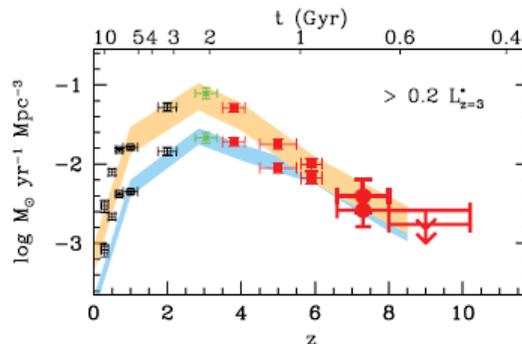


Fig.5.2 Densità di formazione stellare stimata in funzione del redshift, corretta e non corretta per polvere (punti in alto e in basso, rispettivamente) (Bouwens et al. 2008). I dati attuali suggeriscono un aumento da  $z=0$  a  $z=1-2$ , e un declino progressivo a  $z$  maggiori di 3.

#### 4.1.2. *Galassie fino a $z=1-2$ : il declino della formazione stellare, la mass assembly e la crescita della red sequence*

Eccellenti progressi nello studio dell'evoluzione galattica tra  $z=0.2$  e  $z=1.5$  sono stati ottenuti soprattutto grazie alle numerose surveys spettroscopiche profonde e multiwavelength intraprese in questi ultimi anni, come la Vimos-VLT Deep Survey (VVDS), COSMOS e zCOSMOS, DEEP2, COMBO-17 (basata su fotometria in banda intermedia) etc. L'accento nella maggior parte di queste surveys è lo studio combinato della formazione ed evoluzione delle galassie e delle strutture da  $z=1.5$  ad oggi, e ciò ha richiesto la caratterizzazione contemporanea delle proprietà galattiche e del loro ambiente (Scoville et al. 2007). Lo studio di galassie in gruppi massicci e ammassi, invece, per la loro relativa rarità e l'ancora limitata area delle surveys di campo, ha richiesto surveys multiwavelengths su campi selezionati con ammassi e gruppi. Fino a cinque anni fa, studi dettagliati di ammassi si avevano solo per campioni fino a  $z=0.5$ . Si è ora esteso lo studio sistematico fino a  $z=1$  e, per alcune strutture anche oltre, fino a  $z=1.5$  e a candidati protoclusters. Un importante passo avanti è stata la possibilità di estendere fino ai gruppi l'intervallo di masse dei sistemi studiati a  $z=0.5-1$  (White et al. 2005).

Si ha ora un quadro ben dettagliato e -- almeno fino a  $z=1$  -- robusto, dell'evoluzione della formazione stellare su scala cosmica (Fig. 5.2, Bouwens et al. 2008, Hopkins & Beacom 2006). Si sono potuti determinare l'evoluzione delle funzioni di luminosità e di massa delle galassie fino a  $z \sim 1.2$ , anche in funzione della densità locale nel campo, l'evoluzione separata di galassie rosse e blu in funzione della loro massa e la crescita della sequenza rossa (Fig. 5.3, Bell et al. 2007), e la dipendenza della formazione stellare e della formazione stellare per unità di massa dalla massa stellare galattica tra  $z=0.2$  e 2 (Fig. 5.4, Daddi et al. 2007).

Il quadro che emerge è quello di un'attività di formazione stellare fortemente decrescente in galassie star-forming di una data massa da  $z=2$  ad oggi, in aggiunta ad una forte diminuzione della frazione di galassie star-forming. L'aumento osservato del numero di galassie sulla sequenza rossa è consistente con la semplice cessazione della formazione stellare legata all'evoluzione delle galassie blu, senza necessità né spazio per un forte ruolo dei mergers. Questa evoluzione è molto più marcata per galassie di bassa massa che per galassie massicce, che appaiono già essere sostanzialmente formate a  $z=1$ . Lo scenario di downsizing è quindi ormai consolidato: le galassie più massicce sono quelle che raggiungono il completamento della formazione stellare e della mass

assembly a redshifts più alti, mentre le galassie progressivamente meno massicce hanno una storia evolutiva più prolungata.

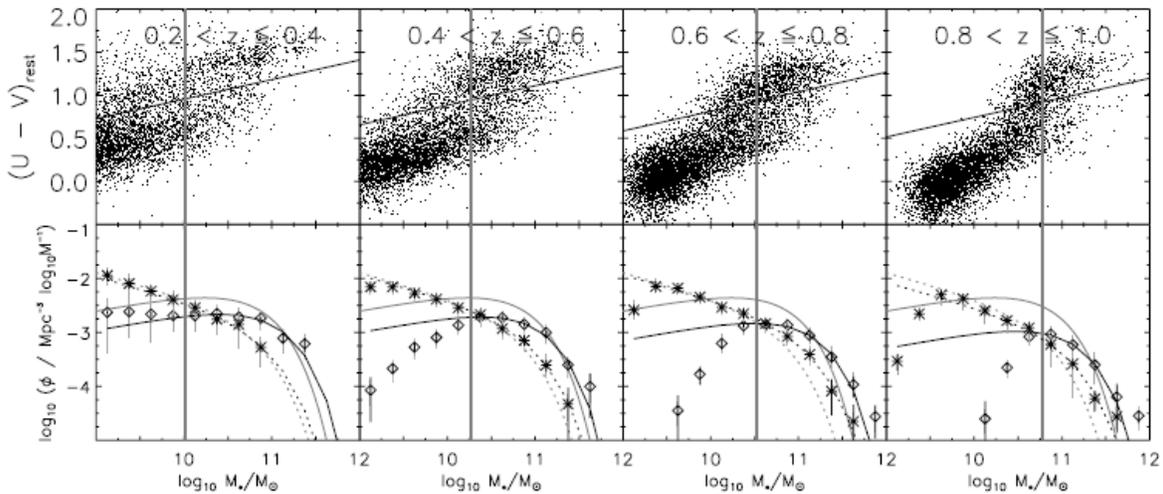


Fig. 5.3 In alto: evoluzione del diagramma colore-massa a  $z=0.2-1$ . In basso: evoluzione della funzione stellare di massa per galassie rosse (diamanti) e blu (asterischi). Le rispettive funzioni a  $z=0$  sono mostrate in grigio (Bell et al. 2007). La massa stellare in galassie rosse cresce a causa dell'aumento del numero di galassie rosse con masse minori di  $10^{11}$  masse solari. La cessazione della formazione stellare legata all'evoluzione della funzione delle galassie blu è sufficiente a riprodurre l'evoluzione della red sequence.

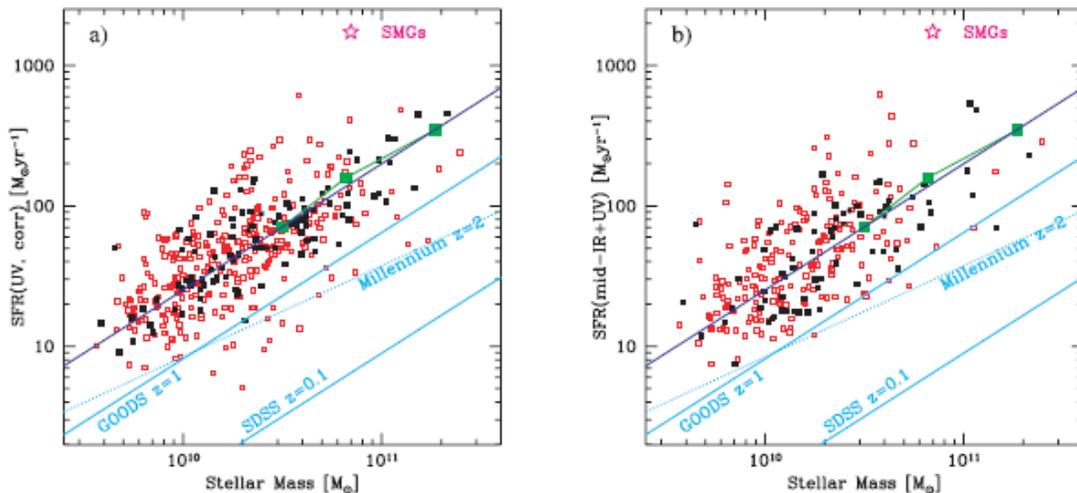


Fig. 5.4. Correlazione tasso di formazione stellare-massa stellare galattica per galassie star-forming a  $z=2$ , confrontato con risultati analoghi a  $z=1$  e  $z=0.1$  (linee) (Daddi et al. 2007). Formazione stellare derivata dall'UV corretto per polvere, e sommando i tassi ottenuti dall'UV e dal mid-IR. A tutti i redshifts esiste una forte correlazione tra il tasso di formazione stellare e la massa galattica, e la relazione si sposta a tassi più alti a epoche precedenti. Tassi corrispondenti a Ultraluminous Infrared Galaxies sono la modalità comune nelle galassie star-forming più massicce a  $z=2$ .



#### **4.1.3. *L'Universo locale: la dipendenza delle proprietà galattiche dalla massa galattica e dall'ambiente a $z=0$***

Lo studio delle galassie nell'universo locale in un ampio intervallo spettrale, dal radio centimetrico all'ultravioletto è uno strumento indispensabile per imporre dei limiti osservativi ai modelli di formazione ed evoluzione delle galassie. In questo campo hanno dato un contributo importante le grandi surveys spettroscopiche dell'Universo locale, in particolare la Sloan Digital Sky Survey (SDSS) e la 2dF Galaxy Redshift Survey (2dFGRS).

Precedenti risultati che mostravano che il parametro fondamentale nel determinare i tempi scala evolutivi della componente barionica delle galassie è la loro massa sono stati così confermati, dettagliati e sono diventati il paradigma per tutta la comunità extragalattica (Cowie et al. 1996, Gavazzi & Scodreggio 1996). Si è confermato che in media le galassie di piccola massa trasformano il loro gas primordiale in stelle in un tempo scala dell'ordine dell'età dell'universo, mentre galassie massive hanno avuto un'enorme efficienza di formazione stellare in epoche cosmologiche remote. L'analisi della dipendenza dall'ambiente di colori, morfologia e formazione stellare di galassie di diversa massa e luminosità ha mostrato che la storia evolutiva dipende sia dalla massa che dall'ambiente in cui le galassie risiedono (Fig. 5.5, Baldry et al. 2006).

L'origine della bimodalità intorno a  $3 \cdot 10^{10}$  masse solari osservata per le proprietà globali delle galassie (Fig. 5.6) è stata oggetto di diversi lavori sia osservativi che teorici (Kauffmann et al. 2003). Importante è stato il ruolo delle recenti simulazioni, che, messe a confronto con le osservazioni, suggeriscono un'interpretazione della causa della bimodalità per le proprietà delle galassie, in particolare il ruolo dell'AGN "feedback" e dell'accrescimento di gas all'interno delle galassie.

Un forte contributo allo studio dell'evoluzione delle galassie è stato dato dal satellite Spitzer che ha permesso di osservare le galassie a lunghezze d'onda MIR con una risoluzione vicina a quella dei telescopi ottici e NIR, arrivando a distinguere complessi di regioni HII con dettaglio di 500 pc nelle galassie vicine. I dati Spitzer, combinati con quelli di GALEX, hanno permesso di calibrare gli indicatori di formazione stellare su galassie vicine (Calzetti et al. 2007), di fare un primo censimento delle regioni di formazione oscurate, e di combinare dati MIR con indicatori UV per ricavare il tasso di formazione stellare totale in galassie fino ad alti redshifts.

Hanno inoltre avuto un notevole impulso gli studi di dinamica delle galassie effettuati con strumenti Integral Field Unit (IFU), tra i quali SAURON, PPAK, VIMOS-IFU e Sinfoni. Con questi strumenti è stato possibile, per esempio, derivare l'anisotropia orbitale delle stelle nella parte centrale delle galassie e porre vincoli sulla frazione di materia oscura determinando accurati rapporti M/L in un campione di galassie vicine. Questi risultati sono limitati dalla piccola copertura spaziale, che raramente supera un raggio efficace. L'utilizzo delle Nebulose Planetarie (PNe) come traccianti della cinematica delle stelle ha permesso di superare tali limiti, fino a raggiungere le regioni di alone. Con il Planetary Nebula Spectrograph (PNS) si è scoperta una classe di galassie ellittiche di luminosità intermedia con un contenuto di materia oscura molto basso rispetto a quanto atteso dal modello standard LCDM (Napolitano et al. 2009).

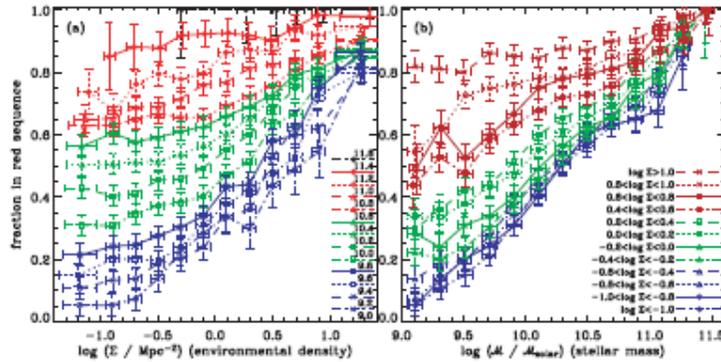


Fig.5.5 Frazione di galassie rosse in funzione della densità locale (sinistra) e della massa galattica stellare (destra), rispettivamente per diversi intervalli di massa e densità, per galassie dell'Universo locale in Sloan (Baldry et al. 2006). Questa frazione mostra una forte dipendenza sia dalla massa stellare galattica che dalla densità locale, quindi dall'ambiente.

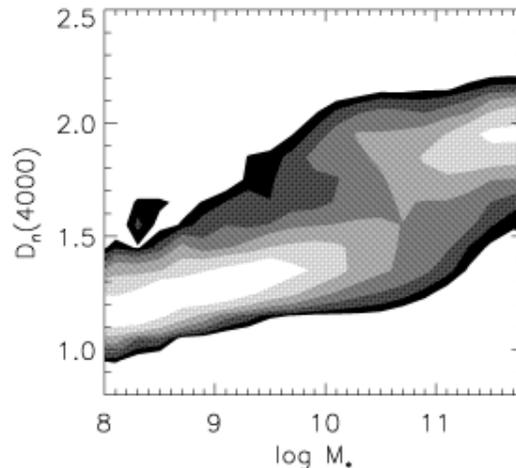


Fig. 5.6 Dipendenza del break a 4000 Å dalla massa galattica in galassie dell'Universo locale (Sloan, Kauffmann et al. 2003). La distribuzione delle proprietà galattiche è bimodale: galassie di bassa massa sono principalmente blue, star-forming con morfologie late-type, mentre galassie massicce sono rosse, passive e di morfologia early-type.

## 4.2. Ricerche svolte in Italia negli ultimi 3-5 anni

Astronomi italiani hanno fortemente contribuito allo sviluppo delle conoscenze nel campo dell'evoluzione galattica osservativa su scala mondiale. La ricerca svolta in Italia in questo settore ha ottenuto livelli di eccellenza e competitività internazionale. I tre filoni più attivi della ricerca italiana degli ultimi 3-5 anni nel settore delle osservazioni di galassie sono descritti qui di seguito.

### 4.2.1. Studi ad alto redshift

La comunità scientifica italiana è numerosa e attiva all'interno dei grossi progetti internazionali che hanno prodotto, negli ultimi anni, osservazioni profonde broad-band (dal radio ai raggi-X) su alcuni campi selezionati (e.g. Garilli et al. 2008). In particolare, utilizzando dati VVDS e COSMOS,

astronomi in Italia hanno fortemente contribuito alla definizione dello scenario di evoluzione cosmica della formazione stellare e della massa stellare descritto nella sezione precedente, allo studio delle funzioni di massa e luminosità, allo studio della sequenza blu e di sferoidi blu compatti possibili progenitori di bulges di spirale (Pozzetti et al. 2007, Zucca et al. 2006, Cassata et al. 2007). Il coinvolgimento italiano è avvenuto in queste surveys a tutti i livelli, da quello osservativo ottico e radio (con osservazioni radio profonde a diverse frequenze ottenute con il VLA, il GMRT e l'ATCA), a quello interpretativo e modellistico.

A guida italiana sono stati anche studi della metallicità e della dinamica spazialmente risolta in galassie star-forming a  $z=2-3$  (Maiolino et al. 2008, Mannucci et al. 2008). La derivazione della relazione massa galattica-metallicità a  $z=3.5$  ha evidenziato una progressiva diminuzione della metallicità a tutte le masse, suggerendo che tale evoluzione sia più marcata in galassie di bassa massa che in galassie massicce (Fig. 5.7).

Nell'ambito della survey GOODS, è stato creato in Italia un catalogo pubblico multibanda (GOODS-MUSIC) che include osservazioni dalla banda U al 24 micron di Spitzer/MIPS (per un totale di 15 bande) e copre un'area di  $143 \text{ arcmin}^2$  localizzata nel Chandra Deep Field South (Grazian et al. 2006a). Questo catalogo ha permesso lo studio dell'evoluzione del clustering delle galassie rosse (DRGs), che rappresentano i progenitori delle galassie più massicce e luminose nell'universo locale, e probabilmente abitano regioni che evolveranno in strutture di massa intermedia, quali i gruppi o piccoli clusters (Grazian et al. 2006b). L'evoluzione della funzione di massa stellare fino a  $z=4$  in GOODS-MUSIC è consistente con uno scenario in cui il 50% delle galassie massicce nell'Universo locale si sono formate in un'epoca tra  $z=4$  e 1.5, con elevati rate di formazione stellare, seguiti poi da un'evoluzione modesta da redshift 1.5 fino all'epoca presente (Fontana et al. 2006, si veda anche sez.5.2.b). Questo dataset ha anche confermato la bimodalità nella distribuzione del colore U-V delle galassie fino a  $z=3$  (Salimbeni et al. 2008) e ha investigato le relazioni tra le varie classi di galassie ad alto redshift selezionate con tecniche diverse, trovando che a) le galassie Lyman  $\alpha$  emitters sono meno massicce, più giovani e contengono meno polvere rispetto alle galassie senza righe di emissione (Pentericci et al. 2007) e b) le LBGs e le DRGs contribuiscono in maniera quasi uguale alla densità di massa stellare globale fino a redshift 2 e, più in generale, le galassie star-forming costituiscono una frazione sostanziale della densità di massa stellare (Grazian et al. 2007).

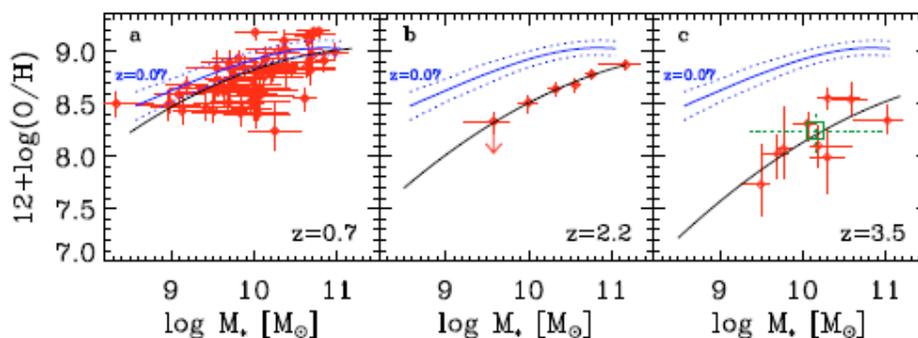


Fig. 5.7 Relazione tra massa galattica e metallicità del gas in galassie star-forming a diversi redshifts (Maiolino et al. 2008). La relazione persiste fino ad alto redshift. L'evoluzione della metallicità è presente a tutte le masse, ma ci sono indicazioni che in galassie di bassa massa sia più forte che in galassie più massicce (downsizing in metallicità).



#### 4.2.2. *Galassie ellittiche e sferoidi*

Lo studio delle galassie ellittiche e degli sferoidi in generale, oltre ad essere un nodo cruciale per investigare parecchie domande chiave dell'astronomia extragalattica attuale, è anche tradizionalmente un campo a cui gli astronomi italiani si sono dedicati e al quale hanno contribuito in modo determinante a livello internazionale. Lo studio delle ellittiche in Italia comprende vari approcci e punti di vista:

##### **La densità numerica delle galassie early-type ad alto $z$ , la loro storia di formazione stellare e mass assembly.**

Gruppi italiani sono all'avanguardia nella conduzione di surveys spettroscopiche ottiche e infrarosse per lo studio di galassie early-type (ETGs) massicce a  $z$  maggiori di 1 (eg., surveys K20, TESIS, GMASS). Si è stabilito che la densità numerica di ETGs massicce, la densità stellare ad esse associata e le relative funzioni di massa e luminosità variano debolmente da  $z=0$  a  $z\sim 1.5$  mostrando che la popolazione di ETGs massicce era già formata a quell'epoca (Longhetti et al. 2005, Cimatti et al. 2006, Saracco et al. 2005, 2006). Il grosso della massa stellare si è quindi formato a redshifts maggiori di 2 in un breve intervallo di tempo con tassi di formazione stellare molto elevati. A redshifts maggiori di 1 galassie passive massicce caratterizzate da popolazioni stellari vecchie e forte clustering sono state identificate, ma le conclusioni basate sulla loro densità numerica a questi redshifts sono ancora incerte a causa del forte clustering e della cosmic variance.

Sia a  $z$  maggiore che minore di 1 si è trovato che il grosso delle popolazioni stellari si è formato prima in galassie early-type di ammasso che di campo (Clemens et al. 2006, 2009, Annibali et al. 2007), e questa differenza è particolarmente evidente a masse minori di  $10^{11}$  masse solari.

##### **L'evoluzione delle dimensioni delle galassie early-type.**

Recentemente si è scoperto che le galassie early-type a  $z>1$  hanno dimensioni caratteristiche (raggi efficaci  $R_e$ ) più piccole di quelle delle galassie locali a parità di massa stellare (Longhetti et al. 2007). Il profilo di luce delle ETGs osservate a  $z\sim 1.5$  è di fatto da 5 a 10 volte più concentrato di quello delle galassie locali e la maggiore compattezza non è legata alla banda di osservazione. L'evoluzione in luminosità non è sufficiente a giustificare l'elevata brillantezza superficiale  $\mu_e$  osservata per le ETGs a  $z>1$ . Il loro raggio efficace deve aumentare da  $z\sim 1.5$  a  $z\sim 0$  per poter soddisfare le proprietà della popolazione locale di ETGs (Fig. 5.8, Cimatti et al. 2008, Saracco et al. 2009).

##### **Relazioni di scala e venti galattici.**

Sono stati fatti importanti passi avanti nella comprensione dell'origine delle relazioni di scala delle galassie early-type, come il piano fondamentale (FP). Si è ora compreso come il tilt del FP non è legato a variazioni delle popolazioni stellari con la massa delle galassie, ma alla non omologia e alla variazione del contenuto di dark matter (La Barbera et al. 2008). Si è trovato che i coefficienti del FP dipendono dall'ambiente dove si trovano le galassie, in termini di densità locale, e quindi non sono universali (D'Onofrio et al. 2008). L'evoluzione del FP col redshift fino a  $z=1$  ha mostrato che l'evoluzione di  $M/L$  delle galassie è consistente con il downsizing (Di Serego Alighieri et al. 2005, 2005, 2006). La combinazione di dati ottici e NIR (SDSS e UKIDSS), per la prima volta su larga scala e in modo omogeneo, hanno mostrato che il FP è essenzialmente indipendente dalla lunghezza d'onda, con la conseguenza che le popolazioni stellari delle galassie massive hanno epoche di formazioni strettamente sincronizzate (La Barbera et al. 2008).

La grande diversità misurata nella quantità di gas caldo in galassie ellittiche locali è ancora un argomento di vivo interesse, in quanto non sono ancora chiari i meccanismi che regolano la

ritenzione del gas all'interno del potenziale delle galassie. Modelli teorici prevedono la presenza di venti galattici la cui emissione è stata rivelata per la prima volta da astronomi italiani in una galassia ellittica con dati Chandra (Trinchieri et al. 2008a). Questa componente è presente solo nella regione interna della galassia ( $<1$  kpc), e la massa di gas coinvolta in questo fenomeno, di circa  $3 \times 10^5$  masse solari, corrisponde alla massa “persa” dalle stelle nella loro evoluzione.

Infine, negli ultimi anni, una serie di studi ha dimostrato come le Fluttuazioni di Brillanza Superficiale (SBF), oltre ad essere un affidabile indicatore di distanza (Biscardi et al. 2008), costituiscono un nuovo ed efficace strumento per comprendere lo stato evolutivo delle popolazioni stellari nelle galassie ellittiche, in grado di affiancare i classici indicatori spettro-fotometrici di età/metallicità. Questa linea di ricerca viene sviluppata in Italia e ha permesso di misurare, per la prima volta, la presenza di gradienti radiali nei valori di SBF in un campione di galassie ellittiche (Cantiello et al. 2007, Raimondo et al. 2005).

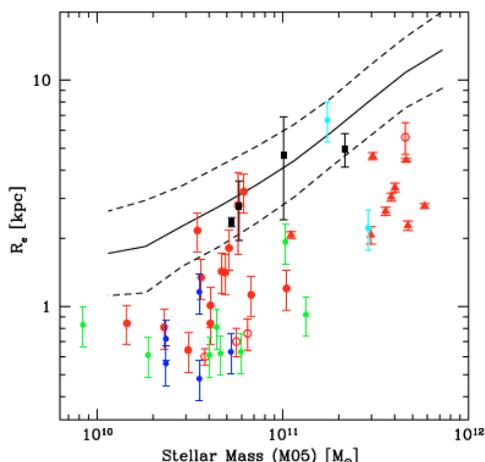


Fig. 5.8 Dimensioni fisiche (raggio effettivo) in funzione della massa galattica stellare per galassie passive a  $z=2$  (punti), confrontati con la relazione nell’Universo locale e il suo scatter (linee, SDSS) (Cimatti et al. 2008). Saracco et al. (2009) trovano una differenza con l’età delle popolazioni stellari: galassie più giovani non sono più compatte/dense delle loro controparti a  $z=0$  e sono in accordo con le relazioni di scala (Kormendy, size-luminosity e size-mass) osservate localmente. Le galassie più vecchie invece non seguono le relazioni di scala locali e per riportarle in accordo con queste è necessario che il loro raggio efficace  $R_e$  aumenti di un fattore 2.5-3 fra  $z \sim 1.5-2$  e  $z=0$ .

### 4.2.3. *Proprietà ed evoluzione di galassie in funzione dell'ambiente*

Una frazione significativa della comunità astronomica extragalattica in Italia si è dedicata negli ultimi anni allo studio delle proprietà delle galassie e della loro evoluzione in funzione dell’ambiente. Discriminare tra effetti ambientali ed effetti legati a proprietà intrinseche alle galassie stesse, in particolare la loro massa, è necessario per stabilire i processi fisici che governano la formazione e l’evoluzione delle galassie.

La ricerca italiana in questo campo si è messa in evidenza soprattutto nei seguenti filoni:

#### **Studi dettagliati multiwavelength di sistemi (ammassi e gruppi) a bassi redshifts.**

Studi singoli hanno riguardato gli ammassi Virgo e Coma, e il supercluster Shapley e, come confronto, campioni di galassie isolate (es. galassie nane isolate di bassa metallicità). La vicinanza



di questi sistemi consente un' esplorazione su un ampio intervallo di massa delle galassie, dalle nane alle giganti ( $10^8 - 10^{12}$  masse solari). L' approccio italiano di tipo multiwavelength utilizza dati di alta qualità nell'ottico e NIR profondo, in  $H\alpha$ , nel radio, nell'IR con Spitzer e presto con Herschel, e permette di ricostruire con grande precisione la storia evolutiva delle galassie di diversi tipi morfologici e masse (Gavazzi et al. 2006, 2008, Boselli & Gavazzi 2006, Bressan et al. 2006, Di Serego Alighieri et al. 2007, Haines et al. 2007). Inoltre, questo approccio rende possibile lo studio delle diverse condizioni fisiche del mezzo interstellare ed il loro effetto sull'evoluzione

In questi anni è stata poi completata la Wide-Field Nearby galaxy-cluster Survey (WINGS, Fasano et al. 2006), un progetto per la maggior parte italiano che ha raccolto dati wide-field e profondi in bande ottiche (U,B,V) e near-IR, dati spettroscopici e imaging  $H\alpha$  per galassie in 77 ammassi a basso  $z$  selezionati in X. Come legacy survey, tutti i dati e i loro prodotti vengono resi pubblici. Il database consente lo studio dettagliato delle proprietà galattiche (popolazioni stellari, morfologie, masse ecc) in funzione delle proprietà dell'ammasso, in un ampio range di masse galattiche, luminosità X e masse dei clusters e densità locale. Sulla base di questi dati si è potuto stabilire la forte dipendenza dei parametri del Piano Fondamentale delle galassie ellittiche dalla densità locale (D'Onofrio et al. 2008), e quantificare l'evoluzione da spirali a S0s negli ultimi Gyr in funzione della massa del cluster, trovando che l'evoluzione morfologica avviene anche, e soprattutto, nei clusters di bassa massa (Poggianti et al. 2009b).

Inoltre sappiamo che la gran parte della massa dell'Universo oggi si trova in gruppi, dove interazioni, accrescimento ed eventi di coalescenza per tutta la storia dell'universo possono essere fattori fondamentali nel forgiare le proprietà di una larga frazione delle galassie che osserviamo nell'universo locale. La comunità italiana è specializzata nello studio delle proprietà X per lo studio della popolazione stellare evoluta nelle galassie sia ellittiche che spirali, principalmente in ambienti poco densi (da gruppi poveri e totalmente isolate). La combinazione di dati Chandra, XMM-Newton, GALEX, con dati ottici, radio, e IR ha permesso una misura del mezzo intergalattico in gruppi dinamicamente giovani e disturbati, rivelando la presenza di emissione X del mezzo interstellare, di bassa brillantezza superficiale, di almeno un ordine di grandezza più bassa di quella misurata in gruppi più evoluti (Trinchieri et al. 2008b, 2005, Rampazzo et al. 2006). Il confronto tra l'alone X e quello ottico ha dimostrato come sia possibile "costruire" l' alone, con il contributo del gas prodotto dalle galassie e poi tolto per "stripping" con effetti mareali o di violenti shock. Fenomeni di perdita di massa per effetti di stripping sono risultati evidenti in gruppi più massicci e dinamicamente più evoluti.

### **Studi ad alto redshift**

La forte partecipazione italiana alle grandi surveys spettroscopiche profonde, in particolare VVDS e COSMOS/zCOSMOS, ha permesso agli astronomi italiani di analizzare le proprietà delle galassie in funzione della densità locale in ambienti a bassa densità fino a  $z=1.5$ . Questi comprendono l'analisi della relazione colore-densità delle galassie e il suo establishment a  $z=1.5$  (Fig. 5.9, Cucciati et al. 2006), e la caratterizzazione di un supercluster a  $z=0.7$  in COSMOS e relativo studio della relazione morfologia-densità (Guzzo et al. 2007).

Se le grandi surveys spettroscopiche includono solo rare strutture massicce, uno studio di ammassi e, in modo omogeneo, di gruppi e di galassie di campo è possibile a partire da surveys di ammassi. Si è trovato che l'evoluzione della frazione di galassie star-forming tra  $z=0.8$  e  $z=0$  dipende fortemente dall'environment (Fig. 5.10, Poggianti et al. 2006), e si è stabilita l'evoluzione della relazione formazione stellare-densità locale e morfologia-densità in ammassi, e lo stretto collegamento tra le due (Poggianti et al. 2008). Si è scoperto che l'incidenza di galassie post-starburst a redshift 0.4-0.8 è particolarmente alta negli ammassi più massicci e in un sottocampione

dei gruppi di bassa dispersione di velocità, ed è molto più bassa in altri gruppi di simile dispersione, nei gruppi più poveri e nel campo (Poggianti et al. 2009a).

Questi ultimi anni hanno anche visto un dibattito sull'evoluzione delle galassie rosse e deboli di ammasso, e sul conseguente build-up della sequenza rossa di ammasso a basse luminosità. Una serie di studi ha trovato un deficit di galassie rosse deboli in ammassi lontani rispetto agli ammassi dell'Universo locale, indicativo di un downsizing della formazione stellare che viene interrotta a redshifts più bassi in galassie più deboli (De Lucia et al. 2007, Stott et al. 2007). Altri studi trovano invece che l'abbondanza di galassie rosse in ammasso non dipende dal redshift (cioè evolve meno dell'errore di misura) fino a masse pari a 1/20 di  $M^*$ , e che malgrado il grande scatter presente nei dati, la non-evoluzione non dipende dalla massa dell'ammasso considerato (Andreon 2008, Andreon et al. 2008). Un'analisi approfondita di database omogenei in un ampio range di ambienti sarà necessaria per stabilire la dipendenza del build-up della sequenza rossa dal redshift, dalla massa galattica e dall'ambiente.

Infine, lo studio di overdensities fino a  $z = 1.6$  ha beneficiato di studi italiani basati sull'imaging, come alternativa alla spettroscopia per identificare strutture massicce e misurare densità locali significative con i redshifts fotometrici. Le strutture identificate usando per esempio il catalogo fotometrico GOODS-MUSIC nel Chandra Deep Field South mostrano proprietà galattiche diverse da quelle di campo, e permettono l'utilizzo delle surveys multi banda profonde per la scoperta di ammassi lontani (Castellano et al. 2007, Trevese et al. 2007).

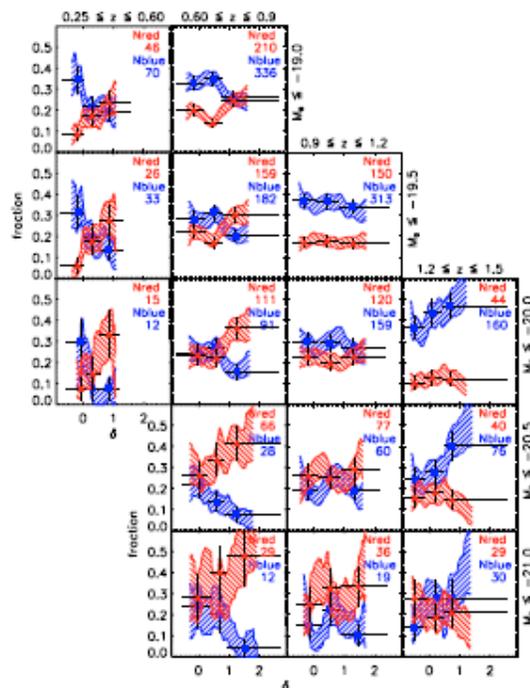


Fig. 5.9 Andamento della frazione di galassie più rosse e più blu in funzione del contrasto di densità e della luminosità assoluta galattica in banda B per diversi intervalli di redshift tra  $z=0.2$  e  $z=1.5$  dalla VVDS (Cucciati et al. 2006). Esiste una forte relazione colore-densità (la frazione di galassie rosse aumenta con la densità) per una luminosità galattica fissata ai redshifts più bassi, mentre la relazione progressivamente scompare a redshifts più alti: l'attività di formazione stellare viene confinata progressivamente col tempo in galassie di luminosità più bassa e ambienti meno densi.

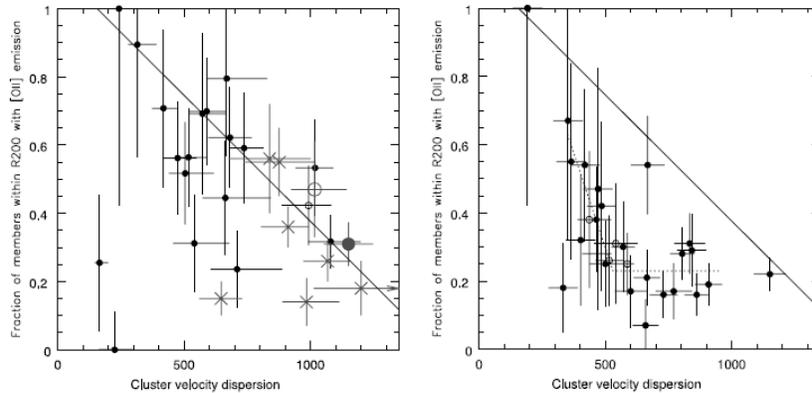


Fig. 5.10 Evoluzione della frazione di galassie con formazione stellare attiva da  $z=0.4-0.8$  (sinistra) all'Universo locale (destra), in funzione della dispersione di velocità (quindi della massa) dell'ammasso/gruppo a cui appartengono (Poggianti et al. 2006). La frazione aumenta tra il 20% e il 50%. In media, l'ampiezza dell'evoluzione dipende fortemente ma non linearmente dalla massa del sistema, ed è più pronunciata negli ammassi di piccola massa (500 km/s).

### 4.3. Programmi internazionali dei prossimi 1-3 anni

La tabella presenta solo i principali progetti internazionali con partecipazione italiana.

<i>Nome</i>	<i>PI</i>	<i>Nazioni/Istituti</i>	<i>Part. italiana</i>	<i>Scopo e Durata</i>
UltraDeep and Extended UltraDeep VIMOS VLT Deep Surveys (UD-VVDS & EUD-VVDS) – 2 ESO Large Programs	O. LeFevre	OMP, Toulouse, LAM, IAP, Genevre, MPE, ITALIA	IASF-Mi, OABr, OABo, IRA	Estensione della VVDS a $z>1.5$ su una larga area – 2006-2010
Cosmic Evolution Survey (COSMOS)	N. Scoville	Caltech, IfA, MPE, ESO, MPI heidelberg, Arizona, ETHZ, Marsiglia, Ehime Univ., ITALIA	OABo, OARm, Univ. Bo, OABr, Univ.Pd, OAPd, IASF-Mi	Formazione ed evoluzione delle galassie, in particolare in funzione dell'ambiente



<i>Nome</i>	<i>PI</i>	<i>Nazioni/Istituti</i>	<i>Part. italiana</i>	<i>Scopo e Durata</i>
zCOSMOS ESO Large Program	S.Lilly	ETHZ, LAM, ESO, IfA, Caltech, CNRS Toulouse, MPE Garching, harvard, Berkeley, IAP, Univ. Bonn, ITALIA	OABr, OABo, IASF-Mi, Univ. Pd, Univ. Bo, OARm	Campagna spettroscopica di COSMOS a $z=0-3.5$ . 2005-2009
HeViCS - Herschel Virgo Cluster Survey – Herschel Open Time Key project	J.I. Davies	Cardiff(6),ITALIA A(9) e altri	OAAr, IRA, Univ.Roma2, Univ.Bicocca	Emissione da polvere in galassie dei diversi tipi e ICM, funzioni di luminosità FIR/submm, 2009-??
LOFAR Extragalactic surveys (LOFAR key project)	Olanda	Olanda, Germania, UK, Francia e Svezia, ITALIA	IRA, OACa, OARm	Radio galassie ad altissimo redshift; galassie star-forming a redshift medio-alto; AGN a medio redshift 2009-2012
e-MERGE (e-MERLIN galaxy Evolution Legacy Survey)	T. Muxlow	Inghilterra,Olanda , Francia, Germania, Italia, Giappone, Stati Uniti, Corea del Sud, Spagna, ITALIA	IRA, Univ. Bo	Formazione ed evoluzione galassie con formazione stellare e AGN fino a $z\sim 5$ . 2009-2012
MASSIV – Mass assembly Survey with SINFONI in VVDS – ESO Large Program	T. Contini	OMP FR, Toulouse, LAM, ITALIA	IASF-Mi, OABo	Proprietà dinamiche di galassie star-forming a $z=1-2$ – 2006-2010
IMACS – Cluster Building Survey	A. Dressler	Carnegie - ITALIA	OAPd	Spettroscopia a grande campo di ammassi lontani 2006-



<i>Nome</i>	<i>PI</i>	<i>Nazioni/Istituti</i>	<i>Part. italiana</i>	<i>Scopo e Durata</i>
LoCuSS (Local Cluster Substructure Survey)	G. Smith	UK, USA, Australia, Cina, Giappone, Francia, Germania, ITALIA	Univ. Tor Vergata	Studio della relazione tra la struttura degli ammassi e l'evoluzione delle galassie e del gas ICM 2009-
KIDS (Kilo Degree Survey) + VIKING (VISTA Kilo Degree Infrared Galaxy Survey)	Konrad Kuijken (KIDS), Will Sutherland (VIKING)	Leiden, Groningen, MPE/USM, Bonn Univ., IAP, London Imperial, Cambridge, Edinburgh Observatory, ITALIA	OACn	Struttura degli aloni galattici con weak lensing e relazione fra proprieta' delle galassie e ambiente 2009?-
PN.S elliptical galaxy survey	N. Douglas	Groningen, MPE, Leiden, Nottingham, MtStromlo, ITALIA	OACn, OATo, Univ. Napoli	Cinematica stellare estesa di galassie early-type utilizzando Nebulose Planetarie -2002-
KINGFISH (Key Insights on Nearby Galaxies: Far InfraRed Survey with Herschel)	R.C. Kennicutt	UK, Francia, Germania, Olanda, Canada, USA, ITALIA	OAAr	Emissione da polvere e gas ionizzato in un campione rappresentativo di galassie, 2009-2012
Next Generation Virgo cluster Survey (NGVS)	L. Ferrarese	Canada, France, USA, UK, China, Chile, ITALIA	Univ. Bicocca	CFHT imaging (u,g,r,i,z) di 100 gradi quadrati in Virgo fino a brillanze superficiali >27 mag/arcsec <sup>2</sup> . 2008-2013



#### 4.4. *Programmi finanziati dei prossimi 1-3 anni con PI in Italia*

<i>NOME</i>	<i>PI</i>	<i>ISTITUTI</i>	<i>FONDI</i>	<i>PERIODO</i>
ACCESS (A Complete CEnsus of Star formation in the Shapley Supercluster) – Dati GALEX, 2.2m, Spitzer, UKIRT, WiFeS, 6dF, AAOmega	P Merluzzi	OACn, Univ. Birmingham, Univ. Durham, Australian National University	FP7 (IRSES, International Research Staff Exchange Scheme)	2009-2012
A systematic mid-infrared study of early-type galaxies with Spitzer - Dati Spitzer e multiwavelength	A. Bressan	OAPd, OATs, INAOE, Puebla, Mexico	ASI - COFIS	2008-2010
VVDS/zCOSMOS : measuring the joint evolution of galaxies and the large scale structure	G. Zamorani	OABo, IASF-Mi, OABr	PRIN-INAF 2007	2008-2010
IR studies of clusters of galaxies from $z=0$ to $z=3$	B.M. Poggianti	OAPd, OATs, OARm	ASI - COFIS	2008-2010
Probing the nature of UltraLuminous X-ray sources	L. Zampieri	OAPd, Univ.Pd, OABr, U. Bicocca	PRIN-INAF 2007	2008-2010
A deep VLT and LBT view of the early universe: the physics of high redshift galaxies (ESO Large program “A deep infrared view of the early Universe: exploiting the unique capabilities of HAWK-I to explore the reionization epoch” + LBT program “Large Scale Structures and Supernovae at high redshift in the COSMOS field”)	A. Fontana	OARm, OATs, OAPd, OABo, OAAr, NOAO, Lick	PRIN-INAF 2007	2008-2009
Morphology of massive early-type galaxies at $z>1.2$	M. Longhetti	OABrera	ASI/COFIS	2008-2010



<i>NOME</i>	<i>PI</i>	<i>ISTITUTI</i>	<i>FONDI</i>	<i>PERIODO</i>
The stellar mass and obscured star formation harbored by red galaxies	P. Saracco	OABrera	ASI/COFIS	2008/2009

#### **4.5. Altri programmi con PI in Italia non finanziati al momento della stesura del Piano triennale**

<i>NOME</i>	<i>PI</i>	<i>ISTITUTI</i>	<i>PERIODO</i>
VIMOS Public Extragalactic Redshift Survey (VIPERS) - ESO Large program 423 hrs con VIMOS@VLT	L. Guzzo	OABr, IASF-Mi, OABo, IRA, Uni-BO, Uni-RM3, OATs MPE Garching, LAM Marseille, IAP Paris, Univ. Lyon, ICC Portsmouth, ROE Edinburgh, Kopernicus Inst. Warsaw, STScI Baltimore	2008-2011
High-resolution SINFONI+AO tomography of z=2 star-forming galaxies: witnessing the growth of disks and bulges – ESO Large Program: VLT 300hrs	A. Renzini	OAPd, OABo, IASF, OATS, Non-INAF: UniBO, CEA-Saclay, MPG-MPE, ETHZ, ESO, IAP.	2009-2011
X-Shooter GTO Programs on “High-z galaxies and AGNs”	A. Cimatti	OABo, OAPd, OAAr, OARm,	2009-2011
HI gas in galassie in funzione di massa galattica e environment dalla survey Arecibo ALFALFA (PI ALFALFA Giovanelli)	G.Gavazzi & S. Di Serego-Alighieri	Univ. Bicocca, OAAr, OARm	

-2005

#### **4.6. Bello e impossibile?**

Da più parti si auspica l'assegnazione di fondi di ricerca per la riduzione e interpretazione dei dati presi con telescopi da terra o dalla spazio. I gruppi che hanno ricevuto tempo di osservazione alle maggiori facilities nazionali e internazionali dovrebbero poter contare su un budget di ricerca garantito in base al tempo di osservazione. Questo meccanismo permetterebbe di essere competitivi rispetto a colleghi all'estero ai quali tali fondi sono garantiti e, soprattutto, consentirebbe agli astronomi italiani di progettare e condurre ricerche anche su grande scala. L'attuale carenza e



incertezza sulla disponibilità di risorse minano infatti la possibilità di condurre a termine progetti di ampio respiro.

La comunità extragalattica è cosciente delle grandi potenzialità di LBT in questo campo, con l'utilizzo delle camere ottiche a grande campo, l'arrivo degli spettrografi infrarossi e degli altri strumenti. Un utilizzo efficiente del telescopio, però, richiede una rapida attivazione di una struttura di coordinamento e gestione del tempo italiano (25% del totale), incaricata di organizzare il service observing, le pipelines, le proposte di osservazione, la distribuzione dei dati ecc.

A livello mondiale è riconosciuto l'estremo interesse per lo sviluppo di uno spettrografo a grande campo con modalità multiplex capace di fornire simultaneamente migliaia di spettri su un campo >1.5 gradi quadri, per condurre large surveys a telescopi ottici di 8 metri. Tale strumento consentirebbe un avanzamento significativo nello studio delle galassie lungo una grande frazione della storia dell'Universo, per la determinazione dell'equazione di stato della Dark Energy e per lo studio della struttura e della formazione della nostra Galassia e del gruppo Locale. La realizzazione di uno strumento del genere è allo studio da parte di vari paesi e strutture internazionali, ed è lo scopo di un working group di Astronet. L'Italia è in grado di farsi promotrice e di giocare un ruolo di primissimo piano nello sviluppo e nell'utilizzo scientifico di uno strumento del genere, come già evidenziato durante l'incontro nazionale sulla spettroscopia a grande campo tenutosi a Roma ad ottobre 2008. I prossimi tre anni saranno cruciali per questo processo, ed è necessario che in Italia si attivino i processi per poterne essere parte attiva. Più a lungo termine, altre facilities per surveys spettroscopiche profonde che sono attualmente in fase di studio potranno essere utilizzate (ad esempio lo spettrografo OPTIMOS per E-ELT), talvolta condotte con leadership italiana (come il satellite EUCLID-NIS).

#### **4.7. Utilizzazione delle grandi strutture nazionali ed internazionali**

Un elenco non esaustivo delle strutture osservative più utilizzate è riportato qui di seguito:

Telescopi ottici/IR: VLT, LBT, TNG, WHT

Telescopi submm/mm/radio: VLA, IRAM, APEX, GMRT, ATCA, e-MERLIN, EVN, WSRT

Satelliti ottici e IR: HST, Spitzer, AKARI

Satelliti X/Gamma ray: Chandra, XMM-Newton, SWIFT, Fermi/GLAST

Satelliti UV: GALEX

Facilities future: ALMA, Herschel, E-ELT, JWST, LOFAR, EVLA, SRT, SKA

#### **BIBLIOGRAFIA**

Andreon 2008, MNRAS, 386, 1045

Andreon et al. 2008, MNRAS, 385, 979

Annibali et al. 2007, A&A, 463, 455

Baldry et al. 2006, MNRAS, 373, 469

Bell et al. 2007, ApJ, 663, 834

Biscardi et al. 2008, ApJ, 678, 168

Boselli & Gavazzi, 2006, PASP, 118, 517

Bouwens et al. 2007, ApJ, 670, 928

Bouwens et al. 2008, ApJ, 686, 230

Bressan et al. 2006, ApJL, 639, L55



Calzetti et al. 2007, ApJ, 666, 870  
Cantiello et al. 2007, ApJ, 662, 940  
Cassata et al., 2007, ApJS, 172, 270  
Castellano et al., 2007, ApJ, 671, 1497  
Cimatti et al. 2006, A&A, 453, L29  
Cimatti et al. 2008, A&A, 482, 21  
Clemens et al. 2006, MNRAS, 370, 702  
Clemens et al. 2009, MNRAS, 392, L35  
Cowie et al. 1996, AJ, 112, 839  
Cucciati et al., 2006, A&A, 458, 39  
Daddi et al. 2007, ApJ, 670, 156  
De Lucia et al. 2007, MNRAS, 374, 809  
Di Serego Alighieri et al. 2005, A&A, 442, 125  
Di Serego Alighieri et al., 2006, ApJ, 647, L99  
Di Serego Alighieri et al. 2007, A&A, 474, 851  
D'Onofrio et al. 2008, ApJ, 685, 875  
Fasano et al. 2006, A&A, 445, 805  
Fontana et al. 2006, A&A, 459, 745  
Forster Schreiber et al. 2006, ApJ, 645, 1062  
Garilli et al. 2008, A&A, 486, 683  
Gavazzi & Scodreggio 1996, A&A, 312, L29  
Gavazzi et al. 2006, A&A, 446, 839  
Gavazzi et al. 2008, A&A, 482, 43  
Genzel et al. 2008, ApJ, 687, 59  
Grazian et al. 2006a, A&A, 449, 951  
Grazian et al. 2006b, A&A, 453, 507  
Grazian et al. 2007, A&A, 465, 393  
Guzzo et al. 2007, ApJS, 172, 254  
Haines et al. 2007, MNRAS, 381, 7  
Hopkins & Beacom 2006, ApJ, 651, 142  
Kauffmann et al., 2003, MNRAS, 341, 54  
La Barbera et al., 2008, ApJ, 689, 913  
LeFevre et al. 2005, Nature, 437, 519  
Longhetti et al. 2005, MNRAS, 357, L40  
Longhetti et al. 2007, MNRAS, 374, 614  
Maiolino et al. 2008, A&A, 488, 463  
Mannucci et al. 2008, IAU Symp. 255, p.106  
Napolitano et al. 2009, MNRAS in press  
Pentericci et al. 2007, A&A, 471, 433  
Poggianti et al. 2006, ApJ, 642, 188  
Poggianti et al. 2008, ApJ, 684, 888  
Poggianti et al. 2009a, ApJ, 692 in press  
Poggianti et al. 2009b, ApJL, accepted  
Pozzetti et al. 2007, A&A, 474, 443  
Raimondo et al. 2005, AJ, 130, 2625  
Rampazzo et al. 2006, MNRAS, 368, 851  
Salimbeni et al. 2008, A&A, 477, 763  
Saracco et al. 2005, MNRAS, 357, L40



- Saracco et al. 2006, MNRAS, 367, 349  
Saracco et al. 2009, MNRAS in press astro-ph 0810.2795  
Scoville et al. 2007, ApJS, 172, 38  
Stott et al. 2007, ApJ, 661, 95  
Trevese et al. 2007, A&A, 463, 853  
Trinchieri et al. 2005, A&A, 444, 697  
Trinchieri et al. 2008a, ApJ, 688, 1000  
Trinchieri et al. 2008b, A&A, 484, 195  
White et al. 2005, A&A, 444, 365  
Zucca et al. 2006, A&A, 455, 879

## 5. AGN E BUCHI NERI SUPERMASSICCI E LA LORO CONNESSIONE CON LE GALASSIE OSPITI

Preparato da Alessandro Marconi, con il contributo di A. Comastri, D. Dallacasa, R. Della Ceca, V. d'Odorico, F. Fiore, G. Giovannini, M. Giroletti, K.-H. Mack, G. Matt, N. Menci, A. Pizzella, M. Polletta, A. Rifatto, G. Risaliti, P. Tozzi, F. Vagnetti

### 5.1. Background scientifico a livello internazionale

Una delle più importanti scoperte degli ultimi anni è stata quella delle strette relazioni che intercorrono tra la massa dei buchi neri supermassicci (BH,  $M_{\text{BH}} \sim 10^6 - 10^{10} M_{\text{sun}}$ ), presenti nei nuclei di molte (se non tutte) le galassie normali nell'Universo locale, e i parametri strutturali degli sferoidi delle galassie ospiti (quali la massa, la luminosità e dispersione di velocità della componente stellare). L'esistenza di tali relazioni mostra come i processi di accrescimento responsabili della crescita ed evoluzione del buco nero centrale influenzino in modo rilevante l'evoluzione della galassia ospite. I Nuclei Galattici Attivi (AGN), che rappresentano tutti quei fenomeni legati alla crescita dei BH, non sono soltanto sorgenti in condizioni fisiche estreme ma costituiscono una fase fondamentale nell'evoluzione delle galassie. A tale riguardo si parla spesso di *co-evoluzione* di BH e galassie. Questo nuovo approccio ha portato, se non alla fusione, a un grosso interscambio tra le comunità che studiano gli AGN e quelle che studiano l'evoluzione delle galassie. Un esempio concreto è rappresentato dalle grandi survey X-ottiche-infrarosse in fase di svolgimento che vedono la stretta collaborazione tra studiosi di nuclei galattici attivi ed evoluzione di galassie.

Grazie a questo interscambio, gli studi osservativi e teorici compiuti negli ultimi anni stanno cominciando a fornire un quadro generale coerente della co-evoluzione BH-galassie.

Le correlazioni fra la massa del buco nero ed i parametri strutturali degli sferoidi hanno permesso di stimare la quantità di BH presenti nell'universo locale. L'ottimo accordo tra le stime della

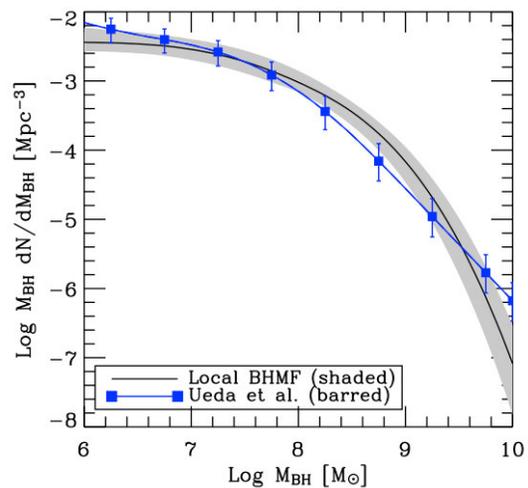


Figura 6.1. Confronto tra la funzione di massa dei BH nell'universo locale (linea continua spessa, l'area grigia rappresenta le incertezze) e quella attesa dagli AGN.

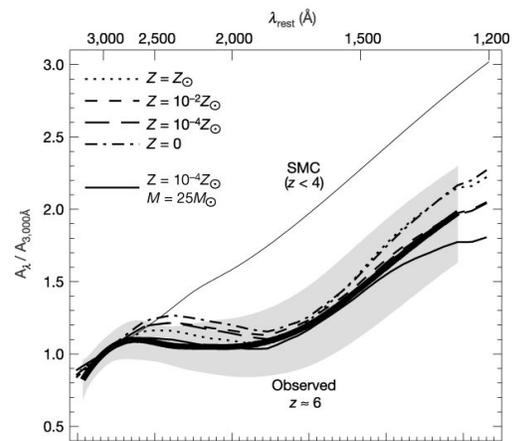


Figura 6.2. Confronto tra la curva di estinzione del quasar SDSS1048+46 a  $z \sim 6$  (linea continua spessa; l'area grigia rappresenta le incertezze) e quelle della polvere prodotta nei resti di supernova calcolate per varie abbondanze degli elementi.

funzione di massa calcolata per i BH nelle galassie vicine e quella ottenuta dall'integrazione della funzione di luminosità degli AGN (Fig. 6.1) porta a concludere che tutte le galassie abbiano attraversato una fase attiva durante la quale il BH ha accresciuto massa in modo efficiente e a tassi presumibilmente vicini al limite di Eddington. Attualmente, tramite misure ad alta risoluzione spaziale con Hubble Space Telescope (HST) o osservazioni con ottiche adattive da telescopi di 8-10 m, si cerca di aumentare in numero ed accuratezza le misure di  $M_{\text{BH}}$  nell'universo locale per affinare le relazioni BH-galassia. Contemporaneamente è stato iniziato lo studio dell'evoluzione col redshift ( $z$ ) delle relazioni BH-galassia per vincolare la loro origine. Risultati preliminari sembrano indicare un "ritardo" nella crescita della galassia rispetto ai BH che, ad alto  $z$ , hanno una massa 3-6 volte superiore rispetto a quanto avviene nell'universo locale dove  $M_{\text{BH}}/M_{\text{bulge}} \sim 10^{-3}$ . La scoperta di un numero elevato di quasar a redshift  $z \sim 5-6$ , avvenuta grazie alla Sloan Digital Sky Survey (SDSS), ha mostrato l'esistenza di un problema di cui al momento non si conosce la soluzione. Questi quasar di alta luminosità hanno BH di grossa massa,  $M_{\text{BH}} \sim 10^9 - 10^{10} M_{\text{sun}}$  (circa 0.01-0.1 della massa della galassia ospite), abbondanze di elementi superiori a quelle solari e mostrano la presenza di grosse quantità di polvere (Fig. 6.2). A quei redshift elevati è trascorso meno di 1 miliardo di anni dal big bang, un tempo apparentemente insufficiente sia per far crescere i BH, che per formare i metalli e la polvere. L'indicazione osservativa che la polvere in questi quasar può essere prodotta dalle supernovae oltre a fornire una soluzione al problema indica come nell'universo primordiale siano rilevanti altri processi fisici rispetto a quanto avviene localmente.

Una comprensione approfondita della co-evoluzione BH-galassia richiede un censimento accurato della popolazione di AGN, e in particolare della componente oscurata, per determinare la sua evoluzione cosmologica e la relazione con l'evoluzione cosmologica delle galassie. Lo strumento principe al momento disponibile per un censimento accurato degli AGN è costituito dalle survey in banda X dura (2-10 e 5-10 keV) condotte con Chandra e XMM, sia perché gli emettitori X ad un certo livello di luminosità sono AGN, sia perché i raggi X consentono di ridurre al minimo gli effetti di selezione dovuti all'oscuramento. In quest'ottica rivestono particolare importanza i recenti risultati ottenuti grazie alle grandi survey X con i satelliti XMM e Chandra combinate anche con survey ottiche (SDSS) e infrarosse (con il satellite Spitzer). In particolare, si è trovato che la densità spaziale e di energia degli AGN luminosi (quasars) raggiunge un massimo a  $z \sim 2-3$  e decresce rapidamente, mentre gli oggetti meno luminosi (Seyfert) mostrano un picco a redshift più bassi e un'evoluzione cosmologica meno marcata (Fig. 6.3). Tali andamenti sono, almeno qualitativamente, molto simili a quelli osservati per le galassie di grande e di piccola massa rispettivamente e che vengono comunemente indicati con il termine *Downsizing*. Tuttavia, è ben noto che le survey X non sono in grado di fornire un censimento completo della popolazione di AGN. Lo studio dell'emissione del fondo cosmico in banda X ed i relativi modelli di sintesi hanno sempre mostrato come debba esistere una popolazione di AGN oscurati anche attorno a 10 keV (i cosiddetti AGN Compton-thick) che quindi non possono

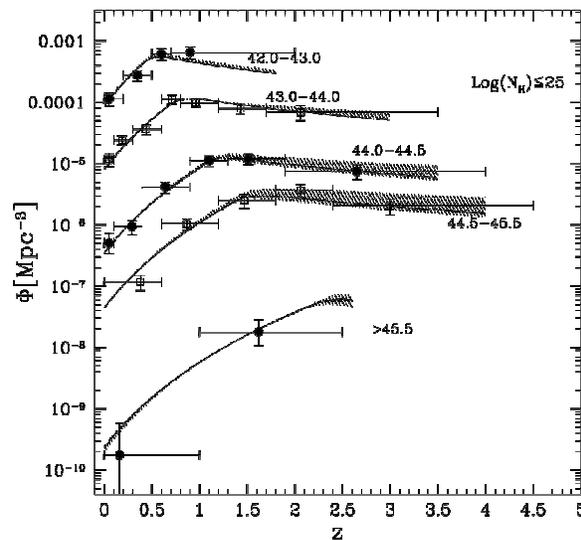


Figura 6.3. Evoluzione differenziale della funzione di luminosità degli AGN in banda X (2-10 keV).



essere identificati con le survey condotte con Chandra e XMM. Nell'Universo locale qualche progresso è stato recentemente compiuto con le survey ad energie maggiori di 10 keV compiute con INTEGRAL e SWIFT/BAT. Tuttavia ai flussi X al momento raggiungibili ( $\sim 10^{-11}$  erg cm<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>) poco più di una dozzina di *bona fide* Compton-thick AGN sono stati rivelati oltre 10 keV. A questo riguardo riveste particolare rilevanza la possibilità emersa negli ultimi anni di rivelare AGN Compton-thick anche nel medio infrarosso (IR). Survey condotte col satellite Spitzer hanno mostrato come sorgenti selezionate per le loro proprietà nel medio IR e, talvolta, nel radio costituiscono una popolazione di AGN mancante dalle survey X, molto probabilmente quella dei Compton-thick. Pertanto, sono attualmente in corso survey in cui si combinano osservazioni X con quelle nel medio IR allo scopo di individuare e censire gli AGN Compton-thick.

Un'altra linea di ricerca molto attiva riguarda la comprensione dei processi fisici negli AGN locali (in gran parte descritta nella parte del PT 2009-2011 "Physics of Accretion and Ejection"), e la relazione tra gli AGN ed i fenomeni di intensa formazione stellare (starburst).

Il modello generalmente accettato per gli AGN prevede che la radiazione primaria sia emessa da un disco di accrescimento (in ottico/UV) e da una corona di gas caldo (raggi X). Tale emissione è assorbita/riflessa/riprocessata da gas e polvere circumnucleari distribuiti nella "Broad Line Region" (BLR, larghezza delle righe osservata > 1000 km/s), "Narrow Line Region" (NLR, < 1000 km/s), ed in un "toro" oscurante. Talvolta, è presente un getto di plasma relativistico osservabile principalmente nel radio grazie alla sua emissione di sincrotrone. Il modello di unificazione prevede che gli AGN di tipo 2 (quelli in cui non si osservano le righe larghe della BLR nello spettro) siano intrinsecamente identiche a quelli di tipo 1, ma osservati attraverso un materiale otticamente spesso che nasconde le parti più interne, incluse le BLR. Recenti osservazioni di variabilità X hanno confermato questo modello, soprattutto per quanto riguarda la compattezza della sorgente X. Tuttavia, sono anche state rivelate delle sorgenti che, pur non mostrando le righe larghe, non mostrano segni di assorbimento nei raggi X, in contrasto con il modello unificato.

Recentemente è stato suggerito che l'attività radio degli AGN, apparentemente ristretta al 10% della popolazione, caratterizzi una fase a bassa emissione di radiazione ma ad alto rilascio di energia cinetica nell'ambiente circum-nucleare. Durante questa fase transiente il nucleo attivo potrebbe avere un notevole *feedback* sulla galassia ospite. Gli obiettivi classici della radioastronomia quali lo studio della dicotomia *radio-quiet radio-loud* e della formazione dei getti si possono quindi inserire nell'ambito della problematica più ampia della co-evoluzione BH-galassia. Lo studio sistematico delle radiosorgenti giovani, con età stimata dalle dimensioni del getto radio ed inferiori ad alcuni milioni di anni, è un tassello indispensabile per la comprensione del fenomeno della radioemissione. Nelle radiosorgenti giovani sono state misurate notevoli velocità trasversali dei getti che fanno pensare a fenomeni di precessione dell'asse dell'AGN e sono state riscontrate asimmetrie nell'emissione radio legate alle difficoltà di propagazione in ambienti molto densi. Tali fenomeni possono aiutare a comprendere l'inizio del feedback dell'AGN sulla galassia ospite. Riguardo al processo di formazione ed evoluzione dei getti, le osservazioni ad altissima risoluzione angolare stanno vivendo un periodo di forte sviluppo grazie all'estensione dei VLBI (Very Long Baseline Interferometry) ad alta frequenza (millimeter VLBI) e alla disponibilità di antenne per osservazioni dallo spazio (Space VLBI), che permettono di raggiungere risoluzioni dell'ordine della decina di micro-secondi d'arco. In particolare, risultati recenti mostrano come alla base dei getti radio siano presenti strutture di velocità trasversali al getto stesso e come le velocità di lancio non siano fortemente relativistiche, presupponendo una successiva fase di accelerazione. L'alta risoluzione angolare ottenuta con il millimeter VLBI ha anche permesso misurare il diametro intrinseco dell'emissione attorno al BH al centro della nostra galassia. Tale diametro risulta essere inferiore a quello atteso sulla base dei modelli teorici.



A parte gli andamenti globali delle popolazioni di AGN e galassie, lo stretto legame tra accrescimento sui BH e formazione stellare nelle galassie è stato confermato a livello dei singoli oggetti. In particolare, l'analisi di decine di migliaia di AGN e galassie dalla SDSS ha mostrato come nell'universo locale, gli AGN si trovino preferibilmente in galassie massicce di tipo *early type* caratterizzate da popolazioni stellari più giovani rispetto alle galassie normali. Osservazioni IR condotte dal satellite Spitzer hanno poi mostrato come i quasar più luminosi siano associati ad una intensa attività di formazione stellare e, parallelamente, come le galassie più luminose e con i tassi di formazione stellare più elevati (ULIRG, *Ultra Luminous IR Galaxies*, e *Scuba galaxies*) abbiano al loro interno AGN molto luminosi anche se non dominanti l'emissione globale.

Un approccio complementare allo studio delle proprietà delle galassie ospiti è costituito dalla determinazione delle abbondanze degli elementi presenti nella galassia stessa per capire la relazione dal punto di vista evolutivo che lega accrescimento sui BH e formazione stellare. La maggior parte di questi studi utilizza le righe in emissione (dalla BLR o dalla NLR) osservate negli spettri di quasar o radio galassie ad alto redshift. Tali studi hanno mostrato come le abbondanze rimangano pressoché costanti e molto maggiori di quelle solari fino ai redshift più alti, ponendo il problema di come questi metalli abbiano avuto il tempo di formarsi. Un approccio alternativo si basa sull'utilizzo delle righe in assorbimento strette associate al quasar. L'analisi delle righe in assorbimento è più semplice rispetto a quella delle righe in emissione poiché le abbondanze si ricavano direttamente dalle densità di colonna misurate. Anche in questo caso sono state trovate abbondanze superiori a quelle solari anche se non ai livelli di quelle della BLR.

Un'altra indicazione della relazione tra AGN galassie ospiti è data dai fenomeni di *outflow* che rappresentano un modo possibile in cui si può manifestare il feedback dell'AGN. Una delle manifestazioni più spettacolari è riscontrabile nei BAL (Broad Absorption Line Quasars) che rappresentano il 10-20% di tutti i quasar. Dall'analisi degli spettri si osservano venti con velocità fino a  $\sim 0.2c$ . Questo fenomeno è ancora poco conosciuto e, in particolare, non è ancora chiara la sua origine anche se studi recenti, indicano come il fenomeno BAL possa rappresentare una fase nell'evoluzione dei quasar.

Infine, la grande mole di osservazioni necessita di una altrettanto grande lavoro teorico volto ad interpretare le osservazioni stesse ed a comprendere i processi fisici alla base delle relazioni tra BH e galassie ospiti. Grazie a simulazioni N-body e idrodinamiche alquanto sofisticate è stato possibile iniziare a quantificare la rilevanza dei fenomeni di "feedback" in grado di auto-regolare i processi di accrescimento e di formazione stellare e la loro evoluzione con il tempo cosmico nonché rendere conto di diverse proprietà osservative di AGN e delle loro galassie ospiti su di un ampio intervallo di redshift e luminosità. In particolare, si è visto come proprio l'effetto del feedback possa portare ad una spiegazione fisica del fenomeno del *Downsizing* di galassie ed AGN, grazie al fatto che oggetti meno massicci si trovano in buche di potenziale gravitazionale meno profonde e quindi la loro formazione ed evoluzione è ritardata dagli effetti di feedback che tendono a bloccare sia la formazione stellare che l'accrescimento sul BH.

#### **HIGHLIGHTS:**

- Accordo tra la funzione di massa dei BH nelle galassie vicine e quella dei *fossili* di AGN ovvero ottenuta dall'integrazione della funzione di luminosità degli AGN (Marconi et al. 2004; Shankar et al. 2004; Merloni 2004).
- Quasars a  $z \sim 6$  ( $t < 1$  Gyr dopo il Big Bang) con abbondanze molto al di sopra di quelle solari e grosse quantità di polvere; possibilità che la polvere sia stata prodotta dalle onde d'urto delle prime supernovae (Maiolino et al. 2004a, 2004b).



- *Downsizing* degli AGN dall'evoluzione differenziale delle funzioni di luminosità con il redshift (Fiore et al. 2003; La Franca et al. 2005), AGN Compton-thick rivelati con Spitzer dalla loro emissione nel medio IR (Daddi et al. 2007; Fiore et al. 2008a, 2008b; Tozzi et al. 2006) combinati nei modelli di sintesi del fondo X (Gilli, Comastri & Hasinger 2007).

## 5.2. **Ricerche in Italia svolte negli ultimi 3-5 anni**

La comunità italiana che studia i Nuclei Attivi è molto numerosa e attiva scientificamente come dimostrato dai convegni nazionali sugli AGN che, con scadenza biennale, sono giunti nel 2008 alla ottava edizione (si veda al riguardo il sito del congresso svoltosi a maggio 2008 a Torino<sup>1</sup>) e hanno sempre visto una partecipazione attiva di un centinaio di ricercatori teorici e osservativi in tutte le bande (radio, submm, infrarosso, ottico, X).

Come già ampiamente descritto nel PT 2006-2008, la determinazione dei processi fisici alla base della formazione ed evoluzione di AGN e del loro ruolo nel contesto più ampio della formazione ed evoluzione delle galassie rappresenta una sfida impegnativa per la ricerca astrofisica e viene perseguita dai più importanti gruppi di ricerca nel panorama internazionale, fra i quali diversi gruppi in Italia che hanno raggiunto nel corso degli ultimi anni una competenza e una visibilità internazionale di valore assoluto. Nel PT 2006-2008, relativamente alle problematiche descritte in questo documento, si identificavano le seguenti priorità:

- *Fisica ed evoluzione di AGN da surveys multi-frequenza e backgrounds cosmici.*
- *Studio della fisica degli AGN radio loud e radio quiet mediante osservazioni multi-frequenza.*
- *Sistemi di assorbimento in quasars.*

La ricerca svolta negli ultimi anni ha dato seguito alle priorità previste dal piano triennale ma si è anche adeguata alle nuove tendenze raggiungendo risultati di assoluta rilevanza.

**Proprietà dei buchi neri supermassivi.** Lo studio delle masse dei buchi neri molto massicci, delle loro relazioni con le proprietà strutturali delle galassie ospiti, la determinazione della loro funzione di massa ed, in generale, di un loro censimento nell'universo locale ed ad alto redshift sono stati perseguiti da gruppi di INAF (OAAr, OAPd) ed Università (Firenze, Padova, Sissa). Sono state effettuate misure delle masse dei BH in galassie nell'universo locale studiando l'affidabilità dei metodi diretti (Marconi et al. 2006; Coccatto et al. 2006; Pastorini et al. 2007; de Francesco et al. 2006, 2008; Della Bontà et al. 2008). Si è mostrato come, misure più indirette di massa dei BH, le cosiddette masse viriali, possano essere soggette a errore se non viene tenuta in considerazione la pressione di radiazione da parte del nucleo attivo (Marconi et al. 2008). Si è studiato le relazioni tra la massa del BH, le proprietà della galassia ospite e la sua evoluzione col redshift (Marconi & Hunt 2003; Pizzella et al. 2005; Labita et al. 2006; Beifiori et al. 2008). Infine si è determinata la funzione di massa dei BH nell'universo locale e se ne è studiata l'evoluzione cosmologica mostrando come i BH trovati nelle galassie locali sono consistenti coll'essere i resti di nuclei attivi (Marconi et al. 2004; Shankar et al. 2004; Tundo et al. 2007).

**Origine dei getti e dell'emissione radio.** Nell'ambito dello studio delle proprietà fisiche dei Nuclei Galattici Attivi in banda radio tramite osservazioni ad altissima risoluzione angolare (VLBI) l'Italia ha una riconosciuta leadership nel campo dello studio degli AGN di bassa potenza radio, difficilmente osservabili, ma che sono la classe dominante fra gli AGN rivelati nella banda radio.

---

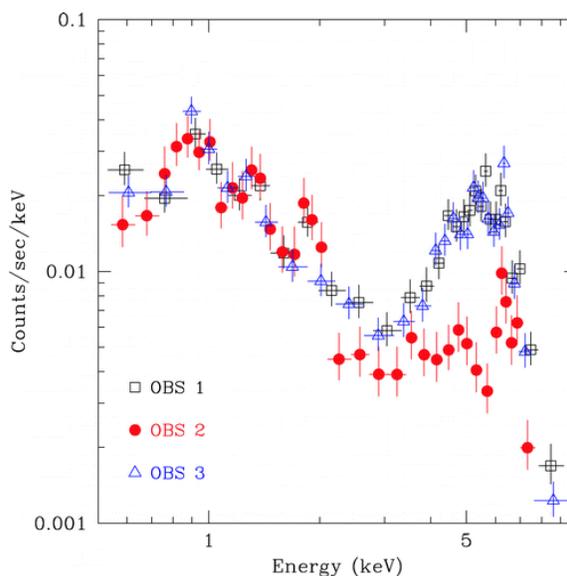
<sup>1</sup> <http://agn8.oato.inaf.it>



Il gruppo di INAF (IRA) e Università (Bologna) è particolarmente attivo in questo campo. E' stata effettuata l'analisi delle regioni più interne del getto, lo studio della struttura del campo di velocità e la connessione con i getti su grande scala (Giroletti et al. 2004, 2008). Sono state caratterizzate le proprietà fisiche e si è verificato il modello unificato in campioni di oggetti di bassa luminosità radio come BL Lacs e radio galassie (Giroletti et al. 2004, 2006; Giovannini et al. 2005, 2007). Sono state individuate diverse sorgenti con evidenza di attività radio intermittente nel tempo (Jamrozny et al. 2007; Saripalli & Mack 2007) e la radiosorgente più giovane nota con un'età approssimativa di 50 anni (Orienti & Dallacasa, 2008), che mostra moti laterali compatibili con una precessione rapida dell'asse del getto radio. Vink et al. (2006) hanno mostrato che l'emissione radio delle sorgenti giovani è più efficiente rispetto a quella delle altre sorgenti radio. Infine, sempre nell'ambito delle sorgenti giovani, sono in fase di studio i BAL radio loud e da mappe VLA e si è giunti alla conclusione che questi oggetti hanno caratteristiche simili a quelle delle radio sorgenti giovani, trovando evidenze per il feedback contemporaneamente nelle bande ottica e radio.

**Struttura circumnucleare, BLR e NLR.** Studi di variabilità spettrale nei raggi X (da XMM-Newton, Chandra, e Suzaku) condotti su galassie di Seyfert da ricercatori INAF (OAAr) hanno rivelato variazioni dell'assorbimento della radiazione X su tempi scala da alcune settimane fino a poche ore (Fig. 6.4) permettendo di misurare le dimensioni della sorgente X (dell'ordine di pochi raggi gravitazionali); determinare la struttura altamente disomogenea dell'assorbitore X; misurare la distanza e le proprietà fisiche di tale assorbitore (ciò ha permesso di identificarlo con le nubi della BLR; Risaliti et al. 2007, 2008).

La variabilità ottica fornisce un potente mezzo per selezionare AGN di bassa luminosità in modo complementare a quanto fatto con le survey di cui sopra. In particolare, la variabilità su tempi scale brevi (dell'ordine di mesi-anni) è una caratteristica che distingue gli AGN dai normali fenomeni stellari, grazie alla compattezza della regione di emissione. Gruppi di ricercatori universitari (La Sapienza e Tor Vergata) hanno condotto survey con XMM di campi osservati ripetutamente nell'ottico ed hanno selezionato AGN di bassa luminosità con basso rapporto X/ottico grazie alla loro variabilità (Trevese et al. 2007, 2008). La ricerca di AGN grazie alla loro variabilità è stata anche estesa per utilizzare dati di survey dedicate alla ricerca di supernove ottenendo il più grande campione di AGN selezionato su questa base (Trevese et al. 2008).



**Highlight 6.4.** Eclissi della sorgente X (AGN) in NGC 1365 che nell'arco di ~4 giorni passa da Compton-thin (OBS 1,3) a Compton-thick (OBS 2)

Lo studio della variabilità ottica delle righe larghe (reverberation mapping) fornisce anche la possibilità di stimare la massa viriale dei BH. A questo riguardo è in corso una campagna per il reverberation mapping di quasar di alta luminosità (Trevese et al., 2007).

Contrariamente a quanto previsto dal modello unificato per gli AGN, esistono alcune galassie Seyfert 2 che non mostrano alcun oscuramento della sorgente centrale ma una genuina mancanza della BLR. Ricercatori universitari (Roma 3) hanno organizzato una campagna di osservazioni simultanee X-ottiche per studiare questa classe di oggetti scoprendo che, almeno un oggetto, NGC



3147, mostra un'effettiva assenza simultanea di BLR e di oscuramento X (Bianchi et al. 2008): questo oggetto è al momento l'unica Seyfert 2 "vera", priva di BLR in aperta violazione del modello unificato.

**Proprietà delle galassie ospiti e relazione con l'AGN.** Un'intensa attività di formazione stellare (*starburst*) e un'attività nucleare, in genere oscurata, sono l'origine dell'intensa emissione infrarossa osservata nelle Galassie Infrarosse Ultraluminose (ULIRG) nell'universo vicino e ad alto redshift come chiaramente messo in evidenza da indagini spettroscopiche in banda X con XMM-Newton che hanno coinvolto ricercatori universitari (Padova) ed INAF (OABr, OAAr, OATs) (Braitto et al., 2003; Franceschini et al. 2003; Braitto et al. 2004; Persic et al. 2004). Un gruppo di ricercatori di OAAr ha sviluppato una tecnica di analisi basata su spettri infrarossi nell'intervallo 3-10 micron, ottenuti con l'osservatorio spaziale Spitzer e con telescopi della classe 8m (VLT, Subaru). Tale metodo ha permesso una separazione precisa dei contributi AGN e starburst nelle ULIRG locali, anche in casi in cui l'attività nucleare è pesantemente oscurata e/o energeticamente secondaria rispetto allo starburst, e non è rivelabile in alcuna altra banda spettrale (Risaliti et al. 2006; Nardini et al. 2008).

Lo scopo principale dello studio delle abbondanze chimiche e delle proprietà della polvere nei quasar è quello di capire la relazione dal punto di vista evolutivo fra quasar, buchi neri super massicci e le galassie che li ospitano. La maggior parte di questi studi utilizza le righe in emissione (dalla BLR o dalla NLR) osservate negli spettri di quasar o di altri AGN ad alto  $z$ . In questo ambito, ricercatori di INAF (OAAr, OARm) e Università (Firenze) hanno effettuati studi che mostrano come le abbondanze degli AGN siano legate alla luminosità ma rimangono assolutamente costanti col redshift, senza mostrare alcuna evoluzione cosmologica come ci si aspetterebbe dai modelli di evoluzione chimica delle galassie (Nagao, Marconi & Maiolino, 2006; Nagao, Maiolino & Marconi, 2006; Maiolino et al. 2004a). E' stato poi mostrato come la polvere dei quasar a più alto redshift si sia potuta formare durante l'esplosione delle prime supernove (Maiolino et al. 2004b).

Un approccio alternativo si basa sull'utilizzo delle righe in assorbimento strette (Narrow Absorption Lines, NAL) associate al quasar. Ricercatori INAF (OATs) hanno stimato le abbondanze chimiche in vari quasars a redshift  $z \sim 2.5$  tramite spettri ad alta risoluzione ottenuti con VLT; gran parte degli oggetti mostrano abbondanze simili o superiori a quelle solari con segni di formazione stellare passata di breve durata e molto intensa ad alti redshift, in accordo con i modelli di formazione congiunta di QSO e galassie ellittiche massicce (D'Odorico et al. 2004; Gabel et al. 2006).

**Modelli di co-evoluzione di galassie e AGN.** La comprensione dei processi fisici alla base delle relazioni BH-galassia richiede lo sviluppo di modelli che includano la descrizione dell'accrescimento di buchi neri supermassivi e della corrispondente fase di AGN in una teoria cosmologica di formazione delle galassie. Attualmente, lo sforzo internazionale in tal senso si dirige essenzialmente verso i modelli semi-analitici e le simulazioni a N-corpi. I modelli semi-analitici sviluppati presso INAF (OARm, OATs) e Università (Trieste, SISSA) costituiscono in questo contesto uno strumento teorico allo stato dell'arte che è basato su una profonda sinergia con ricercatori attivi in campo osservativo ed interpretativo (Menci et al. 2006, 2008a, 2008b; Granato et al. 2004; Fontanot et al. 2006).

**Fisica ed evoluzione cosmologica degli AGN.** Lo studio dei processi fisici alla base della formazione e co-evoluzione di buchi neri, AGN e galassie necessita di osservazioni su tutto l'arco dello spettro e.m. e costituisce quindi l'obiettivo scientifico alla base dei più importanti programmi osservativi di survey in banda X con successivo follow-up ad altre lunghezze d'onda. In questo ambito, è attiva da almeno un decennio una vasta collaborazione che include ricercatori di INAF (OABo, OARm, OAAr, OATs, OABr, IASF-Mi) e Università (RomaTre, Firenze). Questa



collaborazione è nata attorno ai progetti HELLAS (una survey di grande campo che utilizzava i dati ad alta energia di BeppoSAX), HELLAS2XMM (una survey di circa 1.5 gradi quadrati effettuata con XMM tra 2 e 10 keV, caratterizzata da una percentuale del 70% di sorgenti X identificate spettroscopicamente) e XMM Bright Survey (una survey di ~28 gradi quadrati nelle bande 0.5-4.5 e 4.5-7.5 keV, limitata a flussi brillanti e con un'alta percentuale di identificazioni spettroscopiche, ~95%). Questa collaborazione ha poi incluso attività su altri campi come SWIRE (ELAIS-S1) e sul catalogo delle sorgenti XMM (denominato 2XMM). Oltre ai programmi X menzionati sopra, la collaborazione ha in corso programmi di osservazione con VLT, Keck, LBT e Spitzer per la determinazione del redshift delle controparti deboli delle sorgenti X e infrarosse e per la loro caratterizzazione (contributo nucleare, contributo stellare, venti). La collaborazione inoltre sta attivamente sfruttando gli archivi esistenti di dati sui campi COSMOS/CDFS per un'accurata caratterizzazione su tutto lo spettro elettromagnetico delle galassie con nucleo attivo. La collaborazione persegue anche attività nel campo della modellistica e dell'interpretazione dei dati, tramite il confronto delle osservazioni con le predizioni di modelli semianalitici e numerici sviluppati presso INAF (OARm, OABo) e Università (Bologna, Trieste). Tra i risultati principali raggiunti negli ultimi anni si ricordano: la definizione di un campione statisticamente rappresentativo di sorgenti X brillanti (Della Ceca et al. 2004; Caccianiga et al. 2008), la stima della funzione di luminosità locale degli AGN Compton-thick (Della Ceca et al., 2008), la determinazione della funzione di luminosità degli AGN selezionati nell'X a  $z > 3$  (Brusa et al. 2009), la scoperta della correlazione tra frazione di AGN oscurati e redshift (La Franca et al. 2005), un'analisi dettagliata delle proprietà X ed ottiche degli AGN "otticamente elusivi" (Caccianiga et al. 2007), la scoperta di una popolazione di AGN altamente assorbiti nel CDFS e nel campo COSMOS tramite selezione infrarossa e fotometria X (Daddi et al. 2007; Fiore et al. 2008a, 2008b; Tozzi et al. 2006) ed il modello di sintesi del background X (Gilli, Comastri & Hasinger 2007).

Infine, combinando i dati multi frequenza ottenuti da molte surveys internazionali (XMM-LSS/SWIRE/CFHTLS/UKIDSS/VVDS) è stato possibile caratterizzare la distribuzione spettrale di energia dai raggi X al medio IR di un campione di AGN selezionato nei raggi X duri e determinare come le proprietà ottiche ed IR correlino con quelle X in funzione della luminosità e del redshift (Polletta et al. 2007).

#### **HIGHLIGHTS:**

- Eclissi della sorgente X in NGC 1365 da parte di nubi della BLR che permette di misurare le dimensioni della sorgente X e le proprietà dell'assorbitore (Risaliti et al. 2007; 2008);
- Galassia Seyfert 2 "genuina": NGC 3147 mostra assenza simultanea di BLR e di oscuramento X in contrasto col modello unificato (Bianchi et al. 2008);
- Velocità trasversali alla base dei getti radio: il getto si forma da una regione che comprende le parti più interne del disco di accrescimento, ed è caratterizzato da componenti rotazionali della velocità (Giroletti et al. 2008).

### **5.3. Programmi di attività nei prossimi 1-3 anni a livello internazionale**

Di seguito si elencano le caratteristiche principali e l'obiettivo scientifico primario dei più importanti programmi di attività a livello internazionale. Altre caratteristiche sono elencate nella tabella seguente.

**COSMOS (XMM-COSMOS, Chandra-COSMOS).** Survey basata su un Treasury Project con HST copre un'area di circa 2 gradi quadrati e include osservazioni con i più grandi telescopi e dallo spazio inclusi Chandra e XMM (vedi XMM-COSMOS e Chandra-COSMOS). L'obiettivo



scientifico primario riguarda lo studio della formazione ed evoluzione di galassie e AGN in funzione del redshift e della struttura su larga scala.

**Chandra Deep Field South (CDFS-Chandra, CDFS-XMM).** Il CDFS che include parte della survey GOODS è oggetto di surveys profonde in tutte le bande dello spettro elettromagnetico ed in particolare nella banda X mediante osservazioni ultraprofonde con Chandra (2 Msec) e più recentemente con XMM -Newton (1.3 Msec). L'obiettivo scientifico principale riguarda la ricerca e lo studio degli AGN estremamente oscurati e Compton-thick, la ricerca di quasar ad alto redshift e lo studio dell'emissione X di galassie con alto tasso di formazione stellare. Il progetto CDFS-XMM vede un contributo dominante della comunità italiana (il PI è italiano) costituisce al momento il programma che ha ottenuto la maggior quantità di tempo di osservazione con XMM (1.3+1.6 Msec) in due sole AO.

**SWIRE (Spitzer Wide Area Infrared Extragalactic survey).** Survey multi frequenza di 49 gradi quadrati divisi in sei campi effettuata con Spitzer e con telescopi a terra per osservazioni ottiche e radio. L'obiettivo scientifico principale è lo studio dell'evoluzione di galassie e AGN fino a  $z \sim 2$ .

**XMDS (XMM-Newton Medium Deep survey).** Analisi multi-frequenza, dall'ottico ai raggi X, di un campione di AGN selezionato in X. L'obiettivo scientifico è quello di determinare come la distribuzione di energia spettrale degli AGN evolve in funzione della luminosità e quanto questa dipenda dalla luminosità relativa dell'AGN e della galassia ospite e dall'assorbimento, e quantificare il tasso di formazione stellare in diversi tipi di AGN.

**Chandra-SWIRE.** Analisi delle proprietà multi frequenza di AGN selezionati in X e radio con l'obiettivo di studiare l'influenza della radiazione dell'AGN e dell'energia meccanica dei getti radio sulla galassia ospite.

**OABrera/XMM-SSC.** Ricerca e studio delle sorgenti con alto rapporto tra emissione ottica e X; studio delle Spectral Energy Distributions degli AGN assorbiti e non assorbiti appartenenti alla XMM-Bright Survey con dati XMM, Galex, SDSS e Spitzer. Studio di fattibilità per la ricerca di AGN Compton-thick dal catalogo 2XMM. Parte di queste ricerche sono condotte in collaborazione con la XMM Survey Science Center (SSC), un consorzio internazionale di 10 centri di ricerca istituito dall'ESA di cui OABr fa parte; all'interno della collaborazione XMM-SSC OABr è responsabile della XMM Bright Survey.

Nome	PI	Nazioni/Istituti	Part. Italiana	Finanziamento	Durata
COSMOS	N. Scoville	Caltech, IfA, MPE, ESO, MPI Heidelberg, Arizona, ETH Zurigo, Marsiglia, Ehime Univ, ITALIA	INAF (vedi survey XMM-COSMOS e Chandra-COSMOS).		2003 -
XMM-COSMOS	G. Hasinger	collaborazione COSMOS	OABO, OARm, Bologna Univ. (interpretazione dei dati X, correlazioni multifrequenza)	PRIN-MUR 2006 e ASI (Analisi dati di proprietà)	
Chandra-COSMOS	M. Elvis	collaborazione COSMOS	OABO, OARm, Bologna Univ. (Analisi dei dati X, produzione, gestione del catalogo)	PRIN-MUR 2006 e ASI (Analisi dati di proprietà)	
CDFS-Chandra	W.N. Brandt	Penn State, Columbia, Duhram, ESO, MPE, ITALIA	OABO, OATs, OARm, Bologna Univ. (spettroscopia profonda in banda X, confronto con modelli di sintesi del background X, ricerca e studio di AGN Compton-thick, proprietà della riga del ferro).	ASI (Analisi dati d'archivio)	2005--
CDFS-XMM (2.9 Msec di osservazioni in 2 AO)	A. Comastri <u>ITALIA</u>	ITALIA, MPE, ESO, Penn State	OABO, OARm, OATs (gestione e coordinamento del progetto, conteggi profondi in banda hard (> 5 keV), ricerca e caratterizzazione su multifrequenza di AGN oscurati)	Attualmente NON finanziato	2007--
SWIRE	C. Lonsdale	HSC/USA, NRAO/USA, UK, Germania, Francia, Spagna, ITALIA	IASF-Mi, Padova Univ. (studio degli AGN, nei campi con osservazioni X, e follow-up nel millimetrico di starburst e AGN ad alto redshift .)	ASI (Cosmologia delle Strutture formate)	2003--
Chandra-SWIRE	M. Polletta (XMM), B. Wilkes (Chandra)	ITALIA, USA	IASF-Mi		2005--
XMDS	M. Pierre	Francia, Belgio, ITALIA	IASF-Mi, OABr	ASI (Studio Alte Energie)	2003--
OABrera / XMMSSC	R. Della Ceca	UK, Francia, Spagna, Germania, ITALIA	OABr	PRIN-MUR 2006 e ASI (Analisi dati di archivio; Cosmologia delle Strutture formate)	2003-



#### 5.4. *Programmi di attività nei prossimi 1-3 anni a livello Italiano*

Nome	PI	Istituti	Finanziamento	Durata
Studio delle proprietà degli sferoidi a dei buchi neri supermassicci: il legame tra materia oscura, attività nucleare e formazione stellare.	A. Pizzella	Univ. Padova, OAPd	INAF 2006 PRIN	09/2006 09/2008
Unveiling the connection between nuclear activity and galaxies formation and evolution	A. Capetti	OATo, Univ. Bologna, IRA, SISSA	INAF 2006 PRIN	09/2006 03/2009
The demography, physics and evolution of super-massive black holes	G. Setti	OABo, Univ. Bologna, OAAr, Univ. Firenze, OARm, Univ. RomaTre, OABr	MIUR 2006 PRIN	02/2007 02/2009
The census, evolution and physics of highly obscured AGN	F. Fiore	OABo, Univ. Bologna, OAAr, Univ. Firenze, Univ. RomaTre	ASI (Alte Energie)	03/2007 03/2010
Study of the mid-infrared properties of obscured AGN	P. Severgnini	OABr	ASI (Cosmologia e Strutture formate)	03/2007 03/2010
Light in the Darkness: unveiling obscured accretion using the 2XMM catalog	R. Della Ceca	OABr	ASI (Analisi dati d'archivio)	04/2007 04/2009
L'ambiente intorno al buco nero nelle Galassie Attive Anomale.	G. Matt	Univ. Roma 3	Azione Integrata Italia Spagna 2007	07/2007 07/2009
The evolution of obscuration and of star formation in high redshift AGN	R. Maiolino	OABo, OARm	ASI (Cosmologia e Strutture formate)	05/2008 05/2010
AGN activity in infrared luminous objects at high-z	M. Polletta	IASF-Mi, OABr	ASI (Alte energie)	2008 2010
Mining multi-wavelength surveys to investigate AGN feedback and evolution	M. Polletta	IASF-Mi, OABr	ASI (Alte energie)	2008 2010



I barioni diffusi nella storia S. Borgani Univ. Trieste, OATs MIUR PRIN 11/2008  
dell'Universo 2007 11/2010

I progetti non finanziati ma in fase di avvio/svolgimento e non inclusi tra le collaborazioni internazionali e italiane elencate sopra sono indicati in appendice.

### **5.5. Progetti importanti ma non realizzabili al momento**

Benché non sia stata ricevuta nessuna indicazione di progetti importanti non realizzabili al momento è evidente che i livelli di finanziamento attuali sono quasi del tutto insufficienti a mantenere il livello di eccellenza internazionale conseguito fino ad ora e a portare a termine i progetti in corso. In particolare, si ritiene opportuno ricordare che la competizione internazionale in questo settore è molto forte e che in assenza di un adeguato supporto istituzionale e finanziario, che sia costante e sicuro nel tempo, è pressoché impossibile assumere la leadership di grandi progetti internazionali.

### **5.6. Utilizzazione delle grandi strutture nazionali ed internazionali**

- Telescopi ottico/IR classe 4m: TNG, WHT, ESO/NTT (studi spettroscopici di sorgenti singole, identificazione di candidati AGN da survey)
- Telescopi ottico/IR classe 8m: ESO/VLT, Keck (studi spettroscopici di sorgenti singole, identificazione di candidati AGN da survey)
- Satelliti IR: Spitzer (oggetti singoli e survey)
- Satelliti X: Chandra, XMM-Newton, SWIFT, Suzaku (oggetti singoli e survey)
- Telescopi submm/radio: Noto, , VLA, VLBA, IRAM, Effelsberg 100m, WSRT, MERLIN, EVN (osservazioni sorgenti singole e survey) e, a partire dal 2010, il Sardinia radio telescope (SRT).

### **BIBLIOGRAFIA**

Beifiori et al. 2008, ApJ, in press (arXiv:0809.5103)  
Bianchi et al. 2008, MNRAS, 385, 195  
Braitto et al., 2003, A&A, 398, 107  
Braitto et al., 2004, A&A, 420, 79  
Brusa et al. 2009, ApJ, in press (arXiv:0809.2513)  
Caccianiga et al. 2008, A&A, 477, 735  
Caccianiga et al. 2007, A&A, 470, 557  
Coccatto et al. 2006, MNRAS, 366, 1050  
Daddi et al. 2007, ApJ, 670, 173  
D'Odorico et al. 2004 MNRAS, 351 976  
de Francesco et al. 2006, A&A, 460, 439  
de Francesco et al. 2008, A&A, 479, 355  
Della Bontà et al., 2008, ApJ, 690, 537  
Della Ceca et al. 2004, A&A, 428, 383  
Della Ceca et al. 2008, A&A, 487, 119  
Fiore et al. 2003, A&A, 409, 79  
Fiore et al. 2008a, ApJ, 672, 94



Fiore et al. 2008b, ApJ, in press (arXiv:0810.0720)  
Fontanot et al. 2006, MNRAS, 373, 1173  
Franceschini et al., 2003, MNRAS, 343, 1181  
Gabel et al., 2006, ApJ, 646, 742  
Gilli, Comastri & Hasinger 2007, 463, 79  
Giovannini et al. 2005, ApJ, 618, 635;  
Giovannini et al. 2007, 474, 409  
Giroletti et al. 2004 ApJ 600, 127  
Giroletti et al. 2006, ApJ, 646  
Giroletti et al. 2008, A&A 488, 905  
Granato et al. 2004, ApJ, 600, 580  
Jamrozy et al. 2007, MNRAS 378, 581  
La Franca et al. 2005 ApJ, 635, 864  
Labita et al. 2006, MNRAS, 373, 551  
Maiolino et al. 2004a, A&A, 420, 889  
Maiolino et al. 2004b, Nature, 431, 533  
Marconi & Hunt 2003, ApJ, 589, L21  
Marconi et al. 2004 MNRAS, 351, 169  
Marconi et al. 2006 A&A, 448, 921  
Marconi et al. 2008, ApJ, 678, 693  
Menci et al. 2006, ApJ, 647, 653  
Menci et al. 2008a, ApJ, 685, 863  
Menci et al. 2008b, ApJ, 686, 219  
Merloni 2004, MNRAS, 353, 1035  
Nagao, Maiolino & Marconi, 2006, A&A, 447, 863  
Nagao, Marconi & Maiolino, 2006, A&A, 447, 157  
Nardini et al. 2008, MNRAS, 383, L130  
Orienti & Dallacasa, 2008, A&A, 477, 807  
Pastorini et al. 2007, A&A, 469, 405  
Persic et al., 2004, A&A, 419, 849  
Pizzella et al. 2005, ApJ, 631 785  
Polletta et al. 2007, ApJ, 663, 81  
Risaliti et al. 2006, MNRAS, 365, 303  
Risaliti et al. 2007, ApJ, 659, L111  
Risaliti et al. 2008, MNRAS, in press (arXiv:0811.1594)  
Saripalli & Mack 2007, MNRAS, 376, 1385  
Shankar et al. 2004 MNRAS, 354, 1020  
Tozzi et al. 2006, A&A, 451, 457  
Trevese et al. 2007, A&A, 469, 1211  
Trevese et al., 2007, A&A, 470, 491  
Trevese et al. 2008, A&A, 477, 473  
Trevese et al. 2008, A&A, 488, 73  
Tundo et al. 2007, ApJ, 663, 53  
Vink et al. 2006, MNRAS 367, 928



## INDICE ANALITICO

	<b>2</b>	
2dFGRS		23; 33; 66
	<b>A</b>	
ACBAR		13
ACS		19
AKARI		78
ALMA		29; 51; 60; 61; 78
AMBA		13
AMI		13
APEX		13; 29; 78
ASI		14; 30; 31; 32; 35; 48; 76; 91
ASTROSIM		32; 47
ATCA		68; 78
ATIC		10; 11
	<b>B</b>	
BICEP		5
BIMA		5
Bolocam		13
BOOMERanG,		13
B-Pol		5; 8; 9; 15
BRAIN		5
	<b>C</b>	
CBI		5; 7; 13
CFHTLS		33; 88
Chandra		25; 26; 36; 44; 45; 56; 68; 70; 71; 72; 78; 82; 86; 88; 89; 92
CINECA		32; 36; 37; 48; 49; 60
CLOVER		5
CMB-Pol		5; 8
COBE		57
CODEX		47
COMBO-17		64
COSMOS		19; 23; 24; 26; 33; 36; 64; 67; 71; 73; 74; 76; 88
COSMOSOMAS		5
	<b>D</b>	
DASI		5; 7
DEEP2		64
DES		11; 29
DESTINY		11
DUEL		24; 33
DUNE		14; 34; 58
	<b>E</b>	
EBEX		5; 15
EDGE/XENIA		36; 46
E-ELT		11; 47; 51; 78
Effelsberg		92
e-MERGE		74
e-MERLIN		74; 78



ESA	6; 7; 8; 14; 15; 16; 30; 32; 34; 35; 36; 45; 89
ESO	21; 23; 29; 32; 33; 47; 59; 60; 73; 74; 76; 77; 92
ESPRESSO	47
ESSENCE	11
EUCLID	11; 14; 23; 24; 30; 32; 33; 34; 35; 58; 78
EVLA	78
EVN	78; 92

**G**

GALEX	66; 71; 76; 78
GLAST	11; 29; 78
GMRT	25; 68; 78
GOODS	60; 68; 72; 89
GOODS-MUSIC	60; 68

**H**

HELLAS	88
HELLAS2XMM	88
Herschel	35; 60; 61; 71; 74; 75; 78
HST	11; 19; 34; 36; 44; 51; 60; 78; 82; 88

**I**

IASF-Mi	31; 46; 73; 74; 76; 77; 87; 91
INTEGRAL	83
IRA	25; 27; 30; 31; 33; 48; 73; 74; 77; 86; 91
IRAM	78; 92
IRAS	57; 61
ISO	57
IXO	32; 35; 45

**J**

JDEM	30; 34; 37
JWST	51; 55; 58; 78

**K**

Keck	40; 88; 92
KIDS	24; 33; 75

**L**

LBT	34; 76; 78; 88
LCOGT	11
LOFAR	29; 36; 42; 48; 58; 60; 74; 78
LSST	11; 29

**M**

MEGACAM	21
MERLIN	92

**N**

NASA	8; 29; 30; 35; 36; 45
Noto	92
NTT	92



## O

OAAr	74; 75; 76; 77; 85; 86; 87; 91
OABo	24; 27; 30; 31; 32; 73; 74; 76; 77; 87; 91
OABr	30; 31; 32; 46; 47; 73; 74; 76; 77; 87; 89; 91
OACa	48; 74
OACn	33; 34; 75; 76
OACt	27
OAPd	30; 73; 74; 76; 77; 85; 91
OARm	32; 46; 48; 59; 73; 74; 76; 77; 87; 88; 91
OATo	27; 60; 75; 91
OATs	27; 32; 43; 45; 46; 47; 57; 59; 60; 76; 77; 87; 92
OCRA	5
OPTIMOS	78
OSIRIS	11
OVRO	5

## P

Pamela	10; 11
PanSTARRS	11
Planck	6; 7; 9; 13; 14; 15; 16; 29; 35; 42
PNS	66
PPAK	66

## Q

QMAP	5
QUaD	5
QUEST	5
QUIJOTE-CMB	6

## S

SAGACE	35
SAURON	66
Scuba	84
SDSS	18; 23; 29; 34; 40; 43; 48; 66; 69; 70; 82; 84; 89
SDSS-III	48
SHOES	11
SIMBOL-X	35
SINFONI	63; 74; 77
SKA	30; 42; 58; 78
SNAP	11
SNLS	11
SPACE	14; 34
Space VLBI	83
Spider	6
Spitzer	43; 54; 57; 60; 61; 66; 68; 71; 76; 78; 82; 84; 85; 87; 88; 89; 92
SPUD	6
SRT	78; 92
SWIFT	78; 83; 92
SWIRE	88; 89
SZA	6; 13

## T

TNG	78; 92
-----	--------

## U

UKIDSS	69; 88
UVES	43; 46



**V**

VIMOS	23; 25; 32; 33; 35; 66; 73; 77
VIPERS	23; 32; 33; 77
VISTA	33; 55; 58; 60; 75
VLA	25; 26; 60; 68; 78; 86; 92
VLBA	92
VLBI	83; 85
VLT	23; 32; 33; 36; 40; 43; 45; 46; 47; 64; 73; 76; 77; 78; 87; 88; 92
VSA	6
VVDS	23; 24; 30; 33; 62; 64; 67; 71; 72; 73; 74; 76; 88

**W**

WFI	21
WHT	78; 92
WINGS	71
WMAP	5; 6; 7; 8; 9; 14; 22; 42
WSRT	78; 92

**X**

Xenia	45
XMM	24; 26; 31; 36; 44; 45; 56; 71; 78; 82; 86; 87; 88; 89; 92
X-shooter	45; 47

**Z**

zCOSMOS	30; 33; 36; 71; 74; 76
---------	------------------------