Università degli studi Roma Tre
Dipartimento di Fisica
Dottorato di Ricerca in Fisica
XX ciclo

Selezione di Nuclei Galattici Attivi nel medio-infrarosso

Nicola Sacchi

Coordinatore

Prof. Fabio La Franca

Indice

1 Introduzione **5**

2 Descrizione dei dati **15**

2.1 Fotometria NIR and MIR 16

2.2 Fotometria ottica e K 17

2.3 Osservazioni X 18

2.4 Spettroscopia ottica 20

2.4.1 Determinazione spettroscopica dei redshift 26

2.4.2 Classificazione spettroscopica 29

2.5 Catalogo multi-λ 31

3 Analisi delle proprietà IR degli AGN **35**

3.1 Diagrammi di colore 37

3.2 Fit delle SED 40

3.2.1 Programma e dati utilizzati 41

3.2.2 Metodo di fit 45

3.2.3 La differenza fra la SED delle Sey2 e quella delle STB . 52

3.2.4 Fit con χ gaussiani e σ_χ=1 55

3.2.5 Una nuova SED di Starburst con eccesso a 24μm . . . 63

3.2.6 Determinazione fotometrica del redshift 66

4 Risultati **71**

4.1 Stacking X 74

4.2 Spettro composito di AGN oscurati ad alto z 78
4.3 Frazione e conteggi di AGN 80
4.4 Densità degli AGN 86

5 Riassunto e conclusioni **89**

Capitolo 1

Introduzione

Lo studio della formazione ed evoluzione delle strutture nell'Universo è uno dei principali argomenti della cosmologia moderna. I Nuclei Galattici Attivi (AGN) sono tra le più potenti sorgenti conosciute nell'Universo (non sono rare luminosità superiori a 10^{13} $L_{\odot}$) e ricoprono un ruolo di primaria importanza all'interno dei processi di formazione ed evoluzione delle galassie.

Sin dalla loro scoperta da parte dei radio-astronomi nel primi anni '60, gli AGN sono apparsi come una classe molto eterogenea di sorgenti. Mostravano infatti una vasta gamma di tipologie, di distribuzioni spettrali di energia (SED), di parametri di ionizzazione, etc. Nonostante tali differenze, esiste un denominatore comune tra questi oggetti: un'enorme emissione di energia proveniente da una regione estremamente compatta (sotto la scala del parsec), non spiegabile in termini di energia termica prodotta all'interno delle stelle. Fu presto evidente come l'emissione di queste sorgenti avesse come motore centrale processi di accrescimento su buchi neri super-massivi (SMBH, di massa compresa tra 10^6 e 10^{10} $M_{\odot}$).

Per spiegare le osservazioni fu sviluppato il cosiddetto Modello Unificato degli AGN (Antonucci, 1993). Questo modello interpreta la grande varietà di fenomeni relativi agli AGN come combinazione di un singolo processo fisico (accrescimento su un buco nero centrale e conversione di energia gravitazionale in radiativa) e di effetti legati all'orientazione della linea di vista

dell'osservatore rispetto alla geometria del nucleo attivo.

Secondo il Modello Unificato il SMBH è circondato da un disco di accrescimento e da nubi gassose denominate Broad-Line Region (BLR), su scale dell'ordine del parsec e dotate di elevata disperione di velocità, responsabili dell'emissione di righe da materiale fortemente ionizzato con larghezza di diverse migliaia di km s^{-1}. Su scale dal pc al centinaio di pc una distribuzione otticamente spessa di polvere e gas (generalmente denominata toro) oscura la radiazione nucleare in determinate direzioni, mentre altre regioni gassose chiamate Narrow-Line Region (NLR), distanti dal piano del toro, sono responsabili dell'emissione di righe strette (con larghezza inferiore a 10^3 km s^{-1}).

Le differenze che si osservano tra oggetti con intensa o debole emissione radio, tra sorgenti che presentano righe d'emissione in banda ottica larghe o strette, con assorbimento maggiore o minore da parte di gas e polvere nelle bande X ed ottica, vengono tutte spiegate come conseguenza di diverse orientazioni dell'osservatore rispetto a questa geometria toroidale.

Secondo questo modello, il materiale responsabile dell'assorbimento è comune a tutti gli AGN ma i suoi effetti sono visibili solo quando la linea di vista lo attraversa.

Modelli alternativi attribuiscono l'assorbimento ad un fenomeno di merger legato alle prime fasi evolutive di un AGN (Fabian, 1999). Il merger tra due galassie a spirale comporterebbe la crescita del SMBH e dello sferoide della galassia risultante, accompagnata da processi di intensa formazione stellare (starburst) dovuti alla destabilizzazione gravitazionale di grandi quantità di polvere e gas. All'inizio l'AGN si troverebbe così circondato da un ambiente denso e apparirebbe oscurato, col tempo l'AGN potrebbe poi raggiungere una luminosità tale da spazzar via e distruggere gran parte del materiale circostante, inibendo i processi di starburst e apparendo come non oscurato (Silk and Rees (1998), Granato *et al.* (2004), Springel *et al.* (2005), Hopkins *et al.* (2005)).

Nonostante non sia ancora chiaro quali processi regolino i rapporti tra l'evoluzione di un nucleo attivo e della sua galassia ospite è ormai comunemente accettato che l'evoluzione delle strutture galattiche sia il risultato di una continua e complessa interazione tra questi sistemi, sin dall'iniziale formazione fino ai processi di feedback che ne regolano reciprocamente (ed eventualmente interrompono) l'attività.

Siccome gli AGN caratterizzati da un basso assorbimento ($N_H < 10^{22}$ cm^{-2} in base alla definizione in banda X, AGN1) sono facilmente osservabili in diverse bande dello spettro elettromagnetico fino a grandi redshift, sia la popolazione locale che le loro proprietà evolutive sono ben note (Ueda *et al.* (2003), La Franca *et al.* (2005)).

Al contrario, gli AGN oscurati (AGN2) risultano difficilmente osservabili al di fuori dell'Universo locale, e persino a densità colonnari moderate ($N_H \sim 10^{22-23}$ cm^{-2}) una frazione viene sistematicamente persa dalle survey convenzionali. Questo fa sì che non esistano tuttora campioni completi di AGN oscurati e che non siano ben note le loro proprietà evolutive.

Localmente il rapporto osservato tra AGN oscurati e non-oscurati è di circa 4:1 (Osterbrock (1993), Comastri *et al.* (1995), Risaliti *et al.* (1999)) e la metà di questi risultano essere Compton-thick, ossia con $N_H > 10^{24}$ cm^{-2} (Maiolino and Rieke (1995), Risaliti *et al.* (1999)), ma a redshift più alti (z>1) le stime della distribuzione in N_H sono affette da notevoli incertezze e vi sono solo pochi casi di osservazione diretta di AGN oscurati Compton-thick.

Le survey hard-X sono il miglior metodo per selezionare e identificare nuclei galattici attivi non oscurati o moderatamente oscurati ($N_H < 10^{23}$ cm^{-2}); ad energie maggiori di 2 keV, i fotoni sono meno affetti dall'assorbimento da parte di gas e polvere, rispetto ai fotoni ottici. Tuttavia per esplorare la componente maggiormente oscurata degli AGN2 è necessario spingersi ad energie superiori ai 10 keV, attualmente non raggiungibili dai telescopi X con capacità di imaging.

Un approccio largamente esplorato in questi ultimi anni per selezionare

AGN fortemente oscurati è utilizzare osservazioni multibanda, sfruttando in particolare lunghezze d'onda infrarosse (IR) (Alonso-Herrero *et al.* (2004), Stern *et al.* (2005), Urrutia *et al.* (2005), Martínez-Sansigre *et al.* (2005), Donley *et al.* (2005), Houck *et al.* (2005), Weedman *et al.* (2006), Sajina *et al.* (2007), Yan *et al.* (2007)). Infatti, mentre l'emissione in banda X contribuisce solo ad una frazione minore (pochi punti percentuale) della luminosità bolometrica prodotta dall'accrescimento sul SMBH, gran parte dell'energia è emessa nell'infrarosso. La maggior parte degli AGN è costituita da sorgenti circondate da un ambiente ricco di gas e polvere. Quest'ultima è responsabile dell'assorbimento della radiazione ottico-ultravioletta (UV) e della sua riemissione termica a lunghezze d'onda maggiori, principalmente nel medio infrarosso (MIR).

Un'intensa emissione infrarossa da parte di polvere è stata osservata in tutti gli AGN, eccetto in alcuni BL Lac (classe peculiare di nuclei attivi caratterizzati da elevate variabilità e polarizzazione della radiazione).

Il continuo è emesso da polvere circum-nucleare scaldata a temperature di diverse centinaia di gradi dalla sorgente centrale dell'emissione primaria ottica, UV ed X (principalmente il disco di accrescimento). Per questo il continuo MIR fornisce informazioni sulla quantità e sul covering factor[1] della polvere circum-nucleare. Lo spettro nella regione MIR è inoltre ricca di strutture costituite da bande di emissione di Polycyclic Aromatic Hydrocarbon (PAH, delle quali la più intensa ha una lunghezza d'onda $\lambda = 7.7\mu m$), piccoli grani carboniosi eccitati nelle regioni di foto-dissociazione, che tracciano l'attività di formazione stellare. Ulteriori strutture spettrali MIR sono le bande di silicati a $\sim$10 e $\sim 18\mu m$ osservate spesso in assorbimento in AGN oscurati o galassie ad alta luminosità IR.

La banda MIR è molto meno affetta dall'estinzione da polvere che non il vicino infrarosso (NIR), l'ottico e l'UV. Per questo motivo una survey

[1]La frazione di angolo solido coperta da materia oscurante, vista dalla sorgente della componente primaria.

di AGN che completa le bande tradizionali con osservazioni IR può avere una capacità notevolmente superiore di rivelare sorgenti oscurate, attraverso l'energia prodotta dall'accrescimento e riprocessata dalla polvere.

Grazie all'avvento dello Spitzer Space Telescope si sono fatti grandi passi avanti in questa direzione, grazie soprattutto al suo spettrometro IRS (InfraRed Spectrograph), che ha permesso di esplorare in dettaglio le caratteristiche spettrali di un gran numero di sorgenti. In particolare IRS ha consentito l'osservazione di righe di emissione in diversi AGN (Armus *et al.* (2004), Haas *et al.* (2005), Weedman *et al.* (2005)), di PAH in PG QSO locali (Schweitzer *et al.* (2006)) e di studiare l'intensità di feature dei silicati in diverse classi di sorgenti (Spoon *et al.* (2007), Hao *et al.* (2007)).

Grazie invece agli strumenti IRAC e MIPS[2] di Spitzer è stato possibile ottenere una copertura fotometrica di ampie porzioni di cielo fino a flussi prima inaccessibili (inferiori al μJy in alcune bande), alle lunghezze d'onda IR 3.6, 4.5, 5.8, 8.0μm (IRAC) e 24, 70, 160μm (MIPS).

Grazie all'osservazione con questi strumenti di un elevato numero di sorgenti appartenenti a diverse classi, è ormai accertato come una Spectral Energy Distribution (SED) a legge di potenza ($\mathrm{Log}F_\nu \propto \mathrm{Log}\lambda$) nelle bande NIR e MIR (in analogia con altre regioni dello spettro elettromagnetico come l'X e l'ottico-UV) sia la firma di una galassia la cui emissione è dominata da un AGN.

Tuttavia, mentre il cielo in banda X (in particolare ad energie sopra i 2keV) è dominato dall'emissione di nuclei attivi, solo una frazione dell'emissione totale osservata nell'IR è dovuta a riprocessamento di radiazione emessa da AGN. Nella maggior parte delle galassie il nucleo attivo (ove presente) non costituisce la fonte energeticamente dominante in banda IR ed il suo contributo deve essere isolato dalle altre componenti di emissione e formazione stellare. Diversi autori (Lacy *et al.* (2004), Stern *et al.* (2005), Polletta *et al.* (2006), Barmby *et al.* (2006)) hanno sperimentato criteri basati su bande

[2]InfraRed Array Camera e Multiband Imaging Photometer for Spitzer

NIR e MIR per selezionare AGN, riscontrando contaminazione da parte di altre classi di sorgenti (prevalentemente galassie Starburst). Alonso-Herrero *et al.* (2005) hanno mostrato che galassie blu ad alto redshift o starburst locali possono presentare SED IR a legge di potenza simili a quelle di un AGN e che selezioni di questo tipo presentano un alto livello di contaminazione.

D'altra parte, criteri di selezione basati su colori IRAC (v. Par. 3.1 e Fig. 3.1) selezionano solo una frazione della popolazione di AGN e sono lontani dal produrre campioni completi (Lacy *et al.*, 2004). Alonso-Herrero *et al.* (2004) hanno mostrato che applicando sul campione X della Groth Strip Survey i criteri di selezione basati sui colori IRAC, proposti da Lacy *et al.* (2004) e Stern *et al.* (2005), si ottiene una completezza di circa il 50% ed il 70% rispettivamente. Gli stessi autori trovano che le sorgenti X presentano un'estrema varietà di SED MIR, incluse alcune dominate da emissione stellare, tipica di galassie a spirale o starburst. Quindi selezionare AGN sulla base dei soli colori IRAC porta a campioni dotati di un alto livello di incompletezza.

Negli ultimi anni diversi lavori hanno esplorato le proprietà infrarosse di una classe di sorgenti $24\mu m$ con elevato rapporto $24\mu m$/ottico, difficilmente osservabili con gli attuali strumenti di spettroscopia ottica. Solo per citarne alcuni:

- Houck *et al.* (2005) analizzando gli spettri IRS di 31 sorgenti con flusso $F_{24\mu m} > 0.75$mJy ed R>24.5, danno una stima del 76% per la frazione di AGN sul totale degli oggetti con redshift;

- Weedman *et al.* (2006) trovano un risultato simile in 18 sorgenti radio con $F_{24\mu m} > 1$mJy ed R>24, ad un redshift tipico di z$\sim$2;

- Yan *et al.* (2007) presentano uno studio degli spettri IRS di 52 sorgenti con $F_{24\mu m} > 0.9$mJy e $\nu F_\nu(24\mu m)/\nu F_\nu(0.7\mu m)$>10, da cui risulta che tale classe di oggetti è suddivisa in ULIRG-Starburst, sistemi con forte estinzione da polvere ($\tau_{9.8\mu m} > 1$) ed AGN, con frazioni circa uguali.

- Sajina *et al.* (2007) analizzano, per lo stesso campione di Yan *et al.* (2007), quale sia la componente energetica dominante scomponendo le SED in contributo stellare, starburst ed AGN; trovano che i 3/4 delle sorgenti sono dominate dal nucleo attivo ma che nel 60% di queste vi è evidenza di forte formazione stellare;

- Fiore *et al.* (2007) usando una tecnica di stacking X su sorgenti con F($24\mu m$)/F(R)>1000 ed (R-K>4.5) stimano nell'80% la frazione di AGN con 23<Log N_H <25;

- Polletta *et al.* (2007) studiano le proprietà della materia assorbitrice in un campione di AGN oscurati (luminosi e a z>1), selezionati richiedendo assorbimento da silicati a $9.8\mu m$ e rapporto F($24\mu m$)/F(R) compreso tra 575 e 25'000 (valore mediano di 3'500); trovano per queste sorgenti un contributo della componente starburst alla luminosità bolometrica inferiore al 20% e una densità colonnare $N_H \geq 10^{23}\mathrm{cm}^{-2}$.

Tutti questi lavori esplorano la possibilità di selezionare nuclei galattici attivi in base alle proprietà di emissione IR, quantificando in particolare le proprietà statistiche della popolazione maggiormente oscurata. Emerge chiaramente che la strada più promettente per studiare tale componente consiste nell'analizzarne la SED su una vasta gamma di lunghezze d'onda, con l'ausilio di osservazioni multi-λ.

Ragionando in questa direzione, ci siamo prefissi l'obiettivo di studiare le proprietà dell'emissione IR degli AGN e di come una selezione basata su tali lunghezze d'onda si relazioni con i classici criteri utilizzati finora per costruire campioni di nuclei attivi (ossia la spettroscopia ottica ed X). Dopo aver analizzato contaminazione e completezza di tale selezione presenteremo alcune proprietà statistiche del campione di sorgenti $24\mu m$ così isolato, evidenziando come questo presenti un minor bias contro la componente oscurata rispetto ad altri criteri.

Il primo passo è stato quello di produrre un catalogo multi-λ, con osservazioni X, ottiche, NIR/MIR. Ho personalmente progettato, preparato ed eseguito le osservazioni spettroscopiche ottiche, curato la riduzione dei dati e l'identificazione e classificazione degli spettri. I dati utilizzati e la costruzione di tale catalogo sono descritti nel Cap. 2.

Nel Cap. 3 è descritta l'analisi delle proprietà IR delle nostre sorgenti attraverso lo studio dei colori IRAC e delle SED ottico-IR con una procedura di fit appositamente ideata utilizzando il programma Le PHARE[3] (PHotometric Analysis for Redshift Estimations, Arnouts & Ilbert).

Nel Cap. 4 sono presentati i risultati ottenuti da questa analisi, un confronto con informazioni provenienti dalle bande ottica ed X, stime di proprietà statistiche della popolazione dei nuclei galattici attivi, con particolare riferimento alla componente oscurata.

Nel Cap. 5 sono riassunte e discusse le conclusioni del lavoro.

Durante questi 3 anni di dottorato ho svolto attività e ottenuto risultati scientifici che per motivi di organicità della trattazione non trovano spazio in questa tesi. Una grande mole di lavoro è stata dedicata in particolare alla riduzione e all'analisi di dati osservativi, soprattutto di spettroscopia ottica (in collaborazione con Chiara Feruglio, INAF-OAR). Ho curato personalmente tutte le fasi di progettazione e preparazione dei run osservativi, di esecuzione in loco (in caso di visitor mode) o in remoto (in caso di service mode) dell'acquisizione dati, di riduzione dei dati grezzi e di successiva analisi scientifica nonché di utilizzo ed interpretazione dei risultati.

Parte dell'output scientifico di questo lavoro è presentato nella presente tesi, mentre altro è presente in un certo numero di articoli pubblicati o in pubblicazione. Ho partecipato come co-autore ai seguenti articoli:

[3] http://www.oamp.fr/people/arnouts/LE_PHARE.html

- The HELLAS2XMM Survey. VII. The Hard X-Ray Luminosity Function of AGNs up to z = 4: More Absorbed AGNs at Low Luminosities and High Redshifts.
  La Franca, Fiore, Comastri, Perola, Sacchi et al. 2005 (ApJ, 635, 864L)

- The XMM-Newton survey of the ELAIS-S1 field. I. Number counts, angular correlation function and X-ray spectral properties.
  Puccetti, Fiore D'Elia et al. 2006 (A&A, 457, 501P)

- AGN counts at $15\mu m$. XMM observations of the ELAIS-S1-5 sample.
  La Franca, Puccetti, Sacchi et al. 2007 (A&A, 472, 797L)

- The contribution of very massive high-redshift SWIRE galaxies to the stellar mass function.
  Berta, Lonsdale, Polletta et al. 2007 (A&A, 476, 151B)

- The XMM-Newton survey of the ELAIS-S1 field II:
  optical identifications and multiwavelength catalogue of X-ray sources.
  Feruglio, Fiore, La Franca, Sacchi et al. 2008 (in prep, A&A)

Sono inoltre in preparazione i seguenti articoli, nei quali saranno utilizzati alcuni dei risultati presentati in questo lavoro:

- Identification of a population of Spitzer selected X-ray absorbed AGN in the ELAIS-S1 field.
  La Franca, Sacchi et al. 2008 (in prep)

- Multiwavelength catalogue in the ELAIS-S1 field:
  comparing optical spectroscopic, X-ray and MIR selection of AGN.
  Sacchi, La Franca et al. 2008 (in prep)

Capitolo 2

Descrizione dei dati

Da quanto detto nell'Introduzione emerge chiaramente l'esigenza di disporre di una copertura multi-wavelength per selezionare e studiare le sorgenti che ospitano un AGN.

Le osservazioni utilizzate in questo lavoro sono state fatte nel campo ELAIS-S1. Questo campo fa parte della European Large Area ISO Survey (ELAIS; Rowan-Robinson *et al.* (1999), Oliver *et al.* (2000)). ELAIS è il più ampio progetto singolo open-time eseguito con ISO (Infrared Space Observatory); quest'ultimo ha osservato un'area di ~ 12 deg^2 divisa in 4 campi con ISOCAM (Cesarsky *et al.*, 1996) and ISOPHOT (Lemke *et al.*, 1996).

Il campo ELAIS-S1, centrato a RA=$00^h\ 24^m$ e DEC=$-43^o\ 28'$, copre un'area di circa 4 deg^2 nell'emisfero sud ed include il minimo di emissione Galattica a $100\mu m$; è stato osservato nel MIR (2.5-5.5 e 4-18μm) da ISOCAM, che ha rivelato una densità superficiale di 115 sorgenti deg^{-2} fino ad un flusso limite $F_{15\mu m}$=1 mJy (Lari *et al.*, 2001). Nell'ottico è stata eseguita una copertura spettroscopica da La Franca *et al.* (2001) e fotometrica (Berta *et al.*, 2006), utilizzando il telescopio ESO WFI di 2.2m nelle bande ottiche B, V, R.

Una survey di sorgenti X è stata eseguita da Puccetti *et al.* (2006) con XMM-Newton sulla regione centrale di ELAIS-S1 (0.6 deg^2), sfruttando l'ampio campo di vista del satellite. Quest'area è stata successivamente osservata

anche da Chandra con lo scopo di ottenere coordinate più precise delle sorgenti individuate da XMM, data la piccola PSF di appena 0.5 arcsec che consente di rimuovere ambiguità nell'identificazione delle sorgenti.

Ulteriori osservazioni fotometriche sono in via di completamento con VIMOS@VLT nelle bande I e z (programma ESIS). ELAIS-S1 è inoltre uno dei campi sud dello Spitzer Legacy Program SWIRE (Spitzer Wide-area InfraRed Extragalactic survey; Lonsdale *et al.* (2003)) ed ha copertura nei quattro canali IRAC a 3.6, 4.5, 5.8, 8.0 μme nei 3 canali MIPS a 24, 70 e 160 μm. Per la stessa regione centrale osservata da XMM ho curato un progetto di copertura spettroscopica nella banda R con gli strumenti VIMOS@VLT, FORS@VLT e ESO@3.6m, arrivando ad oltre 2'000 spettri di sorgenti selezionate tramite X, ottico e MIR.

Questa survey può quindi contare su una completa copertura multi-banda: XMM-Newton per selezionare un campione in banda X e fornirne gli spettri, Chandra per stabilire le posizioni delle sorgenti X con precisione al secondo d'arco, VLT per avere fotometria e spettroscopia ottica, Spitzer per la fotometria NIR e MIR.

2.1 Fotometria NIR and MIR

Il campo ELAIS-S1 è stato osservato da Spitzer nel Dicembre 2004, sia con l'InfraRed Array Camera (IRAC) nel near-infrared (NIR) che con il Multiple Imaging Photometer for Spitzer (MIPS) nel mid-infrared (MIR), fino a flussi limite di 0.15 mJy a 24μm e di 3.7μJy a 3.6μm (corrispondenti a 5 sigma; Lonsdale *et al.* (2004)) (v. Fig. 2.1).

Le osservazioni Spitzer sono disponibili in quattro canali IRAC, centrati a 3.6, 4.5, 5.8, 8.0μm, nei canali MIPS 24, 70, 160μm e coprono tutto il campo ELAIS-S1 ($\approx$ 7 deg^2). L'incertezza sul flusso è all'incirca del 10%, come descritto nella SWIRE data release (Surace and SWIRE, 2004). I cataloghi

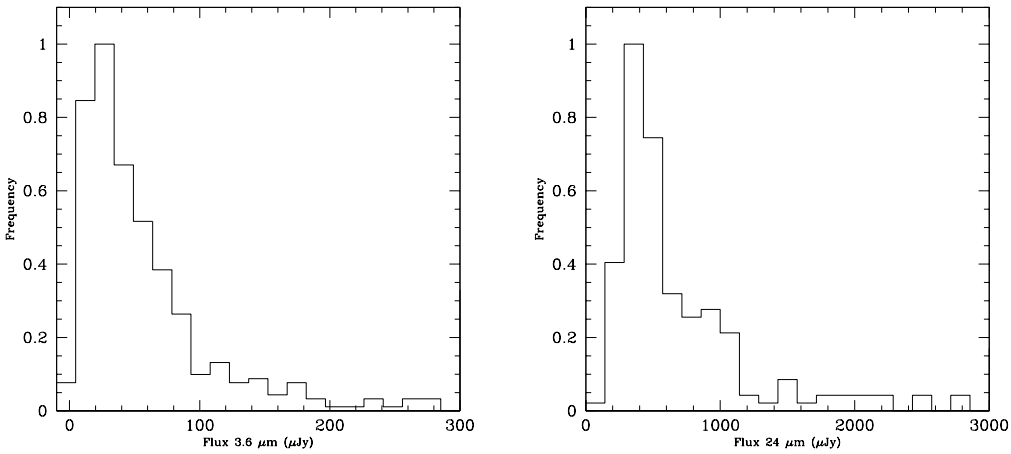

Figura 2.1: Distribuzione delle sorgenti X nei flussi IRAC 3.6 μm (sinistra) e 24 μm(destra).

delle sorgenti ci sono stati forniti dal Team SWIRE. La profondità della survey è riassunta nella Fig. 2.2.

2.2 Fotometria ottica e K

Il campo è stato osservato tra il Luglio 2004 e l'Ottobre 2005 con VIMOS@VLT per ottenere dati fotometrici nella banda R fino a $\sim$ 24.5 (v. Fig. 2.3), con tempi d'integrazione di 180 secondi.

L'array VIMOS consiste di 4 CCD (chiamati quadranti), con un campo di vista di $7'$x$8'$ ciascuno ed un pixel size di 0.205 arcsec/pixel. I quattro quadranti sono separati da gap larghi $2'$. I puntamenti sono stati organizzati in modo da ottenere la copertura più completa possibile e da riempire i gap tra un quadrante e l'altro.

Il campo XMM ELAIS-S1 è anche parte dell'ESO Large Programme 170.A-0143 ed è stato osservato con SOFI@NTT nelle banda J e Ks, fino a J=21 e Ks=19.5 (v. Fig. 2.3). Dispone inoltre della fotometria BVR

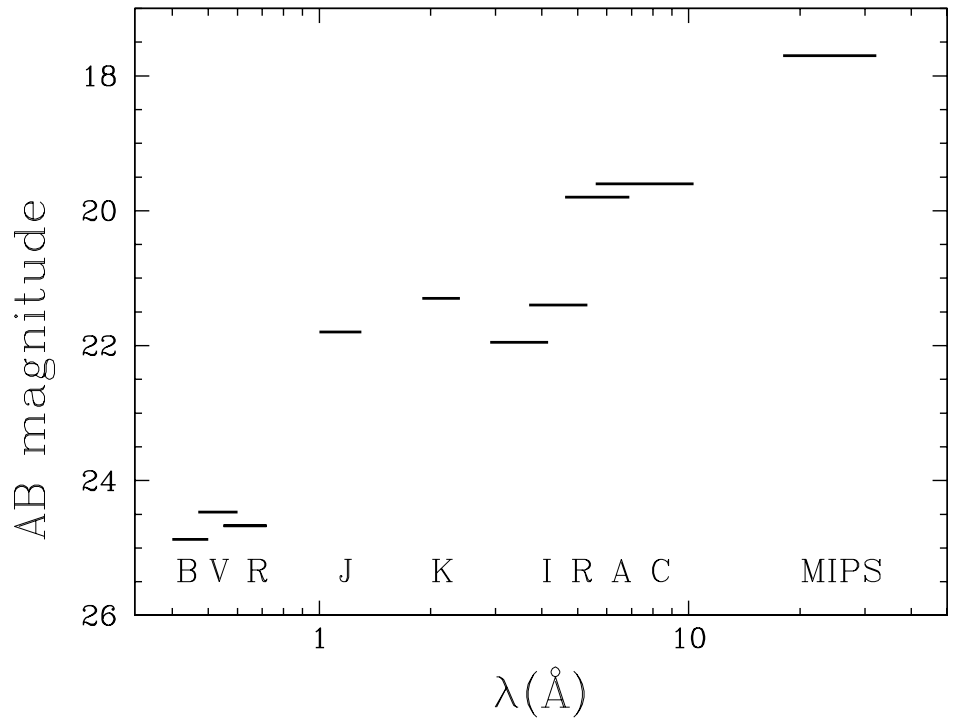

Figura 2.2: Magnitudini limite raggiunte per la object detection nella survey ELAIS-S1, nelle varie bande da lunghezze d'onda ottiche a mid-infrared (la larghezza delle barre orizzontali non indica l'effettiva ampiezza in λ delle varie bande).

ESIS (ESO-Spitzer Imaging Extragalactic WFI Survey, Berta *et al.* (2006)), eseguita con il Wild Field Imager (WFI) al 2.2m dell'ESO.

2.3 Osservazioni X

Le osservazioni di XMM-Newton coprono un'area contigua di 0.6 deg^2 nel campo ELAIS-S1 per un tempo totale di 400 ks, fino ad un flusso limite di circa 2.5 $\times 10^{-15}$ erg s^{-1} cm^{-2} nella banda 2-10 keV e 5 $\times 10^{-15}$ erg s^{-1} cm^{-2} in quella 0.5-2 keV.

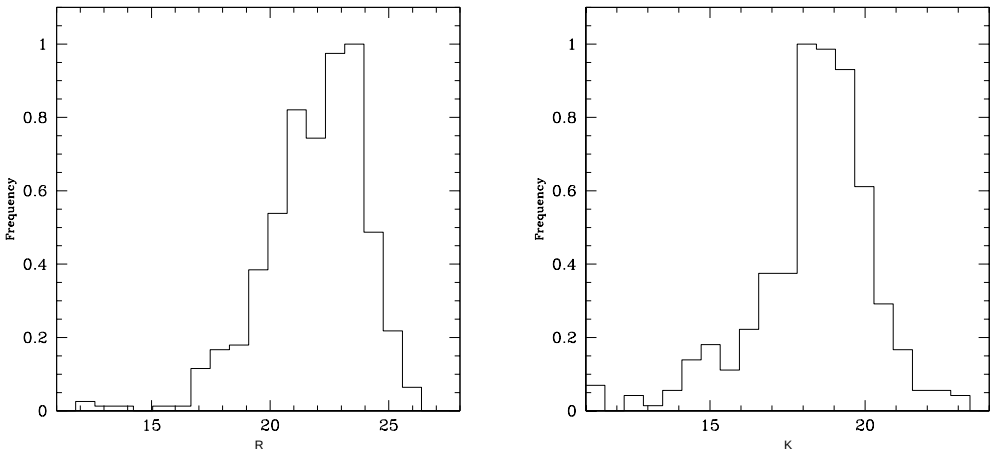

Figura 2.3: Distribuzione in magnitudine R (sinistra) e K (destra) per il campione XMM-Newton.

Sono state eseguite da Maggio a Luglio 2003 con EPIC (European Photon Imaging Camera). La detezione delle sorgenti è stata eseguita sulle immagini sovrapposte nelle quattro bande di energia: 0.5-10 keV (banda intera), 0.5-2 keV (banda soft), 2-10 keV (banda hard) e 5-10 keV (banda ultra-hard); 478 sorgenti sono state individuate (Puccetti *et al.*, 2006).

Siccome molte delle sorgenti X individuate hanno controparti ottiche deboli (R=23.5-25.5), la probabilità di trovare per caso una galassia di quelle magnitudini all'interno delle regioni di confidenza di XMM (80% entro un raggio di 3 arcsec, 95% entro uno di 5.5 arcsec) sono non trascurabili: 23% [65%] nel caso di una galassia di R=24.5 [25.5] entro 3 arcsec. Ciò rende essenziale sviluppare un metodo per identificare la giusta controparte ottica/infrarossa della sorgente X. Il modo migliore è sfruttare la PSF di Chandra che può arrivare a 0.5, consentendo una sicura identificazione della controparte. A questo scopo abbiamo utilizzato i cinque puntamenti Chandra illustrati in Fig. 2.4, per un'area di 0.32 deg^2 e 150ks totali di esposizione. Queste osservazioni hanno permesso di determinare posizioni accurate per

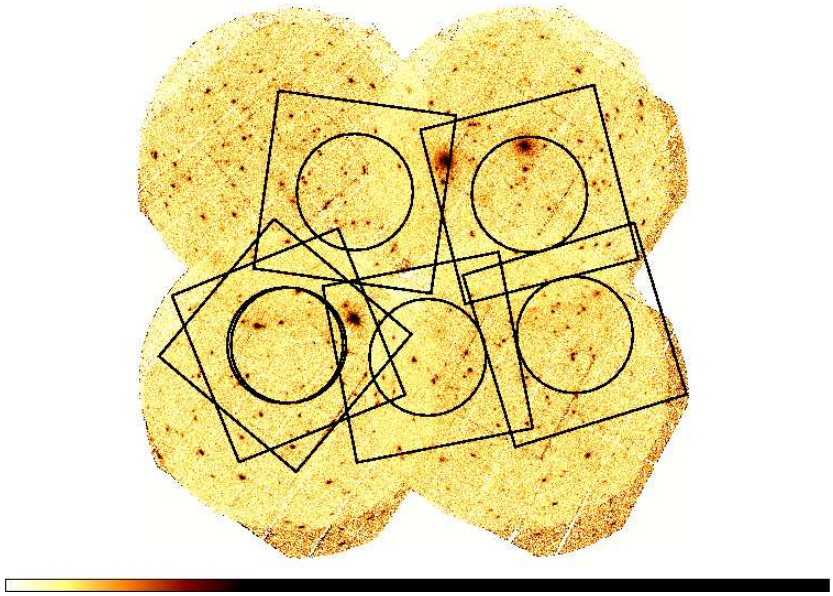

Figura 2.4: Mosaico delle osservazioni XMM (combinazione di PN e MOS) con sovrapposte le regioni dei puntamenti Chandra (quadrati neri) e dei 5.5 arcmin centrali di ogni puntamento (cerchi neri).

circa 200 sorgenti (50% del campione).

2.4 Spettroscopia ottica

Il campo ELAIS-S1 è stato oggetto di due run di osservazioni spettroscopiche con VIMOS@VLT, da noi pianificate e preparate, nelle estati 2004 e 2005. Abbiamo inoltre eseguito personalmente in situ un run spettroscopico delle sorgenti più brillanti (R<21) in ELAIS-S1 con EFOSC2@3.6m dell'ESO, in Cile nell'Ottobre 2005.

Più recentemente sono stati completati due run spettroscopici con FORS2@VLT finalizzati all'identificazione di sorgenti con forte emissione MIR ma debole magnitudine ottica ed X.

Lo spettrografo VIMOS@VLT è stato utilizzato per raccogliere gli spettri ottici. Le osservazioni sono state eseguite nella modalità Multi-Object

Spectroscopy (MOS) con il grism a bassa risoluzione ($\lambda/\Delta\lambda \sim 210$), con copertura in lunghezza d'onda 5500-9500 Å. Grazie alla modalità MOS siamo riusciti ad inserire una media di 30 fenditure su ogni maschera. Le sorgenti da osservare sono state selezionate dando priorità alle sorgenti con detection X, quindi alle $24\mu m$, alle $8\mu m$ ed infine alle sorgenti individuate in K; il tutto fino ad una magnitudine limite R=24. Per ottenere un campione privo di bias non abbiamo specificato alcun criterio di colore nella selezione delle sorgenti da osservare; disponiamo così di un campione spettroscopico di circa 2000 sorgenti, che si riducono a 1414 e 1280 considerando solo le stime affidabili di z con qualità superiore a 1.5 (stima estremamente probabile ma non confermata) e 2 (stima affidabile), rispettivamente.

Tabella 2.1: Lista dei run spettroscopici in ELAIS-S1

Strumento	periodo	magnitudini R	# spettri	# spettri qualità 2
VIMOS@VLT	73	18-24	956	871
VIMOS@VLT	75	18.5-23.5	342	301
EFOSC2@3.6m	76	16-21	34	32
FORS2@VLT	77	20-22	13	13
FORS2@VLT	78	19-24	69	63

Ogni osservazione VIMOS consiste in 4 puntamenti jitterati[1] con offset del telescopio di 2 arcsec lungo la direzione delle slit. Ogni puntamento ha un tempo d'integrazione minimo di 30 minuti. L'eseguire più puntamenti jitterati trova la sua giustificazione nella maggiore efficacia nel rimuovere il background ed il fringing[2], aspetto quest'ultimo di enorme importanza per

[1] La tecnica del jittering consiste nello scomporre un'unica esposizione in più puntamenti con un leggero offset tra loro, in modo da collocare la stessa sorgente in punti diversi del CCD; questo permette una migliore sottrazione del background.

[2] Con il termine fringing si indicano le bande di interferenza costruttiva e distruttiva che si osservano in molti CCD a causa della riflessione di luce visibile o infrarossa fra superfici

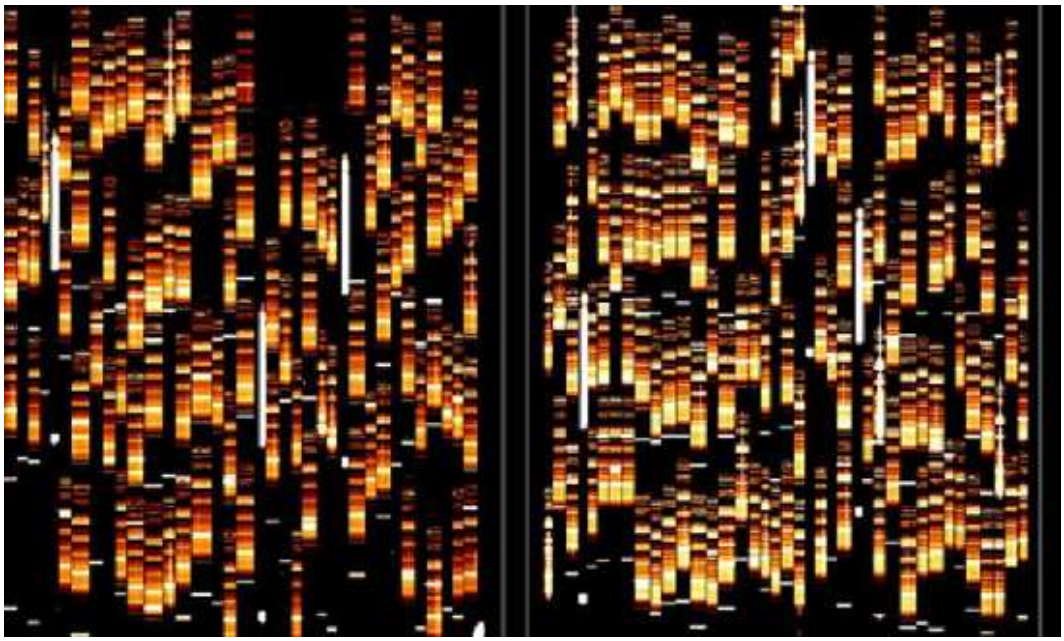

Figura 2.5: Esempio di due dei quattro quadranti che costituiscono un puntamento VIMOS. Ogni rettangolo rappresenta una fenditura (lunga come il lato corto del rettangolo) con dispersione in λ in direzione del lato lungo. Ad ogni fenditura corrisponde uno spettro.

osservazioni spettroscopiche eseguite con un grism che si spinge a lunghezze d'onda superiori a $\sim 8000\mathring{A}$ (come nel caso del Low-Resolution Red usato). I tempi di esposizione totale per puntamento variano da 1 a 4 ore.

L'ampio campo di vista di VIMOS e l'elevato numero di spettri per puntamento (centinaia di spettri per esposizione, v. Fig. 2.5) rendono il processo di riduzione dati difficile da eseguire con le normali procedure. Abbiamo quindi utilizzato VIPGI (VIMOS Interactive Pipeline and Graphical Interface, Scodeggio *et al.* (2005)), un software dedicato che gestisce la riduzione dati di un quadrante alla volta, in quanto le calibrazioni dello strumento differiscono per ogni quadrante. Solo gli ultimi passaggi della riduzione utilizzano la combinazione di tutti e quattro i quadranti.

---

interne.

I passi principali della riduzione dati per ogni quadrante sono i seguenti:

- **Localizzazione degli spettri** si utilizza un flat-field spettroscopico e dei First guesses sulla posizione delle fenditure archiviati all'interno degli header dei file grezzi (raw-data). Partendo da queste posizioni il programma individua i bordi delle aree illuminate del CCD e fitta la loro forma con una funzione polinomiale per determinare con precisione la posizione delle diverse fenditure.

- **Calibrazione in lunghezza d'onda** basandosi sulla posizione di alcune forti righe di emissione della lampada di He-Ar si calcola e si inverte la soluzione di dispersione per convertire la dimensione spaziale del CCD (pixel) nella dimensione λ (Å).

- **Riduzione di dati scientifici** si sottrae il bias dai frame di tutti e quattro i quadranti ma non si corregge per flat-field. Questo perché le esposizioni di flat-field con il grism Low-Resolution Red (LRR) presentano un intenso fringing con struttura completamente diversa rispetto alle esposizioni scientifiche, a causa della differente distribuzione spettrale in energia tra lampada di calibrazione e cielo notturno. Quindi si individuano gli oggetti all'interno delle fenditure e si sottrae il cielo. Per individuare gli oggetti abbiamo usato una soglia di 2 σ e una larghezza minima per oggetto di 4 pixel. Eventuali rilevamenti di oggetti spuri (come per esempio finte sorgenti ai bordi delle fenditure o rumore elettronico del CCD) sono rimossi in seguito durante l'ispezione visiva degli spettri ridotti. La sottrazione del cielo è eseguita per ogni fenditura ed ogni esposizione scientifica separatamente, usando una stima mediana dello spettro del cielo calcolata sulle aree del CCD prive del segnale delle sorgenti precedentemente individuate. Lo spettro del cielo viene quindi sottratto dalle zone relative alle varie fenditure e gli spettri estratti e ricampionati ad una scala di lunghezze d'onda comune.

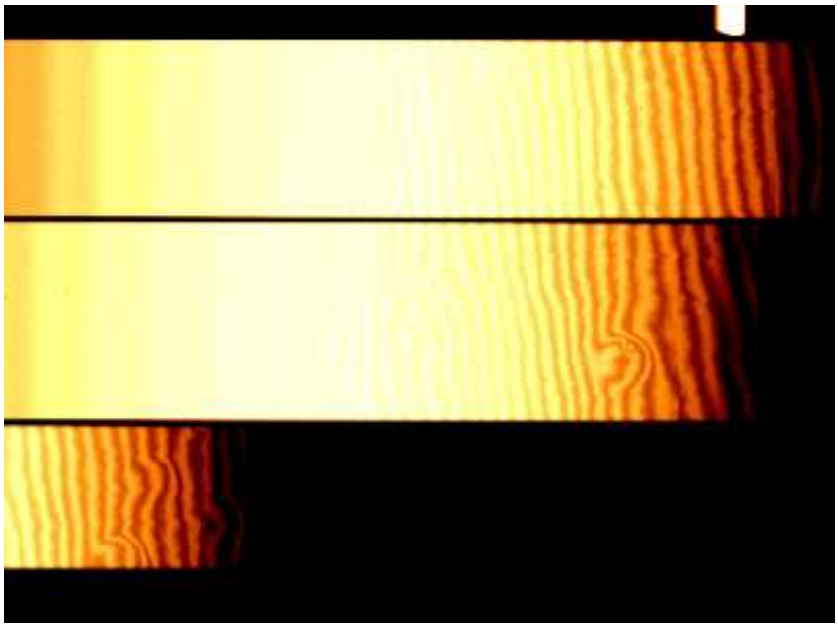

Figura 2.6: Flat-field spettroscopico di VIMOS con il grism LRR; sulla destra (λ maggiori) è visibile la struttura di interferenza che costituisce il fringing.

- **Correzione per fringing** le maggiori difficoltà nella riduzione di dati VIMOS presi col grism LRR sono dovuti al fringing, particolarmente intenso nella porzione rossa dello spettro ($\lambda > 7500\mathring{A}$). Un esempio della struttura del fringing visibile su un frame di flat-field è illustrato in Fig. 2.6. La rimozione del fringing è eseguita combinando le quattro esposizioni jitterate senza considerare gli offset del telescopio, così da ottenere una mappa mediana della struttura del fringing. Si sottrae quindi la mappa dei residui dalle quattro singole esposizioni che vengono poi combinate tenendo conto degli offset relativi per ottenere uno spettro bidimensionale medio per ogni fenditura. Si ripete la localizzazione delle sorgenti sullo spettro combinato e vengono estratti gli spettri monodimensionali usando la procedura di estrazione ottimizzata di Horne (1986).

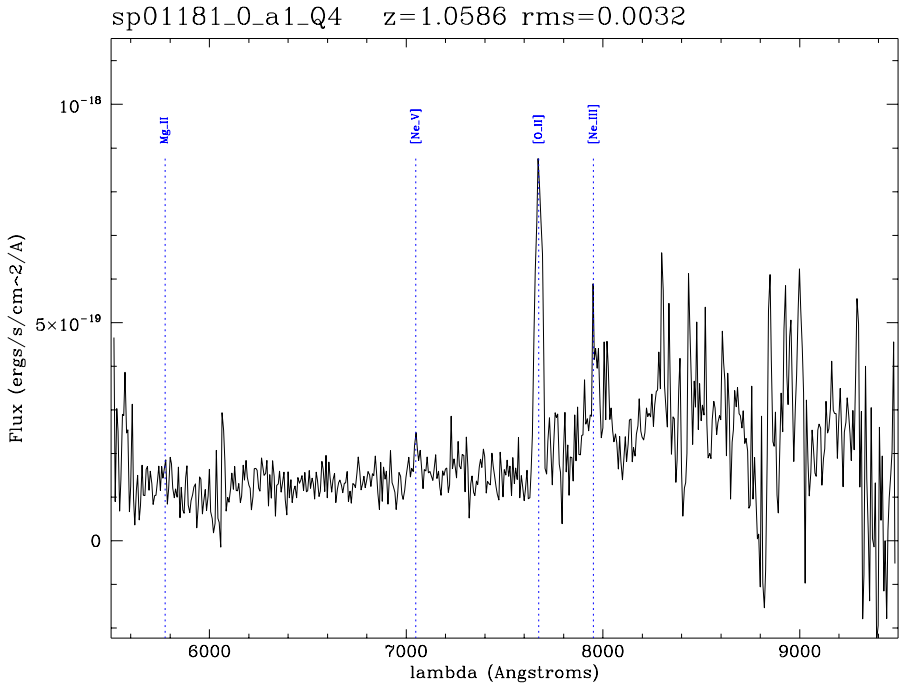

Figura 2.7: Esempio di sorgente debole (AGN) in cui il fringing rende inutilizzabile la parte rossa dello spettro.

Si ricorda che il fringing dovuto alla luce della sorgente non può essere corretto e che per sorgenti deboli ciò impedisce di utilizzare la parte rossa dello spettro ($\lambda > 7500\mathring{A}$) per quanto riguarda l'individuazione delle righe e la determinazione del redshift. Questo perché sorgenti poco luminose presentano normalmente righe di emissione ed assorbimento deboli, difficilmente distinguibili all'inteno della struttura del fringing (v. Fig. 2.7).

- **Calibrazione in flusso** non viene eseguita all'interno della procedura di riduzione perché questa non è in grado di produrre una curva di calibrazione uniforme (v. Fig. 2.8). Ciò è probabilmente dovuto ad una

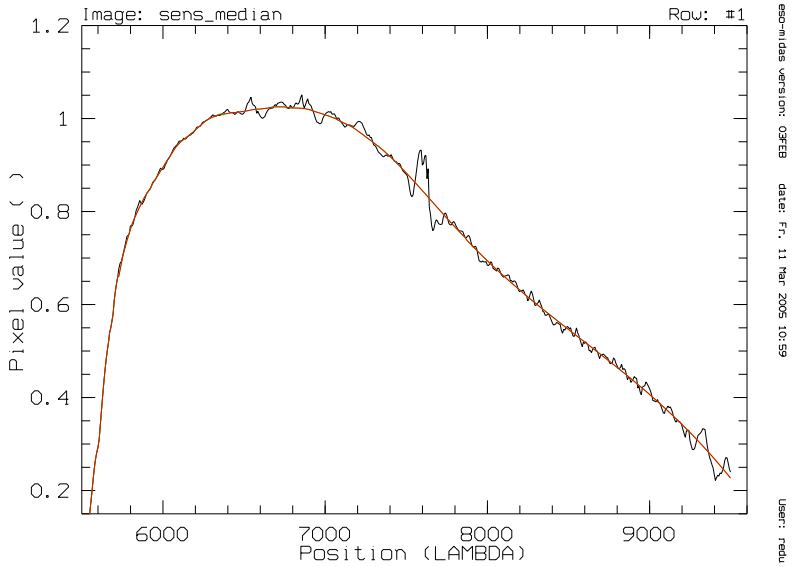

Figura 2.8: Esempio di curva di sensibilità in λ prodotta da VIPGI (in nero) e la curva di calibrazione media ottenuta da diverse osservazioni (in rosso).

differenza tra la stella standard spettrofotometrica calibrata in lambda da VIPGI e la tabella della standard di riferimento. Per aggirare questo problema abbiamo costruito una curva di calibrazione media ottenuta da diverse osservazioni di più stelle standard e l'abbiamo applicata allo spettro mono-dimensionale ottenuto con VIPGI.

2.4.1 Determinazione spettroscopica dei redshift

Per l'identificazione spettroscopica dei dati VIMOS ridotti abbiamo utilizzato un programma MIDAS appositamente scritto. Si è preferito non usare una procedura automatizzata (come *rvidlines* dell'ambiente IRAF) per poter meglio controllare ogni passaggio dell'identificazione e per vincolare la soluzione finale con righe sia in assorbimento che in emissione

simultaneamente[3] (metodo non possibile con *rvidlines*).

Per ogni sorgente il funzionamento della procedura di identificazione spettroscopica si può suddividere nei seguenti passi:

- Visualizzazione dello spettro monodimensionale calibrato, con indicazione delle lunghezze d'onda di particolari feature (assorbimenti tellurici, eventuali righe del cielo mal sottratte e picchi nella struttura del fringing);

- Scelta da parte dell'utente della porzione di spettro da analizzare e selezione di una o più righe (in emissione e/o in assorbimento) con una procedura semi-automatizzata di fit gaussiano del profilo della riga;

- Calcolo e visualizzazione dei redshift relativi a tutte le possibili soluzioni compatibili con le righe selezionate (viene utilizzata una libreria delle principali righe di galassie, starburst e AGN);

- Selezione da parte dell'utente della soluzione migliore (in base all'affidabilità e alla plausibilità delle varie righe considerate) tra quelle proposte dal programma e visualizzazione sullo spettro di tutte le righe presenti nella libreria, con evidenziate quelle selezionate dall'utente;

- Salvataggio su file di alcune informazioni (codice sorgente, redshift con relativa incertezza, codice della qualità dell'identificazione) e dell'ultima schermata visualizzata con spettro e righe della soluzione scelta, per un'eventuale successiva consultazione del fit.

La qualità degli spettri ottici dipende dalla magnitudine della sorgente. Spettri di sorgenti deboli hanno generalmente un minore rapporto segnale/rumore

[3]Il poter vincolare un'identificazione spettroscopica sia con righe in emissione che in assorbimento è di fondamentale importanza per tutte quelle sorgenti (per lo più ELG) in un intervallo di redshift tale da rendere visibili solo le righe OII λ3727 ed il break H-K del Ca λ 3933 3969.

e l'identificazione di feature in questi casi risulta più difficile. Inoltre (nel caso del grism LLR utilizzato) i residui della struttura del fringing ostacolano il riconoscimento di righe nella porzione rossa dello spettro ($\lambda > 7500\mathring{A}$).

Per questi motivi ad ogni soluzione di redshift è stato assegnato un codice di qualità. A spettri con 2 o più righe facilmente riconoscibili è stato assegnato un codice 2. A spettri con un'unica feature riconoscibile (ad esempio il MgII λ2799 largo o l'[OII] λ3727 stretto in emissione) è stato assegnato il valore 1. Infine le soluzioni incerte, per lo più nel caso di sorgenti deboli, sono state contrassegnate da codice di qualità 0.5.

Il numero di identificazioni del redshift sicure (qualità 2) è mostrata in Fig. 2.10, in funzione della magnitudine R. Si può notare un chiaro effetto di selezione: fino ad R $\sim$ 21 la frazione di determinazioni sicure del redshift è di circa l'80 % mentre crolla al 50% ed al 30% rispettivamente ad R 23 e 24.

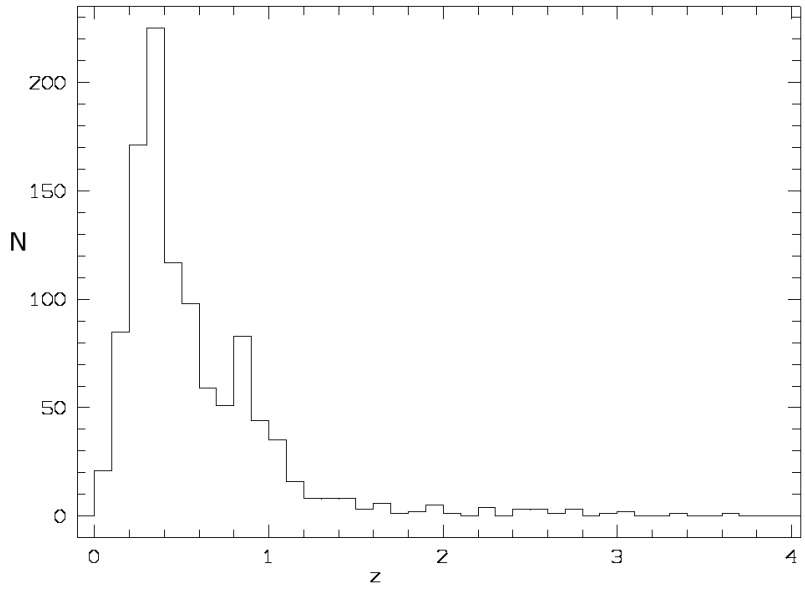

Figura 2.9: Istogramma della distribuzione in z delle sorgenti con stima del redshift di qualità 2.

All'interno di questo lavoro sono state utilizzate solo le determinazioni certe del redshift (qualità 2), così da disporre su un campione di z affidabile per analisi statistiche e per la procedura di SED-fitting descritta nel Cap. 3. In Fig. 2.9 è rappresentata la distribuzione in redshift delle sorgenti utilizzate in questo lavoro.

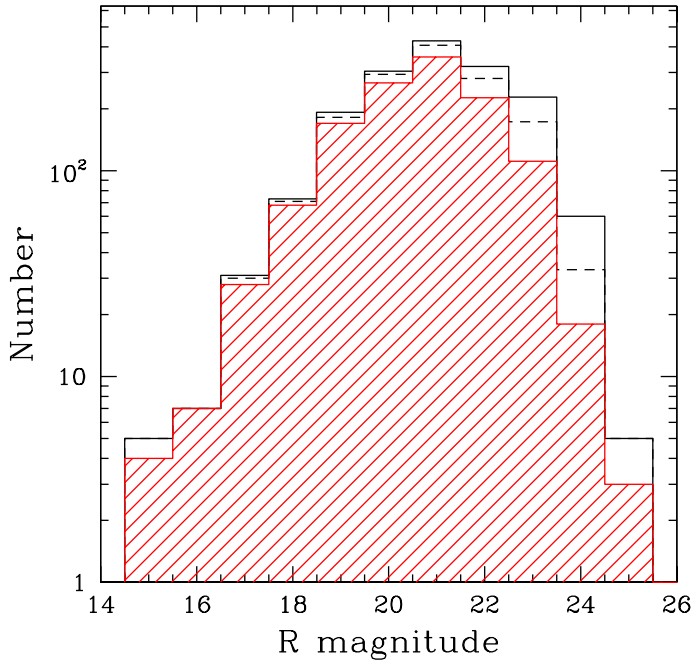

Figura 2.10: Istogramma del campione di sorgenti con redshift in funzione della magnitudine R; in nero il totale, in rosso gli z con qualità 2, in nero-linea tratteggiata gli z con qualità 1. La frazione delle identificazioni sicure diminuisce all'aumentare della magnitudine R

2.4.2 Classificazione spettroscopica

Abbiamo classificato le sorgenti in base alle caratteristiche spettrali ottiche in cinque classi:

- AGN a righe larghe (AGN1): sorgenti con righe larghe (FWHM > 2000 km s^{-1}) come il CIV λ1549, CIII] λ1909, MgII λ2799, [NeV] λ3346 3426, Hβ λ4861, Hα λ6563.

- AGN a righe strette (AGN2): sorgenti con righe strette (FWHM < 2000 km s^{-1}) ad alta ionizzazione che indicano la presenza di un AGN (CIV λ1549, CIII] λ1909, [NeV] λ3426). Con l'opportuna copertura in lunghezza d'onda la presenza di queste righe di emissione permette di classificare come AGN2 le sorgenti in cui righe larghe come il MgII λ2799 o la serie di Balmer dell'H non siano osservate.

- Galassie con righe di emissione (ELG): sorgenti che presentano righe strette in emissione ma nessuna traccia di AGN nel loro spettro ottico. Questi spettri mostrano righe di emissione a bassa ionizzazione, come [OII] λ3727, Hβ λ4861, [OIII] λ5007 4959, Hα λ6563 che possono essere prodotte da fotoni termici da stelle calde. Queste sorgenti mostrano spesso anche l'assorbimento Ca H-K λ3933 3969 ed il salto del continuo a 4000 $\AA$. Tuttavia la presenza di un AGN sottostante non può essere esclusa a causa dell'effetto di diluizione da parte della galassia ospite (Moran *et al.*, 2002) e potrebbe contribuire all'emissione IR senza essere la sorgente dominante.

- Galassie con righe di assorbimento (GAL): sorgenti con spettri tipici di galassie early-type caratterizzate da proprietà di assorbimento come il Ca HK λ 3933 3969 e il salto del continuo a 4000 $\AA$.

- Stelle: per lo più stelle M selezionate per la loro caratteristica emissione di corpo nero con righe di assorbimento a redshift compatibile con zero entro gli errori.

In diversi casi si osservano righe strette in emissione all'interno di un intervallo in lunghezza d'onda per cui non è possibile distinguere tra AGN2 ed ELG. Questo accade soprattutto in sorgenti a basso redshift (z<0.4) per

le quali, data la limitata finestra di osservazione in λ, vincolata dalla configurazione dello strumento, non risultano osservabili le righe di emissione (come per es. il [NeV] λ3426) che permetterebbero di rimuovere la degenerazione tra le due classi di sorgenti. In questi casi si ricorre all'uso dei diagrammi diagnostici classici (v. Tresse *et al.* (1996), Osterbrock (1989), Veilleux and Osterbrock (1987)) che includono uno o più dei seguenti rapporti tra l'intensità delle righe: [NII]/H_α, SII/(H_α+[NII]), OI/H_α, [OIII]/H_β e [OII]/H_β.

2.5 Catalogo multi-λ

Tutti i dati finora descritti sono stati combinati in un catalogo multi-λ con l'intento di studiare le proprietà di emissione IR delle sorgenti extragalattiche ed in particolare degli AGN.

Correlare sorgenti osservate in diverse bande a diverse profondità di flusso è un'operazione tutt'altro che banale, soprattutto quando l'elevato numero delle sorgenti non permette un controllo accurato caso per caso. Si è reso necessario stabilire dei livelli di confidenza entro i quali considerare una correlazione sicura piuttosto che rigettarla come spuria.

Il problema maggiore si è incontrato nella determinazione delle controparti delle sorgenti XMM-Newton. La sua risoluzione angolare è infatti di $\approx 6''$ e la maggioranza delle regioni d'incertezza attorno alle sorgenti X contiene diverse controparti ottiche e/o infrarosse. Abbiamo inizialmente adottato un approccio statistico per assegnare la controparte più probabile ad ogni sorgente X, calcolando la probabilità per ogni sorgente ottica di trovarsi, per caso, a meno di 6 di distanza da una X ed usando la distanza tra le posizioni X-ottiche (d_{X-O}) ed i conteggi nella banda R:

$$P(i) = 1 - exp(-d^2_{X-O}\ N/C)$$

dove C è una costante di normalizzazione (il cui valore non è rilevante dato che non interessa calcolare il valore assoluto di P(i) quanto piuttosto con-

frontare le probabilità relative a diverse sorgenti) ed N i conteggi di galassie in banda R in funzione della magnitudine. La nostra relazione di best-fit nella banda R è $logN = -1.744 + 0.267 \times R$. Abbiamo calcolato nello stesso modo la probabilità per le sorgenti IR usando i conteggi a $3.6\mu m$e confrontandola con la probabilità per la banda R.

Il passo successivo è stato quello di esaminare caso per caso l'assegnazione della controparte tenendo conto, oltre che della probabilità precedentemente calcolata, anche di altri fattori (come la distanza e i flussi K, IRAC e $24\mu m$).

Il problema dell'identificazione delle controparti ottiche e infrarosse è facilmente risolto per le sorgenti con copertura Chandra, in quanto la sua elevata risoluzione angolare (che può arrivare fino a 0.5) permette di rimuovere le degenerazioni introdotte dall'ampia PSF (Point Spread Function) di XMM-Newton.

Per l'unione dei cataloghi ottici ed infrarossi i problemi legati all'indeterminazione della corretta controparte sono stati assai minori, grazie alle ridotte incertezze posizionali.

La versione finale del nostro catalogo multibanda consiste in 3430 sorgenti $24\mu m$ e contiene le seguenti informazioni:

- coordinate e flussi X nelle tre bande XMM;
- coordinate ottiche ESIS e magnitudini fotometriche nelle bande B, V, R;
- coordinate VIMOS, magnitudine in banda R, redshift e classificazione spettroscopica;
- coordinate e magnitudini SOFI@NTT nelle bande fotometriche Ks e J;
- distanza X-O e X-IRAC;
- coordinate e flussi nelle quattro bande IRAC, 3.6, 4.5, 5.8 and 8.0 μm;
- flussi MIPS nella banda 24 μm;

- classificazione della SED (v. Par. 3.2)

In questo lavoro ci siamo concentrati sul sottocampione di sorgenti 24μm, in quanto tale banda consente di esplorare sorgenti con forte emissione da polvere nell'Universo a redshift z>1. A 0.7<z<2.5 infatti la banda 24μm redshiftata campiona l'emissione rest-frame 6-12μm da parte di PAH e grani di polvere di piccole dimensioni, risultando così la finestra di osservazione più sensibile per studiare galassie brillanti nell'infrarosso ad alto redshift.

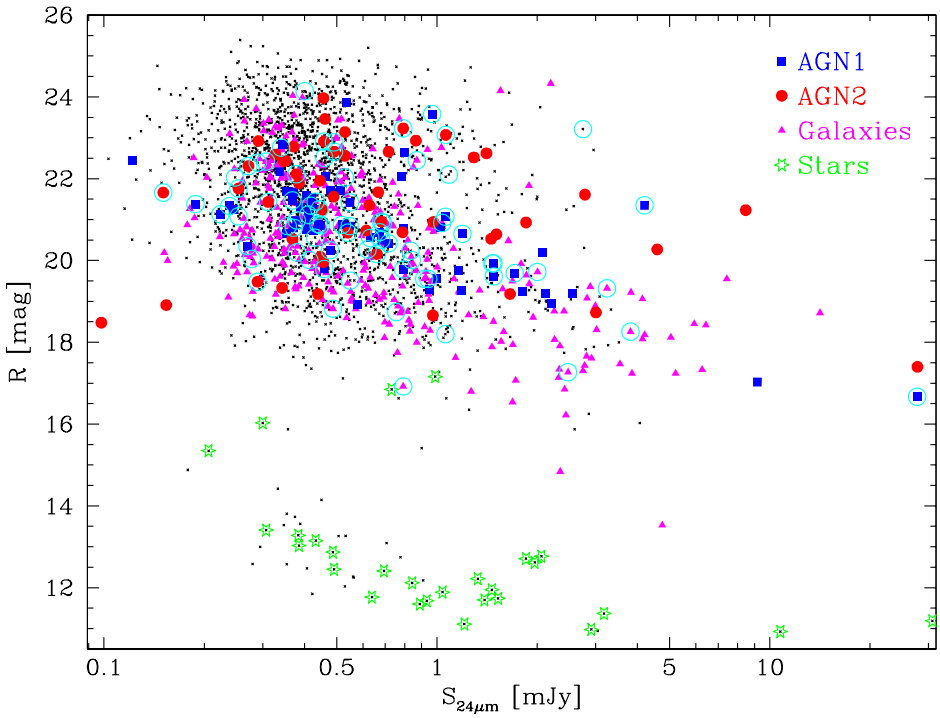

Figura 2.11: Magnitudine R in funzione del flusso 24μm. Ove disponibile è indicata la classificazione spettroscopica. I cerchi azzurri indicano le sorgenti classificate AGN in base alla loro emissione X.

Delle 361 sorgenti 24μm con copertura spettroscopica presenti nel nostro campione, 50 sono state classificate AGN1, 46 AGN2, 226 galassie con righe

di emissione (ELG, ossia spirali caratterizzate da normale formazione stellare oppure galassie starburst) e 39 galassie passive. In Fig. 2.11 è mostrata la distribuzione delle sorgenti sul piano R/24μm con relativa classificazione spettroscopica, mentre in Fig. 2.12 è mostrata la luminosità 24μm (calcolata rest-frame utilizzando il template che meglio riproduce l'IR-SED della sorgente; v. 3) in funzione del redshift spettroscopico.

Si può notare come, in analisi che utilizzano un campione limitato in flusso, il confronto tra diverse popolazioni extragalattiche si traduca in quello tra diverse età cosmologiche e diversi intervalli di luminosità delle sorgenti.

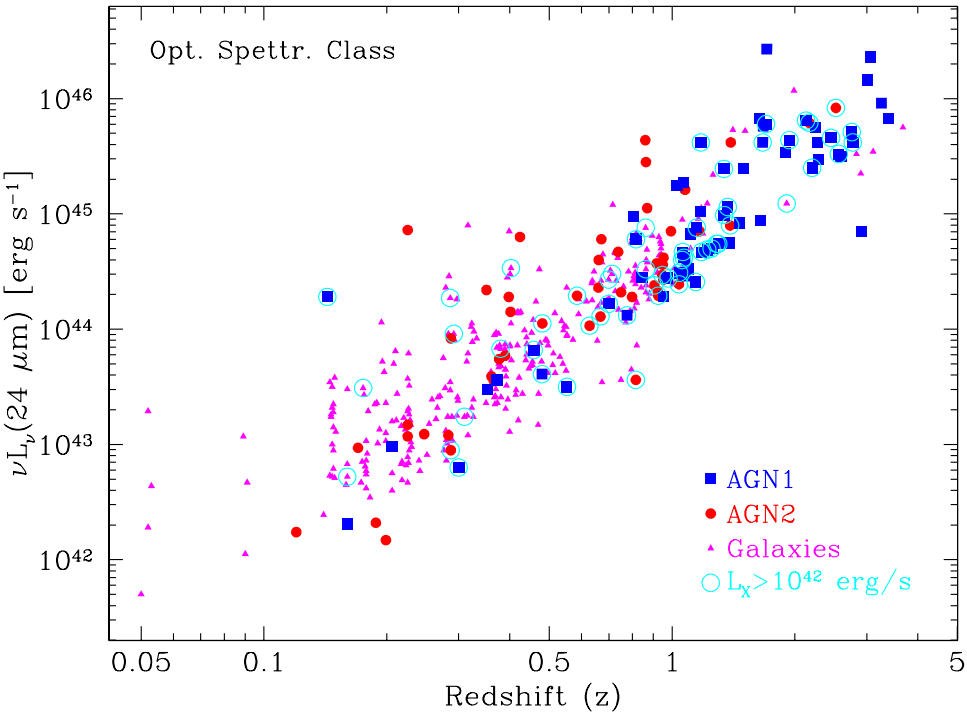

Figura 2.12: Luminosità 24μm in funzione del redshift per le sorgenti extragalattiche del campione spettroscopico. I cerchi azzurri indicano le sorgenti classificate AGN in base alla loro emissione X.

Capitolo 3

Analisi delle proprietà IR degli AGN

Da un gran numero di studi sulla radiazione cosmica di fondo nei raggi X (XRB) e su campioni locali di galassie emerge che la maggior parte degli AGN nell'Universo (e quindi la maggior parte di massa accresciuta) sia composta da una popolazione oscurata (in seguito AGN2). L'assorbimento nei raggi X è provocato da elevate densità colonnari (N_H) di gas circumnucleare lungo la linea di vista, ed è generalmente accompagnato (secondo il modello attualmente più accreditato) da un analogo assorbimento in banda ottica.

Tali proprietà rendono questa classe di sorgenti assai difficile da osservare alle frequenze dello spettro elettromagnetico maggiormente utilizzate per lo studio della controparte non assorbita. Per questo motivo il numero di AGN non riconosciuti nelle survey ordinarie è tutt'oggi molto incerto. Tentativi di risolvere questo problema sono stati fatti (Ueda et al. 2003, La Franca et al. 2005) considerando gli effetti di selezione nella banda X 2–10 keV, ed hanno portato a stime della densità di AGN con densità colonnari fino a $N_H = 10^{24} cm^{-2}$. Per valori maggiori di N_H l'assorbitore diventa otticamente spesso per scattering Compton, e gran parte della radiazione emessa dall'AGN risulta non più visibile in banda X (considerando i limiti degli attuali telescopi per osservazioni ad alte energie).

Gran parte della radiazione così assorbita e non più osservabile direttamente alle alte energie viene riprocessata da materia fredda a lunghezze d'onda maggiori, dando a questa classe di AGN oscurati una particolare impronta spettrale in banda infrarossa (IR). Questo rende possibile aggirare il problema dell'assorbimento in banda X e studiare la popolazione di AGN2 attraverso la loro emissione riprocessata.

L'idea di fondo di questo lavoro consiste nello studiare le proprietà spettrali IR degli AGN con il fine di individuare dei criteri per selezionare la componente di AGN caratterizzata da elevato assorbimento (quindi non osservabile con metodi standard) e successivamente isolarne un campione per studiarne le proprietà evolutive.

Tale analisi è stata eseguita combinando dati osservativi e simulazioni teoriche sull'emissione degli AGN basate sulle attuali conoscenze di tali sistemi fisici. Per quanto riguarda il lato sperimentale, abbiamo a disposizione una lunga serie di dati (v. Cap. 2), alla cui raccolta ho contribuito in prima persona sia sul piano della progettazione/preparazione, che su quello di esecuzione delle osservazioni al telescopio prima e di riduzione ed analisi dati poi.

L'efficacia di analisi multi-banda per la selezione e lo studio di AGN oscurati è ormai accertata. Diversi lavori (Lacy *et al.* (2004), Stern *et al.* (2005), Hatziminaoglou *et al.* (2005)) hanno messo in luce come sia possibile separare differenti popolazioni galattiche (galassie passive, con intensa formazione stellare o AGN) in base al loro posizionamento in diagrammi di colore tra determinate bande del vicino infrarosso (NIR).

Il naturale perfezionamento di analisi di questo tipo consiste nell'estendere il numero di bande fotometriche e confrontare il loro andamento con una libreria di distribuzioni spettrali di energia (SED) di natura teorica o osservativa. Per il successivo lavoro di fit spettrali abbiamo utilizzato una libreria di 21 template ottenuti dalla composizione di dati osservativi e di modelli teorici (Polletta *et al.*, 2006).

Questo tipo di analisi si è rivelato un ottimo strumento in grado di identificare sorgenti la cui emissione IR sia dominata dall'AGN oppure sia dovuta alla sola componente stellare della galassia, in accordo con gli altri metodi precedentemente utilizzati per la selezione di AGN (banda X 2–10keV e spettroscopia ottica). Inoltre l'approccio utilizzato consente di riconoscere il contributo degli AGN anche in sorgenti che ricadono nel regime intermedio, ossia in cui la IR-SED presenta l'impronta di un continuo ionizzante assorbito da polvere fredda, spiegabile sia con la presenza di un nucleo attivo oscurato che con processi di intensa formazione stellare (galassie starburst). È proprio all'interno di questa classe di oggetti che si nasconde la maggior parte degli AGN2 persi dalle survey X ed ottiche (Moran *et al.*, 2002).

In questo capitolo saranno presentati i due approcci utilizzati per selezionare AGN oscurati nell'IR, il primo basato sui diagrammi di colore ed il secondo sul SED-fitting.

3.1 Diagrammi di colore

Alcuni autori (tra gli altri Lacy *et al.* (2004), Stern *et al.* (2005)) hanno avanzato l'ipotesi di poter selezionare AGN con un semplice diagramma ottenuto con i flussi dei soli 4 canali IRAC del satellite IR Spitzer, con lunghezze d'onda 3.6, 4.5, 5.8 ed 8μm (che denoteremo per semplicità con i numeri da 1 a 4).

In particolare, studiando la distribuzione delle sorgenti IR su questi diagrammi colore-colore si è osservato che le galassie ospitanti un nucleo attivo tendono ad occupare un luogo separato da quello delle galassie passive o caratterizzate da intensa formazione stellare.

Il diagramma suggerito da Lacy *et al.* (2004), ad esempio, utilizza i colori 3-1 e 4-2, che definiscono le pendenze della SED negli intervalli sovrapposti 3.6-5.8μm e 4.5-8μm. In Fig. 3.1 e 3.2 riportiamo il suddetto diagramma per le sorgenti del nostro campione, con evidenziata la regione relativa al criterio

di selezione degli AGN proposto da Lacy *et al.* (2007); i cerchi indicano gli AGN classificati tramite dati X o SED infrarossa.

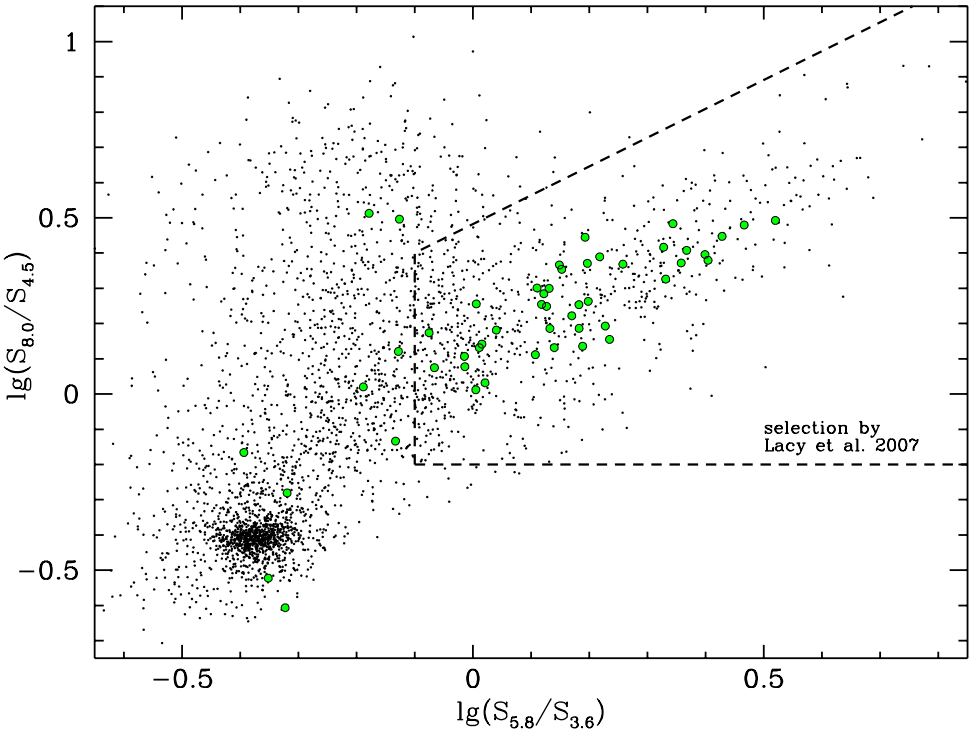

Figura 3.1: Diagramma colore-colore basato sulle 4 bande IRAC relativo al nostro campione. In verde sono indicati gli AGN selezionati per via della loro luminosità hard-X ($L_{2-10keV} > 10^42$ erg s^{-1}); la linea tratteggiata rappresenta il criterio di selezione proposto da Lacy *et al.* (2007).

Come si può vedere, in un diagramma di questo tipo le sorgenti si dispongono su due bracci, uno verticale ed uno diagonale verso alti valori in entrambi i colori. Il punto di incontro di queste due distribuzioni (con valore negativo di circa -0.4 per entrambi i colori) è il luogo delle sorgenti dominate da emissione stellare (galassie passive), aventi pendenza negativa in λ in tutto l'intervallo NIR-MIR.

Il braccio diagonale contiene sorgenti con SED a legge di potenza, flusso

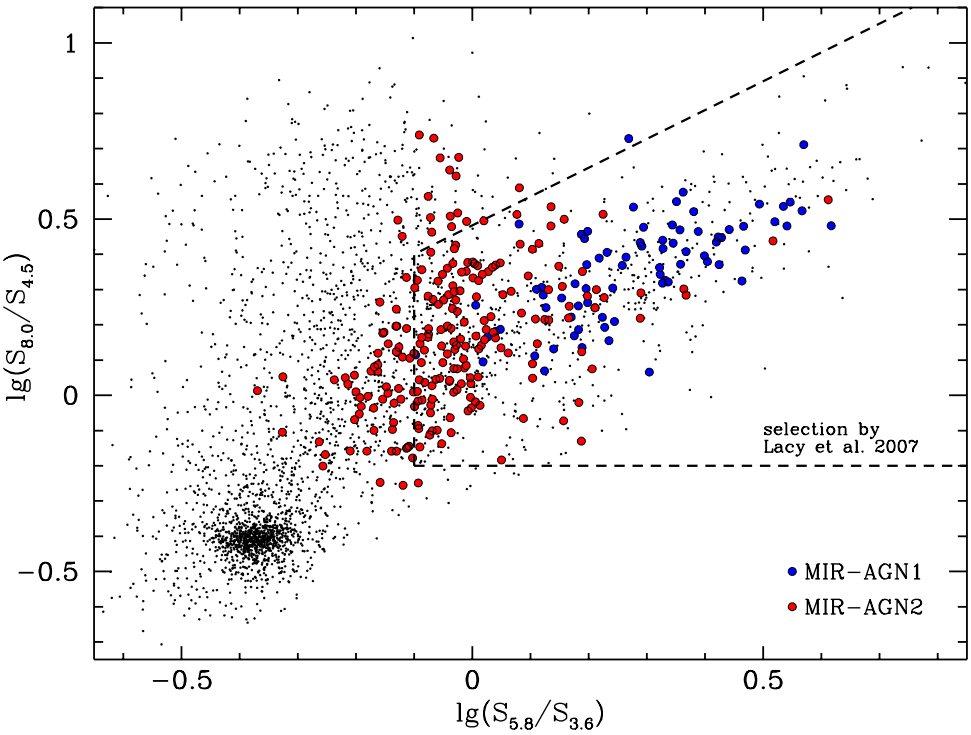

Figura 3.2: Come in figura precedente. In blu sono indicati gli AGN1 selezionati tramite fit della IR-SED, in rosso gli AGN2.

crescente verso λ maggiori, caratteristico di galassie dominate da un nucleo attivo (v. Cap. 1); quello verticale ospita invece galassie con SED non a legge di potenza ma con picchi di emissione (la cui entrata o meno all'interno della banda IRAC $8\mu m$ dipende dal redshift della sorgente) da PAH, legati a fenomeni di intensa formazione stellare (starburst).

In Fig. 3.1 sono indicati in verde gli AGN selezionati attraverso criteri X ($L_{2-10keV} > 10^{42}$ erg s^{-1}), in Fig. 3.2 in blu gli AGN1 selezionati tramite fit della IR-SED, in rosso gli AGN2. Come si può notare, la quasi totalità degli hardX-AGN e dei MIR-AGN1 rientra all'interno della selezione rappresentata ma una frazione consistente dei MIR-AGN2 non risultano selezionabili con un semplice criterio di colore, se non introducendo un elevato grado di

contaminazione da galassie starburst. Tale risultato è confermato anche dalla spettroscopia ottica, sebbene con una statistica inferiore.

Anche esplorando altri criteri di colore per selezionare AGN, adottando diverse combinazioni di bande NIR/MIR, ottiche od X, non risulta possibile isolare un campione completo di AGN con basso livello di contaminazione da parte di galassie starburst. Tali criteri di selezione risultano più adatti per isolare sorgenti particolari od estreme (richiedendo per esempio un alto valore X/O o $24\mu m$/X) piuttosto che per selezionare una popolazione di AGN oscurati, superando le incompletezze delle survey tradizionali.

3.2 Fit delle SED

Analizzare le proprietà spettrali delle galassie (in particolare degli AGN) attraverso il rapporto dei flussi in due bande fotometriche (colore) costituisce un approccio alquanto semplificato rispetto all'utilizzo di dati spettroscopici. Questi permettono infatti una misura diretta della distribuzione spettrale di energia (SED) e del redshift a cui si trova la sorgente.

D'altra parte non è sempre possibile disporre di tali informazioni, soprattutto per vasti campioni di sorgenti e per flussi deboli. Esiste tuttavia una sintesi tra i due metodi che consiste nel basarsi sulle informazioni spettroscopiche per costruire una serie di SED che ben rappresentino le diverse tipologie di sorgenti; tale libreria di template può essere quindi utilizzata all'interno di un metodo di best-fitting per risalire all'intera forma della SED di una sorgente partendo da una serie di bande fotometriche.

Ovviamente più è alto il numero di template utilizzati maggiore è la precisione con cui si conosce la SED della sorgente. Tale aumento di accuratezza richiede tuttavia un maggior numero di bande fotometriche nonché minori incertezze sui flussi per rimuovere la degenerazione tra le diverse soluzioni.

Questo metodo consente inoltre di calcolare il redshift a cui si trova la sorgente in esame. Sebbene non si riesca a raggiungere la stessa precisione di una

determinazione spettroscopica, con i dati in nostro possesso si è dimostrato possibile vincolare simultaneamente la classe spettrale di una sorgente ed il suo redshift, come verrà presentato più avanti.

Nei prossimi paragrafi verranno descritti i dettagli di questa procedura di SED-fitting ed i passaggi con cui è stata calibrata, testata ed ottimizzata.

3.2.1 Programma e dati utilizzati

Il programma utilizzato è LEPHARE, un codice sviluppato da Ilbert e Arnouts per eseguire fit di dati fotometrici con una libreria di template. Si tratta di un programma versatile che permette di configurare e personalizzare ogni aspetto della procedura di fit: la scelta e modifica dei template, il numero ed i filtri delle bande fotometriche, l'entità e le proprietà di estinzione da polvere, la possibilità di stimare il redshift e molto altro.

La versatilità di LEPHARE ci ha permesso di studiare la procedura di fit in dettaglio valutando il peso e l'efficacia di ogni singola modifica apportata. L'uso di alcuni codici scritti appositamente in Midas o SuperMongo ha reso più veloce ed automatizzata questa fase di testing.

I codici esterni a LEPHARE usati sono 3:

- uno script MIDAS che legge le informazioni contenute nel catalogo di ELAIS-S1 (v. Par. 2.5) e seleziona il campione di sorgenti su cui verrà eseguita la procedura di fit sistemando i dati in una forma interpretabile da LEPHARE;
- un altro script MIDAS che a fit ultimati riorganizza l'output di LEPHARE in un formato comprensibile ed adatto all'esecuzione di analisi statistiche;
- una macro SuperMongo che analizza i fit ottenuti con le diverse SED utilizzate, li compara e visualizza l'andamento del χ^2 in funzione della SED, oltre a 3 grafici con il confronto tra i dati fotometrici e i template relativi ai 3 migliori fit.

In particolare l'ultimo script ci ha consentito di seguire con precisione le conseguenze sull'esito finale delle varie modifiche da noi apportate alla procedura di fit (v. Par. 3.2.2).

I dati fotometrici utilizzati sono quelli già descritti in precedenza (v. Cap. 2) e coprono l'intervallo spettrale che va dall'ottico al medio infrarosso. Le bande sono 10: B, V, R, K, 3.6μm, 4.5μm, 5.8μm, 8.0μm 15μme 24μm.

Per ogni banda fotometrica sono noti il flusso e la sua incertezza, utilizzata da LEPHARE per attribuire un livello di confidenza alla bontà del fit. Tuttavia l'uso di un numero ridotto di template, ossia una discretizzazione delle possibili soluzioni, introduce delle ulteriori incertezze che vanno a sommarsi a quelle fotometriche strumentali. Tali errori variano da banda a banda e risultano tanto maggiori quanto più ampia è la differenza tra le diverse SED. Al contrario più fitto il campionamento minori le incertezze. La trattazione di tali errori verrà discussa più avanti (v. Par. 3.2.2).

I template di galassie usati sono 21. Si tratta di SED ottenute dalla combinazione di modelli e spettri compositi (per una descrizione dettagliata dei template e di come siano stati generati v. Polletta *et al.* (2007)). Coprono l'intervallo in lunghezza d'onda da 1000$\mathring{A}$ a 1000μm (v. Fig. 3.3 e 3.4) e sono state utilizzate in diversi lavori (Lonsdale *et al.* (2004), Franceschini *et al.* (2005), Hatziminaoglou *et al.* (2005), Jarrett *et al.* (2006), Polletta *et al.* (2006) e Weedman *et al.* (2006)). A questi template sono state applicate alcune piccole modifiche che verranno descritte in seguito. Per ogni tipo di SED è stato introdotto un grado variabile di estinzione ottica (E(B-V)=0, 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0; legge di estinzione da Calzetti (2001)), così che di fatto il numero delle SED a disposizione nella parte ottica e NIR è più che decuplicato. Alla base di questa scelta c'è l'intenzione di basare il fit, e la successiva classificazione di una sorgente, principalmente sulle caratteristiche della regione NIR-MIR dello spettro, evitando sensibili interferenze da parte della componente ottica.

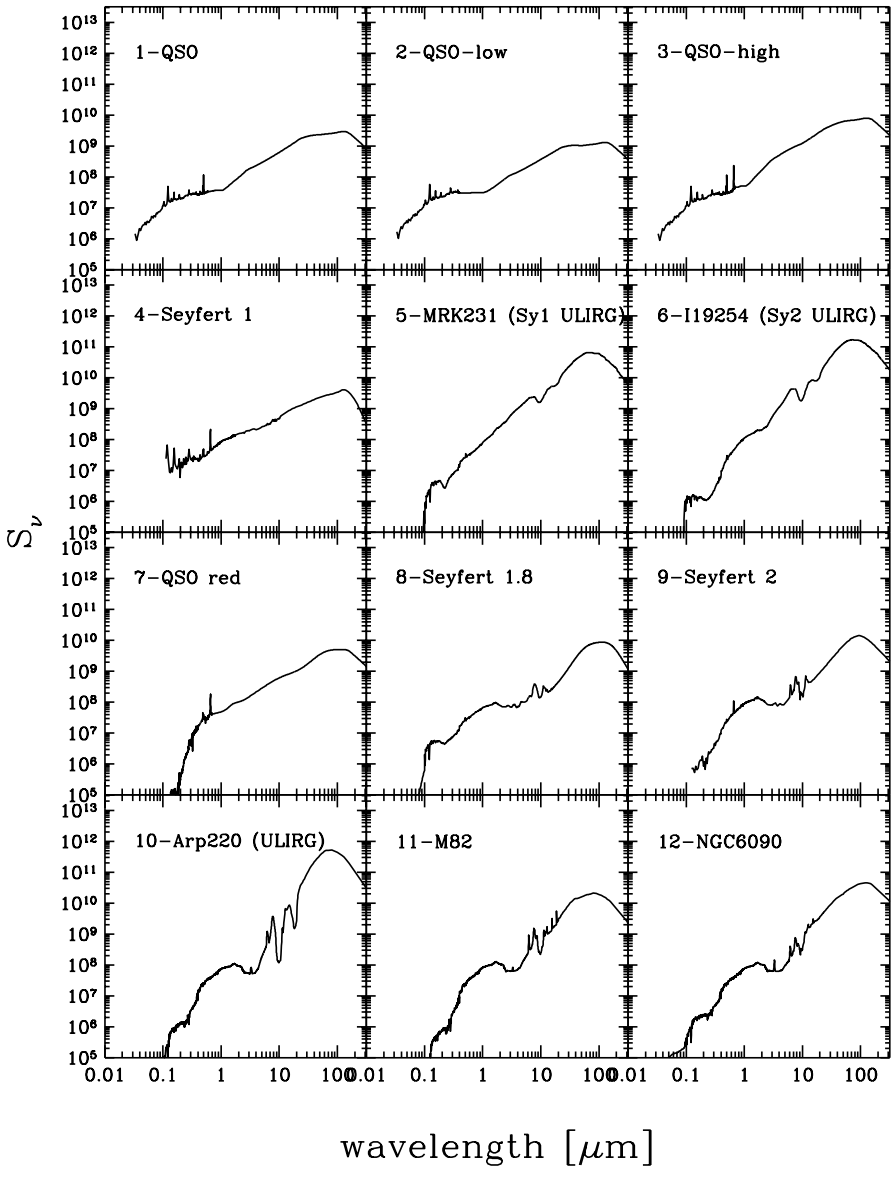

Figura 3.3: Libreria dei 21 template utilizzati, ordinati approssimativamente da quello maggiormente dominato dalla componente AGN fino alle galassie passive ellittiche, passando per gli AGN di tipo 2 (in cui i contributi del nucleo attivo e della galassia ospite sono comparabili), le galassie starburst e quelle a spirale.

Le 21 SED sono state ordinate in modo da formare una certa continuità nelle proprietà spettrali: AGN1 (AGN1-MIR, #1-#6), Sey2 (Sey2-MIR, #7-#9), ULIRG (ULIRG-MIR, #10-#12), starburst intense (STB-MIR, #13-#14), spirali classiche e S0 (Sp-MIR, #15-#18), ed ellittiche (Ell-MIR, #19-#21).

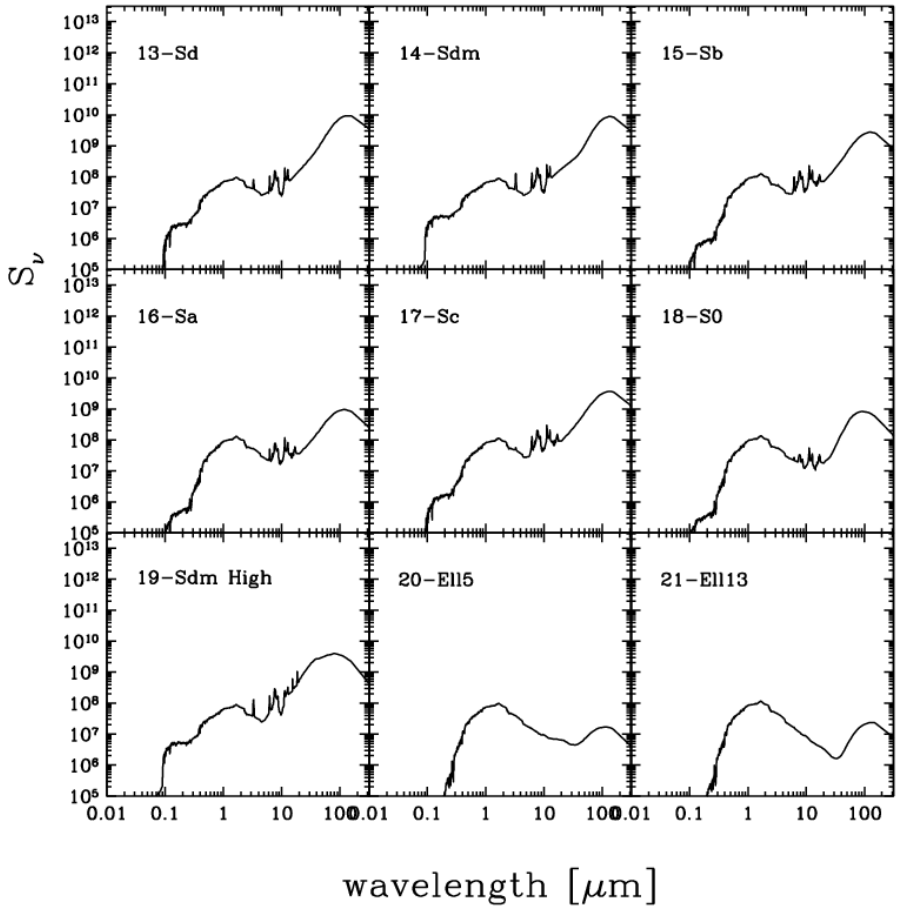

Figura 3.4: Come in figura precedente.

3.2.2 Metodo di fit

Una volta che si dispone di una serie di dati fotometrici e spettroscopici, di un programma in grado di eseguire su questi dei fit e di una libreria di template, ciò di cui si ha bisogno è una procedura per testare il buon funzionamento del metodo di fit, per calibrarlo ed eventualmente modificarlo in qualche sua parte.

Gli aspetti sui quali si può intervenire sono molteplici: cambiare il sottocampione dei dati utilizzati, modificare od escludere alcuni template, variare la configurazione del programma di fit, modificare gil errori introdotti dalla discretizzazione delle SED, etc...

Per tenere sotto controllo tutte queste variabili siamo partiti da una configurazione base ed abbiamo seguito un approccio di graduale complicazione e raffinamento analizzando ad ogni passaggio la qualità dei fit e la loro attendibilità.

Abbiamo selezionato un sottocampione ad alta statistica (flussi elevati) delle sorgenti $24\mu m$, richiedendo la presenza di osservazioni in tutte e 3 le bande ottiche (B, V, R), in K e nelle 4 bande Spitzer-IRAC, nonché un redshift spettroscopico affidabile. Ci siamo così limitati ad un campione di 229 sorgenti. Il motivo per cui ci siamo limitati a sorgenti con copertura spettroscopica è duplice: da una parte la presenza di una stima accurata del redshift consente di vincolare con precisione la posizione della SED in λ anziché doverla stimare dai dati stessi all'interno della procedura di fit, dall'altra disporre di una classificazione spettroscopica delle sorgenti consente di confrontare tale informazione con la classificazione fotometrica proveniente dal fit stesso.

Abbiamo eseguito un'analisi dei χ^2 calcolati nella procedura di fit, dovuti alla composizione di errori fotometrici nelle varie bande e di errori introdotti dall'utilizzo di un numero ristretto di SED. Per far ció abbiamo studiato il contributo delle diverse bande fotometriche al χ^2 con l'intenzione di trovare l'errore che riproducesse per ciascuna banda una distribuzione dei

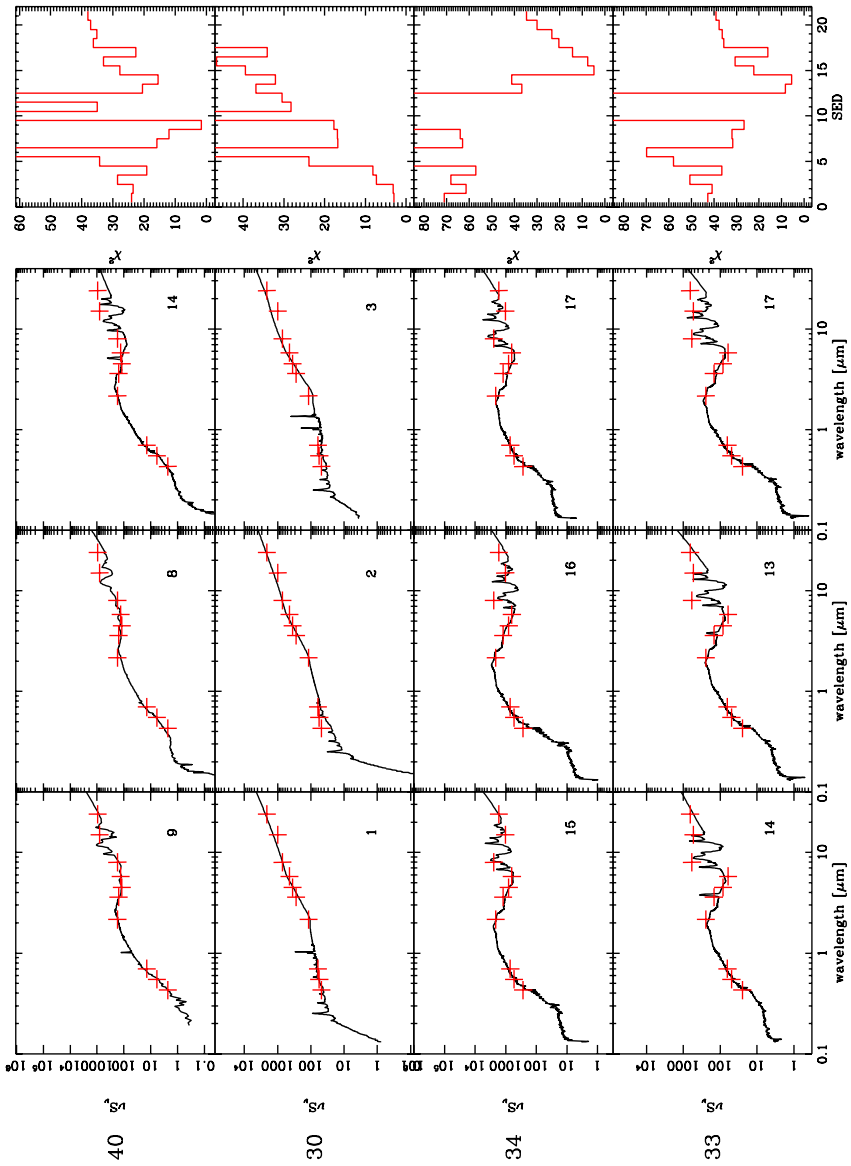

Figura 3.5: Esempio di fit di 4 sorgenti eseguito con LEPHARE. Nelle prime 3 colonne sono visualizzati i dati fotometrici (croci rosse) e le SED (linea nera) di primo, secondo e terzo miglior fit (la dimensione delle croci non è rappresentativa delle incertezze fotometriche). Nella quarta colonna è visualizzata la distribuzione del χ^2 per le varie SED (la numerazione delle SED è la stessa usata nelle Fig. 3.3 e 3.4).

$\chi = (F_{SED} - F_{obj})/err(F_{obj})$ gaussiana con $\sigma \sim 1$ senza dipendenze dal flusso o altre variabili.

Per aiutarci in questa procedura di testing abbiamo sviluppato uno script che, mantenendo l'informazione di ogni singolo fit eseguito con ciascuna delle SED a disposizione, visualizza i primi 3 best-fit, oltre ad un istogramma del valore del χ^2 ottenuto con ciascuna delle 21 SED (v. Fig. 3.5). Come precedentemente descritto l'uso degli errori fotometrici nominali, nonostante porti a dei fit accettabili (nel senso che la SED preferita sembra quella giusta), non permette di attribuire un valore statistico al χ^2, che risulta avere valori dell'ordine di diverse decine o addirittura centinaia.

Abbiamo così aumentato gli errori nominali dei flussi fotometrici in diversi step rieseguendo ogni volta un fit con LEPHARE, così da seguire passo-passo l'effetto di ogni singola modifica sull'esito finale del fit e del calcolo del χ^2. In questo modo è stato possibile ottenere alla fine una soluzione accettabile che tenesse conto per ogni banda delle incertezze introdotte dall'uso di una serie discreta di template e fornisse un valor medio del χ^2 in linea con il numero di gradi di libertà.

In questa operazione di calibrazione delle incertezze fotometriche legate alle SED abbiamo inizialmente scelto di ridurre il "peso" sul fit delle bande ottiche e della banda K, per la loro variabilità e per limitare una loro influenza eccessiva all'interno di una classificazione di sorgenti volutamente basata sull'emissione MIR.

Abbiamo quindi esaminato singolarmente la qualità di ogni fit e confrontato la classificazione spettrale ottenuta con quella derivante dall'analisi spettroscopica. I risultati sono riassunti in Tab. 3.1. La configurazione appena descritta è indicata col numero 1 (arbitrary σ, in quanto si tratta di una scelta arbitraria dei pesi relativi tra le diverse bande). Le colonne rappresentano le diverse classi spettrali in cui sono state raggruppate le 21 SED in ordine di grado "AGNesco", dagli AGN1 alle galassie con sola formazione stellare o ellittiche (gal/ell). Le frazioni, per ogni combinazione di configu-

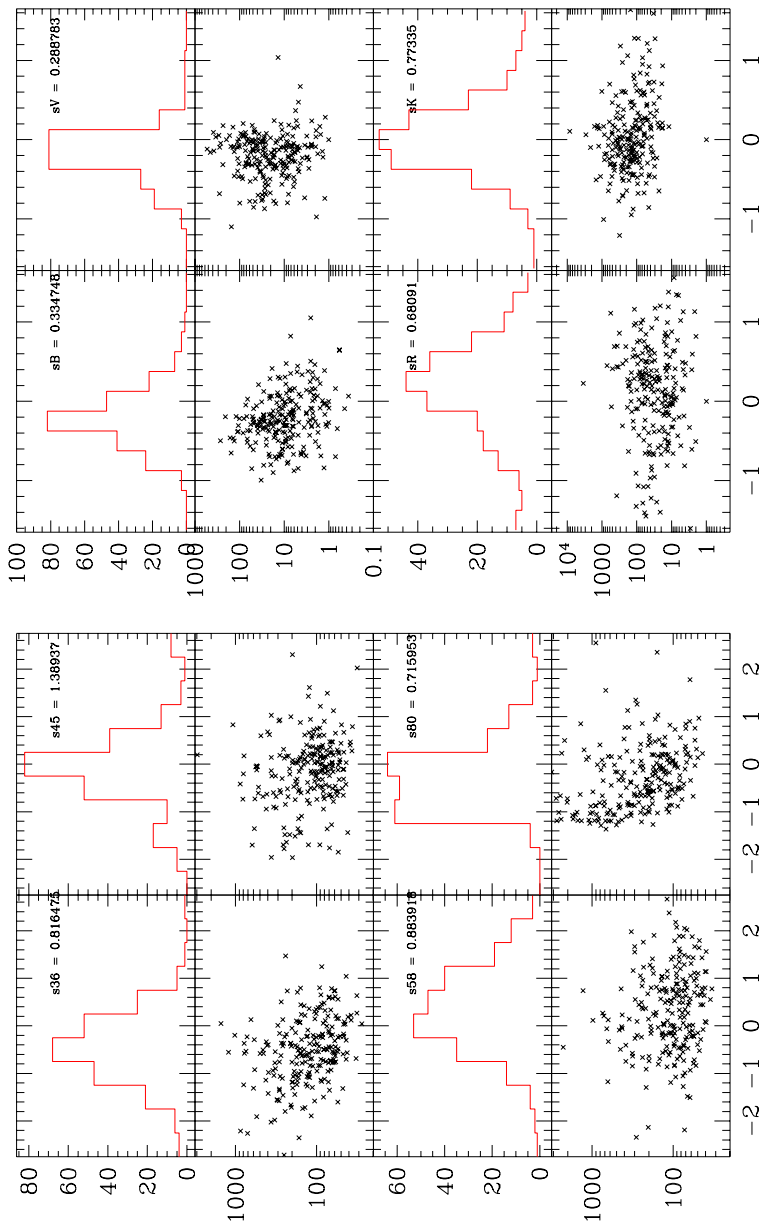

Figura 3.6: È illustrato (per il fit #1) per le singole bande indicate: (in alto) l'istogramma delle deviazioni in flusso, normalizzate all'errore σ_T, della SED di best-fit rispetto alla fotometria; (in basso) l'andamento del flusso fotometrico contro le stesse deviazioni. Accanto all'istogramma è indicata per ogni banda la deviazione standard dei dati in unità di σ_T.

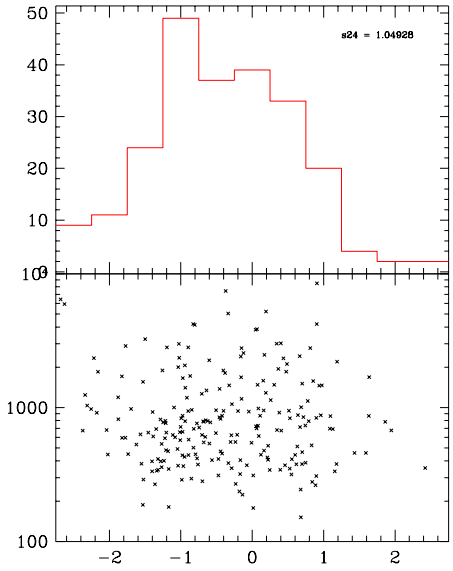

Figura 3.7: Come in Fig. 3.6 per la banda Spitzer-MIPS 24μm.

razione/classe spettrale, hanno al denominatore il numero totale di sorgenti che hanno ricevuto come best fit una SED appartenente a quella classe e al numeratore il sottinsieme di tali sorgenti che risulta essere un sicuro AGN da informazioni spettroscopiche od X. Le altre configurazioni verranno descritte in seguito.

Tabella 3.1: Frazione di AGN sicuri

Configurazione del fit	AGN1	Sey2	ULIRG	Stb	gal/ell
1 - arbitrary σ	52/55	21/82	4/13	4/64	4/15
2 - + high 24μm Sey1.8	52/55	22/84	3/11	4/63	4/16
3 - + σ=1	54/57	19/**53**	2/6	5/83	4/30
4 - + high 24μm STB	54/57	18/**43**	2/6	6/92	4/31

Essendo la nostra finalità selezionare AGN con la maggiore completezza e

la minore contaminazione possibili, la configurazione migliore ai nostri scopi sarà quella con frazioni prossime ad uno per le classi AGN1 ed Sey2 e prossima a zero per le restanti classi.

I risultati del fit in configurazione #1 sono stati ottenuti sommando in quadratura agli errori relativi nominali i seguenti errori percentuali:

B: 100% V: 90% R: 40% K: 45% 3.6μm: 15%

4.5μm: 15% 5.8μm: 25% 8.0μm: 60% 15μm: 60% 24μm: 20%

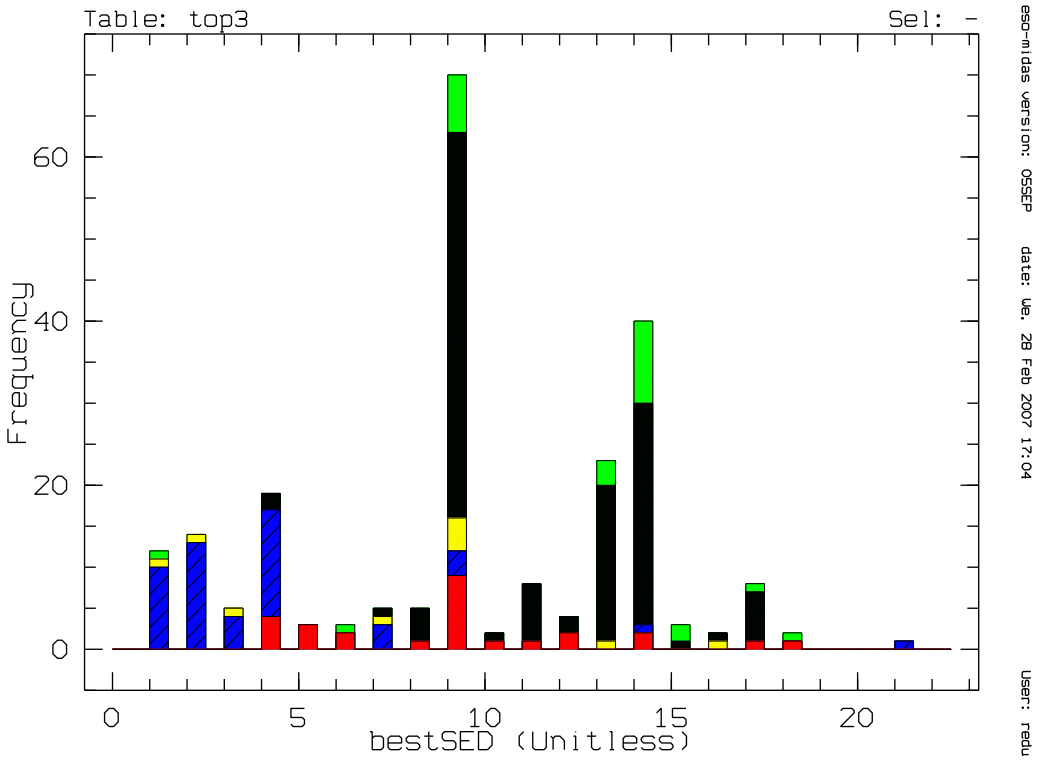

Figura 3.8: Confronto tra la classificazione mediante fit (configurazione #1) della IR-SED (numerazione in ascissa) e quella spettroscopica ottica (colori): in blu AGN di tipo 1, in rosso AGN di tipo 2, in nero galassie STB, in verde galassie passive (assenza di righe di emissione), in giallo sorgenti con luminosità hard-X da AGN ma non classificate come tali basandosi sullo spettro ottico (AGN elusivi).

I maggiori errori relativi introdotti risultano essere quelli a λ maggiori, ossia a 8, 15 e 24 μm. In Fig. 3.6 e 3.7 sono illustrate le distribuzioni dei χ per le varie bande ed il loro andamento col flusso. Come si può vedere non vi sono forti correlazioni tra flusso e χ se non per la banda $8\mu m$ dove, in particolare per le sorgenti fittate con una SED da STB, la concentrazione di punti con valori di χ negativi (ricordiamo che $\chi = (F_{SED} - F_{obj})/err(F_{obj})$) è da attribuirsi ad un'assenza nei template utilizzati di una riga PAH tra 6 e $7\mu m$ circa, che i dati sembrano invece richiedere.

In figura 3.8 è mostrata la distribuzione delle SED relativa alla configurazione #1. La frazione di AGN sicuri fittata da una SED da AGN1 è del 95% (52/55) e del 26% (21/82) nel caso di Sey2. L'alta frazione di AGN1 fittati correttamente conferma quanto trovato nell'analisi con i diagrammi di colore (v. Par. 3.1): le galassie dominate dall'AGN presentano uno spettro caratteristico con andamento a legge di potenza nel vicino e medio infrarosso.

Tale firma è facilmente identificabile e distinguibile dallo spettro di una galassia che non ospita un nucleo attivo al suo interno. Quando invece l'AGN non arriva a dominare lo spettro IR della galassia ospite il suo contributo tende a confondersi con l'emissione dovuta a formazione stellare e la firma all'interno dello spettro IR della presenza di un nucleo attivo diventa più elusiva.

Vale la pena sottolineare come le 21 sorgenti su 82 fittate da template da Sey2 rappresentino un limite inferiore alla frazione di AGN selezionabili tramite le proprietà di emissione MIR. È infatti altamente probabile che tra le rimanenti 61 sorgenti con spettro ottico da Starburst si nascondano altri nuclei attivi non riconosciuti attraverso l'analisi spettroscopica, o per una elevata estinzione dovuta a grandi quantità di polvere attorno all'AGN o per la difficoltà di individuare e misurare l'intensità delle righe a causa di un basso rapporto segnale rumore dello spettro ottico (in queti ultimi casi le sorgenti sono state conservativamente classificate come Starburst).

3.2.3 La differenza fra la SED delle Sey2 e quella delle STB

Se si escludono le sorgenti il cui spettro MIR è di tipo power-law (#1-6, difficilmente confondibili con altre SED) il resto del campione $24\mu m$ considerato si divide in 2 principali gruppi: quello delle Sey2-MIR e quello degli STB-MIR (le galassie che presentano una debole attività di formazione stellare costituiscono una minoranza all'interno del campione considerato per via della loro modesta emissione a $24\mu m$).

Nel primo di questi due gruppi (#7-9) si nota un forte addensamento di sorgenti nel bin relativo alla SED#9. Questa distribuzione è dovuta all'elevato contributo degli AGN al flusso a 24μm.

Le sorgenti appartenenti al secondo gruppo sono invece quasi equipartite (rapporto 2:3) tra i template #13 e #14. Le 2 SED, molto simili tra loro, si differenziano solo per la regione ottica che nella configurazione #1, come detto in precedenza, ha rispetto a quella MIR un peso decisamente inferiore.

In Fig.3.9 è mostrato un confronto tra SED e dati fotometrici relativi a AGN sicuri (classificati in base all'emissione hard-X o allo spettro ottico) e fittati da SED MIR-Sey2 o MIR-STB (non power-law). Gli AGN (punti blu), a meno di pochi casi (punti rossi), mostrano dei rapporti F($24\mu m$)/F($3.6\mu m$) (o F($24\mu m$)/F(K)) più elevati di quelli delle SED da STB (linea rossa) o da Sey1.8 (linea verde) e vengono per questo motivo ben fittati da uno spettro da Sey2 come il #9 (linea blu). Inoltre, escludendo la zona FIR già trattata precedentemente, la principale differenza tra la SED da Sey2 (#9, linea blu) e quella da STB (#14, linea rossa) si trova nel range 3-6μm (rest-frame). Nella prima classe di sorgenti l'avvallamento caratteristico dello spettro di una STB in questo intervallo di lunghezza d'onda viene colmato da un continuo sottostante riprocessato che riscalda la polvere e la mantiene a temperature più elevate. Tale divario è molto accentuato in corrispondenza delle bande Spitzer-IRAC a 4.5, 5.8 e 8.0μm, sebbene quest'ultima (almeno a bassi redshift) sia immersa nelle righe di emissione dei PAH e quindi poco attendibile

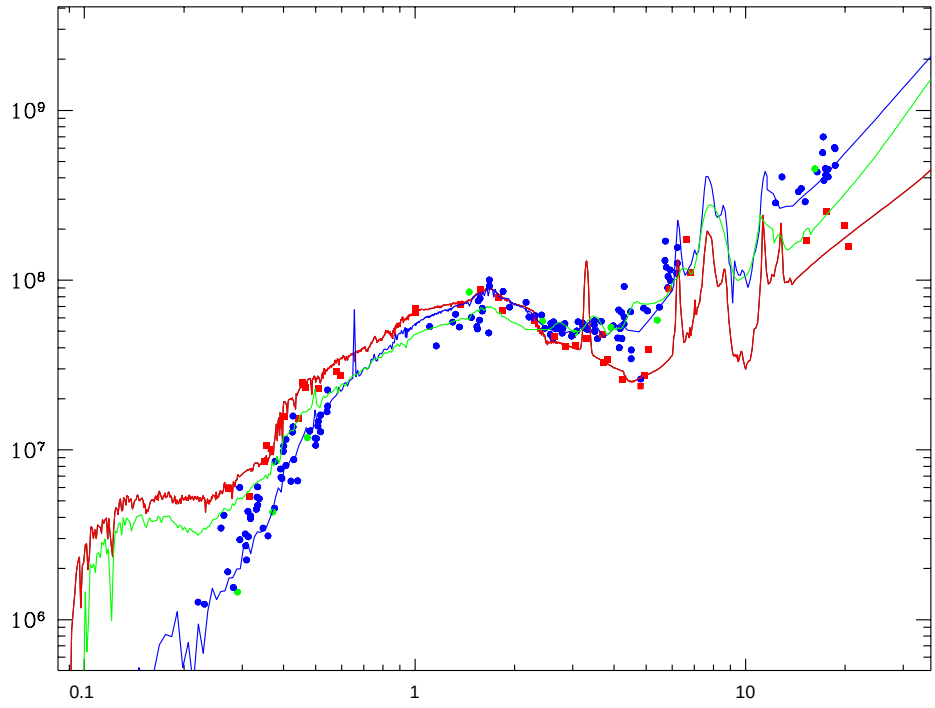

Figura 3.9: Confronto tra SED e dati fotometrici. Tutti i punti rappresentano i dati fotometrici relativi a AGN sicuri (classificati in base all'emissione hard-X o allo spettro ottico). Ogni colore è legato alla SED (non power-law) che meglio ha fittato i dati. In blu è rappresentata la SED #9 (Sey2), in verde la SED #8 (Sey1.8), mentre in rosso è rappresentata la SED #14 (uguale alla #13 nella parte più rossa a partire da K). Le SED #9 (blu) e #14 (rosso) sono state rinormalizzate tra loro in modo tale da coincidere grossomodo nel bump NIR a 2μm. La SED #8 (in verde) è stata rinormalizzata in modo da cercare di seguire l'andamento dei dati nell'intervallo 1-6μm.

sia per ricostruire la SED sia per studiare i colori.

Come si vede in figura 3.10, dove sono mostrati i punti fotometrici di oggetti classificati come MIR-Sey2 o MIR-STB, le sorgenti non si mescolano in quanto ciascuna famiglia segue la propria SED di riferimento. Il problema però consiste nell'evidente mancanza di una netta separazione fra i luoghi occupati dalle due classi di oggetti. Di conseguenza i margini di manovra

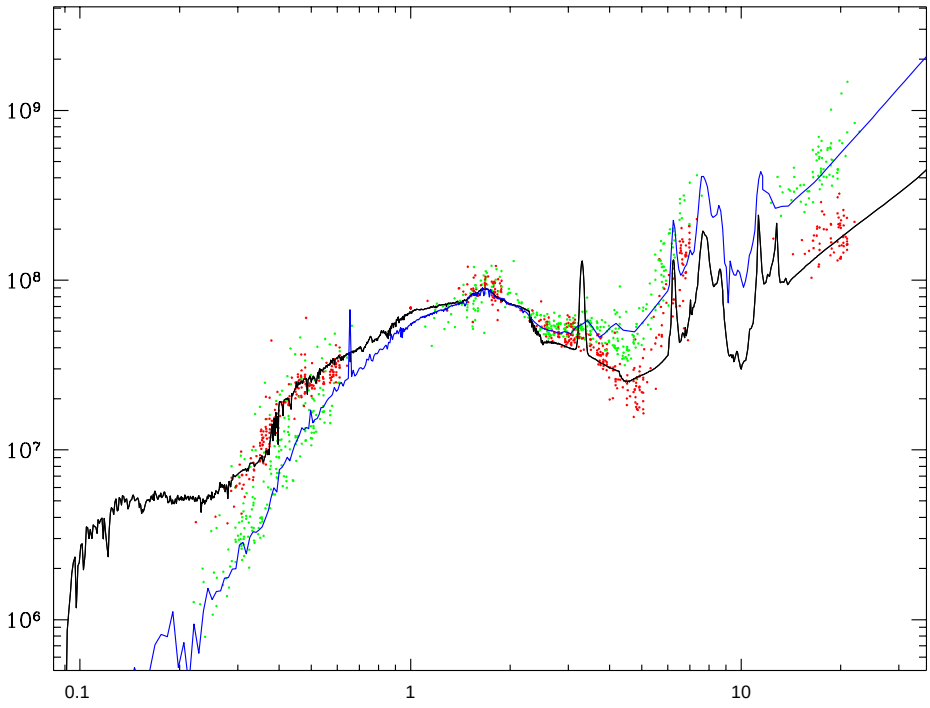

Figura 3.10: Confronto tra SED e dati fotometrici. I punti rappresentano i dati fotometrici relativi ad un sottocampione delle sorgenti 24μm con best-SED #13-#14 (STB, punti rossi e linea nera) o #9 (Sey2, punti verdi e linea blu).

per migliorare l'efficienza della selezione (diminuire la contaminazione da STB senza peggiorare la completezza) sono ridotti.

Una possibile strada è suggerita dalla figura 3.9, dove si vede che mediamente gli AGN sicuri hanno flussi a 24μm ancora più elevati ed un andamento spettrale nell'intervallo 1-6 μm più piatto di quanto non proponga la SED #9. Sembra che vi sia una classe di oggetti che richiede una SED simile alla #8 fino a 6 μm circa, per poi salire avvicinandosi alla zona FIR più ripidamente, come la SED #9.

3.2.4 Fit con χ gaussiani e σ_χ=1

Seguendo le indicazioni forniteci dallo studio dei fit e dal divario tra i dati e i template utilizzati abbiamo quindi introdotto due piccole modifiche alle SED delle Sey2; nonostante queste abbiano poco impatto sulla frazione di AGN totali identificati, meglio rapresentano alcuni fra gli AGN certi da noi osservati.

- **BluSey1.8:** poichè usiamo una grid di possibili estinzioni e poiché avevamo osservato delle Sey2 aventi degli spettri ottici blu che non erano ben rappresentati dai template a nostra disposizione, la SED di Red-QSO è stata sostituita con una identica a quella della Seyfert 1.8 nel NIR e MIR, ma considerevolmente più blu nell'ottico, e cioè avente uno spettro ottico di Seyfert 1. Questa SED diventa per noi la # 7.

- **High 24μm Sey1.8:** i dati mostrano la presenza di una classe di sorgenti con un andamento nel range 2-10 μm uguale alla SED di Seyfert 1.8 ma avente un flusso a 24μm più alto (come per la Seyfert 2). Abbiamo così opportunamente unito le due SED (Sey1.8+Sey2). Dato che la SED descritta sopra (la Sey 1.8 con spettro ottico blu) ben rappresenta (tramite l'estinzione) anche la SED della Sey 1.8 originale, quest'ultima è stata tolta e sostituita con la nuova SED avente la forma di una Sey1.8 fino a 10μm e di una Sey2 oltre. Questa SED diventa per noi la # 8. Il risultato di questa modifica è mostrato nel fit #2 della Tabella 3.1. Come si può vedere dal confronto con il vecchio fit #1, questa modifica non è particolarmente rilevante per separare gli AGN dagli altri tipi di sorgenti ma consente di descrivere con maggiore accuratezza la SED di alcune sorgenti.

Con lo stesso procedimento di calibrazione degli errori descritto nel Par. 3.2.2 relativamente al fit #1 abbiamo esplorato un'altra strada, adottando una configurazione delle incertezze fotometriche tale da fornire un ugual peso

all'interno del fit a tutte le bande a nostra disposizione. In altre parole abbiamo utilizzato degli errori che fornissero una distribuzione dei χ Gaussiana, con un valore della deviazione standard prossima a uno in ogni banda.

I risultati del fit in configurazione #3 sono presentati in Tab. 3.1 (+ $\sigma = 1$) ed in Fig. 3.11; sono stati ottenuti sommando in quadratura agli errori relativi nominali i seguenti errori percentuali:

B: 23% V: 17% R: 25% K: 33% 3.6μm: 19%
4.5μm: 30% 5.8μm: 21% 8.0μm: 42% 15μm: 60% 24μm: 38%

In Fig. 3.12, 3.13 e 3.14 sono illustrate le distribuzioni dei χ per le varie bande ed il loro andamento col flusso. Anche in questa configurazione di errori non vi sono forti correlazioni tra flusso e χ se non per la banda 8μm.

Confrontando la configurazione 1 e la 3 si può vedere come nel secondo caso la frazione di AGN sicuri fittata da una classe spettrale IR da AGN1 o Sey2 sia superiore alla frazione relativa al primo caso (il 66% contro il 53%). Anche l'analisi dei singoli fit indica una maggior efficacia della seconda configurazione. Ciò è imputabile alla necessità di utilizzare anche le bande ottiche e NIR per vincolare la forma della SED nel range di lunghezze d'onda dominato dall'emissione stellare all'interno delle galassie e normalizzare correttamente l'andamento a λ maggiori.

La frazione di AGN sicuri fittata da una SED da AGN1 è del 95% (54/57) e del 36% (19/53) nel caso di Sey2. L'alta frazione di AGN1 fittati correttamente è il linea con quanto trovato per il fit #1, a riprova della facilità con cui è possibile identificare sorgenti dominate nell'IR dall'AGN (con SED power-law) e della relativa indipendenza dai template e dagli errori utilizzati per il fit.

Per il caso delle Sey2 vale quanto detto in precedenza; appena l'AGN non è più dominante nel determinare lo spettro IR ed il suo contributo diventa comparabile a quello della galassia ospite (sia che si tratti di semplice formazione stellare sia di un'intensa fase di starburst) l'impronta tipica della

presenza dell'AGN si attenua fortemente, lasciando una traccia rilevabile solo in un terzo circa dei casi (36%) nel range 3-6μm (rest-frame).

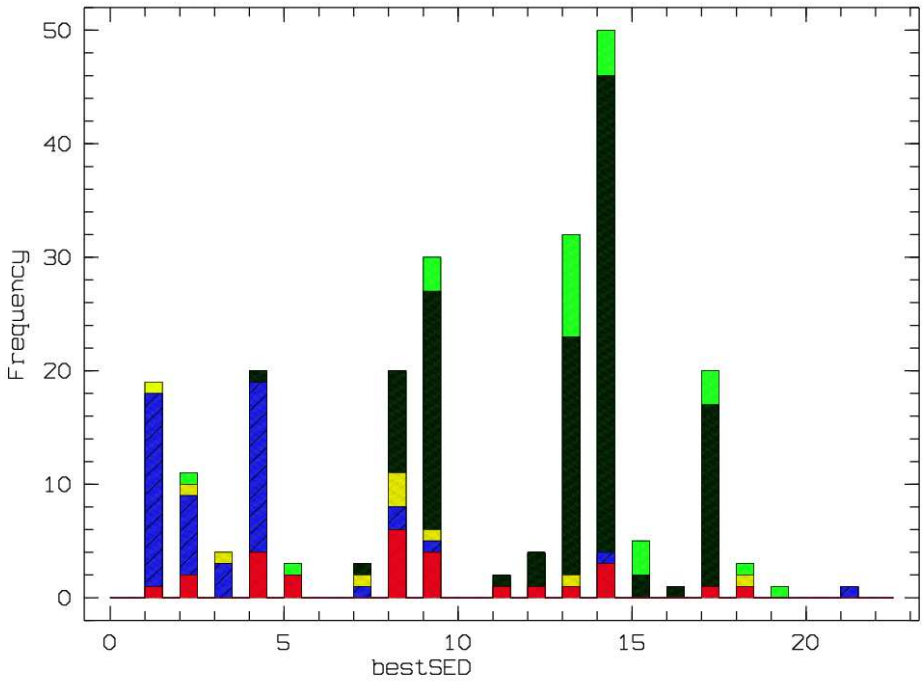

Figura 3.11: Confronto tra la classificazione mediante fit (configurazione #3) della IR-SED (numerazione in ascissa) e quella spettroscopica ottica (colori): in blu AGN di tipo 1, in rosso AGN di tipo 2, in nero galassie STB, in verde galassie passive (assenza di righe di emissione), in giallo sorgenti con luminosità hard-X da AGN ma non classificate come tali basandosi sullo spettro ottico (AGN elusivi).

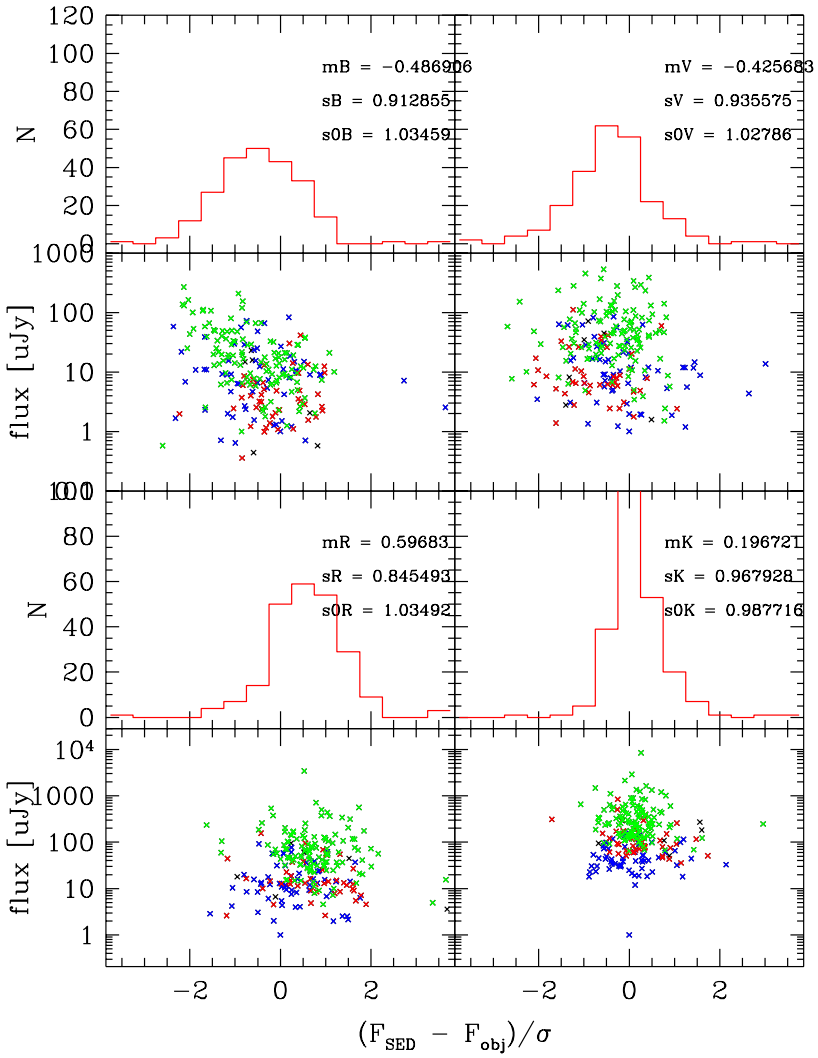

Figura 3.12: Per le varie bande fotometriche B, V, R, K: (sopra) istogramma delle deviazioni dei template (fit #3) rispetto ai dati (normalizzate all'errore adottato per il fit); (sotto) andamento del flusso contro le deviazioni stesse (in blu IR-AGN1, in rosso IR-Sey2, in nero IR-ULIRG, in verde IR-STB+gal). Per ogni banda è indicato il valor medio della deviazione, il sigma rispetto al valor medio e rispetto a 0.

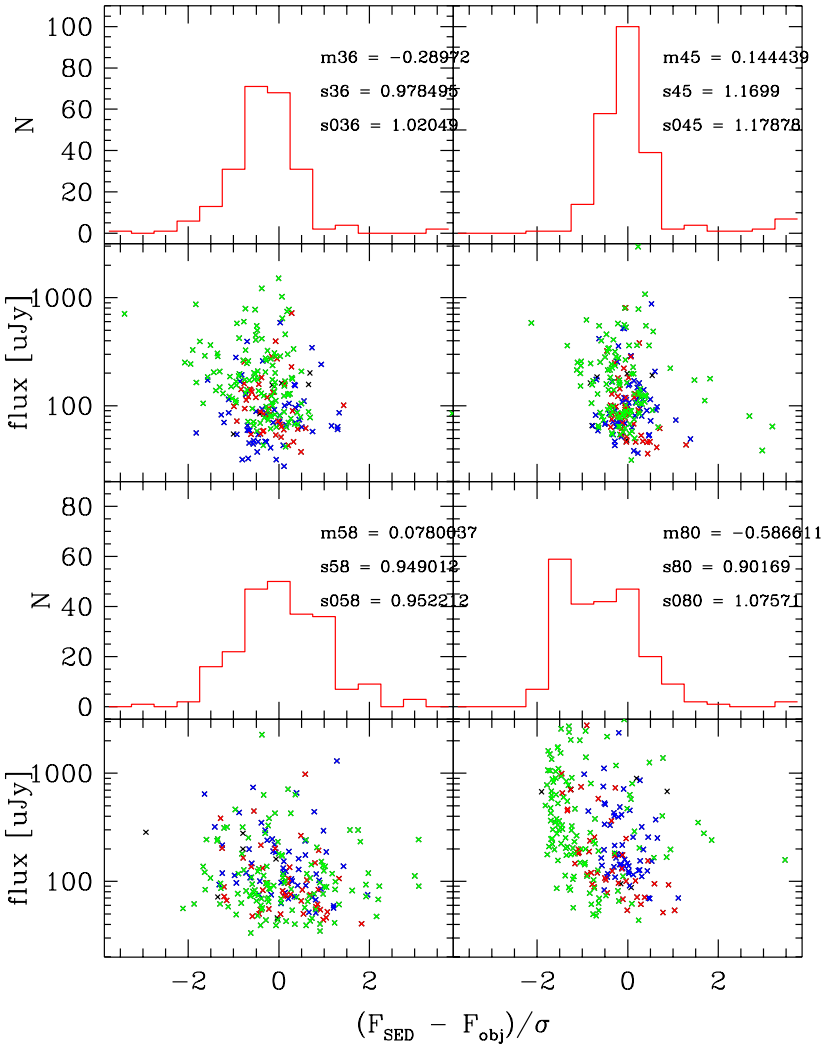

Figura 3.13: Come in figura 3.12 per le bande IRAC 3.6, 4.5, 5.8 e 8.0μm.

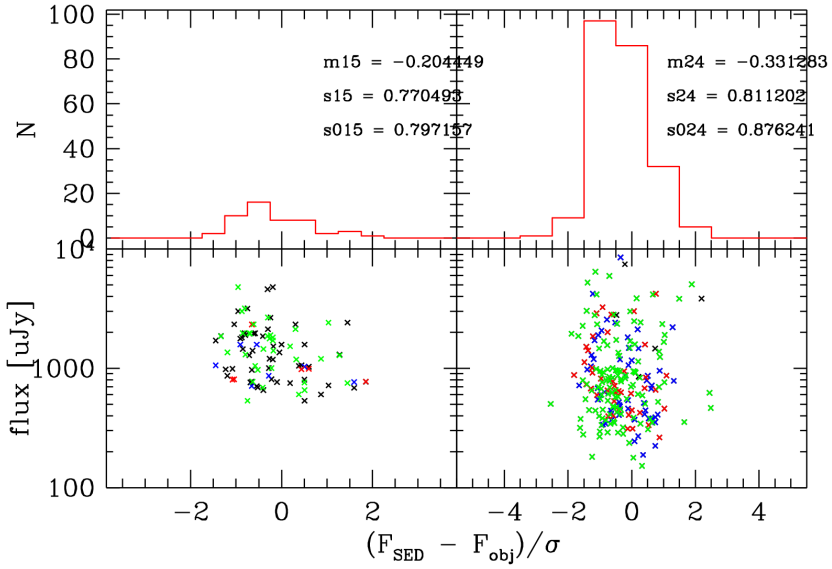

Figura 3.14: Come in figura 3.12 per le bande ISO 15μm e MIPS 24μm.

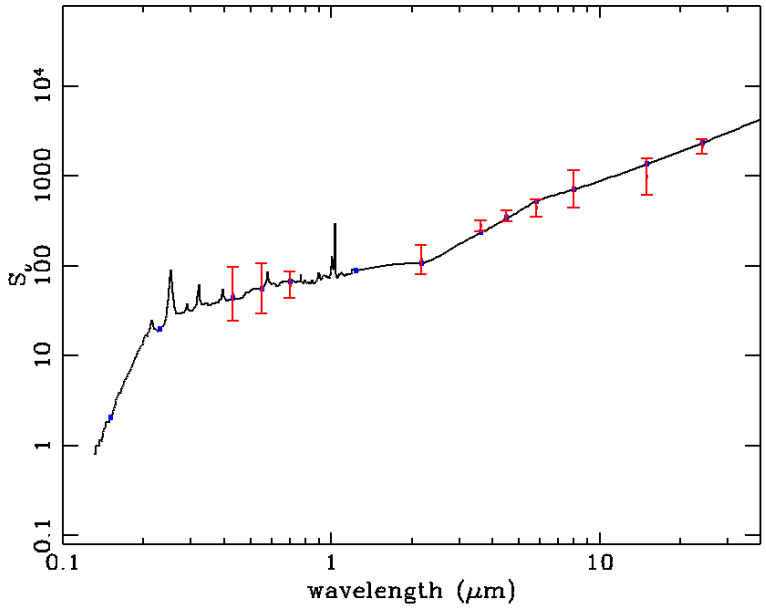

Figura 3.15: Esempio di fit di una sorgente con la SED #1.

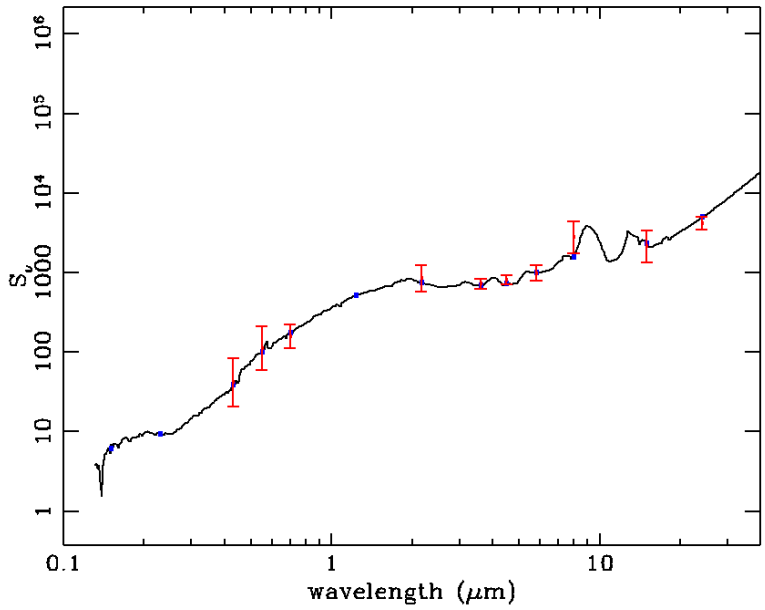

Figura 3.16: Esempio di fit di una sorgente con la SED #8.

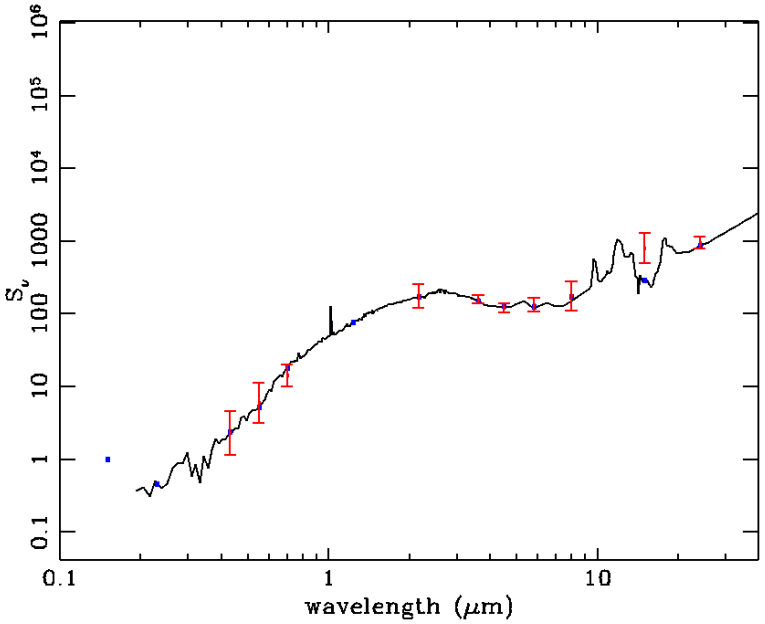

Figura 3.17: Esempio di fit di una sorgente con la SED #9.

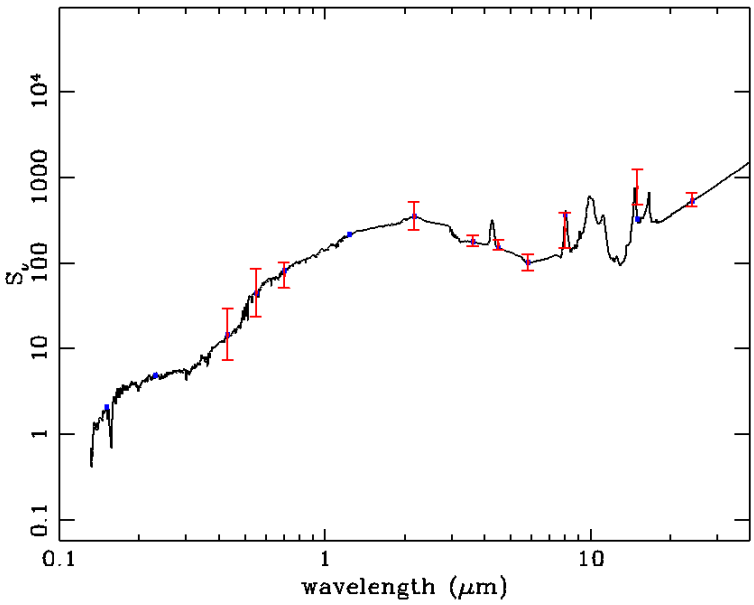

Figura 3.18: Esempio di fit di una sorgente con la SED #13.

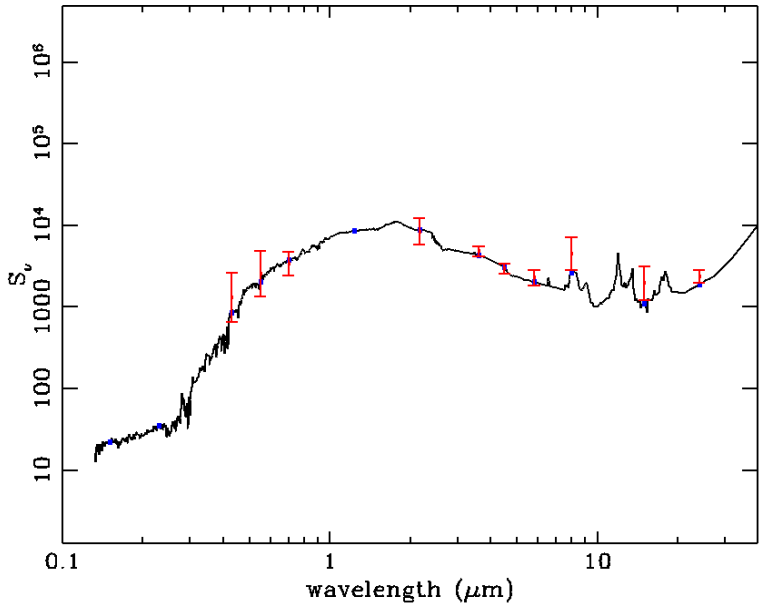

Figura 3.19: Esempio di fit di una sorgente con la SED #18.

3.2.5 Una nuova SED di Starburst con eccesso a 24μm

Malgrado i buoni risultati ottenuti abbiamo voluto esaminare più in dettaglio cosa distinguesse le Sey2 dalle STB, basandoci sui dati X e spettroscopici ottici. Gli AGN noti hanno andamenti ben rappresentati o dalla Sey2 o dalla nuova SED di Sey1.8 (high24) ad esclusione di una manciata di essi (6), che mostrano intorno a 5μm il caratteristico abbassamento dello spettro osservato nelle STB. Di conseguenza questi oggetti risultano indistinguibili dalle Starburst/spirali in base alla SED NIR.

D'altra parte ci siamo accorti che una notevole frazione delle sorgenti

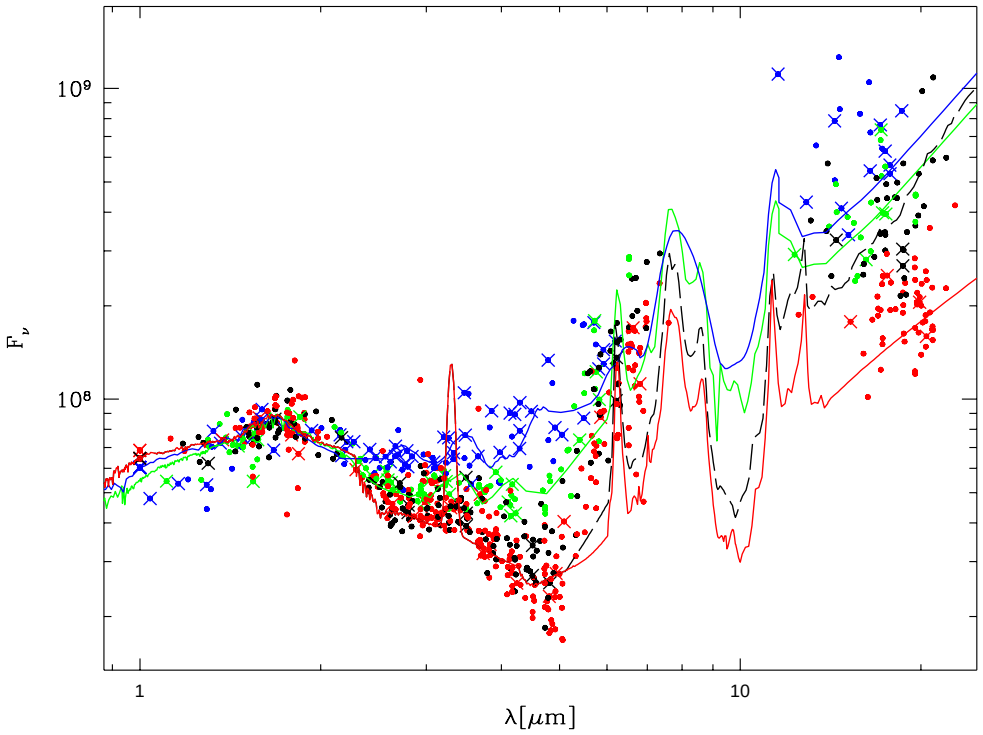

Figura 3.20: Confronto tra dati e template, suddivisi in colore per SED di best fit: in blu Sey1.8 (#8); in verde Sey2 (#9); in nero newSTB (#19); in rosso oldSTB (#14). Le X sovrapposte ai punti indicano i sicuri AGN (X o spettroscopici).

classificate otticamente come Starburst e fittate dalla SED #14 (spirale Sdm) presenta flussi a $24\mu m$ sistematicamente più elevati di quanto proposto dal template, come se i dati relativi a tale classe di sorgenti richiedessero una SED aggiuntiva sostanzialmente diversa dalla #14.

Abbiamo dunque creato una nuova SED di STB, simile a quella di Sdm ma con un flusso a λ>10μm più elevato, inserita al posto della superflua SED #19 da ellittica (ricordiamo che stiamo lavorando su un campione di sorgenti 24μm all'interno del quale il numero di galassie ellittiche è prossimo a zero). Come si può osservare in Fig. 3.20 l'adozione di questa nuova SED seleziona una classe di oggetti (cerchi neri) con uno spettro 2-5μm leggermente più piatto rispetto a quello delle altre STB.

La sola richiesta di un eccesso a 24μm rispetto ad uno spettro da STB

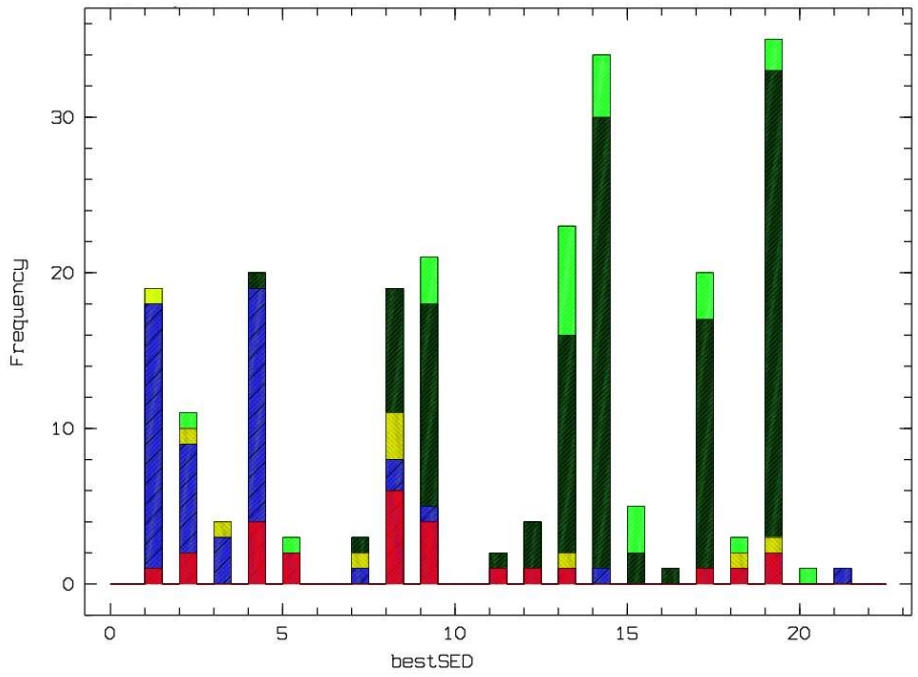

Figura 3.21: Distribuzione delle SED nel fit #4 (colori come in figura 3.11).

(in direzione quindi delle Sey2, v. punti verdi e blu) seleziona una classe di sorgenti che *anche* nel range NIR somigliano maggiormente alle Sey2, o quantomeno vanno in quella direzione (spettro 2-5μm più piatto).

Con l'adozione di questo nuovo template (cfr. i fit 3 e 4 in Tabella 1), **nonostante sia rimasto sostanzialmente invariato il numero di sicuri AGN selezionati** (da 19 a 18), circa un quinto (10 su 53) delle sorgenti precedentemente fittate come Sey2 (prevalentemente STB) è passato alla nuova SED di STB.

Con questa soluzione le SED da IR-AGN1 (power-law) sono efficienti al 95% nel selezionare AGN sicuri, le SED da Sey2 lo sono al 42%, ed il resto delle SED (ULIRG, STB e Spirali) al 9%. Tali valori sono da intendersi come limiti inferiori in quanto la spettroscopia ottica non è in grado da sola

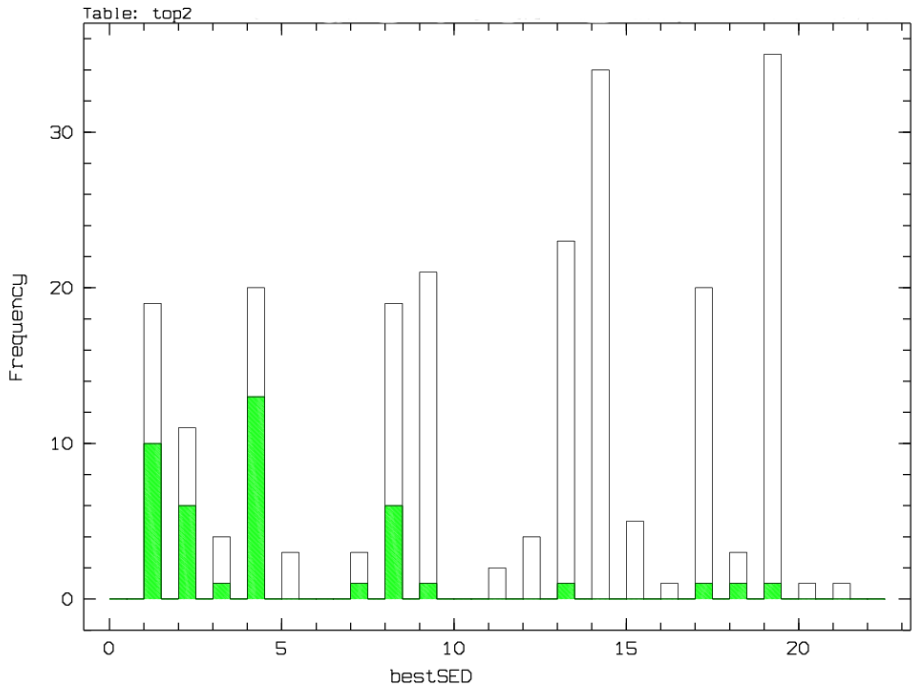

Figura 3.22: Distribuzione delle SED nel fit #4. In verde le sorgenti con detection X in banda 2-10 keV.

di identificare tutti gli AGN2.

Nelle Fig. 3.21 e 3.22 è mostrata la distribuzione delle SED per questo fit. Nella prima figura è indicata la classificazione spettroscopica come in Fig. 3.11. Nella seconda sono invece indicate in verde le sorgenti classificate AGN in base all'emissione hard-X; come si può vedere la quasi totalità di queste sorgenti ricade all'interno delle SED da AGN1 o AGN2.

In conclusione vi sono due possibili interpretazioni: o il nuovo template ben rappresenta una classe di Starburst con emissione IR simile a quella di un AGN oppure rappresenta una classe intermedia di oggetti aventi contributo comparabile da entrambe le componenti STB e AGN, osservabile nella SED NIR-MIR ma difficilmente riscontrabile in banda ottica ed X. È da notare come solo 3 oggetti sui 36 fittati da questa SED risultano AGN in base ai dati spettroscopici o X, in linea con il livello di contaminazione delle altre SED da STB.

Conservativamente la SED #19 verrà considerata rappresentativa di galassie Starburst senza componenti provenienti da AGN. I risultati della nostra analisi andranno perciò considerati come stime in difetto del numero di AGN.

3.2.6 Determinazione fotometrica del redshift

All'interno della procedura di fit con LEPHARE è possibile considerare il redshift come parametro libero ed eseguire così simultaneamente la classificazione spettrale e la determinazione del redshift. L'introduzione di un ulteriore parametro libero riduce l'affidabilità dei fit ma consente di estendere l'analisi della IR-SED ad un numero molto maggiore di sorgenti. Nel nostro caso il campione da analizzare è cresciuto da 229 a 2442 sorgenti. L'insieme di oggetti con redshift spettroscopici discusso finora è stato utilizzato come campione di controllo su cui testare l'affidabilità dei redshift fotometrici calcolati dalla procedura di fit, nonché la classificazione spettrale.

Il risultato di questo test è illustrato in Fig. 3.23. Come si può notare la distribuzione delle sorgenti con MIR-SED non power-law (quadrati pieni)

è confinata per lo più (l'83.9%) all'interno della fascia delimitata dalle due rette tratteggiate, che corrispondono ad una deviazione del 10% in $(1 + z)$ rispetto all'uguaglianza tra le due stime del redshift. I risultati della stima fotometrica del redshift per le sorgenti con SED non power-law risultano affidabili: la deviazione relativa $\Delta z = (z_{phot} - z_{spec})/(1 + z_{spec})$, ha una media di 0.003 e rms pari a 0.07. La frazione di stime completamente errate ($\Delta z > 0.2$) è inferiore all'1%.

Distribuzione ben diversa presentano invece le sorgenti (indicate dalle X) con IR-SED ben fittata da un template con andamento power-law. L'assegnazione di un redshift fotometrico così diverso da quello spettroscopico è dovuta alla difficoltà di vincolare una traslazione in λ di uno spettro con andamento a legge di potenza, caratteristico degli AGN1. L'introduzione di priors (ossia di limiti minimi e massimi alla magnitudine assoluta di una sorgente) permette di escludere parte delle soluzioni estreme con redshift nettamente minori o maggiori rispetto a quelli spettroscopici.

Nonostante le stime fotometriche del redshift non siano affidabili per le sorgenti con spettro IR power-law, ciò non impedisce di derivare anche per loro una classificazione spettrale attendibile, data la caratteristica forma della SED.

L'ottimizzazione della qualità dei redshift fotometrici ha richiesto una numerosa serie di test composti da fit e successivi confronti con gli z spettroscopici. Per ottenere delle stime affidabili è risultato necessario adottare una diversa configurazione degli errori fotometrici rispetto a quella scelta per la classificazione spettrale. In particolare si è dovuto da una parte diminuire il peso, all'interno del fit, delle bande 8 e $24\mu m$, dall'altra aumentare quello della parte NIR-ottica. Questo perché si è dimostrato essenziale, ai fini della determinazione del redshift, il riuscire a seguire il profilo dell'emissione stellare a piccole lunghezze d'onda piuttosto che non l'intervallo IR a λ più elevate.

Si è optato quindi per una procedura di fit in due passi con configurazioni

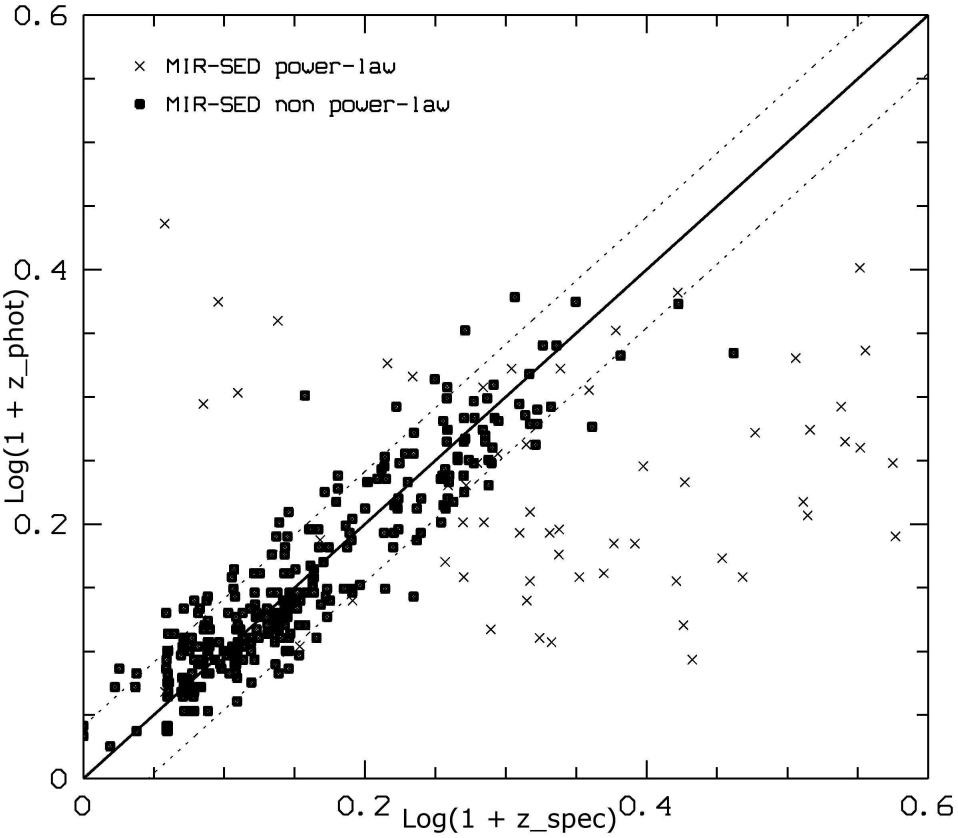

Figura 3.23: Confronto tra i redshift fotometrici e quelli spettroscopici. Le x indicano le sorgenti fittate con una SED da power-law, la linea continua rappresenta l'uguaglianza tra le due stime del redshift mentre le linee tratteggiate indicano deviazioni del 10% in $(1 + z)$.

di errori fotometrici differenti: un primo fit per la determinazione del redshift ed un secondo per quella della SED a z fissato.

La precisione media raggiunta nella determinazione fotometrica del redshift per le sorgenti considerate ci ha permesso di estendere l'analisi ad un campione ben più vasto di quello dotato di copertura spettroscopica, consentendo così di selezionare un numero maggiore di AGN per successive analisi della loro frazione, dei conteggi, dell'emissione media nei raggi X (attraverso il metodo dello stacking) e di altro ancora che verrà descritto nel prossimo capitolo.

Capitolo 4

Risultati

La determinazione fotometrica del redshift ci ha permesso di estendere la procedura di fit dell'IR-SED a tutte le sorgenti dotate di una buona copertura fotometrica. Come già detto in precedenza ci concentreremo su un campione di sorgenti $24\mu m$, richiedendo inoltre detection a 3.6 e $4.5\mu m$ oltre che in banda R con magnitudine superiore a 15 (dato che per flussi R più brillanti la popolazione risulta interamente costituita da stelle). La richiesta di tali bande supplementari oltre alla $24\mu m$ è necessaria per garantire l'affidabilità della classificazione mediante fit della IR-SED e (data la configurazione delle soglie di sensibilità nelle diverse bande) non introduce sensibili effetti di selezione.

In Fig. 4.1 è mostrata la distribuzione delle 2442 sorgenti del campione analizzato, nel piano R contro $24\mu m$. Sono indicate la classificazione della SED ottenuta dalla procedura di fit e le sorgenti emettitrici in hard-X con luminosità da AGN ($L_{2-10\ keV} > 10^{42}$ erg/s). Si può notare come vi siano dei luoghi nel piano R contro $24\mu m$ in cui risiedono le diverse classi di oggetti: a parità di flusso R le galassie a spirale o passive mostrano una ridotta emissione a $24\mu m$ che aumenta man mano che ci si sposta verso gli AGN1, le Sey2 ed infine le ULIRG. Questo torna con quanto già osservato per la classificazione in base alla spettroscopia ottica (v. Fig. 2.11) e testimonia la presenza di un ambiente ricco di polvere in galassie caratterizzate da intensa formazione

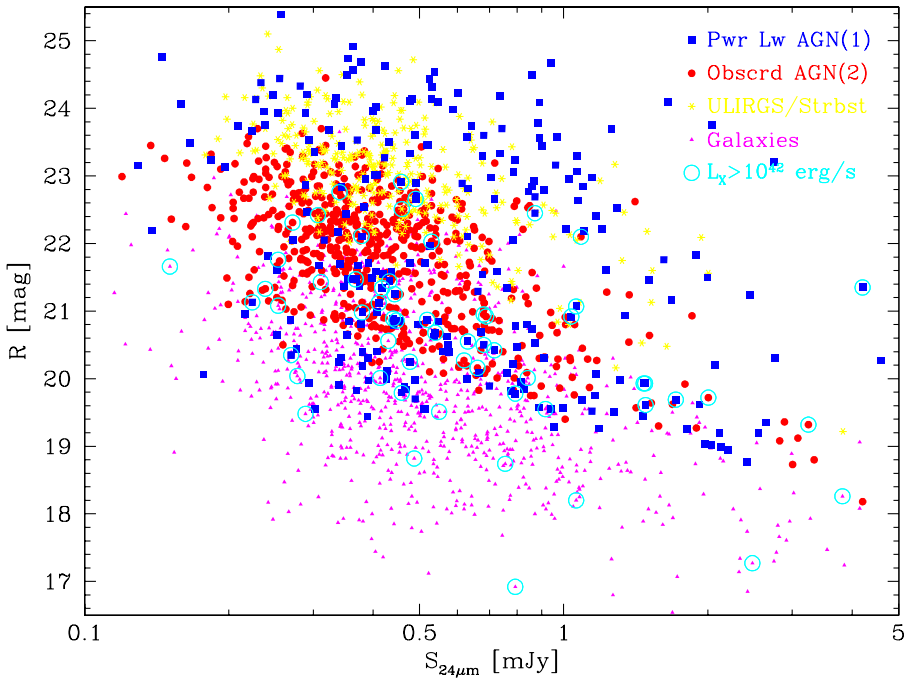

Figura 4.1: Magnitudine R in funzione del flusso $24\mu m$ per le 2442 sorgenti del campione analizzato. Sono indicate in diversi colori le varie classi spettrali ottenute dal fit della SED.

stellare e/o un nucleo attivo (oscurato).

Ciò che invece si discosta da quanto trovato in precedenza è la comparsa di una seconda popolazione di sorgenti ben fittate da IR-SED da AGN1 (ossia powerlaw) a magnitudini R molto deboli (quadrati blu nella parte superiore del diagramma in Fig. 4.1). Tale popolazione pur mostrando caratteristiche delle SED IR simili agli AGN1 presenta un rapporto F($24\mu m$)/F(R)>11.8 (definito come LogF($24\mu m$)[μJy] + 0.4×R[mag]) a causa di elevata estinzione da polvere in banda ottica che ne riduce il flusso R di 2-3 magnitudini rispetto a quello della controparte non oscurata.

Disponiamo di risultati preliminari (v. Par. 4.2), basati su spettroscopia ottica di un sottoinsieme di tali sorgenti, che ne confermano, in oltre il 70%

dei casi, la classificazione fotometrica IR di AGN2. Nel paragrafo 4.1 illustreremo inoltre il processo di stacking impiegato sulle immagini Chandra per analizzare le differenze tra le proprietà X di questa seconda classe di oggetti rispetto alla prima (AGN1).

In Fig. 4.2 è mostrata la distribuzione delle sorgenti del campione analizzato sul piano luminosità $24\mu m$ contro redshift fotometrico ottenuto dalla procedura di fit stessa. Quanto trovato è in accordo con i risultati dell'analisi spettroscopica descritti nel Par. 2.4.2 (v. Fig. 2.12), con popolazioni di sorgenti diverse distribuite in intervalli crescenti di luminosità $24\mu m$ e quindi di redshift (data la natura flux-limited del nostro campione).

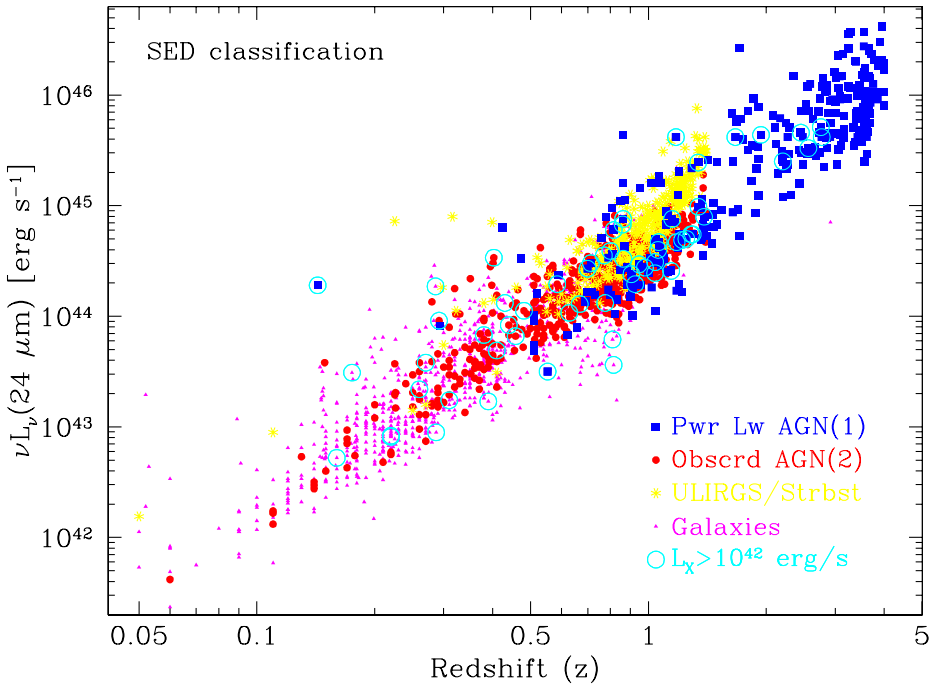

Figura 4.2: Luminosità $24\mu m$ in funzione del redshift, per le sorgenti del campione analizzato. Si ricorda che i redshift fotometrici relativi agli AGN1 non sono affidabili (v. Par. 3.2.6).

4.1 Stacking X

L'aver esteso l'analisi delle SED al campione delle 2442 sorgenti $24\mu m$ con redshift fotometrico ci ha permesso di arrivare a studiare sorgenti con magnitudini più deboli rispetto a quelle raggiunte dai nostri campioni spettroscopici ed X. Se questo da una parte significa disporre di un'elevato numero di oggetti per analisi statistiche, dall'altra impedisce di testare l'affidabilità e la completezza del metodo di selezione con i metodi precedentemente utilizzati per il campione spettroscopico e descritti nel Cap. 3.

Disponendo di dati X dall'elevata precisione posizionale (come per esempio le osservazioni eseguite con il satellite Chandra) è possibile sovrapporre le immagini di diverse sorgenti per aumentare il rapporto segnale/rumore. Vi sono alcune condizioni che vanno soddisfatte per poter utilizzare in maniera efficace questa tecnica:

- Le posizioni delle sorgenti devono essere note con buona precisione per evitare che il segnale sovrapposto delle varie sorgenti si disperda su un'area eccessivamente grande oppure che qualche controparte spuria finisca nella posizione centrale falsando l'analisi;

- Le sorgenti devono mediamente appartenere ad una stessa popolazione con caratteristiche X simili, così che dalla sovrapposizione di decine di oggetti diversi emerga uno spettro medio coerente;

- Nessuna sorgente deve avere singolarmente un contributo nettamente superiore alle altre; in questo caso lo spettro medio ottenuto dallo stacking altro non sarebbe che una versione leggermente diluita di quell'unico spettro particolarmente brillante e non una caratteristica media dell'intera popolazione considerata.

Abbiamo quindi utilizzato le osservazioni Chandra, caratterizzate da una estrema precisione posizionale, per sovrapporre le emissioni X delle sorgenti

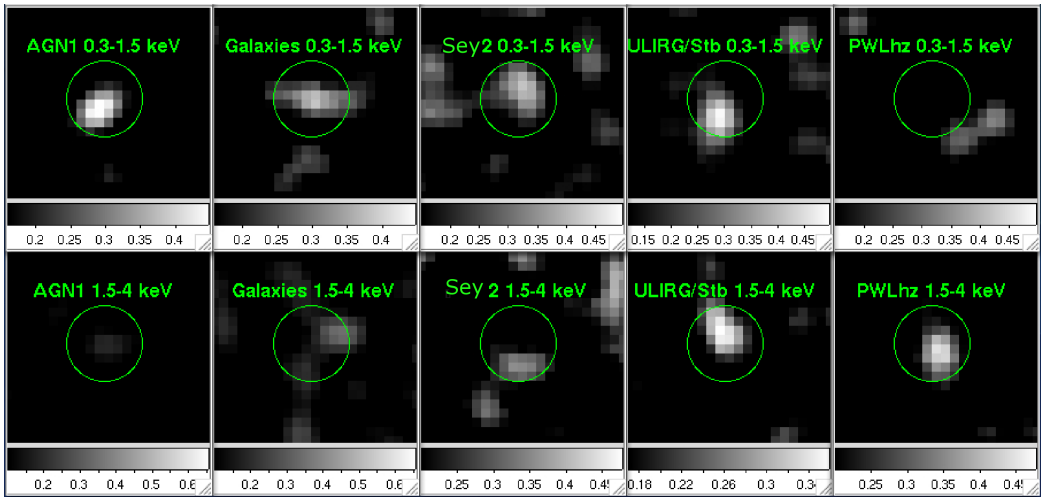

Figura 4.3: Risultati del processo di stacking dei dati X Chandra relativi ai 5 gruppi di sorgenti selezionati tramite il fit della IR-SED, da sinistra a destra in ordine crescente di hardness ratio: AGN1 (IR-powerlaw), galassie a spirale e passive, Seyfert1.8+Seyfert2, ULIRG, IR-AGN ad alto z (IR-powerlaw con componente ottica depressa rispetto agli AGN1). Banda soft-X in alto e hard-X in basso.

selezionate tramite la procedura di fit delle SED descritta nel Capitolo precedente. Abbiamo suddiviso le sorgenti in diverse classi per studiare le proprietà medie X delle varie popolazioni nonché l'affidabilità del nostro metodo di selezione.

Da ogni lista di candidate per lo stacking abbiamo escluso tutte le sorgenti al di fuori dei primi 5.5arcmin dai centri dei 5 puntamenti Chandra. Per angoli di off-axis maggiori la forma della PSF si deforma e l'efficacia di focalizzazione dei fotoni degrada rapidamente, provocando una diluizione del segnale sovrapposto. Abbiamo inoltre escluso tutte le sorgenti che avessero una controparte Chandra (con probabilità di detection casuale[1] inferiore a 10^{-5}) per evitare che un singolo oggetto particolarmente brillante dominasse da solo il segnale sovrapposto.

[1]Ossia la probabilità per cui fluttuazioni Poissoniane del background raggiungano una soglia tale da essere considerate detection di sorgenti reali.

Grazie all'ottima PSF di Chandra entro i primi 5.5arcmin dal centro del puntamento ed al rumore di fondo estremamente ridotto lo stacking di circa 40 sorgenti (della stessa classe di SED) osservate con Chandra per 50ks corrisponde all'osservazione di una singola sorgente per circa 2Ms, con l'effetto di raggiungere flussi più bassi di circa un fattore 6.

Lo stacking è stato eseguito su cinque insiemi: 20 sorgenti con IR-SED da galassia normale o non attiva (galassie-MIR) con redshift compreso tra 0.2 e 0.7, 51 Sey2-MIR con 0.7<z<1.4, 30 ULIRG-MIR con 0.7<z<1.4, 10 e 16 AGN1-MIR appartenenti alle due popolazioni (rispettivamente a magnitudini R brillanti e deboli, queste ultime indicate in seguito AGN2) emerse dall'analisi delle IR-SED e menzionate precedentemente; separatamente nelle bande 0.3-1.5 keV (soft) e 1.5-4 keV (hard). I count rate e le probabilità di una detection spuria sono riportate in Tab. 4.1, mentre le immagini risultanti sono mostrate in Fig. 4.3.

Tabella 4.1: Risultati dello stacking X

SAMPLE	N	$< z >$	CountsS 10^{-6} s^{-1}	CountsH 10^{-6} s^{-1}	ProbS	ProbH	Flux 10^{-16} cgs	LogN$_H$ cm^{-2}	LogL$_X$ erg s^{-1}
MIR-AGN1	10	1.00	30.7	8.77	<0.001	0.045	1.48	...	41.8
MIR-Glx	20	0.35	9.74	7.33	<0.001	0.005	1.24	20.2	40.7
MIR-Sey2	51	0.94	4.49	4.00	0.012	0.023	0.69	21.6	41.4
MIR-ULIRG	30	1.06	7.43	8.38	0.007	0.004	1.49	22.1	41.9
MIR-AGN2	16	*1.50*	<11.0	31.5	0.097	<0.001	8.31	23.0	*42.9*

Gli AGN1-MIR sono stati suddivisi in due gruppi a seconda della distribuzione nel piano magnitudine R contro flusso $24\mu m$ (v. Fig. 4.1). Entrambe le classi di sorgenti sono ben fittate da IR-SED da AGN1, ossia powerlaw, ma le loro proprietà X completamente differenti dicono molto sulla loro natura. La popolazione di AGN1-MIR a magnitudini brillanti (prima coppia di immagini da sinistra in Fig. 4.3) mostra una forte componente soft-X ed una debole nella banda hard, emissione caratteristica di sorgenti non assorbite con spettro a legge di potenza. Si tratta quindi di AGN1 la cui

componente primaria risulta visibile, non oscurata in banda X e dominante nella regione infrarossa. Tale analisi conferma quanto trovato a flussi più brillanti per le sorgenti con copertura XMM-Newton oppure spettroscopica.

La seconda popolazione di MIR-powerlaw (a deboli magnitudini R, ultima coppia di immagini a destra in Fig. 4.3), nonostante presenti le stesse caratteristiche IR della prima classe di oggetti powerlaw, mostra uno spettro X completamente differente. L'emissione hard-X risulta infatti molto brillante mentre non si osserva alcuna componente soft. Si tratta quindi di una classe di sorgenti fortemente oscurate la cui componente primaria domina nella regione infrarossa (spettro powerlaw) ma subisce un pesante assorbimento in banda ottica (2-3 magnitudini più deboli rispetto alla controparte più brillante in banda R) e ad energie soft-X ($\mathrm{LogN}_H \approx 10^{23}\mathrm{cm}^{-2}$), ossia AGN2 secondo la classificazione in banda X. Purtroppo la natura power-law dello spettro IR e la debole magnitudine ottica di questi oggetti ostacolano la determinazione del loro redshift e quindi della loro luminosità instrinseca.

Disponiamo tuttavia di dati spettroscopici (v. Par. 4.2) di buona qualità per un ristretto sottoinsieme, relativamente brillante, di questa popolazione di AGN oscurati nell'X e su un totale di poco più di una decina di spettri i 3/4 sono stati classificati otticamente come AGN di tipo 2 con redshift dell'ordine di 1.2$\sim$1.8. Abbiamo quindi utilizzato un redshift medio di 1.5, eseguito delle stime della luminosità intrinseca 2-10 keV e della densità colonnare di questa popolazione, trovando i valori indicati in Tab. 4.1, tipici di una classe di AGN luminosi fortemente assorbiti.

Lo stacking delle altre 3 classi ha portato a detection significative in entrambe le bande: la probabilità di una detection spuria è al massimo del 2.3% nel caso delle Sey2-MIR nella banda hard.

Assumendo come indice fotonico della pendenza dello spettro X un tipico valore da AGN ($\Gamma \approx 1.8$), le galassie-MIR risultano non assorbite con una luminosità intrinseca 2-10 keV pari a $10^{40.7}$ erg s^{-1}, compatibile con normale attività starburst.

Le Sey2-MIR risultano in media parzialmente assorbite con una densità colonnare di $10^{21.6}$ cm^{-2} e con una luminosità instrinseca di $10^{41.4}$ erg s^{-1}. Sebbene questa luminosità sia più tipica di attività starburst che di AGN, noi crediamo che il moderato assorbimento misurato in banda X sia la firma di una popolazione di AGN oscurati di bassa luminosità (ulteriormente diluita dalla contaminazione da parte di galassie non attive) in accordo con i modelli di sintesi del fondo X (XRB) e di funzione di luminosità X (XLF) degli AGN (es. Comastri *et al.* (1995), Ueda *et al.* (2003), La Franca *et al.* (2005)).

La popolazione di ULIRG mostra in media alto assorbimento X (N_H=$10^{22.1}$ cm^{-2}) e luminosità $L_{2-10\ keV}$=$10^{41.9}$ erg s^{-1}. Si tratta di una popolazione composta prevalentemente da AGN oscurati ad un redshift medio intorno ad 1, predetta dai modelli di XLF e XRB ed in accordo con i risultati emersi negli ultimi anni da diversi lavori sulla fonte energetica alla base dell'emissione IR in galassie ULIRG (Houck *et al.* (2005), Yan *et al.* (2007), Sajina *et al.* (2007)).

Riassumendo, il metodo dello stacking X conferma mediamente la classificazione delle IR-SED. La classe di galassie-MIR è compatibile con una popolazione mista di galassie passive e con modesti fenomeni di formazione stellare, quella delle MIR-Sey2 è composta da AGN di bassa luminosità moderatamente assorbiti a redshift intorno ad 1, le sorgenti IR-powerlaw si dividono a seconda del rapporto $24\mu m$/R in 2 popolazioni: una composta da AGN1 con forte componente soft-X ed una da AGN2 oscurati con elevata luminosità intrinseca.

4.2 Spettro composito di AGN oscurati ad alto z

Quelli presentati in questo paragrafo sono risultati preliminari relativi ad osservazioni spettroscopiche ottiche profonde (R$\sim$24) effettuate su un ristretto numero di sorgenti con lo strumento FORS2 presso il telescopio VLT del-

l'ESO (Paranal, Cile) e recentemente ridotte. L'utilizzo di lunghi tempi di integrazione (2h 40min per campo) con un telescopio della classe degli 8m, ha permesso di ottenere spettri con elevato rapporto segnale/rumore anche per sorgenti con debole magnitudine ottica.

Queste sorgenti sono state selezionate richiedendo un rapporto tra i flussi a $24\mu m$ ed R particolarmente elevato ($F(24\mu m)/F(R)>11.8$) rispetto a quello del resto delle sorgenti $24\mu m$ presenti nel nostro campione. In particolare, una frazione di tali sorgenti presenta caratteristiche IR simili ad AGN1, ossia viene ben fittata da template powerlaw, ma mostra un'emissione ottica estremamente più debole, con flusso R inferiore di 2-3 magnitudini. Come già visto nel paragrafo precedente, tale classe di sorgenti presenta una luminosità X da AGN ed assorbimento in banda X-soft compatibile con densità colonnari dell'ordine di $10^{23}cm^{-2}$, rientrando quindi nella definizione di AGN2.

Abbiamo ridotto ed analizzato gli spettri FORS2 di 12 sorgenti con IR-SED powerlaw, ossia dominata dal riprocessamento da parte della polvere della componente primaria del nucleo attivo, ed alto rapporto $F(24\mu m)/F(R)$ identificando 2 AGN di tipo 1 (righe larghe in emissione ad alta ionizzazione), 9 AGN di tipo 2 (righe strette in emissione ad alta ionizzazione) ed 1 galassia con righe in emissione strette a bassa ionizzazione (indice di formazione stellare).

L'analisi delle proprietà ottiche di questi oggetti conferma quindi quanto trovato dallo stacking X: tale classe di sorgenti extra-galattiche a redshift elevato ($z>1.2$) è costituito quasi interamente (92%) da nuclei attivi in cui la componente primaria risulta oscurata in ottico nella maggior parte dei casi (82%).

In Fig. 4.4 è rappresentato lo spettro ottenuto dalla composizione delle 9 sorgenti classificate come AGN di tipo 2, con indicate le principali righe tipiche degli AGN di tipo 1 e 2.

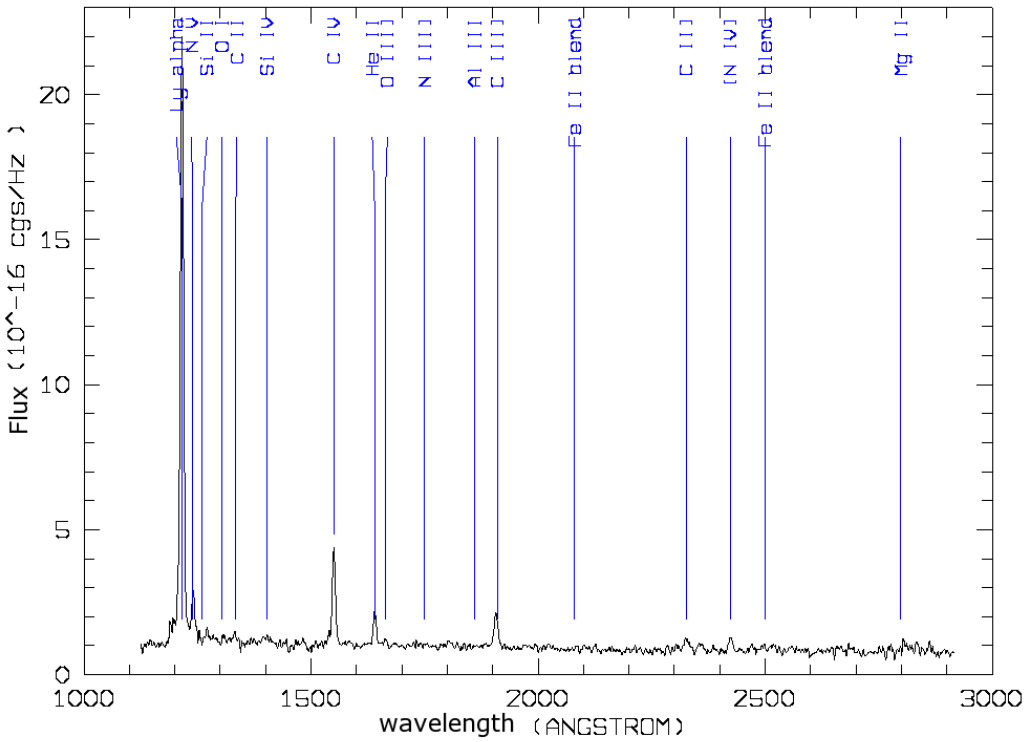

Figura 4.4: Spettro composito ottenuto dalla somma pesata degli spettri delle 9 sorgenti classificate come AGN di tipo 2.

4.3 Frazione e conteggi di AGN

Dopo aver suddiviso il campione nelle diverse popolazioni extragalattiche, in base alle proprietà di emissione in banda IR, abbiamo calcolato la frazione di AGN in funzione del flusso $24\mu m$. Il risultato è illustrato in Fig. 4.5, confrontato con alcuni modelli e dati osservativi disponibili in letteratura (Brand *et al.* (2006), Treister *et al.* (2006), Pearson (2005)). In alto sono indicati i contributi cumulativi di varie classi di oggetti, come descritto in figura. Gli AGN1 (triangoli blu) e gli AGN2, caratterizzati da una IR-SED powerlaw, hanno frazioni simili e costituiscono assieme circa il 10% delle sorgenti extragalattiche $24\mu m$ a flussi 0.5-1mJy (quadrati rossi).

Con cerchi neri pieni è indicata la frazione totale di AGN data dall'insieme di AGN1, AGN2 ed ULIRG, che risulta compresa tra il 10 ed il 20%. Dall'analisi dello stacking X descritta nei paragrafi precedenti è emerso come la classe di sorgenti con IR-SED ULIRG sia una popolazione composta prevalentemente da AGN oscurati. Tale risultato ci ha portato ad includere le sorgenti ULIRG all'interno della popolazione di nuclei attivi e ad adottare questa frazione complessiva come stima della frazione di AGN sul totale delle sorgenti $24\mu m$. Come si può vedere tale stima è circa 4 volte più elevata rispetto alla frazione di AGN1, implicando un rapporto tra sorgenti oscurate e non oscurate dell'ordine di 3:1, in parziale accordo con i modelli di evoluzione degli AGN e di sintesi del fondo cosmico nei raggi X (XRB).

Il confronto tra la nostra stima della frazione di AGN ed i risultati presentati da alcuni autori (riportati in verde) mostra come, nonostante un parziale accordo entro gli errori a flussi $24\mu m$ intorno ad 1mJy, vi sia una sostanziale differenza a flussi più bassi (intorno a 0.2-0.3mJy). La nostra stima prevede una frazione circa doppia di AGN rispetto alle altre considerate, ottenute tramite una selezione basata sul rapporto L($24\mu m$)/L($8\mu m$) nel caso di Brand *et al.* (2006), sull'emissione hard-X nel caso di Treister *et al.* (2006) ed su un modello che riproduce le osservazioni Spitzer ed ISO nel caso di Pearson (2005).

I triangoli neri pieni rappresentano la frazione di AGN nel caso in cui si includano anche tutte le sorgenti che presentano una IR-SED da Sey2. Tale classe di oggetti è in parte costituita (come emerso dallo stacking X) da nuclei attivi di bassa luminosità e modesto assorbimento medi (v. Tab. 4.1), previsti dai modelli che descrivono la popolazione di nuclei galattici attivi. All'interno di questa classe di oggetti ci aspettiamo una parziale contaminazione da parte di galassie starburst, la cui entità non siamo però in grado di quantificare con precisione. Consideriamo quindi questa frazione (pari a circa il 35%) come un limite superiore alla frazione di AGN rispetto al totale delle sorgenti extra-galattiche $24\mu m$.

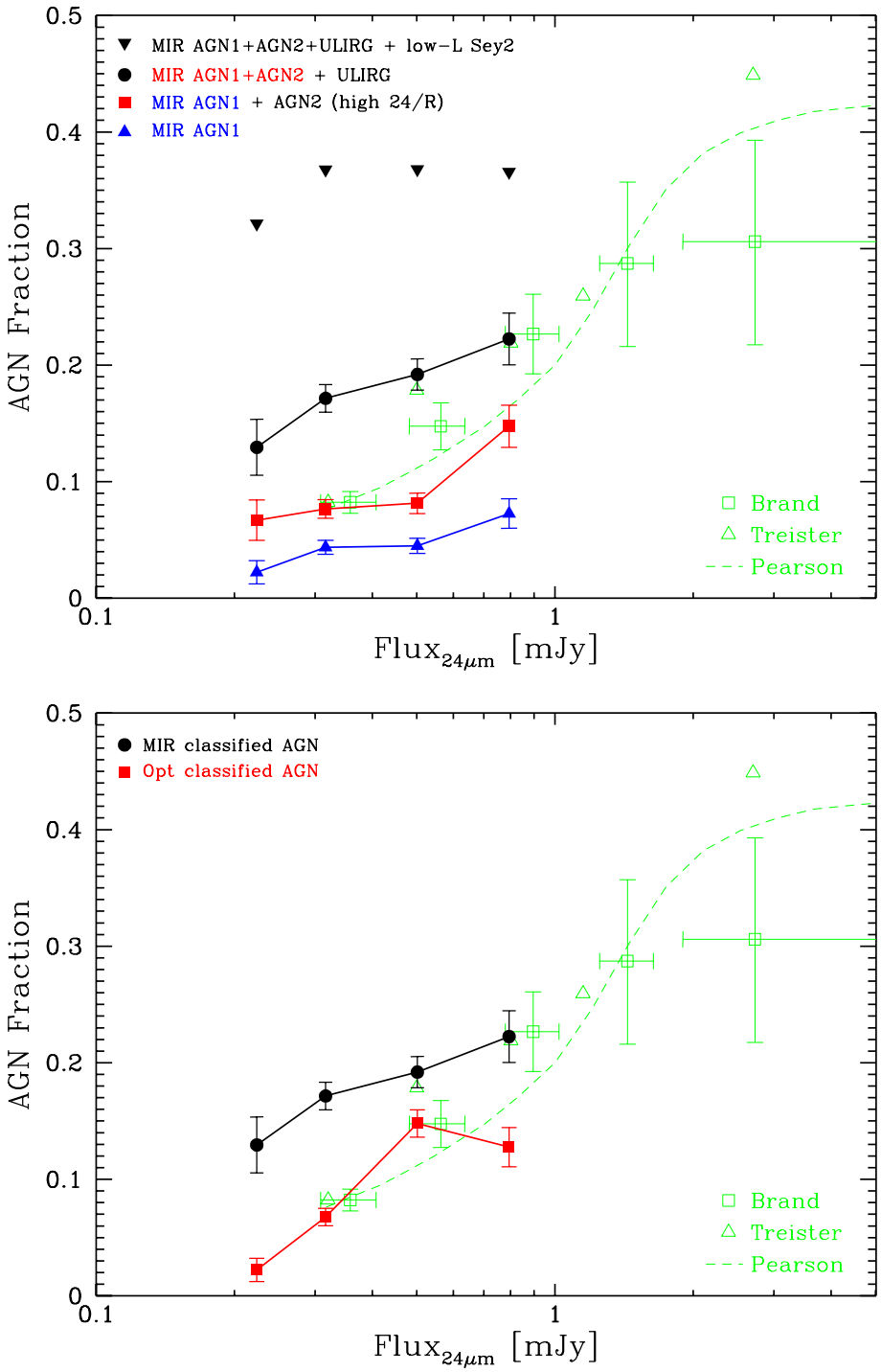

Figura 4.5: Frazione degli AGN sul totale delle sorgenti $24\mu m$ in funzione del flusso. Sono riportate: in alto, con diversi colori le frazioni cumulative relative a varie popolazioni, secondo la classificazione delle SED IR (v. legenda e spiegazione nel testo); in basso, in nero la frazione AGN1+AGN2+ULIRG della figura sopra ed in rosso quella relativa alla classificazione spettroscopica ottica ed X. Come confronto sono indicati in verde alcuni modelli e dati dalla letteratura (Brand *et al.* (2006), Treister *et al.* (2006), Pearson (2005)).

Considerare la totalità delle sorgenti con IR-SED da Sey2 tra gli AGN porta ad un rapporto tra AGN oscurati:non-oscurati intorno a 6:1, sebbene tale valore sia mediato su un ampio intervallo di redshift e vada inteso come un limite superiore.

Come elemento di confronto è indicata, in Fig. 4.5 in basso, oltre alla frazione di AGN1+AGN2+ULIRG del pannello superiore (con cerchi neri pieni), quella delle sorgenti $24\mu m$ classificate AGN tramite l'analisi spettroscopica oppure l'emissione hard-X (quadrati rossi). Tale stima si aggira intorno al 15% per $F_{24\mu m}$ $\sim$0.5-1 mJy, per poi crollare a flussi più deboli, seguendo con buon accordo l'andamento dei modelli e dei dati riportati in verde in figura. Ricordiamo che la frazione da noi ottenuta mediante la sola classificazione spettroscopica ed X (senza utilizzare la tecnica dello stacking), va intesa come un limite inferiore alla reale frazione di AGN per l'incompletezza di tali criteri di selezione e per la loro bassa efficacia a flussi deboli.

Nel calcolo di quest'ultima stima della frazione di AGN in funzione del flusso $24\mu m$ si è tenuto conto degli effetti di selezione introdotti (a favore del numero di nuclei attivi) dall'assegnazione di una priorità per le sorgenti con emissione X nella scelta degli oggetti da osservare, durante la preparazione dei run spettroscopici descritti nel Par. 2.4.

Utilizzando i risultati pubblicati da Papovich *et al.* (2004) sui conteggi a $24\mu m$, abbiamo calcolato la completezza del nostro campione MIR in funzione del flusso, mostrata in Fig. 4.6. Un valore pari ad 1, raggiunto nella parte più brillante dell'intervallo di flusso coperto, equivale ad una completezza di detection. A flussi inferiori agli 0.5 mJy la completezza inizia a diminuire rapidamente, crollando sotto il 10% ad un flusso di 0.2 mJy.

Utilizzando l'informazione dell'area efficace, abbiamo convertito le nostre frazioni in conteggi di AGN a $24\mu m$, ossia il loro numero per unità logaritmica di flusso per unità di grado quadro in cielo. Il risultato è illustrato in Fig. 4.7.

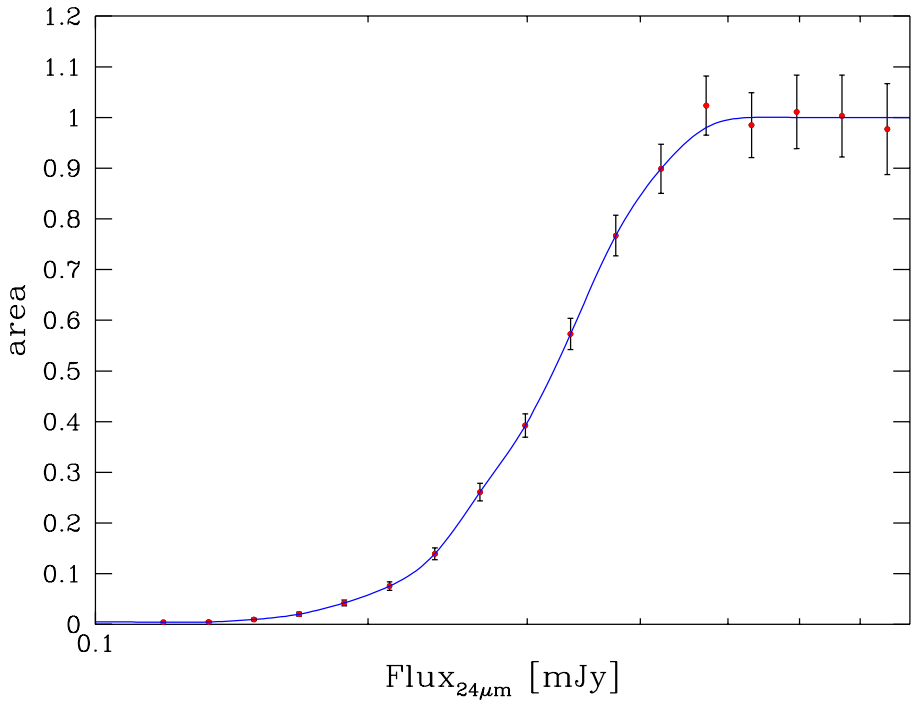

Figura 4.6: Area efficace in funzione del flusso $24\mu m$, ottenuta confrontando i conteggi del nostro campione con quelli di Papovich *et al.* (2004).

Sono riportati (con cerchi neri pieni) i conteggi relativi alla totalità degli AGN, selezionati tramite l'analisi della loro IR-SED, inclusa la classe di sorgenti ULIRG; con cerchi blu pieni sono indicati i soli AGN1-MIR e con cerchi blu vuoti gli AGN1 selezionati spettroscopicamente.

Le tre linee rappresentano i conteggi predetti da Silva *et al.* (2004) partendo dalla funzione di luminosità X di Ueda *et al.* (2003) e convertendola al flusso $24\mu m$, attraverso alcune assunzioni semi-empiriche sulle proprietà spettrali in funzione dell'N_H degli AGN. In particolare le linee blu e nera sono relative rispettivamente ad AGN con $N_H < 10^{21}$ cm^{-2} ed al totale, rispettivamente (compreso il contributo dato dalla galassia ospite).

I risultati di Silva *et al.* (2004) ed i nostri presentano un discreto accordo, considerato che i primi sono affetti da ampi errori (non visualizzati in figura)

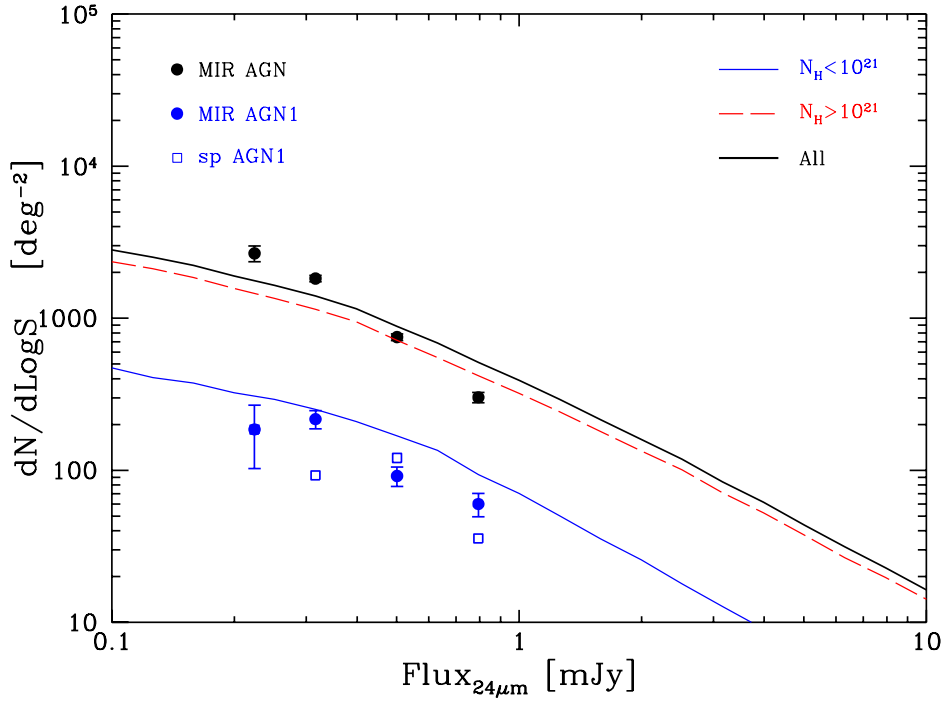

Figura 4.7: Conteggi a 24μm degli AGN totali (cerchi neri pieni) e degli AGN1 (cerchi blu pieni) selezionati tramite il fit delle IR-SED. Il totale degli AGN include anche la classe ULIRG. Con cerchi blu vuoti sono indicati i conteggi degli AGN1 selezionati spettroscopicamente. Le tre linee blu, rossa tratteggiata e nera rappresentano le predizioni di Silva *et al.* (2004) per gli AGN con $N_H < 10^{21}$ cm^{-2}, con $N_H > 10^{21}$ cm^{-2} ed per il totale degli AGN, rispettivamente (v. descrizione nel testo).

e che le incertezze relative ai nostri conteggi soffrono di una sottostima legata alla difficoltà di quantificare correttamente gli errori introdotti dagli effetti di incompletezza e contaminazione che probabilmente affliggono le nostre selezioni.

Tale accordo di massima tra la nostra stima dei conteggi di AGN a 24μm e quella derivata dalle attuali funzioni di luminosità X indica che i criteri MIR da noi proposti non selezionano una popolazione nettamente diversa o nuova rispetto a quella osservata dalle survey hard-X, una volta che si sia tenuto

conto della frazione di oggetti persi e corretto assumendo una distribuzione in N_H.

4.4 Densità degli AGN

Un approccio complementare a quello dei conteggi nel MIR, consiste nell'utilizzare le informazioni ottenute dallo stacking X per derivare la densità degli AGN selezionati.

Abbiamo calcolato la somma degli inversi dei volumi accessibili ($1/V_a$) per ogni oggetto, seguendo il metodo coerente di Avni *and* Bahcall (1980). I volumi accessibili sono stati calcolati tenendo conto dei flussi limite $24\mu m$ ed R, e le k-correction derivate dalle SED di best-fit per ogni oggetto. Gli errori Poissoniani, al livello di confidenza di 1 σ, sono stati calcolati con la formula:

$$\sigma = \sqrt{\sum_i \frac{1}{V_{a_i}}}.$$

In Fig. 4.8 sono confrontate le densità di MIR-Sey2 e ULIRG, negli intervalli di redshift $0.7<z<1.4$, con le stime della funzione di luminosità hard-X (HXLF) di La Franca *et al.* (2005). Abbiamo assunto come luminosità X degli oggetti quella derivata dall'analisi di stacking, con una distribuzione di larghezza circa unitaria in decade, come quella osservata nella distribuzione in banda $24\mu m$ (v. Fig. 4.2).

Dallo stacking dei dati Chandra è risultato che la popolazione di IR-Sey2 presenta una densità colonnare media di $10^{21.6}$ cm^{-2}, con una luminosità intrinseca di $10^{41.4}$ erg s^{-1}. In Fig. 4.8 la loro densità è confrontata con la HXLF degli AGN con $21<\mathrm{LogN}_H\leq22$. Poiché la loro luminosità media è di $10^{41.4}$ erg s^{-1}, possiamo assumerli rappresentativi dell'intervallo in luminosità $41<\mathrm{LogL}_X\leq42$. Se prendiamo in considerazione le incertezze, la densità derivata dallo stacking è in accettabile accordo con il valore atteso dalla funzione di luminosità.

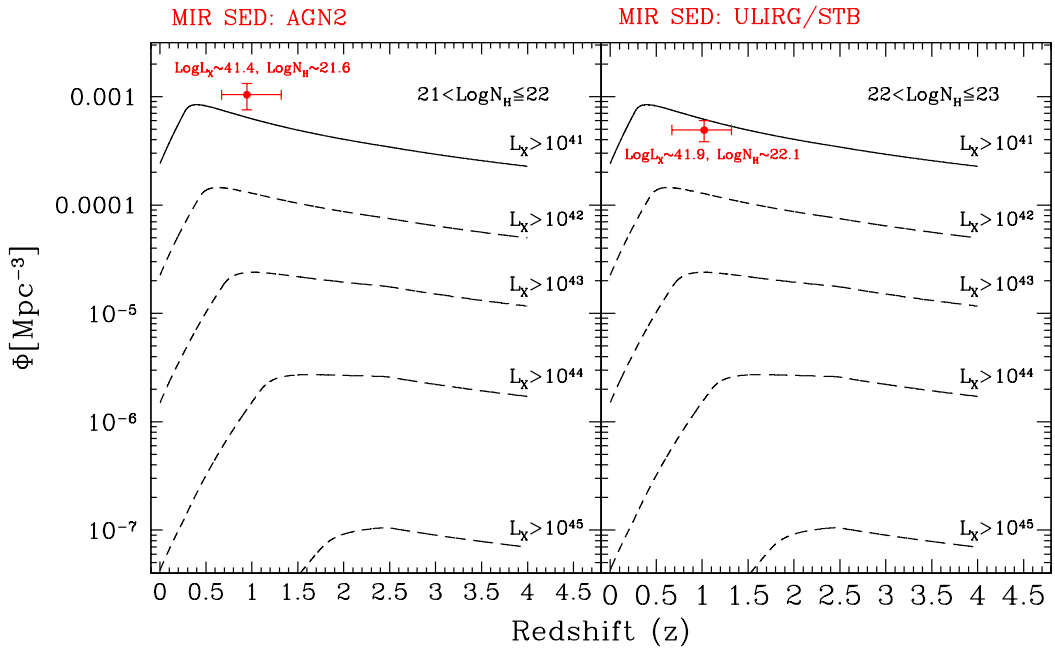

Figura 4.8: Densità dei MIR-Sey2 (*a sinistra*) e delle ULIRG (*a destra*). Le linee indicano gli andamenti derivati dalla funzione di luminosità X di La Franca *et al.* (2005). I dati (in rosso) sono da confrontare con le linee continue.

La popolazione di ULIRG mostra una luminosità media più elevata ($41.5 < \mathrm{LogL}_X < 42.5$) e spettri X più assorbiti ($\mathrm{N}_H \sim 10^{22.1}$ cm^{-2}), ed è perciò da confrontare con la HXLF nell'intervallo $21.6<\mathrm{LogN}_H\leq 22.6$ (in realtà siccome la HXLF considerata assume una distribuzione piatta in LogN_H per densità colonnari comprese tra 10^{21} e 10^{25}cm^{-2}, è indifferente quale decade si consideri all'interno di tale intervallo). Anche in questo caso, considerando le incertezze, la nostra stima della densità risulta in accordo con il valore atteso.

Non è stato possibile derivare una stima della densità anche per le sorgenti

maggiormente oscurate emerse dalla procedura di stacking X (AGN2) a causa di un numero eccessivamente ridotto di oggetti.

Capitolo 5

Riassunto e conclusioni

L'obiettivo di questo lavoro di tesi era studiare le proprietà dell'emissione IR degli AGN e come una selezione basata su tali lunghezze d'onda si relazioni con altri criteri comunemente utilizzati per selezionare galassie ospitanti nuclei attivi (ossia la spettroscopia ottica ed X).

Il primo passo è stato quello di costruire un catalogo multi-λ (v. Cap. 2), con osservazioni X, ottiche (spettroscopiche e fotometriche), NIR/MIR. Ho personalmente progettato, preparato ed eseguito le osservazioni spettroscopiche ottiche, curato la riduzione dei dati e l'identificazione e classificazione degli spettri. Ci siamo quindi concentrati su un sotto-campione a $24\mu m$ che abbiamo utilizzato per esplorare le proprietà di emissione delle varie classi di sorgenti extra-galattiche.

Per far questo abbiamo allestito una procedura di fit basata sul programma per determinazioni fotometriche del redshift Le PHARE ed una libreria di template teorico-osservativi, utilizzando una sequenza semi-automatizzata di script appositamente creati per calibrare la procedura ed ottimizzarne l'efficienza di selezione (v. Cap. 3).

Tale processo di calibrazione ha richiesto un sotto-campione ad alta statistica con detection in ogni banda utilizzata (B, V, R, K, 3.6, 4.5, 5.8, 8.0, 15 e $24\mu m$,) e copertura spettroscopica affidabile, così da poter confrontare la classificazione proveniente dalla spettroscopia ottica precedentemente elabo-

rata con quella ottenuta dal fit della SED infrarossa (adottando il redshift stimato in ottico).

Apportando modifiche ai template delle SED, alle incertezze fotometriche nelle diverse bande e a diversi parametri usati da LePHARE per il fit (possibili valori di estizione ottica, priors per limitare gli intervalli di magnitudine accessibili alle diverse classi di sorgenti, ecc.) abbiamo ottenuto una configurazione ottimale che massimizza l'efficienza e l'affidabilità di selezione di galassie con nuclei attivi al loro interno.

Il passaggio successivo è stato quello di estendere il campione a tutte le 2442 sorgenti $24\mu m$ con adeguata copertura di altre bande indispensabili per il fit (R, 3.6, $4.5\mu m$), utilizzando LePHARE stesso per stimare fotometricamente il redshift delle sorgenti (v. Par. 3.2.6). Abbiamo quindi eseguito diverse analisi statistiche sulla selezione di AGN così ottenuta (v. Cap. 4), ottenendo i seguenti risultati:

- Studiando le proprietà delle diverse sorgenti extragalattiche su un piano R contro $24\mu m$, abbiamo osservato la presenza di una popolazione di sorgenti ben fittate da IR-SED da AGN1 (ossia powerlaw) a magnitudini R molto deboli (v. Fig. 4.1). Tale popolazione pur mostrando caratteristiche delle SED IR simili agli AGN1 presenta un rapporto $F(24\mu m)/F(R)>11.8$, a causa di elevata estinzione da polvere in banda ottica che ne riduce il flusso R di 2-3 magnitudini rispetto a quello della controparte non oscurata.

- L'analisi degli spettri ottici di 12 di queste sorgenti ha confermato la loro natura di AGN oscurati: si tratta di una classe di oggetti a redshift elevato ($z>1.2$), composta quasi interamente (92%) da nuclei attivi, in cui la componente primaria risulta oscurata in ottico nella maggior parte dei casi (82%).

- La tecnica dello stacking X eseguita su osservazioni Chandra per un

sottoinsieme del nostro campione mostra come mediamente vi sia un accordo tra la classificazione X e quella mediante fit dell'IR-SED.

Gli IR-AGN1 presentano una forte componente prevalentemente soft-X, caratteristica di sorgenti non assorbite con spettro X powerlaw.

Gli IR-AGN2 (l'altra classe di sorgenti con IR-SED powerlaw), pur mostrando proprietà di emissione in banda IR simili a quelle degli IR-AGN1, presentano uno spettro X completamente differente, con elevata luminosità intrinseca ($\mathrm{LogL}_{2-10keV} \sim 10^{43}$ erg s^{-1}) e forte assorbimento ($\mathrm{LogN}_H \sim 10^{23}\mathrm{cm}^{-2}$).

Le galassie-MIR risultano non assorbite con una luminosità intrinseca 2-10 keV pari a $10^{40.7}$ erg s^{-1}, compatibile con normale attività starburst.

La popolazione di ULIRG mostra in media moderato assorbimento X (N_H=$10^{22.1}$ cm^{-2}) e luminosità $\mathrm{L}_{2-10keV}$=$10^{41.9}$ erg s^{-1}. Si tratta di una popolazione composta prevalentemente da AGN oscurati ad un redshift medio intorno ad 1, predetta dai modelli di XLF e XRB ed in accordo con i risultati emersi negli ultimi anni da diversi lavori sulla fonte energetica alla base dell'emissione IR in galassie ULIRG (Houck *et al.* (2005), Yan *et al.* (2007), Sajina *et al.* (2007)).

Le IR-Sey2 risultano in media assorbite in X con una densità colonnare di $10^{21.6}$ cm^{-2} e con una luminosità instrinseca 2-10 keV di $10^{41.4}$ erg s^{-1}. Sebbene questa luminosità sia compatibile sia con attività starburst che di AGN, noi crediamo che il moderato assorbimento misurato in banda X sia la firma di una popolazione di AGN oscurati di bassa luminosità in accordo con i modelli di sintesi del fondo X (XRB) e di funzione di luminosità (XLF) degli AGN (es. Comastri *et al.* (1995), Ueda *et al.* (2003), La Franca *et al.* (2005)).

- Abbiamo calcolato la frazione di AGN in funzione del flusso $24\mu m$, confrontandola con alcuni modelli e dati osservativi disponibili in let-

teratura (Brand *et al.* (2006), Treister *et al.* (2006), Pearson (2005)). Gli AGN1 e gli AGN2, caratterizzati da una IR-SED powerlaw, hanno frazioni simili e costituiscono assieme circa il 10% delle sorgenti extragalattiche $24\mu m$ a flussi 0.5-1 mJy.

Dall'analisi dello stacking X è emerso come la classe di sorgenti con IR-SED ULIRG sia una popolazione composta prevalentemente da AGN oscurati. Tale risultato ci ha portato ad includere le sorgenti ULIRG all'interno della popolazione di nuclei attivi e ad adottare questa frazione complessiva, compresa tra il 10 ed il 20%, come stima della frazione di AGN sul totale delle sorgenti $24\mu m$. Tale stima è circa 4 volte più elevata rispetto alla frazione dei soli AGN1, implicando quindi un rapporto tra sorgenti oscurate e non oscurate (a parità di flusso $24\mu m$) dell'ordine di 3:1.

Il confronto tra la nostra stima della frazione di AGN ed i risultati presentati da alcuni autori mostra come, nonostante un parziale accordo entro gli errori a flussi $24\mu m$ intorno ad 1 mJy, vi sia una sostanziale differenza a flussi più bassi (intorno a 0.2-0.3 mJy). La nostra stima prevede una frazione circa doppia di AGN rispetto alle altre considerate.

L'insieme delle sorgenti IR-Sey2 è in parte costituita (come emerso dallo stacking X) da nuclei attivi di bassa luminosità e modesto assorbimento. All'interno di questa classe di oggetti ci aspettiamo una parziale contaminazione da parte di galassie starburst, la cui entità non siamo però in grado di quantificare con precisione. Consideriamo quindi come limite superiore (pari a circa il 35%) la frazione di AGN sul totale delle sorgenti extra-galattiche $24\mu m$, nel caso in cui si includa anche questa classe di oggetti.

- Abbiamo inoltre calcolato la frazione delle sorgenti $24\mu m$ classificate AGN tramite l'analisi spettroscopica oppure l'emissione hard-X (quadrati

rossi). Tale stima si aggira intorno al 15% per $F_{24\mu m}$ ∼0.5-1 mJy, per poi crollare a flussi più deboli, seguendo con buon accordo l'andamento dei modelli e dei dati usati come confronto. Ricordiamo che la frazione da noi ottenuta mediante la sola classificazione spettroscopica ed X (senza utilizzare la tecnica dello stacking), va intesa come un limite inferiore alla reale frazione di AGN per l'incompletezza di tali criteri di selezione e per la loro bassa efficacia a flussi deboli.

- Utilizzando i risultati pubblicati da Papovich *et al.* (2004), abbiamo convertito le nostre frazioni in conteggi di AGN a $24\mu m$.

  Abbiamo confrontato i conteggi relativi alla totalità degli AGN, inclusa la classe di sorgenti ULIRG, con quelli predetti da Silva *et al.* (2004), partendo dalla funzione di luminosità X di Ueda *et al.* (2003) e convertendola al flusso $24\mu m$, attraverso alcune assunzioni semi-empiriche sulle proprietà delle SED degli AGN in funzione dell'N_H.

  I risultati di Silva *et al.* (2004) ed i nostri presentano un discreto accordo, considerato che i primi sono affetti da ampi errori (non visualizzati in figura) e che le incertezze relative ai nostri conteggi soffrono di una sottostima legata alla difficoltà di quantificare correttamente gli errori introdotti dagli effetti di incompletezza e contaminazione che probabilmente affliggono le nostre selezioni.

  Tale accordo di massima tra la nostra stima dei conteggi di AGN a $24\mu m$ e quella derivata dalle attuali funzioni di luminosità X indica che i criteri MIR da noi proposti non selezionano una popolazione nettamente diversa o nuova rispetto a quella osservata dalle survey hard-X, una volta che si sia tenuto conto della frazione di oggetti persi in funzione dell'N_H.

- Con un approccio complementare a quello dei conteggi nel MIR abbiamo utilizzato le informazioni su L_X ed N_H ottenute dallo stacking X per derivare la densità media delle due classi di sorgenti IR-Sey2

ed ULIRG, confrontandola con la funzione di luminosità hard-X di La Franca *et al.* (2005). Le due stime della densità di queste popolazioni sono risultate in accordo entro un sigma.

Dai risultati sopra esposti emerge che dall'analisi delle proprietà della SED ottico-IR è possibile separare le sorgenti dominate dall'accrescimento da quelle dominate da intensa formazione stellare, come confermato direttamente dallo stacking X. I confronti operati tra le nostre stime di densità e conteggi, e quanto predetto da funzioni di luminosità hard-X, portano a concludere che criteri IR selezionano la stessa popolazione di AGN osservata nelle survey X, una volta che si sia tenuto conto degli effetti di selezione in banda X in funzione del valore di N_H.

All'interno del nostro campione $24\mu m$ troviamo che, come già suggerito da diversi autori, un elevato rapporto F($24\mu m$)/F(R) seleziona una popolazione di sorgenti fortemente oscurate da polvere, all'interno della quale un'ampia frazione (dipendente dalla soglia adottata per il rapporto IR/ottico e dal criterio usato per definire l'attività di accrescimento) è costituita da nuclei galattici attivi.

Dalla nostra selezione IR e dallo stacking X sembra inoltre emergere che la maggior parte delle galassie ULIRG, anche se in presenza di intensa formazione stellare, ospita un AGN, nonostante tale presenza non sia facilmente identificabile in banda ottica a causa dell'ambiente ricco di polvere caratteristico di questi sistemi e della conseguente forte estinzione.

Bibliografia

Adelberger, K. L. (2005). Estimating the Galaxy Correlation Length r_0 from the Number of Galaxy Pairs with Similar Redshifts. *ApJ*, **621**, 574–581.

Alexander, D. M., Bauer, F. E., Brandt, W. N., Schneider, D. P., Hornschemeier, A. E., Vignali, C., Barger, A. J., Broos, P. S., Cowie, L. L., Garmire, G. P., Townsley, L. K., Bautz, M. W., Chartas, G., and Sargent, W. L. W. (2003). The Chandra Deep Field North Survey. XIII. 2 Ms Point-Source Catalogs. *AJ*, **126**, 539–574.

Alexander, D. M., Smail, I., Bauer, F. E., Chapman, S. C., Blain, A. W., Brandt, W. N., and Ivison, R. J. (2005). Rapid growth of black holes in massive star-forming galaxies. *Nature*, **434**, 738–740.

Alonso-Herrero, A., Pérez-González, P. G., Rigby, J., Rieke, G. H., Le Floc'h, E., Barmby, P., Page, M. J., Papovich, C., Dole, H., Egami, E., Huang, J.-S., Rigopoulou, D., Cristóbal-Hornillos, D., Eliche-Moral, C., Balcells, M., Prieto, M., Erwin, P., Engelbracht, C. W., Gordon, K. D., Werner, M., Willner, S. P., Fazio, G. G., Frayer, D., Hines, D., Kelly, D., Latter, W., Misselt, K., Miyazaki, S., Morrison, J., Rieke, M. J., and Wilson, G. (2004). The Nature of Luminous X-Ray Sources with Mid-Infrared Counterparts. *ApJ Supplement*, **154**, 155–159.

Alonso-Herrero, A., Perez-Gonzalez, P. G., Alexander, D. M., Rieke, G. H., Rigopoulou, D., Le Floc'h, E., Barmby, P., Papovich, C., Rigby, J. R., Bauer, F. E., Brandt, W. N., Egami, E., Willner, S. P., Dole, H., and

Huang, J. . (2005). Infrared power-law galaxies in the Chandra Deep Field South: AGN and ULIRGs. *ArXiv Astrophysics e-prints*.

Alonso-Herrero, A., Pérez-González, P. G., Alexander, D. M., Rieke, G. H., Rigopoulou, D., Le Floc'h, E., Barmby, P., Papovich, C., Rigby, J. R., Bauer, F. E., Brandt, W. N., Egami, E., Willner, S. P., Dole, H., and Huang, J.-S. (2006). Infrared Power-Law Galaxies in the Chandra Deep Field-South: Active Galactic Nuclei and Ultraluminous Infrared Galaxies. *ApJ*, **640**, 167–184.

Antonucci, R. (1993). Unified models for active galactic nuclei and quasars. *A&A Annual Review*, **31**, 473–521.

Armus, L., Charmandaris, V., Spoon, H. W. W., Houck, J. R., Soifer, B. T., Brandl, B. R., Appleton, P. N., Teplitz, H. I., Higdon, S. J. U., Weedman, D. W., Devost, D., Morris, P. W., Uchida, K. I., van Cleve, J., Barry, D. J., Sloan, G. C., Grillmair, C. J., Burgdorf, M. J., Fajardo-Acosta, S. B., Ingalls, J. G., Higdon, J., Hao, L., Bernard-Salas, J., Herter, T., Troeltzsch, J., Unruh, B., and Winghart, M. (2004). Observations of Ultraluminous Infrared Galaxies with the Infrared Spectrograph (IRS) on the Spitzer Space Telescope: Early Results on Markarian 1014, Markarian 463, and UGC 5101. *ApJ Supplement*, **154**, 178–183.

Baldi, A., Molendi, S., Comastri, A., Fiore, F., Matt, G., and Vignali, C. (2002). The HELLAS2XMM Survey. I. The X-Ray Data and the logN-logS Relation. *ApJ*, **564**, 190–195.

Barger, A. J., Cowie, L. L., Mushotzky, R. F., Yang, Y., Wang, W.-H., Steffen, A. T., and Capak, P. (2005). The Cosmic Evolution of Hard X-Ray-selected Active Galactic Nuclei. *AJ*, **129**, 578–609.

Barmby, P., Alonso-Herrero, A., Donley, J. L., Egami, E., Fazio, G. G., Georgakakis, A., Huang, J.-S., Laird, E. S., Miyazaki, S., Nandra, K.,

Park, S. Q., Pérez-González, P. G., Rieke, G. H., Rigby, J. R., and Willner, S. P. (2006). Mid-Infrared Properties of X-Ray Sources in the Extended Groth Strip. *ApJ*, **642**, 126–139.

Berta, S., Rubele, S., Franceschini, A., Held, E. V., Rizzi, L., Lonsdale, C. J., Jarrett, T. H., Rodighiero, G., Oliver, S. J., Dias, J. E., Buttery, H. J., Fiore, F., La Franca, F., Puccetti, S., Fang, F., Shupe, D., Surace, J., and Gruppioni, C. (2006). The ESO-Spitzer Imaging extragalactic Survey (ESIS). I. WFIB, V, R deep observations of ELAIS-S1 and comparison to Spitzer and GALEX data. *A&A*, **451**, 881–900.

Bertin, E. (2003). SWarp Resample and Coadd Software. *A&A Supplement*, **1**.

Bertin, E. and Arnouts, S. (1996). SExtractor: Software for source extraction. *A&A Supplement*, **117**, 393–404.

Blanton, M. R., Eisenstein, D. J., Hogg, D. W., Schlegel, D. J. S., Brinkmann, J., Quintero, A. D., Berlind, A., and Wherry, N. (2003). The structure, star formation history, and environments of galaxies. In *Bulletin of the American Astronomical Society*, pages 589–+.

Blanton, M. R., Eisenstein, D., Hogg, D. W., Schlegel, D. J., and Brinkmann, J. (2005). Relationship between Environment and the Broadband Optical Properties of Galaxies in the Sloan Digital Sky Survey. *ApJ*, **629**, 143–157.

Brand, K., Dey, A., Weedman, D., Desai, V., Le Floc'h, E., Jannuzi, B. T., Soifer, B. T., Brown, M. J. I., Eisenhardt, P., Gorjian, V., Papovich, C., Smith, H. A., Willner, S. P., and Cool, R. J. (2006). The Active Galactic Nuclei Contribution to the Mid-Infrared Emission of Luminous Infrared Galaxies. *AJ*, **644**, 143–147.

Brandt, W. N., Hornschemeier, A. E., Alexander, D. M., Garmire, G. P., Schneider, D. P., Broos, P. S., Townsley, L. K., Bautz, M. W., Feigelson,

E. D., and Griffiths, R. E. (2001). The Chandra Deep Survey of the Hubble Deep Field North Area. IV. An Ultradeep Image of the HDF-N. *AJ*, **122**, 1–20.

Calzetti, D. (2001). The Dust Opacity of Star-forming Galaxies. *PASP*, **113**, 1449–1485.

Cavaliere, A. and Vittorini, V. (2000). The Fall of the Quasar Population. *ApJ*, **543**, 599–610.

Cesarsky, C. J. (1994). The Infrared Space Observatory Camera. *Experimental Astronomy*, **3**, 101–108.

Cesarsky, C. J., Abergel, A., Agnese, P., Altieri, B., Augueres, J. L., Aussel, H., Biviano, A., Blommaert, J., Bonnal, J. F., Bortoletto, F., Boulade, O., Boulanger, F., Cazes, S., Cesarsky, D. A., Chedin, A., Claret, A., Combes, M., Cretolle, J., Davies, J. K., Desert, F. X., Elbaz, D., Engelmann, J. J., Epstein, G., Franceschini, A., Gallais, P., Gastaud, R., Gorisse, M., Guest, S., Hawarden, T., Imbault, D., Kleczewski, M., Lacombe, F., Landriu, D., Lapegue, J., Lena, P., Longair, M. S., Mandolesi, R., Metcalfe, L., Mosquet, N., Nordh, L., Okumura, K., Ott, S., Perault, M., Perrier, F., Persi, P., Puget, P., Purkins, T., Rio, Y., Robert, T., Rouan, D., Roy, A., Saint-Pe, O., Sam Lone, J., Sargent, A., Sauvage, M., Sibille, F., Siebenmorgen, R., Sirou, F., Soufflot, A., Starck, J. L., Tiphene, D., Tran, D., Ventura, G., Vigroux, L., Vivares, F., and Wade, R. (1996). ISOCAM in flight. *A&A*, **315**, L32–L37.

Cocchia, F., Fiore, F., Vignali, C., Mignoli, M., Brusa, M., Comastri, A., Feruglio, C., Baldi, A., Carangelo, N., Ciliegi, P., D'Elia, V., La Franca, F., Maiolino, R., Matt, G., Molendi, S., Perola, G. C., and Puccetti, S. (2006). The HELLAS2XMM survey.VIII. Optical identifications of the extended sample. *ArXiv Astrophysics e-prints*.

Coil, A. L., Davis, M., Madgwick, D. S., Newman, J. A., Conselice, C. J., Cooper, M., Ellis, R. S., Faber, S. M., Finkbeiner, D. P., Guhathakurta, P., Kaiser, N., Koo, D. C., Phillips, A. C., Steidel, C. C., Weiner, B. J., Willmer, C. N. A., and Yan, R. (2004). The DEEP2 Galaxy Redshift Survey: Clustering of Galaxies in Early Data. *ApJ*, **609**, 525–538.

Comastri, A. and Fiore, F. (2004). The Density and Masses of Obscured Black Holes. *Astrophysics and Space Science Supplement*, **294**, 63–69.

Comastri, A., Setti, G., Zamorani, G., and Hasinger, G. (1995). The contribution of AGNs to the X-ray background. *A&A*, **296**, 1–+.

Comastri, A., Brusa, M., Ciliegi, P., Mignoli, M., Fiore, F., Maiolino, R., Severgnini, P., Baldi, A., Molendi, S., Vignali, C., La Franca, F., Matt, G., and Perola, G. C. (2002). On the nature of X-ray Bright Optically Normal galaxies. *ArXiv Astrophysics e-prints*.

Constantin, A. and Vogeley, M. S. (2006). The Clustering of Low-Luminosity Active Galactic Nuclei. *ApJ*, **650**, 727–748.

Cooper, M. C., Newman, J. A., Madgwick, D. S., Gerke, B. F., Yan, R., and Davis, M. (2005). Measuring Galaxy Environments with Deep Redshift Surveys. *ApJ*, **634**, 833–848.

Cooper, M. C., Newman, J. A., Croton, D. J., Weiner, B. J., Willmer, C. N. A., Gerke, B. F., Madgwick, D. S., Faber, S. M., Davis, M., Coil, A. L., Finkbeiner, D. P., Guhathakurta, P., and Koo, D. C. (2006). The DEEP2 Galaxy Redshift Survey: the relationship between galaxy properties and environment at z ˜ 1. *MNRAS*, **370**, 198–212.

Donley, J. L., Rieke, G. H., Rigby, J. R., and Pérez-González, P. G. (2005). Unveiling a Population of AGNs Not Detected in X-Rays. *ApJ*, **634**, 169–182.

Efstathiou, A. and Rowan-Robinson, M. (1995). Dusty discs in active galactic nuclei. *MNRAS*, **273**, 649–661.

Elvis, M. (2000). A Structure for Quasars. *ApJ*, **545**, 63–76.

Elvis, M., Wilkes, B. J., McDowell, J. C., Green, R. F., Bechtold, J., Willner, S. P., Oey, M. S., Polomski, E., and Cutri, R. (1994). Atlas of quasar energy distributions. *ApJ Supplement*, **95**, 1–68.

Fabian, A. C. (1999). The obscured growth of massive black holes. *MNRAS*, **308**, L39–L43.

Fazio, G. G., Ashby, M. L. N., Barmby, P., Hora, J. L., Huang, J.-S., Pahre, M. A., Wang, Z., Willner, S. P., Arendt, R. G., Moseley, S. H., Brodwin, M., Eisenhardt, P., Stern, D., Tollestrup, E. V., and Wright, E. L. (2004). Number Counts at 3 $\mu m < \lambda < 10 \mu m$ from the Spitzer Space Telescope. *ApJ Supplement*, **154**, 39–43.

Ferrarese, L. and Merritt, D. (2000). A Fundamental Relation between Supermassive Black Holes and Their Host Galaxies. *ApJ Letters*, **539**, L9–L12.

Fiore, F., Brusa, M., Cocchia, F., Baldi, A., Carangelo, N., Ciliegi, P., Comastri, A., La Franca, F., Maiolino, R., Matt, G., Molendi, S., Mignoli, M., Perola, G. C., Severgnini, P., and Vignali, C. (2003). The HELLAS2XMM survey. IV. Optical identifications and the evolution of the accretion luminosity in the Universe. *A&A*, **409**, 79–90.

Fiore, F., Santini, P., Puccetti, S., Brusa, M., Feruglio, C., Fontana, A., Giallongo, E., Comastri, A., Gruppioni, C., Pozzi, F., Zamorani, G., and Vignali, C. (2007). Unveiling obscured accretion in the Chandra Deep Field South. *ApJ, in press.*

Fontana, A. (2001). High z evolution of optically and IR-selected galaxies. *Astrophysics and Space Science Supplement*, **277**, 535–538.

Fontana, A., D'Odorico, S., Poli, F., Giallongo, E., Arnouts, S., Cristiani, S., Moorwood, A., and Saracco, P. (2000). Photometric Redshifts and Selection of High-Redshift Galaxies in the NTT and Hubble Deep Fields. *AJ*, **120**, 2206–2219.

Franceschini, A., Hasinger, G., Miyaji, T., and Malquori, D. (1999). On the relationship between galaxy formation and quasar evolution. *MNRAS*, **310**, L5–L9.

Franceschini, A., Manners, J., Polletta, M. d. C., Lonsdale, C., Gonzalez-Solares, E., Surace, J., Shupe, D., Fang, F., Xu, C. K., Farrah, D., Berta, S., Rodighiero, G., Perez-Fournon, I., Hatziminaoglou, E., Smith, H. E., Siana, B., Rowan-Robinson, M., Nandra, K., Babbedge, T., Vaccari, M., Oliver, S., Wilkes, B., Owen, F., Padgett, D., Frayer, D., Jarrett, T., Masci, F., Stacey, G., Almaini, O., McMahon, R., Johnson, O., Lawrence, A., and Willott, C. (2005). A Complete Multiwavelength Characterization of Faint Chandra X-Ray Sources Seen in the Spitzer Wide-Area Infrared Extragalactic (SWIRE) Survey. *AJ*, **129**, 2074–2101.

Gebhardt, K., Bender, R., Bower, G., Dressler, A., Faber, S. M., Filippenko, A. V., Green, R., Grillmair, C., Ho, L. C., Kormendy, J., Lauer, T. R., Magorrian, J., Pinkney, J., Richstone, D., and Tremaine, S. (2000). A Relationship between Nuclear Black Hole Mass and Galaxy Velocity Dispersion. *ApJ Letters*, **539**, L13–L16.

Georgakakis, A., Nandra, K., Laird, E. S., Gwyn, S., Steidel, C. C., Sarajedini, V. L., Barmby, P., Faber, S. M., Coil, A. L., Cooper, M. C., Davis, M., and Newman, J. A. (2006). A deep Chandra survey of the Groth Strip - II. Optical identification of the X-ray sources. *MNRAS*, **371**, 221–234.

Giacconi, R., Zirm, A., Wang, J., Rosati, P., Nonino, M., Tozzi, P., Gilli, R., Mainieri, V., Hasinger, G., Kewley, L., Bergeron, J., Borgani, S., Gilmozzi, R., Grogin, N., Koekemoer, A., Schreier, E., Zheng, W., and Norman, C.

(2002). Chandra Deep Field South: The 1 Ms Catalog. *ApJ Supplement*, **139**, 369–410.

Giavalisco, M., Ferguson, H. C., Koekemoer, A. M., Dickinson, M., Alexander, D. M., Bauer, F. E., Bergeron, J., Biagetti, C., Brandt, W. N., Casertano, S., Cesarsky, C., Chatzichristou, E., Conselice, C., Cristiani, S., Da Costa, L., Dahlen, T., de Mello, D., Eisenhardt, P., Erben, T., Fall, S. M., Fassnacht, C., Fosbury, R., Fruchter, A., Gardner, J. P., Grogin, N., Hook, R. N., Hornschemeier, A. E., Idzi, R., Jogee, S., Kretchmer, C., Laidler, V., Lee, K. S., Livio, M., Lucas, R., Madau, P., Mobasher, B., Moustakas, L. A., Nonino, M., Padovani, P., Papovich, C., Park, Y., Ravindranath, S., Renzini, A., Richardson, M., Riess, A., Rosati, P., Schirmer, M., Schreier, E., Somerville, R. S., Spinrad, H., Stern, D., Stiavelli, M., Strolger, L., Urry, C. M., Vandame, B., Williams, R., and Wolf, C. (2004). The Great Observatories Origins Deep Survey: Initial Results from Optical and Near-Infrared Imaging. *ApJ Letters*, **600**, L93–L98.

Gilli, R., Salvati, M., and Hasinger, G. (2001). Testing current synthesis models of the X-ray background. *A&A*, **366**, 407–417.

Gilli, R., Daddi, E., Zamorani, G., Tozzi, P., Borgani, S., Bergeron, J., Giacconi, R., Hasinger, G., Mainieri, V., Norman, C., Rosati, P., Szokoly, G., and Zheng, W. (2005). The spatial clustering of X-ray selected AGN and galaxies in the Chandra Deep Field South and North. *A&A*, **430**, 811–825.

Granato, G. L., De Zotti, G., Silva, L., Bressan, A., and Danese, L. (2004). A Physical Model for the Coevolution of QSOs and Their Spheroidal Hosts. *ApJ*, **600**, 580–594.

Grazian, A., Fontana, A., de Santis, C., Nonino, M., Salimbeni, S., Giallongo, E., Cristiani, S., Gallozzi, S., and Vanzella, E. (2006). The GOODS-

MUSIC sample: a multicolour catalog of near-IR selected galaxies in the GOODS-South field. *A&A*, **449**, 951–968.

Gruppioni, C., Ciliegi, P., Rowan-Robinson, M., Cram, L., Hopkins, A., Cesarsky, C., Danese, L., Franceschini, A., Genzel, R., Lawrence, A., Lemke, D., McMahon, R. G., Miley, G., Oliver, S., Puget, J.-L., and Rocca-Volmerange, B. (1999). A 1.4-GHz survey of the southern European Large-Area ISO Survey region. *MNRAS*, **305**, 297–308.

Haas, M., Siebenmorgen, R., Schulz, B., Krügel, E., and Chini, R. (2005). Spitzer IRS spectroscopy of 3CR radio galaxies and quasars: testing the unified schemes. *A&A*, **442**, L39–L43.

Hao, L., Weedman, D. W., Spoon, H. W. W., Marshall, J. A., Levenson, N. A., Elitzur, M., and Houck, J. R. (2007). The Distribution of Silicate Strength in Spitzer Spectra of AGNs and ULIRGs. *ApJ Letters*, **655**, L77–L80.

Hasinger, G. (2003). Formation and Evolution of Supermassive Black Holes in Galactic Centers: Observational Constraints. In S. H. Holt and C. S. Reynolds, editors, *AIP Conf. Proc. 666: The Emergence of Cosmic Structure*, pages 227–236.

Hatziminaoglou, E., Perez-Fournon, I., Polletta, M., Afonso-Luis, A., Hernan-Caballero, A., Montenegro-Montes, F. M., Lonsdale, C., Xu, C. K., Franceschini, A., Rowan-Robinson, M., Babbedge, T., Smith, H. E., Surace, J., Shupe, D., Fang, F., Farrah, D., Oliver, S., Gonzalez-Solares, E. A., and Serjeant, S. (2005). Sloan Digital Sky Survey Quasars in the Spitzer Wide-Area Infrared Extragalactic Survey (SWIRE) ELAIS N1 Field: Properties and Spectral Energy Distributions . *AJ*, **129**, 1198–1211.

Hogg, D. W., Blanton, M. R., Eisenstein, D. J., Gunn, J. E., Schlegel, D. J., Zehavi, I., Bahcall, N. A., Brinkmann, J., Csabai, I., Schneider, D. P.,

Weinberg, D. H., and York, D. G. (2003). The Overdensities of Galaxy Environments as a Function of Luminosity and Color. *ApJ Letters*, **585**, L5–L9.

Hogg, D. W., Blanton, M. R., Brinchmann, J., Eisenstein, D. J., Schlegel, D. J., Gunn, J. E., McKay, T. A., Rix, H.-W., Bahcall, N. A., Brinkmann, J., and Meiksin, A. (2004). The Dependence on Environment of the Color-Magnitude Relation of Galaxies. *ApJ Letters*, **601**, L29–L32.

Hopkins, P. F., Hernquist, L., Martini, P., Cox, T. J., Robertson, B., Di Matteo, T., and Springel, V. (2005). A Physical Model for the Origin of Quasar Lifetimes. *ApJ*, **625**, L71–L74.

Horne, K. (1986). An optimal extraction algorithm for CCD spectroscopy. *PASP*, **98**, 609–617.

Houck, J. R., Soifer, B. T., Weedman, D., Higdon, S. J. U., Higdon, J. L., Herter, T., Brown, M. J. I., Dey, A., Jannuzi, B. T., Le Floc'h, E., Rieke, M., Armus, L., Charmandaris, V., Brandl, B. R., and Teplitz, H. I. (2005). Spectroscopic Redshifts to z ¿ 2 for Optically Obscured Sources Discovered with the Spitzer Space Telescope. *ApJ Letters*, **622**, L105–L108.

Jarrett, T. H., Polletta, M., Fournon, I. P., Stacey, G., Xu, K., Siana, B., Farrah, D., Berta, S., Hatziminaoglou, E., Rodighiero, G., Surace, J., Domingue, D., Shupe, D., Fang, F., Lonsdale, C., Oliver, S., Rowan-Robinson, M., Smith, G., Babbedge, T., Gonzalez-Solares, E., Masci, F., Franceschini, A., and Padgett, D. (2006). Remarkable Disk and Off-Nuclear Starburst Activity in the Tadpole Galaxy as revealed by the Spitzer Space Telescope. *AJ*, **131**, 261–281.

Kauffmann, G., White, S. D. M., Heckman, T. M., Ménard, B., Brinchmann, J., Charlot, S., Tremonti, C., and Brinkmann, J. (2004). The environmental dependence of the relations between stellar mass, structure, star formation and nuclear activity in galaxies. *MNRAS*, **353**, 713–731.

La Franca, F., Matute, I., Gruppioni, C., Alexander, D., and ELAIS Consortium (2001). The evolution of type 1 AGN at 15 μm from ELAIS. *Memorie della Societa Astronomica Italiana*, **72**, 211–213.

La Franca, F., Gruppioni, C., Matute, I., Pozzi, F., Lari, C., Mignoli, M., Zamorani, G., Alexander, D. M., Cocchia, F., Danese, L., Franceschini, A., Héraudeau, P., Kotilainen, J. K., Linden-Vørnle, M. J. D., Oliver, S., Rowan-Robinson, M., Serjeant, S., Spinoglio, L., and Verma, A. (2004). The Nature of the Mid-Infrared Population from Optical Identifications of the ELAIS-S1 Sample. *AJ*, **127**, 3075–3088.

La Franca, F., Fiore, F., Comastri, A., Perola, G. C., Sacchi, N., Brusa, M., Cocchia, F., Feruglio, C., Matt, G., Vignali, C., Carangelo, N., Ciliegi, P., Lamastra, A., Maiolino, R., Mignoli, M., Molendi, S., and Puccetti, S. (2005). The HELLAS2XMM Survey. VII. The Hard X-Ray Luminosity Function of AGNs up to z = 4: More Absorbed AGNs at Low Luminosities and High Redshifts. *ApJ*, **635**, 864–879.

Lacy, M., Storrie-Lombardi, L. J., Sajina, A., Appleton, P. N., Armus, L., Chapman, S. C., Choi, P. I., Fadda, D., Fang, F., Frayer, D. T., Heinrichsen, I., Helou, G., Im, M., Marleau, F. R., Masci, F., Shupe, D. L., Soifer, B. T., Surace, J., Teplitz, H. I., Wilson, G., and Yan, L. (2004). Obscured and Unobscured Active Galactic Nuclei in the Spitzer Space Telescope First Look Survey. *ApJ Supplement*, **154**, 166–169.

Lacy, M., Petric, A. O., Sajina, A., Canalizo, G., Storrie-Lombardi, L. J., Armus, L., Fadda, D., and Marleau, F. R. (2007). Optical Spectroscopy and X-Ray Detections of a Sample of Quasars and Active Galactic Nuclei Selected in the Mid-Infrared from Two Spitzer Space Telescope Wide-Area Surveys. *AJ*, **133**, 186–205.

Lari, C., Pozzi, F., Gruppioni, C., Aussel, H., Ciliegi, P., Danese, L., Franceschini, A., Oliver, S., Rowan-Robinson, M., and Serjeant, S. (2001). A

new method for ISOCAM data reduction - I. Application to the European Large Area ISO Survey Southern Field: method and results. *MNRAS*, **325**, 1173–1189.

Lemke, D., Klaas, U., Abolins, J., Abraham, P., Acosta-Pulido, J., Bogun, S., Castaneda, H., Cornwall, L., Drury, L., Gabriel, C., Garzon, F., Gemuend, H. P., Groezinger, U., Gruen, E., Haas, M., Hajduk, C., Hall, G., Heinrichsen, I., Herbstmeier, U., Hirth, G., Joseph, R., Kinkel, U., Kirches, S., Koempe, C., Kraetschmer, W., Kreysa, E., Krueger, H., Kunkel, M., Laureijs, R., Luetzow-Wentzky, P., Mattila, K., Mueller, T., Pacher, T., Pelz, G., Popow, E., Rasmussen, I., Rodriguez Espinosa, J., Richards, P., Russell, S., Schnopper, H., Schubert, J., Schulz, B., Telesco, C., Tilgner, C., Tuffs, R., Voelk, H., Walker, H., Wells, M., and Wolf, J. (1996). ISOPHOT - capabilities and performance. *A&A*, **315**, L64–L70.

Lonsdale, C., Polletta, M. d. C., Surace, J., Shupe, D., Fang, F., Xu, C. K., Smith, H. E., Siana, B., Rowan-Robinson, M., Babbedge, T., Oliver, S., Pozzi, F., Davoodi, P., Owen, F., Padgett, D., Frayer, D., Jarrett, T., Masci, F., O'Linger, J., Conrow, T., Farrah, D., Morrison, G., Gautier, N., Franceschini, A., Berta, S., Perez-Fournon, I., Hatziminaoglou, E., Afonso-Luis, A., Dole, H., Stacey, G., Serjeant, S., Pierre, M., Griffin, M., and Puetter, R. (2004). First Insights into the Spitzer Wide-Area Infrared Extragalactic Legacy Survey (SWIRE) Galaxy Populations. *ApJ Supplement*, **154**, 54–59.

Lonsdale, C. J., Smith, H. E., Rowan-Robinson, M., Surace, J., Shupe, D., Xu, C., Oliver, S., Padgett, D., Fang, F., Conrow, T., Franceschini, A., Gautier, N., Griffin, M., Hacking, P., Masci, F., Morrison, G., O'Linger, J., Owen, F., Pérez-Fournon, I., Pierre, M., Puetter, R., Stacey, G., Castro, S., Polletta, M. d. C., Farrah, D., Jarrett, T., Frayer, D., Siana, B., Babbedge, T., Dye, S., Fox, M., Gonzalez-Solares, E., Salaman, M., Berta,

S., Condon, J. J., Dole, H., and Serjeant, S. (2003). SWIRE: The SIRTF Wide-Area Infrared Extragalactic Survey. *PASP*, **115**, 897–927.

Maiolino, R. and Rieke, G. H. (1995). Low-Luminosity and Obscured Seyfert Nuclei in Nearby Galaxies. *ApJ*, **454**, 95.

Maiolino, R., Salvati, M., Bassani, L., Dadina, M., della Ceca, R., Matt, G., Risaliti, G., and Zamorani, G. (1998). Heavy obscuration in X-ray weak AGNs. *A&A*, **338**, 781–794.

Malkan, M. A., Gorjian, V., and Tam, R. (1998). A Hubble Space Telescope Imaging Survey of Nearby Active Galactic Nuclei. *ApJ Supplement*, **117**, 25–+.

Manning, C. V. (2002). The Search for Intergalactic Hydrogen Clouds in Voids. *ApJ*, **574**, 599–622.

Martínez-Sansigre, A., Rawlings, S., Lacy, M., Fadda, D., Marleau, F. R., Simpson, C., Willott, C. J., and Jarvis, M. J. (2005). The obscuration by dust of most of the growth of supermassive black holes. *Nature*, **436**, 666–669.

Merritt, D. and Ferrarese, L. (2001). The $M_{bull} - \sigma$ Relation for Supermassive Black Holes. *ApJ*, **547**, 140–145.

Mignoli, M., Pozzetti, L., Comastri, A., Brusa, M., Ciliegi, P., Cocchia, F., Fiore, F., La Franca, F., Maiolino, R., Matt, G., Molendi, S., Perola, G. C., Puccetti, S., Severgnini, P., and Vignali, C. (2004). The HELLAS2XMM survey. V. Near-Infrared observations of X-ray sources with extreme X/O ratios. *A&A*, **418**, 827–840.

Miller, C. J., Nichol, R. C., Gómez, P. L., Hopkins, A. M., and Bernardi, M. (2003). The Environment of Active Galactic Nuclei in the Sloan Digital Sky Survey. *ApJ*, **597**, 142–156.

Moran, E. C., Filippenko, A. V., and Chornock, R. (2002). "Hidden" Seyfert 2 Galaxies and the X-Ray Background. *ApJ Letters*, **579**, L71–L74.

Oliver, S., Rowan-Robinson, M., Alexander, D. M., Almaini, O., Balcells, M., Baker, A. C., Barcons, X., Barden, M., Bellas-Velidis, I., Cabrera-Guerra, F., Carballo, R., Cesarsky, C. J., Ciliegi, P., Clements, D. L., Crockett, H., Danese, L., Dapergolas, A., Drolias, B., Eaton, N., Efstathiou, A., Egami, E., Elbaz, D., Fadda, D., Fox, M., Franceschini, A., Genzel, R., Goldschmidt, P., Graham, M., Gonzalez-Serrano, J. I., Gonzalez-Solares, E. A., Granato, G. L., Gruppioni, C., Herbstmeier, U., Héraudeau, P., Joshi, M., Kontizas, E., Kontizas, M., Kotilainen, J. K., Kunze, D., La Franca, F., Lari, C., Lawrence, A., Lemke, D., Linden-Vørnle, M. J. D., Mann, R. G., Márquez, I., Masegosa, J., Mattila, K., McMahon, R. G., Miley, G., Missoulis, V., Mobasher, B., Morel, T., Nørgaard-Nielsen, H., Omont, A., Papadopoulos, P., Perez-Fournon, I., Puget, J.-L., Rigopoulou, D., Rocca-Volmerange, B., Serjeant, S., Silva, L., Sumner, T., Surace, C., Vaisanen, P., van der Werf, P. P., Verma, A., Vigroux, L., Villar-Martin, M., and Willott, C. J. (2000). The European Large Area ISO Survey - I. Goals, definition and observations. *MNRAS*, **316**, 749–767.

Osterbrock, D. E. (1989). *Astrophysics of gaseous nebulae and active galactic nuclei*, volume 154. Mill Valley: Univ. Sci.

Osterbrock, D. E. (1993). The nature and structure of active galactic nuclei. *ApJ*, **404**, 551–562.

Papovich, C., Dole, H., Egami, E., Le Floc'h, E., Pérez-González, P. G., Alonso-Herrero, A., Bai, L., Beichman, C. A., Blaylock, M., Engelbracht, C. W., Gordon, K. D., Hines, D. C., Misselt, K. A., Morrison, J. E., Mould, J., Muzerolle, J., Neugebauer, G., Richards, P. L., Rieke, G. H., Rieke, M. J., Rigby, J. R., Su, K. Y. L., and Young, E. T. (2004). The 24 Micron Source Counts in Deep Spitzer Space Telescope Surveys. *ApJ Supplement*, **154**, 70–74.

Pearson, C. (2005). Spitzer and ISO galaxy counts in the mid-infrared. *MNRAS*, **358**, 1417–1422.

Perola, G. C., Puccetti, S., Fiore, F., Sacchi, N., Brusa, M., Cocchia, F., Baldi, A., Carangelo, N., Ciliegi, P., Comastri, A., La Franca, F., Maiolino, R., Matt, G., Mignoli, M., Molendi, S., and Vignali, C. (2004). The HELLAS2XMM survey. VI. X-ray absorption in the 1df AGN sample through a spectral analysis. *A&A*, **421**, 491–501.

Piccinotti, G., Mushotzky, R. F., Boldt, E. A., Holt, S. S., Marshall, F. E., Serlemitsos, P. J., and Shafer, R. A. (1982). A complete X-ray sample of the high-latitude /absolute value of B greater than 20 deg/ sky from HEAO 1 A-2 - Log N-log S and luminosity functions. *ApJ*, **253**, 485–503.

Polletta, M. d. C., Wilkes, B. J., Siana, B., Lonsdale, C. J., Kilgard, R., Smith, H. E., Kim, D.-W., Owen, F., Efstathiou, A., Jarrett, T., Stacey, G., Franceschini, A., Rowan-Robinson, M., Babbedge, T. S. R., Berta, S., Fang, F., Farrah, D., González-Solares, E., Morrison, G., Surace, J. A., and Shupe, D. L. (2006). Chandra and Spitzer Unveil Heavily Obscured Quasars in the Chandra/SWIRE Survey. *ApJ*, **642**, 673–693.

Polletta, M. d. C., Tajer, M., Maraschi, L., Trinchieri, G., Lonsdale, C. J., Chiappetti, L., Andreon, S., Pierre, M., Le Fevre, O., Zamorani, G., Maccagni, D., Garcet, O., Surdej, J., Franceschini, A., Alloin, D., Shupe, D. L., Surace, J. A., Fang, F., Rowan-Robinson, M., Smith, H. E., and Tresse, L. (2007). Spectral Energy Distributions of Hard X-Ray Selected Active Galactic Nuclei in the XMM-Newton Medium Deep Survey. *ApJ*, **663**, 81–102.

Puccetti, S., Fiore, F., D'Elia, V., Pillitteri, I., Feruglio, C., Grazian, A., Brusa, M., Ciliegi, P., Comastri, A., Gruppioni, C., Mignoli, M., Vignali, C., Zamorani, G., La Franca, F., Sacchi, N., Franceschini, A., Berta, S., Buttery, H., and Dias, J. E. (2006). The XMM-Newton survey of the

ELAIS-S1 field. I. Number counts, angular correlation function and X-ray spectral properties. *A&A*, **457**, 501–515.

Risaliti, G., Maiolino, R., and Salvati, M. (1999). The Distribution of Absorbing Column Densities among Seyfert 2 Galaxies. *ApJ*, **522**, 157–164.

Rowan-Robinson, M., Oliver, S., Efstathiou, A., Gruppioni, C., Serjeant, S., Cesarsky, C. J., Danese, L., Franceschini, A., Genzel, R., Lawrence, A., Lemke, D., McMahon, R., Miley, G., Perez-Fournon, I., Puget, J. L., Rocca-Volmerange, B., Ciliegi, P., Heraudeau, P., Surace, C., Lafranca, F., and ElAIS Consortium (1999). The European large area ISO survey: ELAIS. In P. Cox and M. Kessler, editors, *ESA SP-427: The Universe as Seen by ISO*, pages 1011–+.

Sajina, A., Yan, L., Armus, L., Choi, P., Fadda, D., Helou, G., and Spoon, H. (2007). Spitzer Mid-Infrared Spectroscopy of Infrared Luminous Galaxies at z˜2. II. Diagnostics. *ApJ*, **664**, 713–737.

Schneider, D. P., Hall, P. B., Richards, G. T., vanden Berk, D. E., Anderson, S. F., Fan, X., Jester, S., Stoughton, C., Strauss, M. A., Subbarao, M., Brandt, W. N., Gunn, J. E., Yanny, B., Bahcall, N. A., Barentine, J. C., Blanton, M. R., Boroski, W. N., Brewington, H. J., Brinkmann, J., Brunner, R., Csabai, I., Doi, M., Eisenstein, D. J., Frieman, J. A., Fukugita, M., Gray, J., Harvanek, M., Heckman, T. M., Ivezic, Z., Kent, S., Kleinman, S. J., Knapp, G. R., Kron, R. G., Krzesinski, J., Long, D. C., Loveday, J., Lupton, R. H., Margon, B., Munn, J. A., Neilsen, E. H., Newberg, H. J., Newman, P. R., Nichol, R. C., Nitta, A., Pier, J. R., Rockosi, C. M., Saxe, D. H., Schlegel, D. J., Snedden, S. A., Szalay, A. S., Thakar, A. R., Uomoto, A., Voges, W., and York, D. G. (2005). SDSS quasar catalog. III. (Schneider+, 2005). *VizieR Online Data Catalog*, **7243**, 0–+.

Schweitzer, M., Lutz, D., Sturm, E., Contursi, A., Tacconi, L. J., Lehnert, M. D., Dasyra, K. M., Genzel, R., Veilleux, S., Rupke, D., Kim, D.-C.,

Baker, A. J., Netzer, H., Sternberg, A., Mazzarella, J., and Lord, S. (2006). Spitzer Quasar and ULIRG Evolution Study (QUEST). I. The Origin of the Far-Infrared Continuum of QSOs. *ApJ*, **649**, 79–90.

Scodeggio, M., Franzetti, P., Garilli, B., Zanichelli, A., Paltani, S., Maccagni, D., Bottini, D., Le Brun, V., Contini, T., Scaramella, R., Adami, C., Bardelli, S., Zucca, E., Tresse, L., Ilbert, O., Foucaud, S., Iovino, A., Merighi, R., Zamorani, G., Gavignaud, I., Rizzo, D., McCracken, H. J., Le Fèvre, O., Picat, J. P., Vettolani, G., Arnaboldi, M., Arnouts, S., Bolzonella, M., Cappi, A., Charlot, S., Ciliegi, P., Guzzo, L., Marano, B., Marinoni, C., Mathez, G., Mazure, A., Meneux, B., Pellò, R., Pollo, A., Pozzetti, L., and Radovich, M. (2005). The VVDS Data-Reduction Pipeline: Introducing VIPGI, the VIMOS Interactive Pipeline and Graphical Interface. *PASP*, **117**, 1284–1295.

Silk, J. and Rees, M. J. (1998). Quasars and galaxy formation. *A&A*, **331**, L1–L4.

Silva, L., Maiolino, R., and Granato, G. L. (2004). Connecting the cosmic infrared background to the X-ray background. *MNRAS*, **355**, 973–985.

Spoon, H. W. W., Marshall, J. A., Houck, J. R., Elitzur, M., Hao, L., Armus, L., Brandl, B. R., and Charmandaris, V. (2007). Mid-Infrared Galaxy Classification Based on Silicate Obscuration and PAH Equivalent Width. *ApJ Letters*, **654**, L49–L52.

Springel, V., Di Matteo, T., and Hernquist, L. (2005). Modelling feedback from stars and black holes in galaxy mergers. *MNRAS*, **361**, 776–794.

Stern, D., Eisenhardt, P., Gorjian, V., Kochanek, C. S., Caldwell, N., Eisenstein, D., Brodwin, M., Brown, M. J. I., Cool, R., Dey, A., Green, P., Jannuzi, B. T., Murray, S. S., Pahre, M. A., and Willner, S. P. (2005). Mid-Infrared Selection of Active Galaxies. *ApJ*, **631**, 163–168.

Stern, D., Chary, R.-R., Eisenhardt, P. R. M., and Moustakas, L. A. (2006). Spitzer Observations of the Prototypical Extremely Red Objects HR 10 and LBDS 53W091: Separating Dusty Starbursts from Old Elliptical Galaxies. *AJ*, **132**, 1405–1414.

Surace, J. A. and SWIRE (2004). Deep and Wide Mid-Infrared Source Counts from the Spitzer Wide-Area Infrared Extragalactic (SWIRE) Survey. In *Bulletin of the American Astronomical Society*, pages 1450–+.

Treister, E., Urry, C. M., Chatzichristou, E., Bauer, F., Alexander, D. M., Koekemoer, A., Van Duyne, J., Brandt, W. N., Bergeron, J., Stern, D., Moustakas, L. A., Chary, R.-R., Conselice, C., Cristiani, S., and Grogin, N. (2004). Obscured Active Galactic Nuclei and the X-Ray, Optical, and Far-Infrared Number Counts of Active Galactic Nuclei in the GOODS Fields. *ApJ*, **616**, 123–135.

Treister, E., Urry, C. M., Van Duyne, J., Dickinson, M., Chary, R. R., Alexander, D. M., Bauer, F., Natarajan, P., Lira, P., and Grogin, N. A. (2006). Spitzer Number Counts of Active Galactic Nuclei in the GOODS Fields. *ApJ*, **640**, 603–611.

Tresse, L., Rola, C., Hammer, F., Stasinska, G., Le Fevre, O., Lilly, S. J., and Crampton, D. (1996). The Canada-France Redshift Survey - XII. Nature of emission-line field galaxy population up to z=0.3. *MNRAS*, **281**, 847–870.

Ueda, Y., Akiyama, M., Ohta, K., and Miyaji, T. (2003). Cosmological Evolution of the Hard X-Ray Active Galactic Nucleus Luminosity Function and the Origin of the Hard X-Ray Background. *ApJ*, **598**, 886–908.

Urrutia, T., Lacy, M., Gregg, M. D., and Becker, R. H. (2005). Chandra Observations of 12 Luminous Red Quasars. *ApJ*, **627**, 75–82.

Veilleux, S. and Osterbrock, D. E. (1987). Spectral classification of emission-line galaxies. *ApJ Supplement*, **63**, 295–310.

Weedman, D., Polletta, M., Lonsdale, C. J., Wilkes, B. J., Siana, B., Houck, J. R., Surace, J., Shupe, D., Farrah, D., and Smith, H. E. (2006). Active Galactic Nucleus and Starburst Classification from Spitzer Mid-Infrared Spectra for High-Redshift SWIRE Sources. *ApJ*, **653**, 101–111.

Weedman, D. W., Hao, L., Higdon, S. J. U., Devost, D., Wu, Y., Charmandaris, V., Brandl, B., Bass, E., and Houck, J. R. (2005). Mid-Infrared Spectra of Classical AGNs Observed with the Spitzer Space Telescope. *ApJ*, **633**, 706–716.

Yan, L., Sajina, A., Fadda, D., Choi, P., Armus, L., Helou, G., Teplitz, H., Frayer, D., and Surace, J. (2007). Spitzer Mid-Infrared Spectroscopy of Infrared Luminous Galaxies at z ˜ 2. I. The Spectra. *ApJ*, **658**, 778–793.

Zirbel, E. L. (1997). The Megaparsec Environments of Radio Galaxies. *ApJ*, **476**, 489.