

## 5 Cosmologia

### 5.1 VST survey

Il problema fondamentale che la cosmologia osservativa del nuovo secolo è chiamata a risolvere è la natura delle strutture che compongono l'universo: le galassie, gli ammassi di galassie, i filamenti lungo i quali gli ammassi di galassie sembrano preferibilmente formarsi, e i *voids*, le grandi regioni di bassa densità.

Durante gli ultimi venti anni un enorme progresso è stato compiuto nello studio delle regioni più dense dell'universo – i cosiddetti core degli ammassi di galassie – grazie alla disponibilità di telescopi della classe dai 4m agli 8m (e.g. VLT e Keck) e dell'HST. Dalla conoscenza delle proprietà degli oggetti in questi ambienti è stato possibile comprendere che l'epoca di prima formazione delle galassie d'ammasso risale ad almeno  $z = 2$ . Questo risultato peraltro appare ancora abbastanza circoscritto, in considerazione del fatto che i dati disponibili non permettono nemmeno di distinguere tra i due principali scenari di formazione delle galassie: il *merging* gerarchico e la formazione monolitica.

L'esplorazione sin qui condotta è limitata a particolari ambienti, quali i core degli ammassi, oppure è confinata entro distanze o aree troppo piccole per ottenere risultati veramente significativi. Esempi della attuale situazione sono la survey SDSS che, pur coprendo ben 1000 gradi quadrati di campo, riguarda distanza troppo modeste ( $z \leq 0.15$ ) per permettere lo studio di diversi aspetti dell'evoluzione, oppure gli Hubble Deep Field che, sebbene in grado di determinare proprietà fotometriche di galassie fino a grandi distanze, coprono però angoli di pochi primi d'arco.

L'insieme di VST e OmegaCam (cfr. par. 1.2) offre ora la migliore possibilità di esplorare grandi volumi di universo, grazie all'accoppiamento tra la profondità fornita da un telescopio di 2.6m di diametro, collocato nel miglior sito astronomico del mondo, e il campo di ben un grado quadrato. Sulla base di queste considerazioni l'OAC ha progettato una *survey* finalizzata ad esplorare l'universo a *redshift* tra  $z = 0.2$  e 1, allo scopo di studiare l'evoluzione delle galassie in diversi ambienti, per mezzo della distribuzione in luminosità, della relazione colore-luminosità, e delle leggi di scala.

Il progetto della *survey*, che ha visto coinvolti numerosi istituti italiani e stranieri, tra cui i P.I. olandesi di OmegaCam, quelli inglesi del telescopio VISTA e il responsabile della ESO Imaging Survey, prevede di osservare 200 gradi quadrati di cielo in cinque bande fotometriche (UBVRI), con una profondità corrispondente a  $V = 25$  mag con rapporto  $S/N=10$ . Con queste caratteristiche sarà possibile studiare le proprietà evolutive delle popolazioni stellari in galassie da  $z = 1$  fino all'epoca attuale, in ambienti che vanno dagli ammassi ricchi come quello di Coma, ai super-ammassi, ad ambienti relativamente poco densi (il campo e i *void*).

La VST *survey* permetterà di ottenere magnitudini e colori (con un'accuratezza del 5%) per 8 milioni di galassie. Si stima che possano essere classificati circa 500 ammassi di galassie di diversa ricchezza fino a  $z = 1$ , tra cui circa 30 molto ricchi (tipo Coma), e quantità progressivamente crescenti di ammassi meno ricchi. L'area campionata corrisponde ad un diametro di 300 Mpc a  $z = 0.5$ , il che permetterà di campionare la struttura su larga scala dell'universo fino a scale dell'ordine dei 60 Mpc. Oltre a costituire una base per studio delle proprietà evolutive delle galassie unica nel suo genere, la *survey* consentirà di determinare la struttura degli ammassi di galassie di diversa massa fino a  $z = 1$ , e l'evoluzione della distribuzione di luminosità dei QSO (e quindi la misura dei parametri cosmologici) fino a  $z=5$ .

Numerosissimi, poi, sono i risultati che ci si aspetta di ottenere in ambiti diversi da quello dell'evoluzione delle galassie; in particolare, per tutto ciò che riguarda gli oggetti rilevanti per lo studio della struttura della Galassia. La *survey* permetterà, per esempio, di scoprire almeno 1000 nane bianche di alone e un centinaio di nane bianche del disco. La sola rilevazione di tali oggetti permetterà di porre limiti mai prima raggiunti sulla distribuzione spaziale delle popolazioni stellari di età diverse, e quindi sullo stato evolutivo della Galassia.

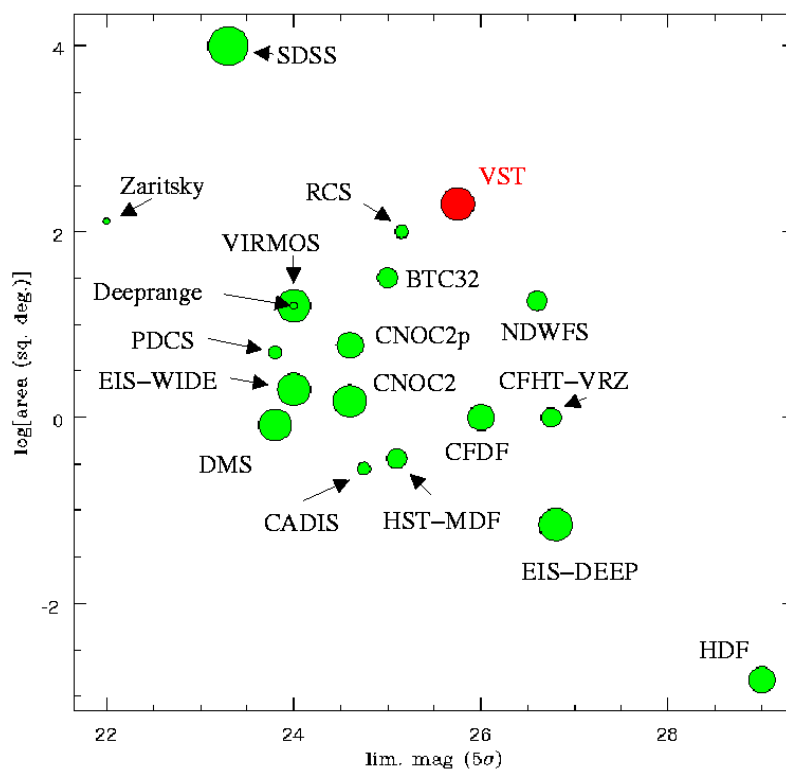


Figura 36: Distribuzione delle *survey* recentemente concluse o ancora in corso rispetto alla profondità (*ascisse*) e all'area (*ordinate*). Le dimensioni dei simboli sono proporzionali al numero delle bande fotonometriche (da 1 a 6). E' evidente come la VST *survey*, per profondità e per area, si collochi alla frontiera delle *survey* esistenti.

La grande area e la profondità della *survey* consentiranno inoltre lo studio di tutti quei fenomeni che per la loro intrinseca rarità sfuggono solitamente ad uno studio statistico o persino alla rilevazione, come il *lensing*, i corpi minori del Sistema Solare, gli oggetti rari in genere, e fenomeni transienti. In particolare, le statistiche disponibili fanno prevedere di rivelare qualche migliaio di fenomeni di *lensing* di QSO da parte di galassie interposte, permettendo non solo la misura diretta della massa di un enorme campione di galassie, ma anche di stabilire vincoli molto precisi alle costanti cosmologiche.

La *survey* prevede l'utilizzo di circa 800 ore di osservazione VST su un arco di quattro anni. Le necessità in termini di riduzione e archiviazione dei dati sono state studiate, e portano ad una stima ragionevole di due giorni di riduzione per ogni notte di osservazione. Per raggiungere questi risultati l'OAC è da tempo impegnato con altri istituti nella preparazione degli strumenti di analisi dei dati e nella risoluzione dei problemi di archiviazione.

Dal punto di vista delle risorse e del prodotto scientifico, la *survey* fornirà alla comunità italiana la più grande, omogenea, e statisticamente significativa base su cui impostare studi di cosmologia osservativa, astrofisica extragalattica, e galattica per gli anni a venire.

## 5.2 VIRMOS U *survey*

Nell'ambito del consorzio VIRMOS (cfr. Le Fevre et al. 2001, *Deep Fields*, Proc. ESO/ECF/STScI Workshop, Cristiani S., Renzini A., Williams R.E. eds., Springer 2001, p. 236), che ha in programma di ottenere i redshift di  $1.5 \times 10^5$  galassie su 18 gradi quadrati distribuiti su cinque campi, l'OAC si occupa di condurre la *survey* fotonometrica nella banda U su 16 gradi quadrati sino ad una magnitudine limite U = 24.5 AB mag (shallow *survey*) e su un grado quadrato sino a U = 26 AB mag (deep *survey*). Le osservazioni, condotte a La Silla col Wide Field Imager (8k×8k, 33'×34' FOV) del telescopio ESO-MPI da 2.2m, sono iniziate nel marzo del 1999 e proseguono tuttora.

Sono stati già osservati circa 11.5 e 0.8 gradi quadrati delle *survey shallow* e *deep* rispettivamente. Tutti i dati ottenuti sono stati ridotti, combinati assieme e calibrati fotometricamente.

Congiuntamente ai dati BVRIK disponibili nell'ambito del progetto VIRMOS, la fotometria U serve principalmente per la determinazione dei *redshift* fotometrici e per l'individuazione di candidati Ly- $\alpha$  drop-out, da osservare successivamente per via spettroscopica con VIMOS. Oltre agli scopi già citati, il gruppo OAC è poi specificamente interessato ad usare la fotometria U per l'individuazione ed il successivo studio spettroscopico di AGN con VIMOS, per lo studio di stelle galattiche peculiari calde, quali ad esempio le nane bianche, e per l'indagine morfologica quantitativa in U di galassie nell'universo vicino.

Riguardo all'ultimo punto, è stata completata un'analisi morfologica quantitativa multibanda su 66 galassie vicine ( $z < 0.1$ ). Attraverso l'uso di diagrammi concentrazione-asimmetria, è stato evidenziato un eccesso di galassie irregolari nella banda U rispetto alla banda I (figura 37). Il risultato è significativo per lo studio dell'evoluzione delle galassie. Infatti, le osservazioni ad alto redshift sono compiute precipuamente nel NIR, a cui corrisponde un rest-frame ultravioletto. Inoltre, è stato recentemente stimato che la percentuale delle galassie irregolari ad alto redshift è pari a circa il 30%, ben maggiore che nell'universo locale (4%). I risultati mostrati in figura indicano che una parte della frazione di irregolari ad alto redshift è probabilmente dovuta ad un effetto di banda (correzione K morfologica). Infine, le procedure di morfologia quantitativa adottate mostrano come la frazione di irregolari aumenti del 7% dall'infrarosso all'ultravioletto.

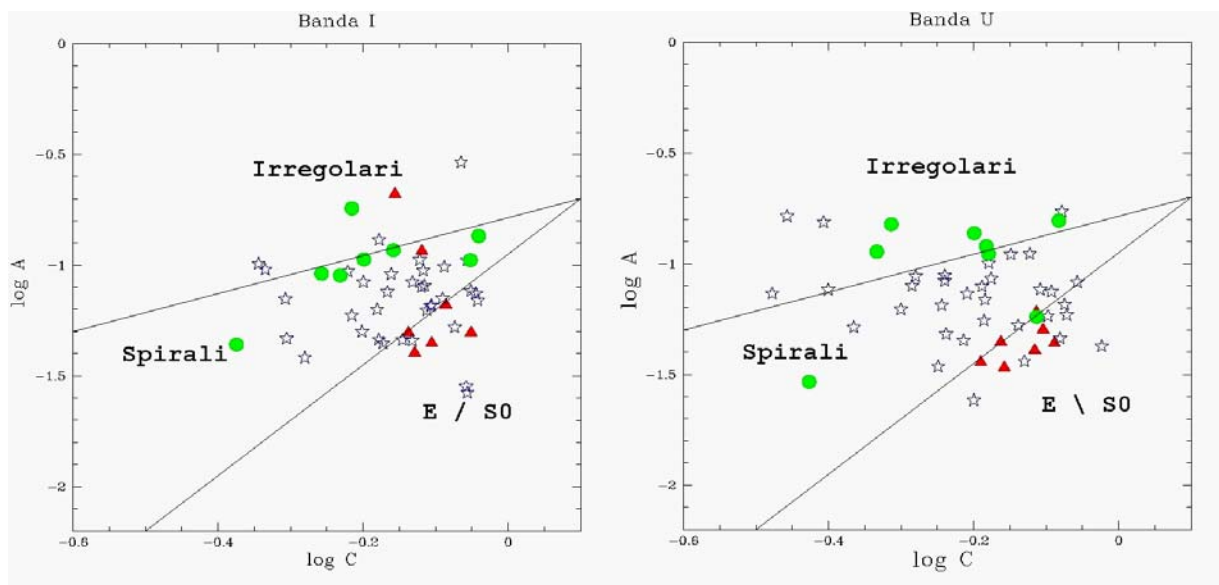


Figura 37: Diagrammi concentrazione (C)-asimmetria (A) per un campione di 66 galassie vicine nelle bande U (destra) e I (sinistra).

### 5.3 Survey della struttura a grande scala con XMM

Il progetto XMM-Large Scale Structure Survey, che vede coinvolti una quindicina di istituti (tra cui l'OAC) in oltre dieci nazioni, ha l'obiettivo primario di studiare la struttura a grande scala dell'universo fino a  $z \sim 1$ , com'essa è tracciata dagli ammassi di galassie rivelati in raggi X, in massa (attraverso il lensing gravitazionale), in S-Z e usando come traccianti gli AGN/QSO (cfr. [http://vela.astro.ulg.ac.be/themes/spatial/xmm/LSS/index\\_e.html](http://vela.astro.ulg.ac.be/themes/spatial/xmm/LSS/index_e.html)). La regione osservata – un'area connessa di 64 gradi quadri – ha una copertura estesa a diverse lunghezze d'onda: ottico (CFHT Legacy Survey, <http://www.cfht.hawaii.edu/Science/CFHLS/>, e CTIO Rz'), infrarosso (SIRFT-SWIRE Legacy Survey, <http://www.ipac.caltech.edu/SWIRE/>), banda X (XMM GTO + open time), IR vicino (in corso ora su una porzione dell'area totale, e target di una delle survey di UKIDSS, <http://www.ukidss.org/index.html>), radio, ecc.

La copertura a differenti lunghezze d'onda, oltre a consentire di studiare l'obiettivo principale della survey, ossia la struttura a larga scala, permette numerosi studi secondari, quali l'evoluzione della funzione di luminosità  $X$  degli ammassi, e della luminosità ottica delle galassie negli ammassi, lo studio dell'effetto Butcher-Oemler, l'evoluzione della omogeneità delle galassie ellittiche fino a  $z \sim 1.5$  e oltre, e altri ancora. Il progetto è attualmente in fase di analisi dei primi dati, riguardanti i primi 4 gradi quadrati.

#### 5.4 Nebulose Planetarie intracluster

Cinquant'anni fa Fritz Zwicky scoprì un eccesso di luce tra le galassie dell'ammasso di Coma. Questa luminosità intracluster è estremamente debole, appena più brillante di quella del cielo notturno. Per molto tempo la sua natura è rimasta sconosciuta, ma lo sviluppo di moderna strumentazione e di telescopi di crescente apertura offre nuove opportunità d'indagine.

In particolare, utilizzando l'ESO Wide Field Imager (una camera CCD a grande campo  $30' \times 30'$ ), un gruppo di ricercatori dell'OAC ha ottenuto immagini profonde in alcune aree "vuote" dell'ammasso della Vergine. Utilizzando tecniche particolari è stato possibile identificare, tra le molte migliaia di stelle deboli della Via Lattea e tra le galassie di sfondo, un piccolo numero di nebulose planetarie "apolidi", che non appartengono ad alcuna galassia in particolare e che sono dunque membri isolati dell'ammasso della Vergine.

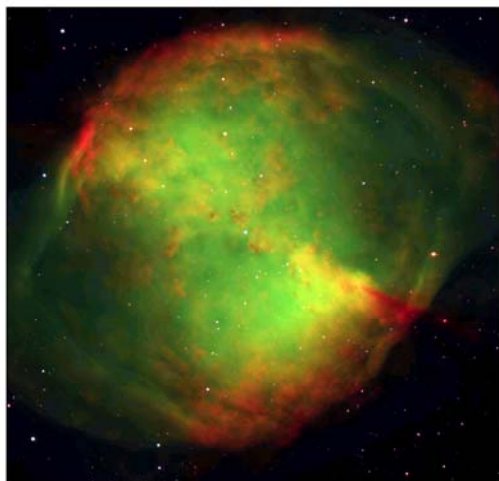


Figura 38: Nebulosa planetaria NGC 6853 (M27), ottenuta combinando immagini di VLT-UT1 + FORS1.

Nella Galassia le Nebulose Planetarie (stelle nell'ultima fase dell'evoluzione, nella quale espellono gli strati esterni in un volume di circa 1 anno-luce di diametro) possono essere osservate in grande dettaglio e forniscono splendide e suggestive immagini, come quella in figura 38. Alla distanza della Vergine, invece, esse appaiono puntiformi e possono essere identificate solo perché concentrano una gran parte della loro luce in due righe verdi dello spettro dell'ossigeno. E anche così esse appaiono estremamente deboli: l'energia ricevuta nelle righe dell'OIII corrisponde a quella di una lampadina di 60 Watt vista ad una distanza di 10 milioni di km, circa 20 volte la distanza della Luna.

Quale può essere l'origine di queste stelle apolidi? L'interpretazione che oggi appare più probabile è che siano state perse in violente interazioni tra le galassie al momento della formazione del cluster, quando le galassie erano molto più vicine l'una all'altra. Si sono già ottenuti gli spettri di alcuni di questi oggetti, da cui si può ricavare la loro velocità radiale. Quando saranno in numero sufficiente, si potrà studiare il moto di delle PN nell'ammasso e, quindi, avere informazioni ulteriori sull'origine dei misteriosi astri "senza fissa dimora". Le prime analisi suggeriscono che l'emissione totale di luce di tutte le stelle *intracluster* possa essere paragonabile alla luce delle galassie dell'ammasso: un dato di discreto interesse nel quadro delle ricerche sulla natura della *dark matter*.

Sappiamo che la funzione di luminosità delle nebulose planetarie è limitata superiormente; cioè, non esistono PN più brillanti di una certa magnitudine limite. Perciò, dalla luminosità massima di un gruppo di queste stelle è possibile stimare la loro distanza. Con gli oggetti scoperti dai ricercatori dell'OAC è dunque possibile stimare la distanza del lato dell'ammasso della Vergine che è più vicino a noi. Questa risulta inferiore del 15% a quella del centro dell'ammasso. Dunque, il Virgo cluster ha approssimativamente la forma di un sigaro con una profondità di 10 milioni di anni luce. Nuovi studi permetteranno di costruire una mappa di posizioni e velocità delle PN *intracluster* e di capire i processi di formazione degli ammassi di galassie, le più grandi strutture auto-gravitanti dell'Universo.

## 5.5 Evoluzione delle galassie

La nostra conoscenza dell'evoluzione delle galassie è basata sullo studio delle proprietà di diverse famiglie di galassie a vari *redshift*. Molte delle proprietà osservate, opportunamente parametrizzate, vengono combinate in relazioni che, come la relazione colore-magnitudine o il “piano fondamentale” per le galassie *early-type*, possono essere ora studiate su una frazione importante dell'età dell'universo.

Un gruppo di ricercatori dell'OAC ha intrapreso un programma per la ricostruzione della storia della formazione e dell'evoluzione delle galassie nell'intervallo di *redshift* tra  $z \sim 1.5$  e l'epoca attuale. L'obiettivo è perseguito

*i)* con l'acquisizione di nuovi dati fotometrici e spettroscopici (principalmente con ESO NTT e VLT) e con l'uso di dati di archivio (principalmente HST);

*ii)* con un'accurata analisi statistica e studio delle relazioni (e correlazioni) tra le quantità osservate;

*iii)* ponendo vincoli ai parametri fisici (per esempio, età, metallicità, massa) delle galassie mediante confronti dei dati con i modelli disponibili per i diversi aspetti trattati (evoluzione delle popolazioni stellari e *merging* gerarchico).

Il programma prevede anche un utilizzo intensivo dei dati che verranno dalle *survey* VST, i quali permetteranno di estendere lo studio dell'evoluzione delle galassie in tutti i tipi di ambiente e su basi statistiche estremamente solide.

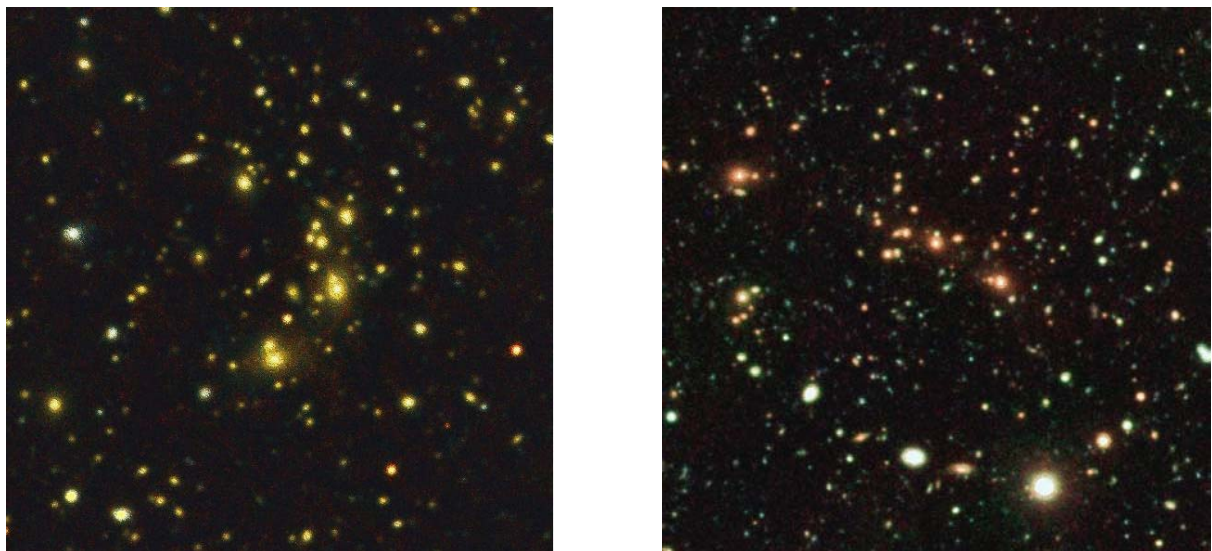


Figura 39: Immagini composite (V, R e I) della regione centrale di due degli ammassi di galassie studiati. A sinistra AC 118 a  $z = 0.31$  (NTT + EMMI; galassie gialle), a destra un ammasso scoperto dai dati della *survey* EIS a  $z = 0.64$  (VLT + FORS2; galassie rosa). I due riquadri corrispondono a regioni di  $160''$  di lato. Le dimensioni lineari ai *redshift* degli ammassi sono 0.7 Mpc e 1 Mpc rispettivamente ( $H_0 = 68 \text{ km/s/Mpc}$ ,  $q_0 = 0.2$ ).

E' previsto lo studio di galassie in diversi ambienti: da ammassi ricchi, al campo, ai *void*, e a *redshift* che vanno dall'universo locale sino a  $z \sim 1.5$ . La scelta di studiare ambienti diversi è dettata dalla necessità di conoscere la dipendenza della storia evolutiva delle galassie dall'ambiente circostante. L'intervallo di *redshift* è fissato dalle possibilità di determinare le proprietà rilevanti per il programma con gli strumenti attualmente disponibili. Una parte significativa della storia evolutiva delle galassie, inoltre, si svolge proprio in questi ultimi due terzi di vita dell'universo, in cui si formano quasi la metà delle stelle attualmente presenti; ed è su questo intervallo di *redshift* che ci si sta impegnando per misurare l'evoluzione della frazione di galassie blu negli ammassi (effetto Butcher-Oemler).

Un punto fermo del metodo è la scelta di non adottare una selezione morfologica. Oltre alle difficoltà di effettuare una robusta classificazione morfologica nell'intervallo di *redshift*

considerato, associare galassie dello stesso tipo morfologico a *redshift* diversi sarebbe in contraddizione con un quadro di evoluzione gerarchica e inquinerebbe i risultati della ricerca

### 5.6 Struttura ottica e NIR delle galassie a $z = 0.3$

L'applicazione di un nuovo algoritmo ad immagini NTT nell'ottico e nel vicino infrarosso ha permesso di determinare per la prima volta la struttura interna di un ampio ( $N = 93$ ) campione di galassie in un ammasso a  $z \sim 0.3$ .

L'algoritmo è un *fit* bidimensionale delle immagini con un modello di distribuzione di brillantezza convoluto con la PSF locale, misurata sulle stelle presenti nell'immagine stessa. Il principale pregio di questo metodo è la possibilità di misurare i parametri strutturali di galassie lontane su immagini da terra, potendo sfruttare appieno i vantaggi che alcuni strumenti, come per esempio SOFI e ISAAC, presentano rispetto a quelli a bordo di HST. Si possono ottenere misure accurate di parametri strutturali da immagini prese in condizioni ordinarie. Con un *seeing* dell'ordine di  $1''$ , per esempio, è possibile arrivare a misurare raggi efficaci dell'ordine di mezzo pixel: ciò implica con la capacità di determinare da terra i raggi efficaci di galassie distanti fino a  $z \sim 1$ .

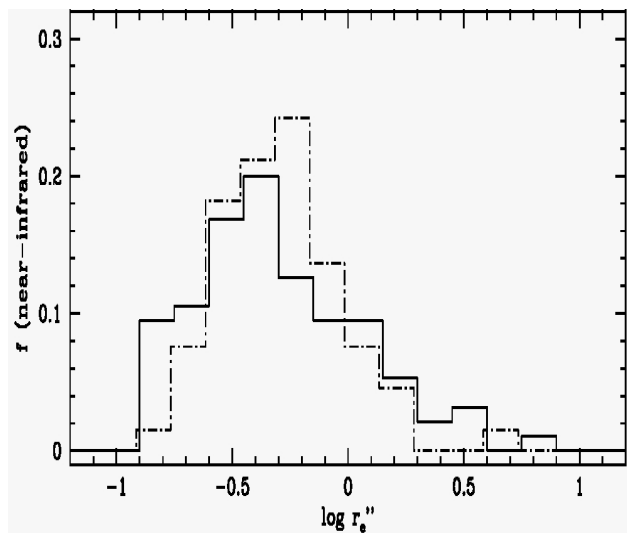


Figura 40: Distribuzione dei raggi efficaci in banda K delle galassie di AC118 (*linea continua*) con quella delle galassie dell'ammasso di Coma ( $z = 0.024$ ; *linea tratteggiata*).

I risultati dell'esempio che segue fanno parte di una survey sulla struttura ottica e NIR di galassie di ammasso a *redshift* compresi tra 0.1 e 0.7, basata su dati NTT e VLT. Nel caso particolare sono stati utilizzati dati NTT-EMMI (bande V, R e I) e NTT-SOFI (banda Ks), oltre a dati HST-WFPC2 nella banda F702W ( $\sim$  banda R). Sono stati ottenuti i parametri strutturali di circa 90 galassie appartenenti all'ammasso ricco AC 118, che si trova a  $z = 0.31$ , e si sono confrontate per la prima volta le strutture ottica e NIR delle galassie a 4.5 Gyr con quelle delle galassie locali.

Il primo risultato è che la relazione tra strutture ottica e NIR delle galassie a  $z = 0.3$ , descritta in termini di gradienti interni di colore, è profondamente diversa dalle galassie locali. Tale diversità è prova di una forte evoluzione nei gradienti di colore, nel senso che le galassie a  $z = 0.3$  sono molto

più concentrate nel NIR che nell'ottico rispetto alle galassie locali. Un'evoluzione così rilevante può essere spiegata solo se ai gradienti interni di colore contribuisce, oltre ad un gradiente di metallicità, anche un gradiente di età delle popolazioni stellari.

Se ne deduce che le galassie a  $z = 0.3$  sono composte di popolazioni stellari di diversa età (più vecchie nelle regioni interne), che evidentemente non possono essersi formate contemporaneamente durante un collasso monolitico, ma devono essere state raccolte da *merging* di popolazioni stellari di età media diversa.

Un secondo risultato riguarda le dimensioni stesse delle galassie, parametrizzate dal raggio che contiene metà della luminosità totale. In questo caso la fotometria NIR gioca un ruolo fondamentale, in quanto è solo nell'infrarosso che la distribuzione di brillantezza è realmente proporzionale alla distribuzione di massa, e rappresenta quindi fedelmente la struttura interna di una galassia.

La figura 40 mostra la distribuzione dei raggi efficaci in banda K delle galassie di AC118 (*linea continua*) insieme con quella delle galassie dell'ammasso di Coma ( $z = 0.024$ ; *linea tratteggiata*), traslata al *redshift* di AC118, assumendo  $\Omega_m = 0.3$  e  $\Omega_\Lambda = 0$ . Le due distribuzioni

appaiono ragionevolmente simili. In particolare, le mediane coincidono, e non paiono esserci significative differenze nella parte corrispondente ai raggi maggiori, dove entrambi i campioni sono completi.

Questo confronto mostra che, dall'epoca di AC118, non c'è stato nessun aumento delle dimensioni delle galassie più grandi. Siccome un aumento sistematico delle dimensioni delle galassie sarebbe la prova che i fenomeni di *merging* hanno svolto un ruolo essenziale nella loro recente evoluzione, se ne deduce che il *merging* non ha giocato negli ultimi 4.5 Gyr.

### 5.7 Ricerca di supernovae a red-shift intermedi

Le supernove ad alto *redshift* possono essere usate in due modi: *i*) come indicatori di distanza per misurare i parametri cosmologici, in particolare la costante di Hubble e il parametro di accelerazione, *ii*) come tracciatori della formazione stellare. Dalla frequenza delle SNe prodotte da core-collapse (tipi II a Ib/c) che derivano da stelle massicce ( $M > 10$  masse solari) si ottiene una misura del tasso di formazione stellare corrente. Per contro, le SNe generate da esplosioni termonucleari (tipo Ia), che hanno progenitori di piccola massa, riflettono la formazione stellare integrata su una più lunga base temporale. Gli attuali programmi di ricerca di supernove ad alto *redshift* sono specificatamente progettati per trovare SN Ia da utilizzare come indicatori di distanza, e quindi non risultano adatti ad affrontare la seconda tematica.

Per sopperire a questa deficienza, da un paio d'anni è in corso una ricerca di supernove a *redshift* intermedi utilizzando il WF imager del telescopio ESO-MPI di 2.2m. Il gruppo, che ora ha membri anche in OAC, ha dovuto dedicare un impegno considerevole allo sviluppo di procedure di analisi delle immagini ottenute dal mosaico di CCD. In questo momento il programma di osservazione è articolato come segue. Si comincia con due notti di osservazione al telescopio ESO-MPI di 2.2m durante le quali viene coperta un'area di 2.5 gradi quadrati fino ad una magnitudine limite  $V = 24$ . Grazie all'investimento dedicato allo sviluppo S/W, in 2-3 giorni queste immagini vengono completamente analizzate. In media si ricavano da 6 a 10 candidati, con magnitudini da 21 a 23.5, in dipendenza delle condizioni del cielo e delle fluttuazioni statistiche. Dopo 7-10 giorni dalle osservazioni, viene utilizzata una notte al VLT + FORS per una conferma spettroscopica. Circa il 70-80% dei candidati trovati risultano in effetti SNe; gli altri sono AGN o QSO ad alto redshift. Questa sequenza viene ripetuta due volte per semestre. Al momento ci si trova nel corso del terzo dei quattro semestri previsti dal programma approvato dall'ESO.

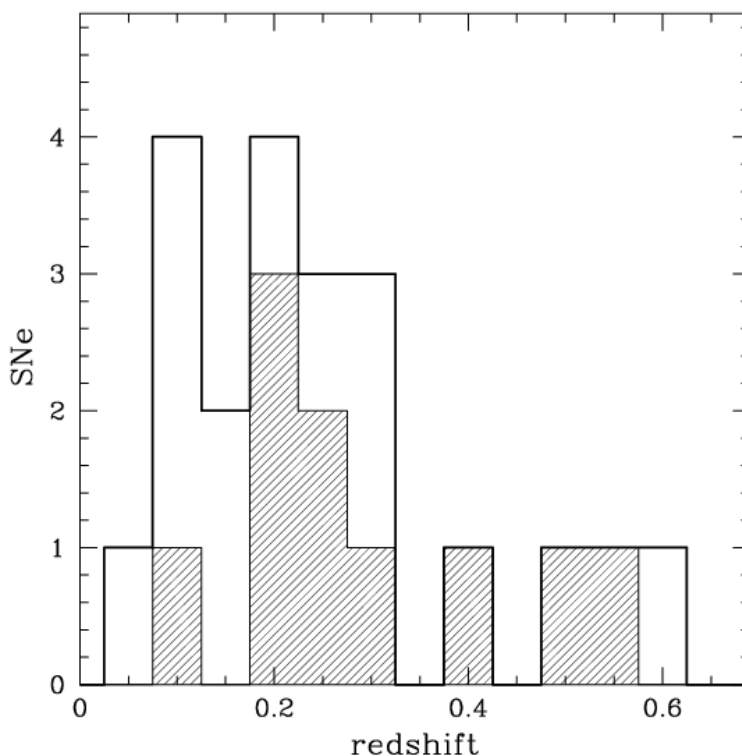


Figura 41: Istogramma in funzione del redshift delle SNe trovate nel corso della search da parte del gruppo OAC. L'area ombreggiata si riferisce alle SN di tipo Ia.

La figura 41 mostra la distribuzione col *redshift* delle SNe trovate finora; l'area tratteggiata indica le SN Ia, e il rimanente sono le SN II+Ib/c. Si vede come la *search* sia particolarmente efficiente nell'intervallo  $0.1 < z < 0.3$  e che sia *core-collapse* che SN termonucleari sono ben rappresentate.

### 5.8 Ricerca di QSO ad alto *redshift* ( $z > 5$ ) in una survey multicolore

La ricerca dei QSO è generalmente finalizzata all'uso di questi oggetti come traccianti della storia dell'universo attraverso la determinazione delle loro caratteristiche in funzione del *redshift* e dell'epoca in cui si osservano i primi QSO. Quest'ultimo aspetto è molto importante perché permette di dare un'indicazione precisa dei tempi-scala relativi all'epoca di formazione delle galassie nell'universo primordiale.

Il progetto dei ricercatori dell'OAC è dunque finalizzato alla messa a punto di metodi di selezione e strumenti di analisi per la ricerca di QSO ad alto *redshift* ( $z > 5$ ), in vista della futura survey VST. Tale ricerca si propone i seguenti obiettivi: *i)* definire la funzione di luminosità dei QSO nella sua parte più debole, per ottenere la densità di luminosità integrata dei QSO; *ii)* determinare il contributo dei QSO al fondo UV; *iii)* identificare i picchi nella distribuzione di massa, in quanto i QSO risiedono in galassie massive. Il punto di partenza sarà costituito dalla Capodimonte Deep Field (OACDF; cfr. par 5.13): verrà determinato il numero di candidati QSO nella OACDF in modo da definire una strategia ottimale per la ricerca degli oggetti ad alto  $z$ . Una survey multicolore (per esempio, UBVR) permette di trovare QSO fino a  $z = 5$ , in quanto per  $z > 5$  la Ly- $\alpha$  forest assorbe la banda R. Per poter trovare QSO a  $z = 6$  occorrono la banda I o z. Poiché i QSO a  $z > 5$  sono oggetti molto rari, sarà necessario sviluppare anche strumenti di analisi per evitare false identificazioni e nello stesso tempo minimizzare la probabilità che vengano inavvertitamente esclusi veri QSO.

Nella figura 42 (destra) è riportato lo spettro di un QSO ( $V = 21.8$  mag), identificato nella OACDF2 a  $z = 3.15$  grazie alla Ly- $\alpha$  e alle righe in emissione indicate. I colori di quest'oggetto sono consistenti con quelli di un QSO ad alto *redshift*, come si vede dalla collocazione nel diagramma a due colori (b-v) vs (r-i) di figura 42 (sinistra). Qui la linea continua indica l'evoluzione dei colori in funzione del *redshift* per un *template* di QSO; i punti rappresentano le stelle nel campo dell'OACDF2.

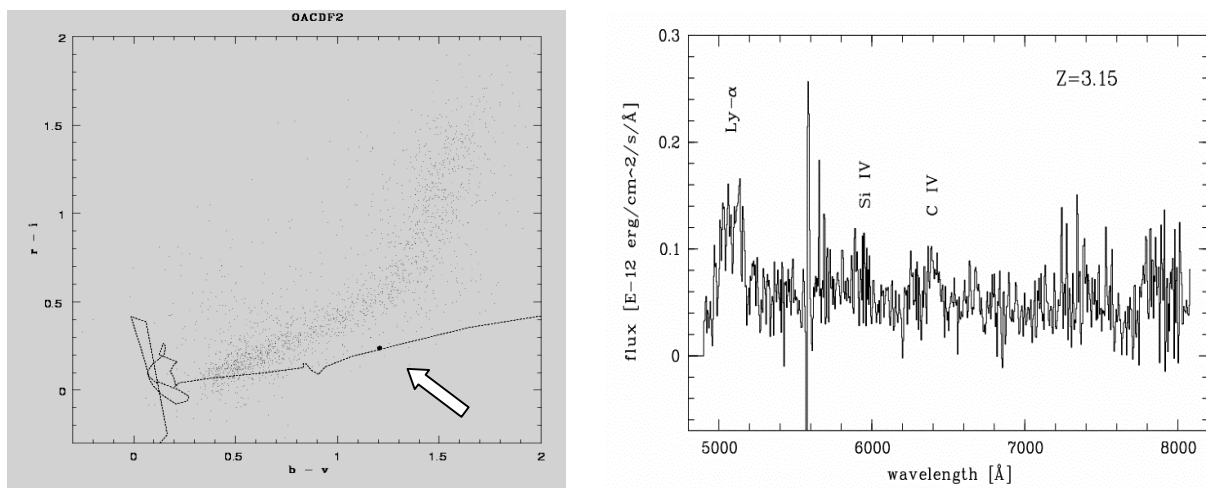


Figura 42: Il pannello di destra mostra lo spettro di un QSO a  $z = 3.15$ , identificato nel Capodimonte Deep Field. L'oggetto (indicato dalla freccia a sinistra) ha colori consistenti con quelli dei QSO ad alto *redshift* (vedi testo).



## 5.9 La struttura a larga scala dell'universo primordiale

La formazione di strutture per instabilità gravitazionale e il collasso della componente luminosa negli aloni virializzati di materia oscura rappresentano oggi la base della teoria moderna di formazione galattica. Il modello galassia-alone oscuro viene usato nella maggior parte dei trattamenti analitici, nei modelli semianalitici e nelle simulazioni numeriche che includono la sola gravità, ma ad oggi esso rimane una pura speculazione teorica che non è stata mai verificata. Una predizione forte di questo modello è che le galassie di una certa massa dovrebbero formarsi prima in regioni dove la densità è più alta; poiché tali regioni sono ritenute essere fortemente ammassate, un test naturale è di misurare il *clustering* delle galassie nell'universo primordiale, cioè la tendenza delle galassie ad alto redshift a distribuirsi nello spazio in strutture, come filamenti o “mura”, piuttosto che in maniera uniforme.

Negli ultimi anni, grazie ai progressi tecnologici, ai telescopi con diametri da 8 metri in su e a strumentazione sempre più efficiente, si sta riscoprendo la possibilità di ricercare galassie a redshift elevati grazie alla fotometria a banda stretta che mira all'individuazione della riga d'emissione Ly- $\alpha$ , peculiare caratteristica spettrale delle galassie giovani con forte formazione stellare. Questo tipo di ricerca è in grado di selezionare oggetti che hanno un'emissione nel continuo dello spettro molto debole, e quindi di spingersi a magnitudini limite proibite alle normali tecniche fotometriche basate su filtri standard a larga banda.

Questa tecnica è stata poco usata finora a causa del flusso debole osservato nella riga d'emissione Ly- $\alpha$ , difficilmente osservabile con i soli telescopi da 4 metri, ma che con i moderni telescopi da 8 metri diventa una strategia ottimale per identificare e studiare le strutture a grande scala a *redshift*  $> 2.0$ . Nel passato i modelli teorici non avevano tenuto in alcuna considerazione il ruolo delle polveri nell'interazione con un'emissione di risonanza ultravioletta: questo problema irrisolto ne limita l'uso ad una pura descrizione topologica del cielo.

## 5.10 Studio delle proprietà di gruppi e ammassi di galassie a diversi redshift.

La ricerca si articola lungo due direzioni. La prima riguarda lo sviluppo di un algoritmo di ricerca di gruppi e ammassi di galassie. Due algoritmi diversi (*adaptive kernel* e un miglioramento del metodo della *red sequence*) sono stati messi a punto per gli ammassi di galassie e testati con osservazioni indipendenti, ottenendo lusinghieri risultati relativamente all'affidabilità. Per i gruppi, è stato usato l'algoritmo di van Albada. La funzione di molteplicità di gruppi e ammassi di galassie rivelati mediante i nostri algoritmi in un ampio intervallo di ricchezza ( $2 < N_{\text{obj}} < 200$ ) e su  $\sim 250$  gradi quadrati suggerisce scenari di formazione simili per gruppi ed ammassi (figura 44). Attualmente, viene utilizzata la funzione di molteplicità per porre vincoli alla forma dello spettro delle perturbazioni primordiali dell'universo.

La seconda direzione di ricerca concerne la funzione di luminosità delle galassie in ammasso. La funzione di luminosità è una quantità d'interesse cosmologico, oltre ad essere uno strumento per lo studio dell'evoluzione delle galassie. È stata determinata la funzione di luminosità di numerosi ammassi (da 40 a 60, secondo il campione considerato), a vari *redshift* ( $z < 0.3$ ), in tre colori ottici, e anche nel vicino infrarosso (bande J, H e K), considerando sia l'intero ammasso sia unicamente le regioni centrali. Per qualche ammasso, la determinazione della funzione di luminosità si spinge fino alle galassie nane o, in un caso, alla luminosità degli ammassi globulari più brillanti. Attualmente, è in corso lo studio della dipendenza della funzione di luminosità dalle caratteristiche dell'ambiente (ricchezza, luminosità a raggi X, distanza dal centro dell'ammasso, ecc.). L'esperienza acquisita ha permesso di individuare alcuni errori sistematici, con importanti conseguenze cosmologiche, che alterano le due recenti funzioni di luminosità infrarosse che usano i dati delle survey 2MASS e 2MASS+2dF.

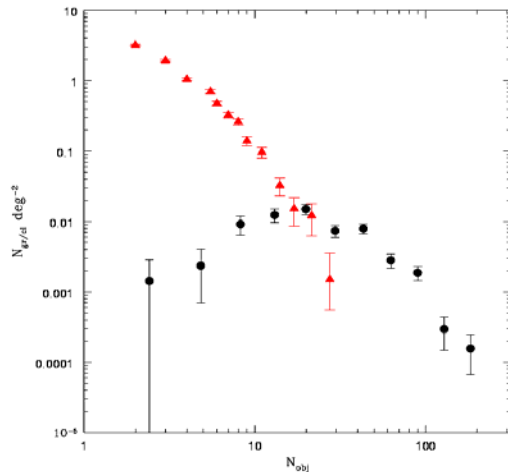


Figura 43: Rappresentazione preliminare della funzione di molteplicità per unità di area per i gruppi (*triangoli rossi*) e per gli ammassi di galassie (*cerchi neri*) ottenuta attraverso gli algoritmi di ricerca sviluppati in OAC.

### 5.11 Gravitational lensing.

La teoria del *lensing* gravitazionale interpreta un'ampia varietà di fenomeni astrofisici – talvolta veramente spettacolari, quali la formazione di immagini multiple o ad anello e di giganteschi archi luminosi, come pure improvvise amplificazioni della luminosità di una sorgente lontana –, tutti dovuti all'interazione di un campo gravitazionale (la cui sorgente è chiamata “lente”) con la radiazione (“sorgente” vera e propria). L'analisi dettagliata di questi fenomeni consente la ricostruzione della struttura gravitazionale della lente, indipendentemente dal suo stato dinamico. Quando sorgente e lente si trovano a distanze cosmologiche, gli eventi di *lensing* gravitazionale equivalgono a immagini di giganteschi telescopi (naturali), che ci svelano la struttura dell'universo e ci consentono di verificarne i modelli.

All'interno della vasta e variegata fenomenologia del *lensing* gravitazionale è possibile distinguere due regimi principali: *weak* e *strong lensing*. Il regime di *weak lensing* è dovuto alla presenza, lungo la linea di vista, di materia caratterizzata da basso contrasto della densità la quale induce una debole amplificazione, deamplificazione e deformazione delle sorgenti lontane. L'effetto consente di osservare direttamente la struttura a larga scala dell'universo. I fasci di luce provenienti da sorgenti lontane subiscono una debole, ma in principio misurabile deformazione (*shear* cosmico) da parte della distribuzione di materia su grande scala. Dalla statistica dell'ellitticità di galassie lontane (in un campo sufficientemente grande da rendere il campione statistico significativo) si può ricostruire la distribuzione di massa delle strutture su grande scala e risalire allo spettro primordiale di disomogeneità dalle quali le strutture si sono evolute.

Il regime di *strong lensing* è caratterizzato da una profonda deformazione del fronte d'onda della radiazione proveniente dalla sorgente da parte del campo gravitazionale della lente. Dal punto di vista fenomenologico esso è associato agli effetti più spettacolari del *lensing* gravitazionale: immagini multiple di quasar e galassie, immagini allungate di galassie di fondo da parte di ammassi di galassie. Per quanto riguarda questo effetto, sono possibili due strategie osservative. Una ha come obiettivo lo studio dettagliato di una lente e dei suoi parametri osservativi (posizione e numero delle immagini, amplificazione, *time delay*, ecc.). Essa consente di porre vincoli sulla dinamica e la geometria della lente (ad esempio, determinandone la massa o l'estensione spaziale) e, su scala extragalattica, di ottenere una stima dei parametri cosmologici, quali la costante di Hubble o il parametro di decelerazione, e quindi di testare i vari modelli di universo. La seconda strategia, invece, ha natura statistica e consiste nel contare il numero di lenti gravitazionali rivelate all'interno di *survey*, caratterizzandone la distribuzione in termini di un certo insieme di quantità osservabili. La statistica delle lenti gravitazionali, che è legata contemporaneamente al grado di disomogeneità che caratterizza l'universo su scala locale (e che la luce incontra nel suo cammino dalla sorgente all'osservatore) ed alla sua struttura a larga scala, costituisce pure uno strumento

peculiare per testare i modelli cosmologici. Soltanto l'esiguo numero di dati osservativi ne ha finora limitato l'uso.

In alcune geometrie gli angoli di deflessione sono molto piccoli, dell'ordine di grandezza di pochi millesimi di secondo d'arco o anche meno, sicché le immagini multiple della sorgente non sono separabili. Tuttavia la magnificazione luminosa delle sorgenti risulta alterata poiché il *lensing*, mentre preserva il numero di fotoni emessi dalla sorgente, modifica la sezione del fascio luminoso (*shear* e *focusing*). Di conseguenza, è possibile rivelare questi tipi di fenomeni in una situazione dinamica, in cui la lente e la sorgente siano in moto relativo l'uno rispetto all'altro, tramite una caratteristica variazione temporale della luminosità (che nel caso più semplice segue il cosiddetto profilo di Pacinski). Ciò accade nel cosiddetto regime di *microlensing* gravitazionale, che si è rivelato un efficace strumento per la ricerca della materia oscura nell'alone della nostra o di altre galassie, qualora essa si presenta in forma dei cosiddetti Macho (Massive Astrophysical Compact Halo Object), o per studiare il contenuto di stelle di piccola massa nel disco o nel *bulge* delle galassie.

### 5.11.1 Microlensing

L'OAC è interessato da tempo al *lensing* gravitazionale, in molte delle sue applicazioni. Di più antica data è l'impegno nel campo del *microlensing*, per la sua applicabilità alla ricerca della materia oscura (DM) e allo studio della struttura dei quasar. Relativamente alla DM, l'OAC è partner di primo piano in una vasta collaborazione internazionale denominata SLOTT-AGAPE (cfr. <http://www.na.astro.it/slag/slott.html>). Lo scopo principale è di costruire una mappa della distribuzione di Macho nel disco galattico, tramite osservazioni verso il *bulge* e le braccia a spirali, e negli aloni della Via Lattea, di M31 e di M33 (in particolare le osservazioni verso M31 hanno reso necessario l'impiego di una tecnica particolare di rivelazione di eventi, detta del pixel *lensing*, a causa del fatto che il campo in questione non è risolto). La disponibilità dei due telescopi progettati e realizzati dall'OAC, cioè il TT1 ed il VST, permetterà di rendere esecutivi gli strumenti di analisi messi appunto nell'ambito di tale collaborazione, come pure di dedicarsi a nuove applicazioni, quali la rivelazione di eventi binari e planetari, o di buchi neri tramite appunto il *microlensing*.

Per quanto riguarda, invece, il *microlensing* su quasar per la ricerca di DM in forma di Macho e per l'analisi strutturale dei QSO, l'OAC, in collaborazione con le Università di Napoli e Salerno e con gli Osservatori di Amburgo e Potsdam, sta attualmente preparando una serie di osservazioni da effettuare al TNG sul quasar doppio UM673. Contando sull'utilizzo dei telescopi VST e TT1 si intende continuare a sviluppare questo campo di ricerca.

### 5.11.2 Strong lensing

Per quanto riguarda lo *strong lensing*, l'OAC ha inaugurato una proficua linea di ricerca teorica sulla possibilità di ottimizzare lo studio di sistemi lensati per indagini cosmologiche ed anche sulla struttura della lente. Particolare interesse è stato dedicato alla misura dei time *delay* tra le immagini multiple di una stessa lente, ed alla statistica dei quasar lensati per ricostruire la distribuzione di massa delle lenti e per vincolare i parametri cosmologici. L'esperienza acquisita in ambito teorico verrà impiegata pure per mettere appunto una accurata strategia di osservazioni per TT1 e VST. Entrambi questi telescopi sono infatti degli strumenti ideali per i lunghi *monitoring* fotometrici necessari alla misura del time *delay* e per l'ampiezza del campo di osservazione richiesta dalle osservazioni per la statistica del *lensing*. Anche in questo campo si ci è valse delle collaborazioni con le Università di Napoli e di Salerno, e coi gruppi di Potsdam ed Amburgo. Attualmente è anche in corso una ricerca di lenti gravitazionali nell'OACDF, che ha già prodotto ben 5 candidati.

### 5.11.3 Weak lensing

Il *weak lensing*, e lo *shear* cosmico in particolare, rappresentano la più giovane delle avventure scientifiche dell'OAC nell'ambito del *lensing* gravitazionale. Da un lato, infatti, le caratteristiche tecniche del VST ne fanno uno strumento ideale per la misura dello *shear* e per l'osservazione di

eventi di *weak lensing* in genere, che richiedono un grande campo, un'accurata qualità delle immagini e condizioni di ottimo *seeing*. D'altro lato l'OAC dispone delle competenze umane in ambito cosmologico e astrofisico indispensabili per utilizzare al meglio questo nuovo formidabile strumento di indagine cosmologica. In questo contesto l'OAC è inserito in una importante e vasta collaborazione internazionale, che include tra gli altri i gruppi di ricercatori dell'Università di Bonn guidati e dell'IAP.

## 5.12 Capodimonte Deep Field (OACDF)

In vista dell'arrivo del VLT Survey Telescope, l'OAC (OAC) ha iniziato un progetto pilota chiamato Osservatorio Astronomico di Capodimonte Deep Field (OACDF), che riguarda osservazioni a grande campo utilizzando il Wide Field Imager (WFI) del telescopio ESO da 2.2m. Il progetto OACDF, che coinvolge numerosi ricercatori dell'OAC e dell'Osservatorio di Roma, utilizza 15 notti di tempo garantito in seguito alla collaborazione di OAC alla realizzazione di ES-WFI. Sono stati ottenuti circa 300 Gbyte di dati grezzi nelle bande B, V, R e I, e in sei bande intermedie che coprono interamente la banda I.

La profondità dell'OACDF (circa 25.4 mag nella banda R) permette di raggiungere gli obiettivi scientifici prefissati: primo passo per la scienza che verrà fatta con il VST. Tra questi obiettivi, i principali sono:

1. Struttura a grande scala dell'universo e ammassi di galassie: nel campo dell'OACDF ci si aspetta di trovare circa 5 ammassi a *redshift* intermedi e alti ( $z > 0.5$ ), di cui studiare le proprietà intrinseche e la relazione con le strutture circostanti.
2. Galassie a  $z \approx 0.5$ : confrontando proprietà quali colori, funzioni di luminosità, morfologia, interazione, dispersione di velocità di galassie sia in ammassi che di campo, si può indagare in dettaglio sulla relazione fra morfologia e ambiente e sulla frequenza e importanza delle interazioni fra galassie a *redshift* intermedio.
3. Quasar ad alto *redshift*: con una magnitudine limite di circa 25.5 nelle bande larghe, ci si può aspettare di rivelare alcune centinaia di QSO, i quali possono essere individuati dai colori e poi confermati da successive osservazioni spettroscopiche nell'ottico e nell'IR e nelle bande radio e X.
4. Galassie di *Seyfert* e *Starburst*: l'individuazione di alcune centinaia di galassie Seyfert1, Seyfert2 e *starburst* permetterà uno studio della funzione di luminosità con implicazioni sulle relazioni fra queste classi di oggetti. L'identificazione è basata su una griglia di magnitudini derivata dalla spettroscopia ottica e UV di galassie attive vicine.
5. Identificazione di lenti gravitazionali, per lo studio delle proprietà delle lenti e dei parametri cosmologici.

Inoltre, i dati dell'OACDF costituiscono un archivio unico per confronti con altri archivi di dati a diverse lunghezze d'onda, sia nell'X che nel radio. La possibilità di indagini combinate a varie frequenze è essenziale per gli studi extragalattici, ma anche per studi di tipo stellare. I dati OACDF verranno utilizzati anche per i seguenti studi galattici e planetari:

1. Stelle di alone: la *survey* OACDF può essere usata per studiare l'alone della Galassia. In particolare, può servire ad individuare stelle di bassa luminosità quali Nane Bianche (WD), stelle con massa molto piccola (VLMS) e nane brune (BD). I candidati verranno selezionati sulla base degli indici di colore e poi confermati da ulteriori osservazioni fotometriche nell'IR e/o spettroscopiche (ottico-IR). Nel campo OACDF ci si può aspettare qualcosa come  $\sim 5$  WD e  $\sim 10$  VLMS + BD. Questi numeri sono molto incerti dato che la statistica di questi oggetti è molto povera. Per questo motivo già ottenere dei limiti superiori alla loro funzione di luminosità sarebbe un risultato importante, anche perché sia le VLMS + BD, sia in particolar modo le WD, potrebbero essere una componente importante della materia oscura, come suggerito dai recenti risultati degli esperimenti Macho ed Eros sul *microlensing*.
2. Kuiper Belt Objects (KBO) ad alta inclinazione orbitale. Ci sono una trentina di questi corpi minori del Sistema Solare che hanno una inclinazione orbitale maggiore di 10 gradi in

declinazione. Siccome le magnitudini visuali di questi oggetti variano fra 22 e 24, ci si aspetta di individuare praticamente tutti i candidati KBO nel campo OACDF, e cioè circa 5 di questi oggetti celesti. La fotometria in varie bande può fornire informazioni cruciali sull'origine dei KBOs.

Il catalogo delle sorgenti dell'OACDF è stato anche recentemente completato con la determinazione dei *redshift* fotometrici per tutti gli oggetti più brillanti di  $I_{AB} = 22$ . I *redshift* spettroscopici, determinati dagli spettri di un centinaio di galassie nel campo OACDF, ottenuti durante il primo *follow-up* spettroscopico con lo strumento EMMI-MOS al telescopio ESO-NTT, sono stati utilizzati per ottimizzare la procedura di determinazione dei *redshift* fotometrici. La configurazione ottimale, quella cioè che meglio riproduceva i risultati spettroscopici, è stata quella di usare le tre bande larghe (B,V,R) e i due filtri intermedi centrati rispettivamente a 753 e 914 nm.

La fase di *follow-up* spettroscopico delle sorgenti dell'OACDF è attualmente in corso, facendo uso del Telescopio Nazionale Galileo (TNG) e di diversi telescopi all'ESO. Sotto si mostrano esempi di oggetti già identificati nel campo dell'OACDF.

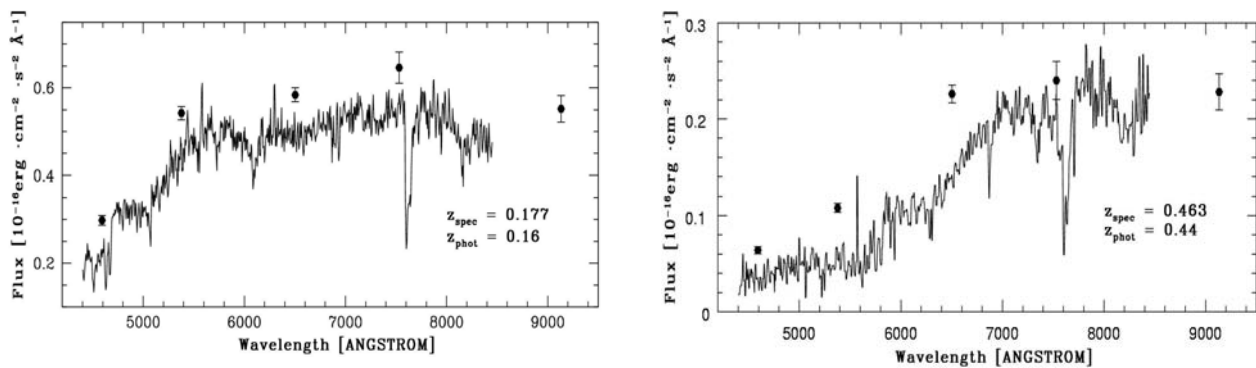


Figura 44a: Esempi di due spettri di galassie ellittiche e loro redshift spettroscopici. Vengono riportati anche i risultati dei redshift fotometrici. I cerchi neri rappresentano i flussi ottenuti dall'OACDF. Il confronto tra redshift spettroscopici e fotometrici del catalogo del follow-up ESO-NTT fornisce una dispersione di 0.04 attorno ad una media consistente con lo zero. Il catalogo completo con i redshift spettroscopici e fotometrici per tutti gli oggetti dell'OACDF più brillanti di  $I_{AB}=22$ , sarà presto pubblicato.

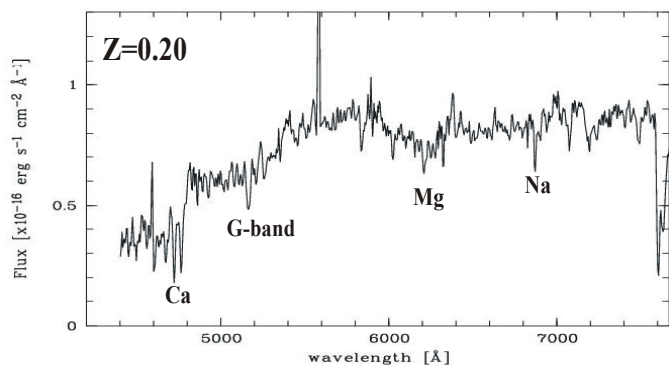


Figura 44b: A sinistra un esempio di un nuovo ammasso di galassie a  $z=0.2$ . Lo spettro mostrato a destra corrisponde all'oggetto indicato dalla freccia. I diversi candidati ad ammassi di galassie che sono stati trovati nell'OACDF saranno studiati in dettaglio con follow-up spettroscopico.

Figura 44c: *press release* dell'ESO sull'OACDF.