



Università degli Studi di Padova

DIPARTIMENTO DI FISICA E ASTRONOMIA "GALILEO GALILEI"

Corso di Laurea Triennale in Astronomia

TESI DI LAUREA TRIENNALE

**La natura delle galassie di tipo Narrow Line Seyfert 1
attraverso una panoramica delle loro proprietà osservative**

Laureando:

Tobia Peruzzi

Relatore:

Piero Rafanelli

Correlatore:

Giovanni La Mura

Sommario

Il seguente elaborato di Tesi ha l'intento di illustrare nella maniera più dettagliata possibile, con gli attuali dati a disposizione, una problematica astrofisica di grande interesse, quella della comprensione delle galassie di tipo Narrow Line Seyfert 1. L'elaborato parte da una spiegazione generale dell'argomento, partendo dalla definizione di galassia attiva e delle varie tipologie di questi oggetti, di come vengono rilevati, classificati e, accanto a ciò, ci saranno dei cenni storici sulla loro scoperta. In seguito verrà data una definizione rigorosa delle galassie di Seyfert e della loro classificazione, per arrivare ad una descrizione della sottocategoria delle galassie Narrow Line Seyfert 1. A seguito di ciò verrà presentata una descrizione morfologica di queste galassie e un confronto con gli altri tipi di galassie di Seyfert. Il centro di questo elaborato sarà poi trattato in un capitolo che parlerà delle varie questioni aperte riguardo alle Narrow Line Seyfert 1 e ai vari modelli interpretativi a riguardo. Infine si discuteranno le conclusioni ottenute da una visione panoramica delle proprietà di questi oggetti, confrontandole con i più recenti modelli interpretativi, presenti nella letteratura corrente.

Indice

1	Nuclei Galattici Attivi	7
1.1	Cenni storici sulla scoperta degli AGN	8
1.2	Classificazione degli AGN	9
1.3	Osservazione degli AGN	12
1.3.1	Ottico - UV	13
1.3.2	Infrarosso - submillimetrico	13
1.3.3	Raggi X	14
1.3.4	Radio	14
1.4	Modello Unificato	16
2	Galassie Narrow Line Seyfert 1	21
2.1	Morfologia	24
2.2	Proprietà spettrali	28
2.3	Relazione massa del buco nero - bulge	29
2.4	Calcolo della massa del buco nero delle galassie NLS1	31
3	Scenari interpretativi riguardo le galassie Narrow Line Seyfert 1	33
3.1	Interpretazione geometrica: le NLS1 come casi particolari di altre Seyfert 1	33
3.2	Interpretazione evolutiva: le NLS1 come classe a sé stante	36
4	Conclusioni	39
5	Bibliografia	41

Capitolo 1

Nuclei Galattici Attivi

Il termine nucleo galattico attivo (o per brevità AGN) viene utilizzato per indicare i nuclei di galassie che presentano gas altamente ionizzato non correlato con l'attività stellare. Questi oggetti presentano quindi una forte emissione in un ampio intervallo di lunghezze d'onda anch'essa non correlata con l'attività stellare. Deve quindi esserci un altro meccanismo che determina la ionizzazione del gas e la conseguente forte emissione a quasi tutte le lunghezze d'onda. Tale meccanismo è dato dalla presenza di un buco nero supermassiccio (con $M_{\text{BH}} \approx 10^6 - 10^9 M_{\odot}$ in certi casi) che accresce materiale dal mezzo interstellare al centro di questi oggetti.

Questi oggetti differiscono quindi sia dalle galassie normali, che dalle galassie in cui è molto attiva la formazione stellare, in quanto gli spettri delle prime presentano svariate righe in assorbimento dovute alle stelle, mentre gli spettri delle seconde sono caratterizzati da righe di emissione generate da gas a più basso grado di ionizzazione.

Le galassie che contengono un nucleo galattico attivo vengono chiamate galassie attive, però sovente si usa semplicemente il termine AGN. La peculiarità degli AGN è che il loro spettro, se a bassa risoluzione, assomiglia allo spettro a righe di emissione di nebulose gassose, anche se gli spettri degli AGN mostrano un più ampio intervallo di grado di ionizzazione. Per questi motivi per lo studio degli AGN vengono applicati metodi di analisi tipici dello studio di nebulose quali resti di supernovae, nebulose planetarie, novae e regioni H II.

Ci sono due modi per definire se una galassia è attiva o meno:

- il primo si basa sul meccanismo fisico coinvolto: una galassia si definisce attiva se nel suo nucleo si trova un SMBH alimentato da un processo secolare di accrescimento o da un processo di accrescimento dominato da meccanismi di merging
- il secondo si basa sulle sue peculiarità spettroscopiche e fotometriche

Il secondo punto richiede, rispetto al primo, una trattazione più ampia, in quanto la classificazione basata su fenomeni osservativi non è così ben definita per via di limitazioni osservative e oscuramento delle sorgenti. Si può quindi dire che un oggetto è classificato come AGN se soddisfa almeno a una delle seguenti proprietà:

- contiene una regione nucleare molto compatta ($r_{\text{nucleo}} < 200 \text{ pc}$) la cui luminosità bolometrica ($L_{\text{bol}} \approx 10^8 - 10^{14} L_{\odot}$) è di gran lunga superiore a quella prevista per una galassia dello stesso tipo morfologico ($L_{\text{bol}} \approx 10^5 - 10^8 L_{\odot}$)
- lo spettro è caratterizzato da un continuo non termico
- lo spettro contiene righe di emissione i cui rapporti di intensità indicano la presenza di fotoionizzazione da parte di una sorgente non termica
- le righe di emissione permesse e/o il continuo sono variabili

1.1 Cenni storici sulla scoperta degli AGN

Il primo studio dello spettro di un AGN fu fatto da Edward A. Fath all'osservatorio Lick nel 1908. Fath fece questa scoperta studiando gli spettri dei nuclei delle "spiral nebulae" che ora noi sappiamo essere galassie a spirale. Fath notò in particolare sei righe di emissione nella galassia NGC 1068. Di queste sei righe una era la $H\beta$, mentre le altre al tempo erano identificate come righe caratteristiche delle nebulose gassose. Oggi sappiamo che queste righe sono: $[\text{O II}] \lambda 3727$, $[\text{Ne III}] \lambda 3869$, $[\text{O III}] \lambda \lambda 4363, 4959, 5007$. In seguito a ciò V.M. Slipher studiò, nel 1917, lo stesso oggetto studiato da Fath e nel 1926 Edwin Hubble notò il tipico spettro a righe di emissione delle nebulose planetarie in tre "spiral nebulae" (una era quella già studiata da Fath) che oggi sappiamo essere tre galassie attive: NGC 1068, NGC 4051, NGC 4151.

Il primo tentativo di classificazione venne però fatto solo nel 1943 da Carl K. Seyfert, che sostenne che una piccola frazione di galassie con nucleo stellare brillante, fra cui le tre studiate da Hubble, presentavano dei nuclei il cui spettro era caratterizzato da righe di emissione di ricombinazione con profilo largo ($\text{FWHM} \approx 1 - 5 \cdot 10^3 \text{ km s}^{-1}$) e strette ($\text{FWHM} \approx 5 \cdot 10^2 \text{ km s}^{-1}$) righe proibite di alto grado di ionizzazione (Osterbrock e Ferland 2006). Tali oggetti furono in seguito denominati "Galassie di Seyfert". Ora sappiamo che queste galassie sono la tipologia più diffusa di AGN nell'universo vicino ($z < 0.1$), ove gli AGN costituiscono una frazione ($\approx 35\%$) del totale di galassie (inattive più attive) (Osterbrock e Ferland 2006).

In seguito vennero fatte ulteriori scoperte al riguardo degne di nota: una poco dopo la seconda guerra mondiale in cui Walter Baade e Rudolph Minkowski (Baade e Minkowski 1954) identificarono nello spettro della galassia Cygnus A delle righe di emissione molto

simili a quelle delle galassie di Seyfert, l'altra avvenuta nel 1963 in cui Maarten Schmidt (Schmidt 1963) si accorse che la radiosorgente di morfologia stellare 3C 273, era in realtà una galassia ad alto redshift ($z = 0.158$). Schmidt si accorse di ciò grazie all'identificazione di righe di emissione tipiche degli AGN nello spettro di 3C 273. In seguito a questa scoperta, Jesse L. Greenstein (Greenstein 1963; Greenstein e Schmidt 1964) identificò le stesse righe nell'oggetto 3C 48 e ne misurò il redshift pari a $z = 0.367$. Questo era il più alto redshift mai osservato al tempo. Divenne quindi subito chiaro che questi oggetti dovevano essere estremamente luminosi per essere osservati a così grandi distanze. Tali oggetti presero il nome di quasars o "quasistellar radio sources" e costituiscono oggi la classe di oggetti più luminosi fra gli AGN ($L > 10^{12} L_{\odot}$).

1.2 Classificazione degli AGN

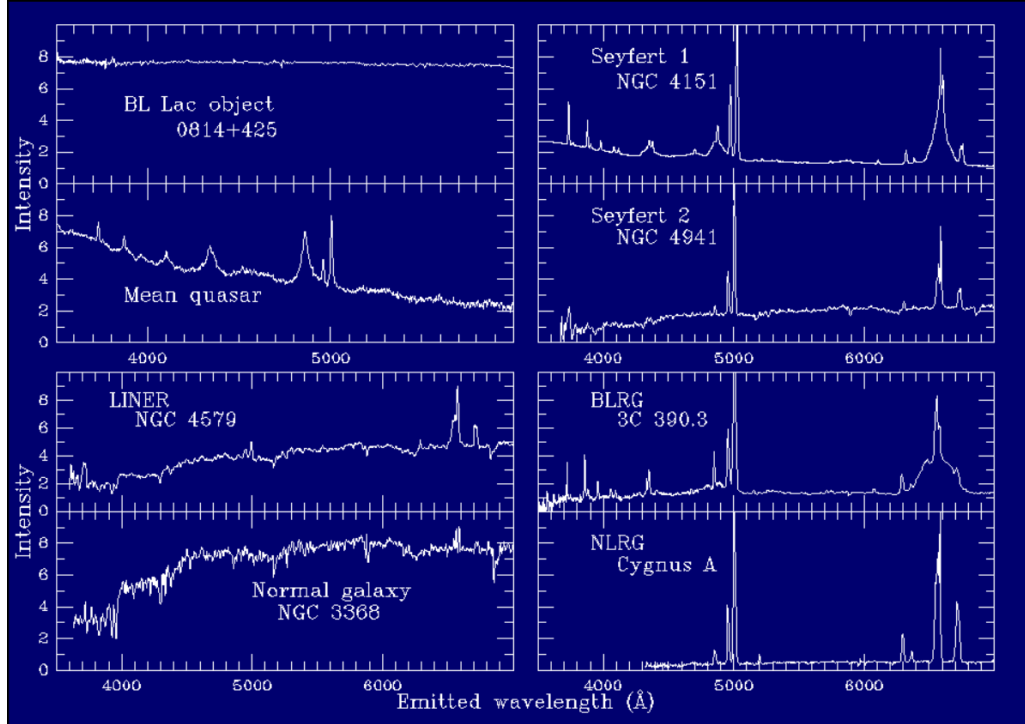


Figura 1.1: Spettri ottici di diverse tipologie di AGN, confrontati con lo spettro di una galassia quiescente.

La spettro emesso dagli AGN può essere fortemente variabile nel continuo e nelle righe nelle varie bande spettrali in cui è osservato. Una classificazione degli AGN è stata fatta (Kellermann et al. 1989) sulla base delle loro proprietà radio definendo il parametro R , cioè il rapporto fra il flusso a 5 GHz e il flusso in banda ottica a 4400 Å, cioè:

$$R = \frac{L_{\nu}(5\text{GHz})}{L_{\nu}(4400\text{\AA})} \quad (1.1)$$

Per convenzione è stato stabilito che un AGN è:

- AGN radio - brillanti se $R > 10$
- AGN radio - quieti se $R < 10$

le due sottoclassi possono essere ulteriormente suddivise sulla base delle loro caratteristiche spettroscopiche.

Gli AGN radio - quieti si distinguono in:

- Seyfert 1
- Seyfert 2
- Narrow Line Seyfert 1
- LINER (Low Ionization Nuclear Emitting Region)
- radio - quiet quasar (anche chiamati QSO¹)

Gli AGN radio - brillanti si distinguono in:

- blazars
- BLRG (Broad Line Radio Galaxies)
- NLRG (Narrow Line Radio Galaxies)
- radio - loud quasar (o semplicemente quasar)

le ultime tre tipologie possono essere raggruppate sotto l'unica tipologia di radio galassie. Le S1 presentano uno spettro simile ai QSO, però risultano molto meno luminose ($L_{S1} \approx 10^{10} - 10^{12} L_{\odot}$, $L_{QSO} \approx 10^{13} - 10^{14} L_{\odot}$), essendo visibili principalmente a bassi redshift. Le S1 e i QSO hanno inoltre le stesse caratteristiche spettrali, tanto che è difficile distinguere fra galassie di Seyfert molto luminose e QSO poco luminosi. Inoltre lo spettro delle S1 è dominato dal continuo non termico. Le righe permesse sono larghe, con FWHM dell'ordine di 10^4 km s^{-1} , mentre le righe proibite risultano più sottili, con FWHM minori di 10^3 km s^{-1} (Antonucci 1993). Le S2 presentano nuclei con continuo non termico debole o del tutto assente e righe di emissione di ricombinazione e proibite con uguale profilo e relativamente strette con FWHM di $400 - 1000 \text{ km s}^{-1}$. Le righe delle S2 inoltre non presentano variabilità, al contrario delle S1 (Lawrence, 1987).

Le NLS1 (che verranno discusse meglio in seguito) presentano caratteristiche intermedie fra le Seyfert 1 e 2, assieme a consistenti differenze rispetto ad entrambe le tipologie. Le NLS1 presentano un continuo più ripido rispetto alle S1, delle forti righe di emissione

¹Quasi Stellar Objects

del Fe II (tipiche delle S1, ma non delle S2), come si osserva per esempio nella galassia 1 Zw1 (Halpern e Oke 1986), però presentano una $\text{FWHM}(\text{H}\beta)$ considerevolmente minore rispetto alle S1, cioè $\text{FWHM}(\text{H}\beta) < 2000 \text{ km s}^{-1}$ (Osterbrock e Pogge 1985).

I LINER sono AGN le cui righe di emissione proibite più intense corrispondono a un grado di ionizzazione più basso di quello delle Seyfert e rispetto a queste presentano anche un profilo più stretto, con FWHM dell'ordine dei $200 - 400 \text{ km s}^{-1}$. Fa eccezione la riga $\text{H}\alpha$, che può avere in alcuni casi un profilo marcatamente più largo. I LINER sono inoltre gli AGN meno luminosi ($L_{\text{bol}} \approx 10^8 - 10^{10} L_{\odot}$).

I QSO (o quasar radio - quieti) hanno le stesse proprietà dei quasar radio - brillanti, ma non presentano il loro tipico spettro in radio. I QSO, inoltre, sono rilevabili anche a grandi distanze, data la loro alta luminosità ($L_{\text{bol}} \approx 10^{13} - 10^{14} L_{\odot}$). QSO e Seyfert 1 presentano delle similitudini, entrambi infatti presentano un continuo non stellare fra il lontano IR e la banda X, forti righe di emissione, bassa polarizzazione e una grande variabilità.

L'emissione radio delle radio galassie (cioè BLRG, NLRG e quasar) proviene molto probabilmente da lobi, cioè da radio - strutture diffuse le cui dimensioni possono anche eccedere quelle della galassia ospite (come si può vedere in Figura 1.2).

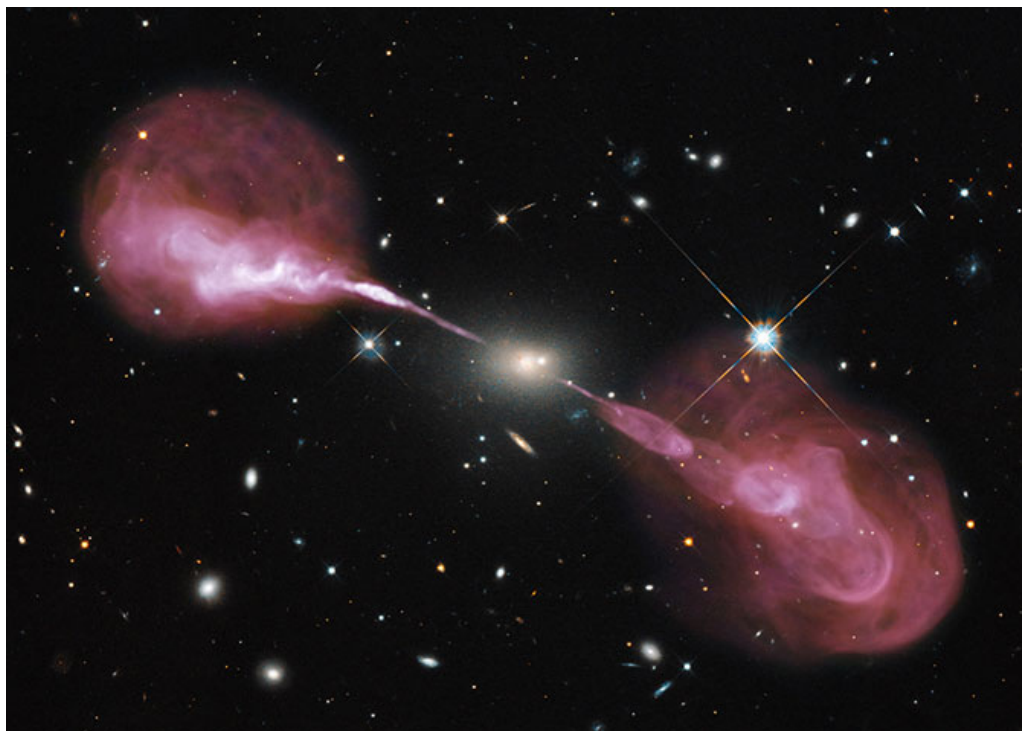


Figura 1.2: Immagine dei lobi della galassia ellittica Hercules A. È il risultato di una composizione fra un'immagine presa con la "Wide Field Camera 3" del telescopio spaziale Hubble e una presa con il radio telescopio Very Large Array. Fonte: NASA

Oltre ai lobi l'emissione può provenire da jet radio, cioè da strutture piuttosto sottili che come getti collimati partono dal nucleo della galassia e arrivano nella zona di emissione radio.

I blazar sono caratterizzati da emissione radio proveniente dalle regioni centrali del nucleo e la loro emissione è molto variabile ad ogni lunghezza d'onda.

In Figura 1.1 si possono vedere spettri diversi di AGN a confronto.

1.3 Osservazione degli AGN

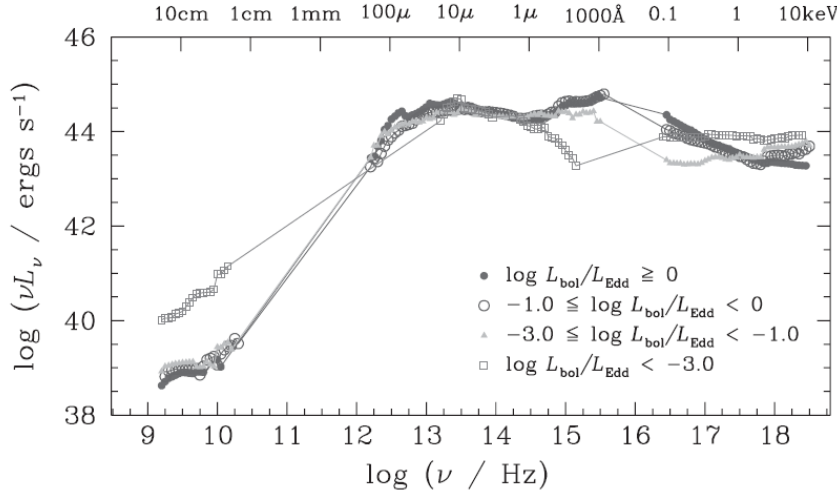


Figura 1.3: Esempi di vari SED su tutto lo spettro elettromagnetico. Fonte: The physics and evolution of active galactic nuclei, Netzer (2013).

Le caratteristiche spettrali degli AGN sono facili da distinguere in un grande intervallo di lunghezze d'onda, in quanto gli AGN sono caratterizzati da un'alta luminosità bolometrica ($L_{\text{bol}} \simeq 10^8 - 10^{14} L_{\odot}$) emessa in una regione estremamente compatta ($r_{\text{nucleo}} < 200 \text{ pc}$). La distribuzione spettrale di energia (SED) degli AGN può essere descritta, se si considera solo un intervallo limitato di energia, da una legge di potenza sia in lunghezza d'onda che in frequenza:

$$L_{\nu} \propto \nu^{-\alpha} \quad (1.2)$$

$$L_{\lambda} \propto \lambda^{-\beta} \quad (1.3)$$

dove α è l'indice spettrale in frequenza e β è l'indice spettrale in lunghezza d'onda; sussiste inoltre la relazione $\beta = 2 - \alpha$. In Figura 1.3 si può vedere un esempio di varie distribuzioni spettrali di energia a diverse frequenze.

Gli AGN sono quindi caratterizzati dall'emissione di radiazione in un ampio intervallo

di lunghezza d'onda, tanto da coprire l'intero spettro elettromagnetico. Questo porta quindi ad una differenza nelle caratteristiche osservative alle varie lunghezze d'onda.

1.3.1 Ottico - UV

Le principali caratteristiche osservate in questa banda sono:

- immagini ottiche di galassie di tipo Seyfert 1 mostrano una sorgente centrale puntiforme caratterizzata da un'emissione molto maggiore rispetto alle regioni circostanti
- le galassie di tipo Seyfert 2 non mostrano questo eccesso di luminosità
- la frequenza con cui compaiono le righe proibite e la loro ampiezza sono simili nelle Seyfert 1 e 2, questo suggerisce che le condizioni fisiche nella regione in cui esse sono prodotte è simile in entrambe le categorie
- le limitazioni osservative possono dare vita a problemi nella classificazione degli oggetti osservati

1.3.2 Infrarosso - submillimetrico

Inizialmente in questa banda le osservazioni venivano effettuate solo nel vicino infrarosso con fotometria a banda larga. Con il progredire della tecnologia è stato possibile utilizzare la spettroscopia nel vicino e medio IR (nel medio infrarosso grazie a ISO e Spitzer, che hanno fornito spettri di alta qualità (risoluzione del grating dell'ordine di $(\frac{\Delta\lambda}{\lambda})_{LWS} \approx 150 - 200$, risoluzione dell'interferometro di Fabry - Pérot dell'ordine di $(\frac{\Delta\lambda}{\lambda})_{LWS} \approx 6700 - 9700$) fino a redshift pari a 3), l'imaging da terra nella banda N ($10 \mu m$) e spettroscopia nel lontano IR grazie a IRAS e Spitzer. Dopo il lancio di Herschel è stato possibile condurre survey per fotometria ad alta risoluzione nell'intervallo di lunghezza d'onda fra 55 e $672 \mu m$, anche fino a $z \simeq 5$ e oltre. Per le osservazioni nel submillimetrico (da $0,4 \mu m$ a $1,2 \mu m$) sono stati utilizzati strumenti come SCUBA, IRAM e ALMA.

La maggior parte dell'emissione nel vicino e medio IR è data da emissione secondaria delle polveri. Con il termine "secondario" si intende emissione dovuta a grani di polvere scaldati da meccanismi primari di emissione di radiazione proveniente dagli AGN, cioè da radiazione prodotta dal processo di accrescimento. La temperatura dell'emissione secondaria si colloca fra 100 e 2000 K, mentre la dimensione delle regioni da cui proviene l'emissione è dell'ordine di 1 pc.

L'emissione nel lontano IR può essere di due tipi:

- termica: data da polvere fredda riscaldata da stelle giovani (quindi non dal meccanismo primario di produzione di energia)

- non termica: si nota in sorgenti radio molto luminose e appare come un'emissione non termica con origine nelle zone più centrali

Righe di emissione larghe e strette in tutto lo spettro IR sono viste in molti AGN.

1.3.3 Raggi X

Inizialmente l'osservazione in banda X degli AGN presentava forti limitazioni strumentali. In seguito però, con il lancio dei satelliti Chandra e XMM-Newton, è stato possibile identificare centinaia di righe di emissione e assorbimento (Netzer 2013) che precedentemente non potevano essere osservate, facendo diventare l'osservazione in X degli AGN una tecnica principale di indagine di questi oggetti. Attualmente gli strumenti più avanzati per lo studio degli AGN nella banda X sono il satellite Suzaku e il satellite Swift/BAT (che permette di osservare anche nella banda γ , UV e ottica).

Lo spettro in X delle Seyfert 1 è dominato da strette righe di emissione e da un continuo molto marcato. Inoltre si può notare la riga di emissione $K\alpha$ del ferro a 6.4 eV, che però risulta relativamente debole e molto larga, con una larghezza equivalente di 100 eV (Netzer 2013). Per quanto riguarda le Seyfert 2 si nota un continuo in X più attenuato rispetto alle Seyfert 1. Di conseguenza si notano molto più chiaramente le linee di emissione e la riga $K\alpha$ del ferro a 6.4 eV risulta estremamente sottile e appena risolta, ma con una larghezza equivalente pari a 1 - 2 keV (Netzer 2013).

Nel range di energia 0.2 - 20 keV una legge di potenza del tipo $L_\nu \propto \nu^{-\alpha_x}$ riesce a descrivere molto bene lo spettro intrinseco di AGN di entrambi i tipi, dove α_x rappresenta l'indice spettrale nella banda X. In molti casi risulta addirittura $\alpha_x \simeq 1$, però all'assottigliarsi delle righe α assume valori maggiori, come nel caso delle NLS1.

L'osservazione in X degli AGN risulta molto importante per quanto riguarda le galassie di tipo NLS1, in quanto l'osservazione in questa banda ha permesso di scoprire un gran numero di questi oggetti, mentre fino a quel momento si stimava che solo il 15% delle S1 e 1.5 fossero NLS1 (Osterbrock 1987), e anzi ha permesso di riclassificare molti oggetti come NLS1, trovando che il 25% delle S1 sono NLS1 (Stephens 1989) e in certi campioni di galassie anche fino al 40% (Edelson et al. 1999). Ciò si deve al fatto che le galassie di Seyfert mostrano una generale anticorrelazione tra indice spettrale e larghezza delle righe, come si può vedere dalla Figura 1.4, e ciò implica che le NLS1 mostrano un eccesso di radiazione X di bassa energia.

1.3.4 Radio

Le campagne osservative mirate ad individuare radio galassie hanno preceduto quelle nell'ottico mirate ad individuare AGN. Molte radio galassie studiate poi nell'ottico -

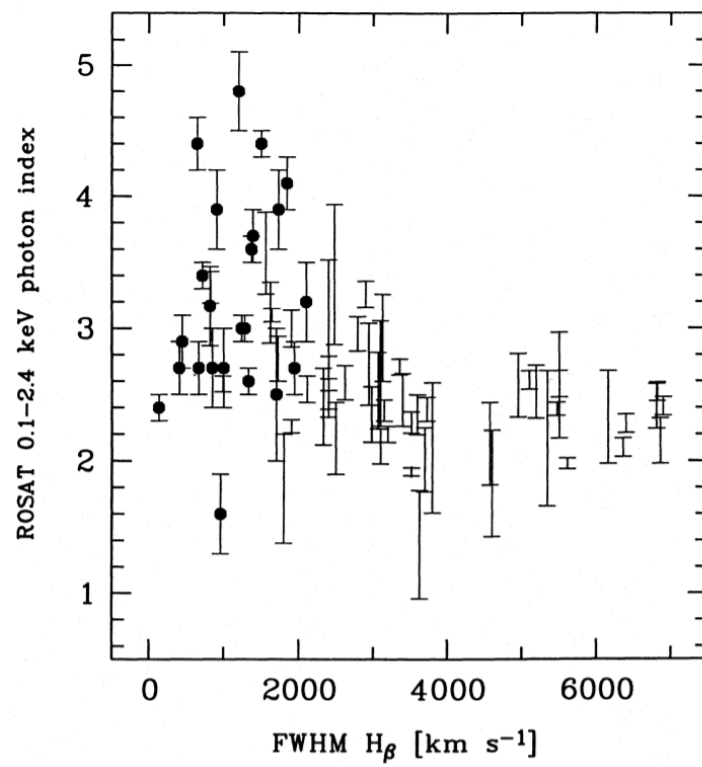


Figura 1.4: Andamento del continuo in banda X rispetto alla FWHM della riga $H\beta$ per galassie Seyfert 1 (barre verticali) e NLS1 (pallini neri). Da Boller, Brandt e Fink (1996)

UV hanno mostrato spettri simili, in queste ultime due bande, a vari tipi di AGN. La caratteristica principale rilevata in radio è stata la presenza di uno o due lobi con dimensioni anche superiori alla galassia ospite. Sono state inoltre rilevate forti emissioni radio dal nucleo e getti radio. Le osservazioni in radio permettono di classificare gli AGN come radio quiet o radio loud, come spiegato nella sezione 1.2.

C'è una connessione fra la struttura radio e lo spettro radio degli AGN:

- in presenza di uno spettro ripido: la morfologia è dominata dai lobi e il tasso di variabilità è basso
- in presenza di uno spettro piatto: i nuclei risultano più luminosi, i lobi risultano deboli o non rilevabili e si può osservare forte variabilità

La demarcazione fra spettro piatto e spettro ripido si basa sul valore dell'indice spettrale radio che compare nella relazione a legge di potenza che meglio rappresenta l'andamento spettrale di questi oggetti nel radio, cioè:

$$F_\nu \propto \nu^{-\alpha_r} \quad (1.4)$$

dove l'indice spettrale α_r definisce uno spettro piatto se $\alpha_r < 0,5$ e ripido se $\alpha_r > 0,5$.

1.4 Modello Unificato

Per spiegare le differenti proprietà osservative dei vari AGN è stato proposto il così detto modello unificato (Antonucci e Miller 1985, Antonucci 1993) secondo cui le differenze osservate nelle varie sottoclassi di AGN si possono attribuire alle diverse inclinazioni con cui si osservano questi oggetti, come si può vedere in Figura 1.5. Il modello unificato proposto da Antonucci è stato più volte rivisto e implementato (Beckmann e Shrader 2012, Netzer 2015). Il modello risulta in accordo con molte proprietà tipiche degli AGN, però in certi casi emergono ancora delle problematiche che non rientrano nel modello.

Il modello unificato prevede che la struttura di un AGN sia costituita dalle seguenti componenti:

- **SMBH:** provoca i principali processi di produzione di energia degli AGN. La massa di tale oggetto varia fra 10^6 e $10^9 M_\odot$
- **Disco di accrescimento:** è una regione discoide attorno al buco nero super-massiccio centrale composta da gas e polvere, il cui raggio risulta essere circa 10^{-3} pc. È grazie alla presenza di questo disco, assieme al buco nero super-massiccio centrale, che avviene l'emissione. Infatti il materiale convogliato nel disco di accrescimento perde momento angolare tramite moti turbolenti e attriti viscosi. L'ener-

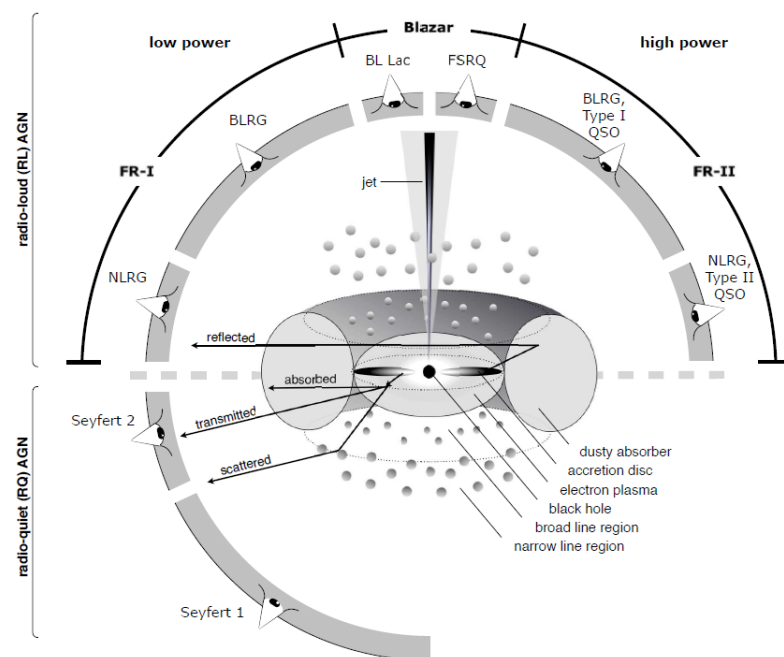


Figura 1.5: Rappresentazione del modello unificato secondo cui le differenze rilevate fra i vari AGN siano dovute solo a differenti inclinazioni degli oggetti rispetto a noi. Da Beckmann e Shrader 2013.

già persa in questi processi e la successiva caduta di materiale sul SMBH provoca emissione di energia alle lunghezze d'onda dei raggi X e dell'UV

- **Broad Line Region (BLR):** è una regione che circonda il buco nero supermassiccio centrale e il disco di accrescimento. La BLR è caratterizzata da un raggio fra 10^{-3} e 10^{-1} pc. Tale regione è composta da addensamenti di gas altamente ionizzato dalla radiazione proveniente dalle regioni sottostanti e presenta una densità di particelle di $10^9 - 10^{12} \text{ cm}^{-3}$. In questa regione si formano le righe spettrali permesse, in quanto la densità è troppo alta perché si possano formare le righe proibite. La dispersione di velocità mostrata dai profili delle righe è pari a diverse migliaia di km s^{-1}
- **Toro:** è una regione composta per lo più da polvere e gas molecolare, piuttosto simmetrica e presumibilmente con una forma toroidale. Circonda la BLR ed è caratterizzato da un raggio interno dell'ordine dei parsec e da un raggio esterno attorno ai 100 pc. Il gas molecolare e la polvere presenti nel toro sono otticamente spessi, di conseguenza se si osserva attraverso il toro questo può oscurare l'emissione delle regioni più centrali
- **Narrow Line Region (NLR):** al pari della BLR, è una regione caratterizzata da una diretta esposizione alla radiazione proveniente dal nucleo, ma con una densità di particelle inferiore ($10^2 - 10^4 \text{ cm}^{-3}$). In questa regione si formano le righe proibite comunemente osservate negli AGN e le righe permesse con FWHM minore di 10^3 km s^{-1} . La distanza dal centro di questa regione varia da circa 1pc fino a diverse centinaia di pc, arrivando in alcuni oggetti a raggiungere dimensioni dell'ordine di 1kpc. Le righe in questa regione si formano prevalentemente per ricombinazione del plasma ionizzato dalla radiazione del nucleo o per diseccitazione di stati metastabili di ioni pesanti, eccitati per collisione da elettroni termici in condizioni di bassa densità, inferiore alla densità critica dei livelli metastabili di provenienza.
- **Jet:** sono getti di particelle relativistiche emesse nelle regioni centrali, sotto l'effetto di intensi campi magnetici.

Il modello unificato prevede che le inclinazioni con cui si può osservare un AGN permettano di vedere solo alcune parti della struttura descritta sopra, dando vita alle differenze osservative che hanno portato a definire varie sotto classi di AGN. Per esempio se si osservano direttamente il disco di accrescimento e la BLR si osserveranno le caratteristiche tipiche delle galassie S1, mentre se la linea di vista interseca il toro, che come detto tende ad oscurare l'emissione proveniente dalle regioni più interne, si osserveranno le caratteristiche tipiche delle galassie S2. Quando invece l'osservazione avviene lungo

una direzione allineata con l'asse di propagazione del getto, gli effetti di collimazione e distorsione relativistica portano ad esaltare una serie di caratteristiche energetiche e di variabilità che corrispondono alle proprietà tipiche dei blazar.

Il modello unificato offre sicuramente un'ottima spiegazione di alcune caratteristiche degli AGN, come quelle descritte sopra e anche quelle relative alle righe e ai meccanismi di emissione, però in certi casi presenta delle difficoltà nell'interpretazione di alcune specifiche proprietà. Prima di tutto la struttura del toro in certi casi può mostrare anisotropie e c'è anche un certo grado di incertezza per quanto riguarda la sua estensione. Un'altra discrepanza sta nel fatto che il modello unificato sostiene che le galassie di S2 abbiano una BLR occultata dal toro a causa dell'inclinazione della linea di vista. Alcuni studi suggeriscono però che solo il 50% delle S2 abbiano una BLR oscurata (Tran 2001). Una ulteriore difficoltà è data dal fatto che alcune sottocategorie di AGN presentano caratteristiche fisiche diverse, oltre a differenze di luminosità e angolo di vista del toro (Netzer 2015). Questo potrebbe essere dato da differenze nel meccanismo di emissione dell'energia (cioè da differenze nel buco nero super-massiccio centrale), o dal fatto che certi oggetti mostrano una mancanza intrinseca di uno dei componenti tipici degli AGN rispetto a quanto previsto dal modello unificato (Netzer 2015).

Capitolo 2

Galassie Narrow Line Seyfert 1

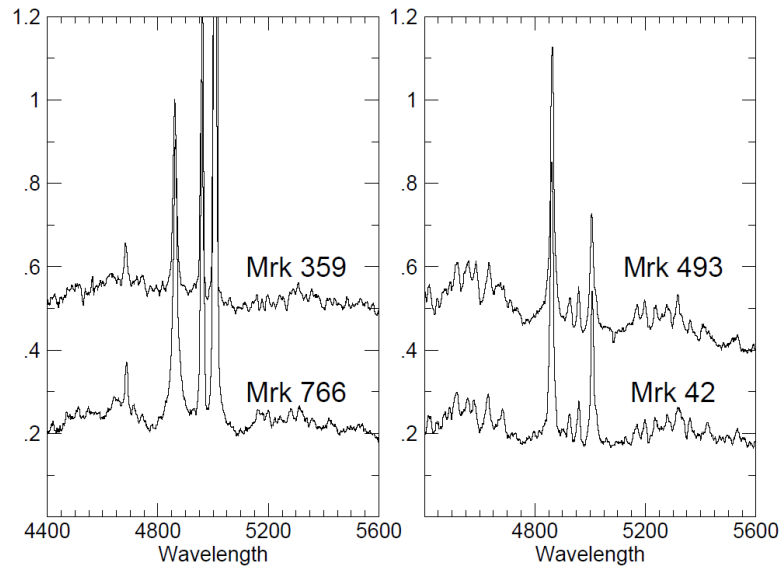


Figura 2.1: Spettro di quattro NLS1 nelle regioni $H\beta$, $[O III]$ e $Fe II$. Da Pogge (2011)

Le galassie di Seyfert, come accennato nel Capitolo 1, sono una particolare classe di AGN meno luminose dei QSO ($L_S \approx 10^{10} - 10^{12} L_\odot$, $L_{QSO} \approx 10^{13} - 10^{14} L_\odot$), ma con spettro simile caratterizzato dalla presenza di un continuo non termico e da righe di emissione con profilo complesso. Lo spettro delle galassie di tipo S1 presenta righe permesse e semi - proibite larghe ($FWHM \approx 5 \cdot 10^3 - 3 \cdot 10^4 \text{ km s}^{-1}$) e righe proibite strette ($FWHM \lesssim 5 \cdot 10^2 \text{ km s}^{-1}$) (Antonucci 1993). Lo spettro delle galassie di tipo S2 invece presenta righe di emissione permesse e proibite con uguale profilo stretto ($FWHM \approx 400 - 1000 \text{ km s}^{-1}$) (Netzer 2013). La frazione di continuo non termico rispetto a quello stellare è $f_c(S1) = 0.9$ per le S1 e $f_c(S2) = 0.3$ per le S2. Dopo aver richiamato le proprietà delle galassie di tipo S1 e S2, si possono definire le Narrow Line Seyfert 1

come galassie di Seyfert con le seguenti proprietà spettrali (Pogge 2011):

- righe di emissione permesse con $\text{FWHM} \leq 2000 \text{ km s}^{-1}$
- $[\text{O III}]/\text{H}\beta < 3$, però ci possono essere delle eccezioni se $[\text{Fe VII}]$ risulta particolarmente intensa e in presenza di $[\text{Fe X}]$
- $\text{FWHM}(\text{H}\beta) < 2000 \text{ km s}^{-1}$

I primi due criteri sono stati definiti da Osterbrock e Pogge (Osterbrock e Pogge 1985), mentre l'ultimo da Goodrich (Goodrich 1989). In certi casi viene indicata anche la presenza delle righe di emissione del Fe II come criterio di classificazione ed è stato anche proposto di usare il rapporto $\text{Fe II}/\text{H}\beta$, classificando come NLS1 gli oggetti per cui $\text{Fe II}/\text{H}\beta > 0.5$ (Veron et al. 2001). Questo deriva dal fatto che le galassie NLS1 presentano una anticorrelazione fra l'intensità dell'emissione Fe II rispetto a $[\text{O III}]$ e alla larghezza delle righe di Balmer. In generale però questo criterio non viene usato spesso, in quanto alcune galassie NLS1 presentano delle righe del Fe II molto deboli, che in caso di rapporto segnale rumore piuttosto basso possono non essere identificate. Un esempio di ciò si può vedere in figura 2.1 dove si vede che l'oggetto Mrk 359 mostra delle righe del Fe II piuttosto deboli. In figura 2.2 si possono invece notare le differenze che gli spettri delle NLS1 presentano rispetto sia alle S1, che alle S2, in quanto quest'ultime non mostrano tracce di Fe II.

Si ritiene che le NLS1, oltre ad essere oggetto di studio per quanto riguarda la loro natura, possano offrire delle informazioni molto utili sulla comprensione dei fenomeni fisici che avvengono al centro degli AGN. Per esempio l'alto tasso di accrescimento di materiale dal mezzo interstellare da parte dei buchi neri al centro delle galassie NLS1 (tasso molto vicino al limite di Eddington), rende questi oggetti dei perfetti banchi di prova per i modelli di accrescimento di materia da parte di buchi neri al centro di galassie.

Il meccanismo di emissione delle galassie NLS1 è anche molto peculiare, in quanto è prodotto da accrescimento sul buco nero supermassiccio al loro centro, come in tutti gli AGN, ma con un meccanismo di accrescimento secolare (Orban de Xivry et al. 2011) di materiale dal mezzo interstellare, anziché da un meccanismo dominato da processi di merging (Mathur et al. 2012). Inoltre tale processo di accrescimento risulta molto vicino o anche superiore al limite di Eddington (Pounds, Done e Osborne 1995). Il limite di Eddington è definito come il valore limite per la luminosità prodotta dall'accrescimento di materia su di un corpo sferico in equilibrio idrostatico. Superato tale limite la pressione della radiazione prodotta nel processo di accrescimento non è più bilanciata dall'attrazione gravitazionale del corpo centrale ed espelle il materiale circostante, arrestandone il flusso. Unendo ora il concetto appena esposto di limite di Eddington con il fatto che nelle galassie NLS1 (come in generale negli AGN) il processo di produzione

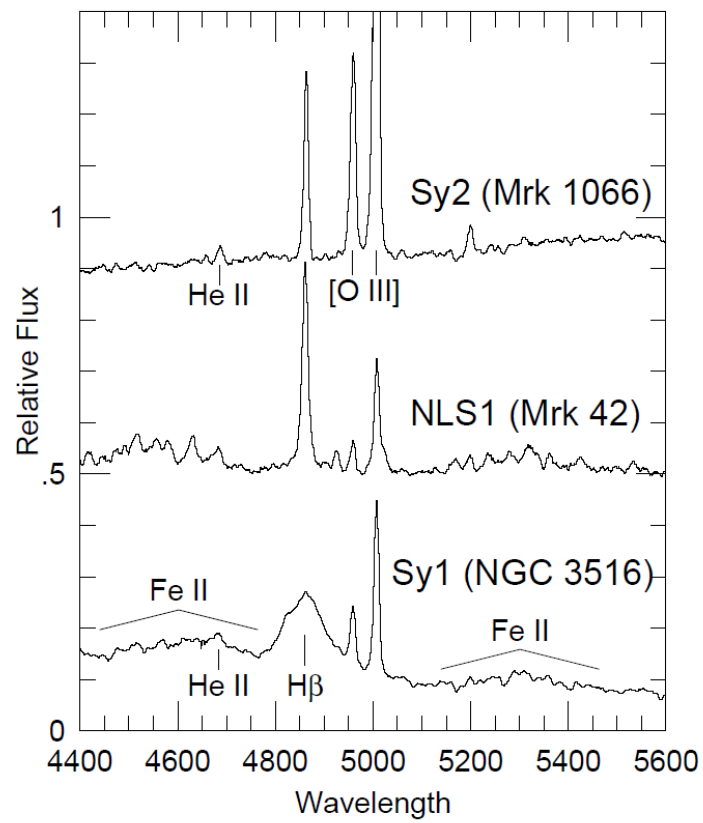


Figura 2.2: Spettri della regione di H β di tre oggetti: NLS1 Mrk 42 (al centro), Sy1 NGC 3516 (sotto) e Sy Mrk 1066 (sopra), presi con il Lick 3 m Image - Tube Spectrograph. Da Pogge (2011)

dell'energia è dato dalla caduta di materiale sul buco nero centrale, si vede che è possibile estendere il limite di Eddington ad un limite relativo al processo di accrescimento del buco nero centrale. Infatti l'emissione della radiazione negli AGN è prodotta da gas che, possedendo un certo momento angolare, non può precipitare direttamente nel buco nero, ma è costretto a dissiparlo attraverso attriti viscosi che portano alla formazione di un disco di accrescimento. Questo processo, cioè l'emissione di radiazione per via della perdita di momento angolare a causa dell'attrito viscoso, ha anche l'effetto di aumentare la temperatura del disco di accrescimento e, inoltre, rappresenta anche il meccanismo grazie al quale l'energia potenziale gravitazionale del gas viene trasformata in radiazione. Tenendo a mente queste considerazioni risulta ovvio che al concetto di limite di Eddington relativo alla luminosità si accompagna il concetto di limite di Eddington relativo al tasso di accrescimento del buco nero centrale. Il limite di Eddington per la luminosità dipende solo dalla massa dell'oggetto, come mostrato dalla relazione:

$$L_{\text{Edd}} = 3.22 \cdot 10^4 \cdot \frac{M}{M_{\odot}} \cdot L_{\odot} \quad (2.1)$$

Dato ora un certo tasso di accrescimento $\dot{M}$, se supponiamo che una frazione ϵ dell'energia potenziale gravitazionale di un certo oggetto possa essere trasformata in radiazione, allora la luminosità prodotta da questo processo avrà la seguente espressione:

$$L = \epsilon \cdot \dot{M} \cdot c^2 \quad (2.2)$$

Se ora poniamo questa luminosità L uguale alla luminosità limite di Eddington L_{Edd} , otteniamo il limite di Eddington per l'accrescimento:

$$\dot{M}_{\text{Edd}} = 3.22 \cdot 10^4 \cdot \frac{M}{c^2 \cdot \epsilon} \cdot \frac{L_{\odot}}{M_{\odot}} \quad (2.3)$$

Si vede che il limite al tasso di accrescimento dipende solo dalla massa del buco nero e dalla frazione di energia potenziale trasformata in radiazione. Si può inoltre notare che per un valore di luminosità tipico di una galassia NLS1, cioè $L \approx 10^{10} - 10^{12} L_{\odot}$, si trova un valore di massa di circa $M \approx 10^6 - 10^7 M_{\odot}$, che risulta piuttosto piccolo. Le galassie NLS1 sono infatti caratterizzate da buchi neri relativamente poco massicci, a differenze degli altri AGN in cui il meccanismo di emissione è rappresentato da un buco nero supermassiccio ($M_{\text{SMBH}} \approx 10^7 - 10^9 M_{\odot}$) alimentato da processi di merging.

2.1 Morfologia

Le galassie NLS1, così come le Seyfert in generale, sono solitamente galassie con morfologia simile alle spirali inattive. Ci sono però anche esempi di galassie peculiari, interagenti (De Robertis, Hayhoe, Yee 1998) o E/S0 (Ohta et al. 2007). Le NLS1 sono galassie che

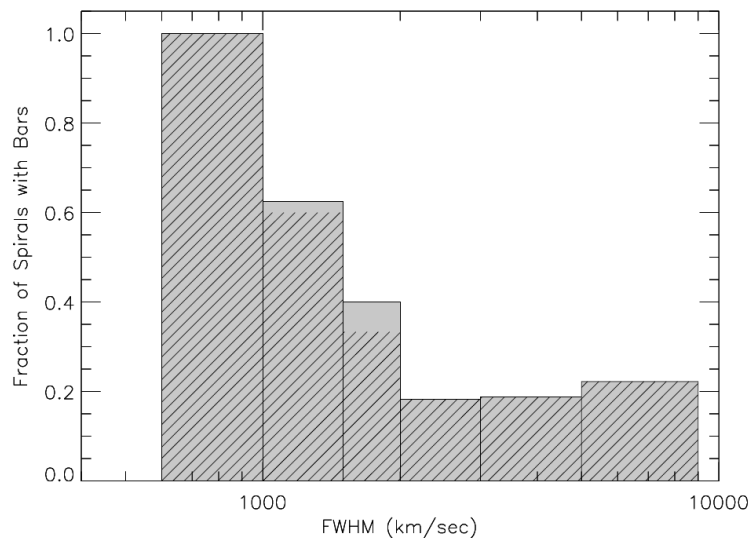


Figura 2.3: Istogramma che mostra la frazione di Seyfert spirali barrate in funzione della $\text{FWHM}(\text{H}\beta)$. Da Crenshaw, Kraemer e Gabel (2003)

vengono per lo più osservate nell'universo locale, con redshift minori di 0,1, e luminosità bolometriche $L_{\text{bol}} = 10^{10} - 10^{12} L_{\odot}$.

Una gran parte di galassie NLS1 mostrano la presenza (a differenza delle galassie S1) di una barra nella regione centrale con un'estensione di circa 1 kpc rispetto al nucleo, come viene mostrato da Crenshaw, Kraemer e Gabel (2003). Nel loro campione di galassie a spirale risulta che il 65% delle galassie NLS1 sono barrate, mentre solo il 25% delle galassie S1 risultano barrate. Si nota inoltre una correlazione fra l'aumento di galassie barrate al diminuire della FWHM della riga $\text{H}\beta$, come illustrato in figura 2.3. Queste caratteristiche morfologiche suggeriscono che ci sia una correlazione fra la presenza di una barra e il maggiore tasso di accrescimento che si osserva nelle NLS1 rispetto alle S1. Infatti la presenza della barra concorre, con la sua attrazione gravitazionale, a portare gas nelle regioni centrali della galassia, verso il buco nero centrale, aumentando il materiale a disposizione per l'accrescimento. Questo però è solo un indicatore del maggior tasso di accrescimento che si osserva nelle galassie NLS1 rispetto alle galassie S1 e non rappresenta il meccanismo che dà vita all'attività di accrescimento nel nucleo. Infatti si nota un'abbondanza statistica di spirali barrate molto simile fra le galassie NLS1 e le galassie inattive (Crenshaw, Kraemer e Gabel 2003), di conseguenza non può essere la sola presenza della barra a dare vita all'attività di accrescimento del buco nero centrale. Mathur (2000) e Mathur et al. (2012) suggeriscono che la presenza della barra indichi che le galassie NLS1 siano galassie giovani, in una fase iniziale di attività, e che quindi

possano evolvere. La sequenza evolutiva proposta è la seguente:

1. La galassia è inizialmente una spirale inattiva, con un buco nero di massa inferiore a $10^7 M_{\odot}$.
2. Per via di forze mareali o distribuzioni asimmetriche di massa nel disco galattico interno si forma la barra in un tempo pari a circa 10^8 anni. La barra comincia a trasportare grandi quantità di gas nel nucleo, per via della sua attrazione gravitazionale.
3. Inizia la fase NLS1 della galassia, in cui l'emissione di energia è appunto data da un buco nero, più piccolo rispetto a quello delle S1, con tasso di accrescimento vicino o superiore al limite di Eddington. La barra può arrivare anche a indurre fenomeni di formazione stellare. Una volta che il 5% del materiale della barra è stato ridistribuito, questa viene distrutta.
4. Il buco nero risulta ora supermassiccio, essendo arrivato anche ad un aumento di dieci volta la sua massa iniziale e da qui comincia la fase S1 per la galassia. Di conseguenza deve essere anche diminuito il tasso di accrescimento di materiale. Ci sono diverse spiegazioni a questo fenomeno: indebolimento della barra, diminuzione della riserva di gas nel disco interno, oppure fenomeni energetici tipici degli AGN che hanno come effetto quello di espellere materiale dalle regioni più interne (Crenshaw, Kraemer e George 2003). Questa ultima giustificazione è suffragata dall'osservazione che le galassie di Seyfert presentano un anello esterno (probabilmente costituito dal materiale espulso nelle fasi precedenti alla fase S1) con più frequenza rispetto alle galassie normali (Hunt e Malkan 1999).

L'ultima caratteristica morfologica delle galassie NLS1 degna di nota è la presenza, in alcuni di questi oggetti, di pseudonuclei. Mathur et al. (2012) hanno presentato le osservazioni di 10 NLS1 effettuate con l' "Advanced Camera for Surveys" dell' HST, mostrando che ognuno di questi oggetti si colloca ben al di sotto della relazione $M_{\text{BH}} - L_{\text{bulge}}$ e che cinque di questi si collocano al di sotto della relazione di Kormendy (come si può osservare in Figura 2.4) per i nuclei galattici (Kormendy 1977), il che indica che questi oggetti sono caratterizzati da pseudonuclei piuttosto che da nuclei normali. Da questo Mathur et al. (2012) concludono che i buchi neri al centro di queste NLS1 sono in piena fase di crescita regolata da un processo secolare, in quanto gli pseudonuclei si formano grazie a processi secolari, al contrario dei nuclei osservati nelle galassie dei primi tipi morfologici che si pensa si formino attraverso processi di merging.

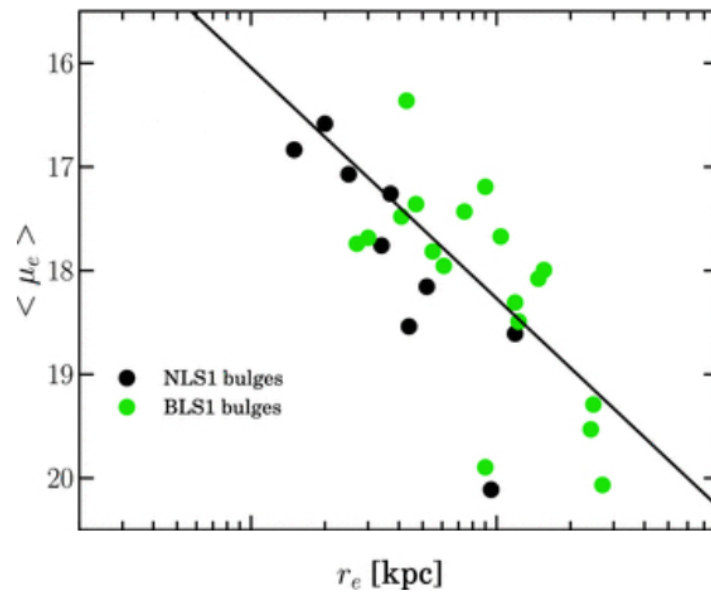


Figura 2.4: Relazione di Kormendy applicata agli sferoidi di galassie NLS1 e BLS1. In ordinata è riportata la brillantezza superficiale media entro il raggio effettivo r_e e in ascissa è riportato il raggio effettivo in kpc. Da Orban de Xivry et al. (2011)

2.2 Proprietà spettrali

Le NLS1 presentano svariate caratteristiche alle varie frequenze, fondamentali per la loro classificazione e l'analisi delle loro proprietà. In X si può notare un continuo ripido (con pendenza nell'intervallo $1.5 < \Gamma < 5.0$) (Boller, Brandt e Fink 1996) e rapidamente variabile (con tempi scala ~ 2.2 h) (Brinkmann 2004), soprattutto per energie inferiori a 1 keV (Boller, Brandt e Fink 1996; Brandt, Mathur e Elvis 1997). Inoltre i raggi X risultano particolarmente importanti per lo studio delle galassie NLS1, poiché sono uno degli strumenti più efficaci per l'identificazione di questi oggetti. Infatti prima dell'utilizzo dei raggi X come metodo di indagine, le galassie NLS1 erano reputate come molto rare rispetto agli altri AGN. In seguito all'utilizzo dell'indagine nella parte X dello spettro, svariati studi hanno classificato come NLS1 un gran numero di AGN precedentemente non riconosciuti come tali. Un esempio è dato da Puchnarewicz et al. (1992, 1995) che hanno classificato come NLS1 il 50% degli AGN di un campione da loro selezionato. Tale scoperta è coadiuvata dai lavori di Remillard et al. (1986) e di Gioia et al. (1984), che hanno trovato percentuali simili di NLS1 nei loro campioni. Le caratteristiche in X delle galassie NLS1 possono essere riassunte in due proprietà (Boller, Brandt e Fink 1996):

- pendenza dello spettro in X con indice spettrale nell'intervallo $1.5 < \Gamma < 5.0$ a differenza delle galassie S1 per le quali Γ è compreso fra $1.0 < \Gamma < 2.5$
- rapida variabilità in X anche di svariati ordini di grandezza

Le NLS1 nell'ottico - UV presentano le tipiche righe di emissione il cui profilo e rapporto di intensità permettono la loro classificazione. Inoltre risultano poco luminose nell'UV rispetto alle S1 ($L_{S1} \approx 10^{12}$, $L_{NLS1} \approx 10^{10}$) e in ottico mostrano variazioni simili alle S1, in certi casi anche inferiori.

Nell'infrarosso risultano molto luminose e presentano due importanti proprietà: nel NIR (lontano infrarosso) mostrano un valore del rapporto fra le righe coronali e le righe proibite a bassa ionizzazione maggiore rispetto alle S1, mentre nel MIR (medio infrarosso) la luminosità delle NLS1 indica un certo tasso di formazione stellare ($SFR \approx 10 - 500 M_{\odot} \text{ y}^{-1}$) (Caccianiga 2015), probabilmente anche correlato con la presenza della barra come discusso nella Sezione 2.2.

Per quanto riguarda la banda radio c'è da notare che generalmente le galassie NLS1 sono radio - quiete, anche se ne sono state osservate di radio - brillanti, anche se la loro frazione è inferiore rispetto alla frazione di S1 radio - brillanti. Inoltre la frazione di NLS1 radio - brillanti con alte luminosità in radio è ulteriormente inferiore. Una delle eccezioni a questa proprietà è rappresentata dalla galassia PKS 2004 - 447, che presenta tutte le caratteristiche per essere classificata come NLS1, però al contempo è un oggetto estremamente radio - brillante ($L_{\text{radio}} \approx 10^{10} - 7 \cdot 10^{10} L_{\odot}$) (Kreikenbohm 2016; Oshlack,

Webster e Whiting 2001). Oltre a questo è degno di nota anche il campione di 23 galassie NLS1 radio - luminose che presentano caratteristiche simili ai blazar (Yuan et al. 2008).

2.3 Relazione massa del buco nero - bulge

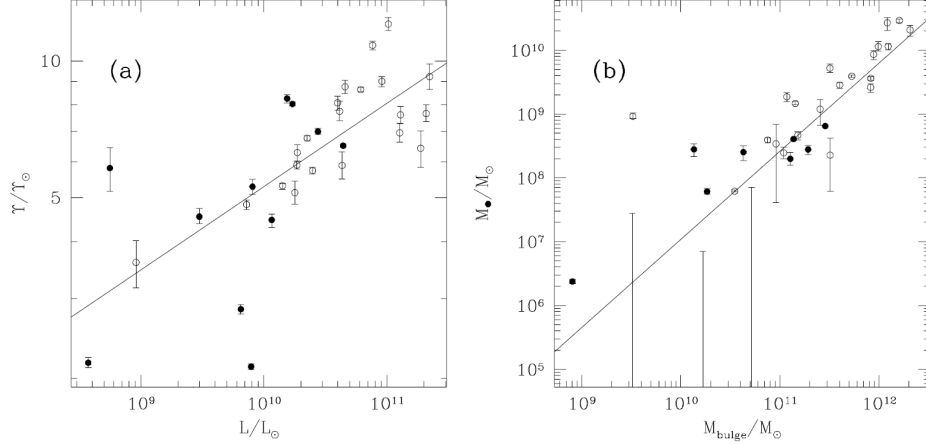


Figura 2.5: Esempio di relazione di Magorrian. Correlazione (a) fra il rapporto massa in stelle e luminosità in banda V e (b) fra la massa degli MDO (massive dark objects) e la massa dello sferoide. Da Magorrian et al. (1998)

Una relazione molto importante è stata trovata da Magorrian et al. (1998). La relazione di Magorrian è una correlazione fra la massa del buco nero nel centro di una galassia e la luminosità dello sferoide di quella galassia, cioè $M_{\text{BH}} - L_{\text{bulge}}$ (Magorrian et al. 1998). Generalmente si osserva che le galassie NLS1 stanno sistematicamente più in basso rispetto alla relazione di Magorrian (Mathur et al. 2001, 2012), come mostrato in figura 2.6. Tale risultato suggerisce che le galassie NLS1 presentino delle caratteristiche diverse, in particolare una massa del buco nero centrale inferiore e un tasso di accrescimento molto alto (vicino al limite di Eddington), rispetto alle galassie normali o alle S1, che invece sono ben descritte dalla relazione di Magorrian (Shen et al. 2008).

Un'altra relazione di particolare interesse è rappresentata da una correlazione empirica fra la dispersione di velocità delle stelle nel nucleo di una galassia e la massa del buco nero al centro di quella galassia. Viene anche indicata con $M_{\text{BH}} - \sigma$. La formulazione più recente di questa relazione è la seguente (McConnell et al. 2011):

$$\frac{M_{\text{BH}}}{10^8 M_\odot} \cong 1,9 \cdot \left(\frac{\sigma}{200 \text{ km s}^{-1}} \right)^{5,1} \quad (2.4)$$

Svariati autori hanno trovato che la relazione $M_{\text{BH}} - \sigma$ non risulta valida per le NLS1 (Mathur et al. 2001; Bian e Zhao 2004a, b; Grupe e Mathur 2004; Mathur e Grupe

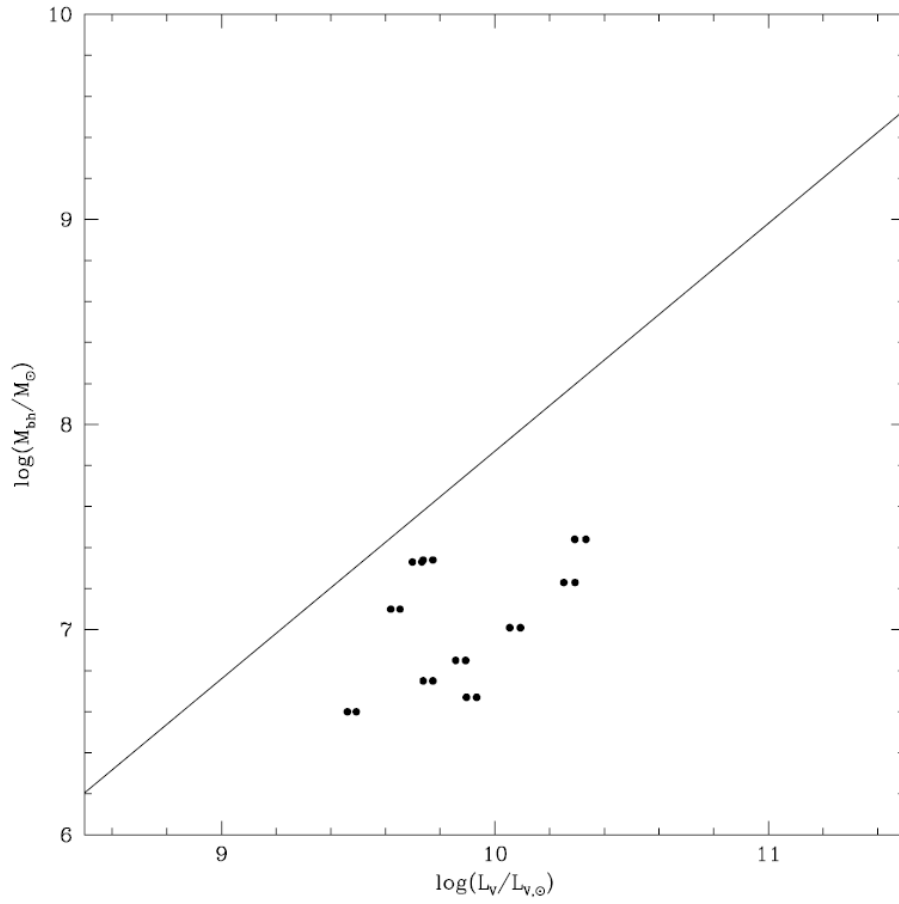


Figura 2.6: Relazione fra massa del buco nero e luminosità dello sferoide per un campione di NLS1. Per ogni galassia sono riportati due punti, che corrispondono a due diverse assunzioni riguardo alle correzioni all'indice di colore. La riga continua rappresenta la relazione massa del buco nero e luminosità dello sferoide trovata da Gültekin et al. (2009). Da Mathur et al. (2012)

2005), soprattutto se le galassie in esame contengono degli pseudonuclei (Mathur et al. 2012), cioè nuclei composti da materiale proveniente dal disco che si sono creati con processi secolari. Ciò è dovuto al fatto che la relazione $M_{\text{BH}} - \sigma$ per gli pseudonuclei è diversa rispetto a quella per i nuclei di galassie dei primi tipi morfologici (Hu 2008). Inoltre i buchi neri presenti in questi pseudonuclei non seguono la relazione $M_{\text{BH}} - \sigma$, applicabile alle normali galassie e agli altri AGN come le S1, e si collocano al di sotto di essa (Gadotti e Kauffmann 2009). Accanto a questo però c'è anche la constatazione che le NLS1 seguono la relazione $M_{\text{BH}} - \sigma$ (Wang e Lu 2001; Botte et al. 2005). Questa discrepanza è dovuta al fatto che alle misurazioni della dispersione di velocità σ effettuate tramite la larghezza della riga [O III], come nei casi precedentemente citati, si associa un grande grado di incertezza, che può quindi portare ai risultati contraddittori esposti sopra. Viene però mostrato da Komossa e Xou (2007), tramite l'utilizzo della riga [S II] per il calcolo di σ , che le galassie NLS1 seguono effettivamente la relazione $M_{\text{BH}} - \sigma$, così come le galassie S1 e le galassie normali. Un risultato simile viene ottenuto anche da Botte et al. (2004), in cui vengono stimate le dispersioni di velocità di otto galassie NLS1 tramite il tripletto di assorbimento Ca II, le quali confrontate con le dispersioni di velocità calcolate con la larghezza della riga [O III] suggeriscono che quest'ultima fornisce un valore troppo alto di σ , dimostrando che le galassie NLS1 seguono la relazione $M_{\text{BH}} - \sigma$.

2.4 Calcolo della massa del buco nero delle galassie NLS1

Il calcolo della massa del buco nero centrale delle galassie NLS1 è molto importante dal punto di vista della classificazione, in quanto uno dei punti a sostegno della tesi che le galassie NLS1 siano effettivamente una classe particolare di AGN è dato dal fatto che questi oggetti mostrano una massa del buco nero centrale inferiore rispetto alle galassie S1 o in generale ai BLAGN. Ci sono svariati modi per calcolare la massa delle galassie NLS1, così come per gli AGN in generale. Uno di questi metodi è quello del "reverberation mapping" (Wandel et al. 1999; Kaspi et al. 2000), che porta alla determinazione del raggio della BLR attorno ad un buco nero. In particolare supponendo che la relazione che lega la struttura della BLR e la massa del buco nero centrale abbia la forma (Peterson e Horne 2004):

$$M_{\text{BH}} = \frac{f R_{\text{BLR}} (\Delta V)^2}{G} \quad (2.5)$$

dove f rappresenta un fattore di scala che dipende dalla geometria e dalla cinematica della BLR, R_{BLR} è il raggio della BLR e $(\Delta V)^2$ è il quadrato della dispersione di velocità del gas nella BLR. L'equazione (2.5) permette quindi di risalire alla massa dalla conoscenza

del raggio della BLR e della velocità del gas al suo interno. La velocità del gas può essere calcolata tramite la FWHM delle righe di emissione provenienti dalla BLR (cioè dalle righe più larghe), se si suppone che la BLR sia gravitazionalmente legata al buco nero centrale, come è stato suggerito da Peterson e Wandel (1999, 2000). Il raggio della BLR può essere calcolato tramite la tecnica del reverberation mapping che si basa sul fatto che le variazioni di flusso nelle righe di emissione prodotte nella BLR siano proporzionali alle variazioni del flusso del continuo (Peterson e Horne 2004). Quello che viene identificato è un ritardo nelle variazioni delle righe di emissione rispetto alle variazioni del continuo dato dal tempo che impiega la luce a percorrere la BLR. Il maggior problema legato a questo metodo di determinazione della massa del buco nero è dato dal fatto che per ottenere una mappatura dettagliata della BLR di un oggetto per il calcolo del raggio, occorrono decenni di osservazioni. L'applicazione di questa tecnica ha in più occasioni mostrato che i buchi neri al centro di galassie NLS1 possiedono masse inferiori rispetto a quelle calcolate per le galassie S1 (Grupe e Mathur 2004; Collin e Kawaguchi 2004; Mathur e Grupe 2005; Komossa e Xu 2007).

Altri due metodi utili per il calcolo della massa del buco nero sono dati dall'utilizzo della relazione di Magorrian, se si conosce la luminosità del bulge, o dall'utilizzo della relazione $M_{\text{BH}} - \sigma$, se si conosce la dispersione di velocità delle stelle. La relazione di Magorrian fornisce, come detto nella sezione precedente, masse sistematicamente più basse rispetto alle galassie S1 (Botte et al. 2004), così come la relazione $M_{\text{BH}} - \sigma$ (Barth et al. 2005), con l'accorgimento che certi metodi per il calcolo della dispersione di velocità delle stelle possono portare ad una sovrastima di questa.

Un ultimo metodo per il calcolo delle masse è fornito dallo studio della variabilità in banda X. Tale metodo si basa sul fatto che la variabilità in banda X anti correla con la massa del buco nero centrale (Papadakis 2004). Il metodo si basa quindi sul calcolo della variabilità in banda X, che può essere effettuato tramite un'analisi della densità nello spettro di potenze (Nikolajuk et al. 2004). Anche questo metodo fornisce gli stessi risultati dei precedenti.

Capitolo 3

Scenari interpretativi riguardo le galassie Narrow Line Seyfert 1

Come si può evincere da quanto discusso fino ad ora, le NLS1 presentano un numero molto grande di caratteristiche e peculiarità che dipendono, in certi casi, dall'intervallo di frequenza considerato. Non è quindi scontato interpretare le caratteristiche delle galassie NLS1, né lo è definire un'interpretazione univoca di questi oggetti. Risulta quindi importante presentare gli scenari interpretativi proposti riguardo alle galassie NLS1. La natura delle galassie NLS1 può essere interpretata in vari modi: queste galassie possono essere delle galassie giovani, in fase di evoluzione, possono avere caratteristiche simili ai blazar e ai quasar, la loro morfologia può presentare peculiarità come la presenza di pseudonuclei e barre. Inoltre è anche di fondamentale importanza capire se queste galassie costituiscano una classe di oggetti a sé stante oppure debbano considerarsi come appartenenti ad una classe più ampia, in quanto osservati sistematicamente sotto certe condizioni. In questo capitolo verranno quindi presentate le varie interpretazioni riguardo alle caratteristiche che sono state rilevate dall'osservazione delle galassie NLS1.

3.1 Interpretazione geometrica: le NLS1 come casi particolari di altre Seyfert 1

Le proprietà osservative delle galassie NLS1 si possono interpretare invocando il modello riportato in Figura 1.5 che suggerisce che questi oggetti siano visti sotto particolari condizioni, nello specifico che siano oggetti sistematicamente visti a basse inclinazioni e che quindi le varie peculiarità che li contraddistinguono possano essere spiegate semplicemente in termini dell'angolo sotto cui le vediamo. Nel Capitolo 2 è stato più volte notato che le galassie NLS1 sono caratterizzate da buchi neri piuttosto piccoli, con masse

inferiori alle $10^8 M_{\odot}$. Come viene però proposto da Decarli et al. (2008), se si suppone che i nuclei attivi delle galassie NLS1 siano sistematicamente visti a basse inclinazioni, si trovano dei valori maggiori per le masse e valori minori per il tasso di accrescimento, entrambi simili ai valori trovati per le galassie S1. Decarli et al. (2008) fanno però un'altra assunzione riguardo alle NLS1 e cioè che la BLR di questi oggetti abbia una struttura discoidale, quindi non diffusa. Tale assunzione è suffragata da Wills e Browne (1986), che trovano un'anticorrelazione fra la larghezza della riga $H\beta$ e il valore del parametro R definito nell'equazione (1.1). Tale anticorrelazione è solitamente associata ad oggetti in cui la struttura della regione in cui avviene l'emissione è discoidale. Come è noto, l'allargamento delle righe spettrali prodotte in una certa regione è dovuto all'effetto Doppler causato dalla componente radiale della velocità del materiale in quella regione. Nel caso delle galassie NLS1 l'allargamento dei profili è dovuto alla componente radiale della velocità del gas nella BLR. Quindi, sotto le assunzioni precedenti, il moto del gas nella BLR avverrebbe prevalentemente su di un piano perpendicolare alla line di vista. Di conseguenza l'allargamento osservato delle righe rappresenterebbe solo una minima parte di quello effettivo e quindi le masse ne risulterebbero sottostimate, come si può vedere nella formula (2.5). Decarli et al. (2008) ricalcolano quindi le masse dei buchi neri di un campione selezionato di NLS1 e il rapporto $L_{\text{bol}}/L_{\text{Edd}}$, e trovano che le masse risultano dell'ordine o maggiori di $10^8 M_{\odot}$ e il rapporto $L_{\text{bol}}/L_{\text{Edd}}$ assieme al tasso di accrescimento del SMBH minori a quanto precedentemente calcolato. Questi due valori risultano molto simili a quanto calcolato per le galassie S1, suggerendo quindi che le NLS1 facciano parte di una classe più ampia di oggetti e che le loro proprietà osservative andrebbero interpretate in termini di un effetto di inclinazione.

I risultati trovati da Decarli et al. (2008) trovano riscontro anche in altri lavori. Uno di questi è quello di Calderone et al. (2013), in cui viene proposto un metodo alternativo per il calcolo delle masse dei buchi neri al centro delle galassie NLS1, che si basa sull'applicare ai dati relativi alle osservazioni in ottico e UV di questi oggetti il modello di Shakura e Sunyaev relativo allo spettro dei dischi di accrescimento (Shakura e Sunyaev, 1972). Il modello di Shakura e Sunyaev si basa sull'assunzione che instabilità indotte in plasmi da campi magnetici producano effetti di turbolenza e una viscosità anomala del plasma. Per descrivere questo effetto, il modello di Shakura e Sunyaev prevede un parametro da cui dipende la viscosità per tenere conto delle anomalie generate dal campo magnetico. Calderone et al. (2013) analizzano un campione di 23 galassie radio - brillanti NLS1 con questa tecnica e trovano che la massa del buco nero di ogni galassia del campione è dell'ordine o superiore a $10^8 M_{\odot}$, come trovato da Decarli et al. (2008). E' inoltre interessante notare che un risultato di questo tipo è in accordo con quanto trovato relativamente al valore delle masse dei buchi neri al centro dei blazar. A questo proposito

D'ammando et al. (2017), hanno analizzato la galassia NLS1 FBQS J1644+2619. Tale galassia presenta emissione γ e getti relativistici che suggeriscono la presenza di un buco nero con massa pari o superiore a $10^8 M_{\odot}$. Gli autori si propongono di spiegare se, in questo oggetto, i getti relativistici siano generati da un meccanismo differente rispetto al buco nero centrale o se la massa del buco nero dell'oggetto sia maggiore rispetto alle previsioni. L'oggetto viene studiato nel vicino IR e, tramite la luminosità infrarossa del nucleo, viene calcolata una massa dell'ordine di $10^8 M_{\odot}$, in accordo con l'ipotesi che i getti relativistici siano prodotti da buchi neri super massicci. Tale risultato indica quindi che la galassia in esame potrebbe non essere una NLS1 in quanto il buco nero al suo centro risulta più massiccio delle previsioni per questi oggetti.

L'assunzione che la BLR delle galassie NLS1 presenti una struttura discoidale e che questi oggetti siano visti sistematicamente sotto certe condizioni rappresenta quindi un modello interpretativo della proprietà osservata relativa alla riga $H\beta$ di essere più sottile rispetto a quanto osservato per le galassie S1, e ha portato ad un ricalcolo delle masse e del tasso di accrescimento delle NLS1. Un ricalcolo delle masse va ad influire anche sulle relazioni di Magorrian e $M_{BH} - \sigma$ applicate alle NLS1. Infatti con masse più elevate le galassie NLS1 seguono sia la relazione di Magorrian, che la relazione $M_{BH} - \sigma$ (Decarli et al. 2008; Wang e Lu 2001; Botte et al. 2005).

E' stato inoltre trovato che le proprietà in banda X delle galassie NLS1 possono essere spiegate in termini dell'orientazione con cui sono osservate, sulla base del fatto che la legge di potenza dell'emissione non può essere intrinsecamente isotropa. A sostegno di ciò c'è lo studio di Ghisellini et al. (2004) secondo cui l'estrema variabilità in X può essere spiegata se si assume che la radiazione X è prodotta tramite un fenomeno di dissipazione di energia lungo l'asse di rotazione del buco nero centrale. Accanto a questo c'è anche da prendere in considerazione il lavoro di Doi et al. (2007) secondo cui il 50% delle galassie NLS1 radio - brillanti sono associate con getti ad alta temperatura. Tale risultato sostiene l'interpretazione secondo cui le galassie NLS1 siano viste perpendicolarmente ad un piano preferenziale, perché si pensa, come nel caso dei blazar, che l'emissione γ ad alta energia provenga da un getto orientato perpendicolarmente ad una BLR discoidale (Tavecchio e Ghisellini 2012). Infatti nel caso di una BLR piatta, discoidale, se l'angolo di osservazione è perpendicolare alla BLR, allora il gas in essa contenuto tenderà ad assorbire meno la radiazione ad alta energia.

C'è infine da menzionare che l'interpretazione relativa al fatto che la ridotta larghezza delle righe di emissione delle galassie NLS1 sia dovuta ad effetti di inclinazione è suffragata anche dai dati ottenuti da Rakshit et al. (2017). Nel loro lavoro trovano che l'inclinazione delle galassie S1 appartenenti al loro campione è in media maggiore rispetto a quella delle galassie NLS1, a sostegno di quanto proposto in questo modello.

3.2 Interpretazione evolutiva: le NLS1 come classe a sé stante

Una diversa interpretazione delle proprietà osservative delle galassie NLS1 può essere data dal fatto che queste galassie costituiscano una classe particolare di oggetti caratterizzata da delle proprietà peculiari. Una delle caratteristiche più distintive che suggeriscono che le NLS1 costituiscano una classe a sé stante di galassie è data dal fatto che le masse del buco nero centrale calcolate per questi oggetti risultano inferiori rispetto a quelle calcolate per le galassie S1. Come esposto in sezione 2.4 ci sono svariati metodi per calcolare le masse dei buchi neri di questi oggetti. Svariate applicazioni di questi metodi, in particolare del reverberation mapping, hanno mostrato che le masse dei buchi neri al centro delle galassie NLS1 sono sistematicamente inferiori rispetto alle galassie S1. È però stato notato che il calcolo della velocità o della dispersione di velocità del gas nella BLR tramite la riga $H\beta$ può non essere attendibile, in quanto la FWHM della riga $H\beta$ dipende dall'inclinazione con cui si osserva la BLR. Sono stati quindi effettuate delle correzioni relative alla FWHM che hanno portato a trovare delle masse superiori dei buchi neri al centro di galassie NLS1 (Collin et al. 2006), ma in ogni caso inferiori rispetto a quelle relative alle galassie S1.

Strettamente legato alle masse dei buchi neri centrali è il discorso relativo al loro tasso di accrescimento. Viene infatti calcolato che il rapporto $L_{\text{bol}}/L_{\text{Edd}}$ è estremamente alto per questi oggetti e che quindi il tasso di accrescimento del buco nero centrale è molto elevato rispetto a quello relativo alle galassie S1, vicino al limite di Eddington (Boroson e Green 1992) o anche superiore (Collin e Kawaguchi 2004). Tali risultati sono suffragati dai lavori di Pounds et al. (1995), Wang e Netzer (2003), nei quali viene trovato un tasso di accrescimento vicino o superiore al limite di Eddington grazie all'utilizzo della luminosità nella banda X.

Un altro fattore che suggerisce che le galassie NLS1 costituiscano una classe a parte di oggetti è dato dal fatto che questi oggetti mostrano la presenza di una barra con maggior frequenza rispetto alle S1, come mostrato in sezione 2.1, definendo quindi anche una differenza morfologica fra le NLS1 e le S1. Inoltre, Mathur (2000) e Mathur et al. (2012) suggeriscono che la presenza della barra indichi che le galassie NLS1 siano galassie giovani in fase di evoluzione. Quest'ultima proprietà riuscirebbe a spiegare sia la caratteristica morfologica relativa alla presenza della barra, sia la massa del buco nero ridotta e il relativo alto tasso di accrescimento. Quindi l'interpretazione che siano galassie giovani suggerisce che le NLS1 siano una classe a parte di oggetti in fase di evoluzione, mentre le S1 siano l'ultimo stadio evolutivo delle NLS1, come già accennato nella sezione 2.1.

Ci sono inoltre studi che suggeriscono che le galassie NLS1 non siano osservate siste-

maticamente a basse inclinazioni, in quanto Smith et al. (2005) hanno trovato che le proprietà relative alla polarizzazione delle galassie NLS1 e delle galassie S1 sono simili, contrariamente a quanto ci aspetteremmo di vedere, se le NLS1 fossero sistematicamente osservate sotto un particolare angolo di inclinazione. Sono state condotte osservazioni in radio di galassie NLS1 trovando che queste non presentano un'orientazione preferenziale rispetto agli altri AGN (Berton et al. 2015, 2017). Viene infatti trovato che certe galassie NLS1 con getti relativistici potrebbero essere osservate anche a grandi inclinazioni (Berton et al. 2015, 2017), suggerendo quindi che questi oggetti non siano sistematicamente visti a basse inclinazioni.

Infine c'è da menzionare che le galassie NLS1 non seguono le relazioni di Magorrian e $M_{\text{BH}} - \sigma$ per via del fatto che le masse dei buchi neri calcolate per questi oggetti, come già trattato in precedenza, sono inferiori rispetto a quelle calcolate per le galassie S1 (Mathur et al. 2001, Mathur et al. 2012). Le galassie NLS1 stanno infatti sistematicamente al di sotto rispetto ad entrambe le relazioni, favorendo un'interpretazione evolutiva piuttosto che geometrica per queste galassie. C'è però da notare che le stime di massa dello sferoide non si applicano agli pseudonuclei e che le dispersioni di velocità stellare ottenute da righe di emissione del gas sovrastimano tali valori (Decarli et al. 2008). Tenendo conto di questi effetti e ricalcolando le masse si nota che le galassie NLS1 risultano in linea con le relazioni di scala come la relazione di Magorrian e la relazione $M_{\text{BH}} - \sigma$ (Decarli et al. 2008; Wang e Lu 2001; Botte et al. 2005). In questo caso però le masse dei buchi neri corrette per un effetto geometrico risultano troppo grandi per i corrispondenti valori di massa dello sferoide e di dispersione di velocità stellare. Viene quindi proposto (Mathur et al. 2012) che le galassie NLS1 operino un accrescimento secolare (giustificato anche dalla maggior presenza di pseudonuclei) piuttosto che di merging. In questo scenario è plausibile che le NLS1 si trovino in una fase evolutiva in cui il rapporto fra il nucleo attivo e la galassia ospite non ha ancora raggiunto un equilibrio e, di conseguenza, una collocazione di questi oggetti in una relazione di scala risulta indeterminata.

Capitolo 4

Conclusioni

In questo elaborato di Tesi sono state presentate le caratteristiche principali di una particolare classe di galassie attive, le galassie NLS1, ponendo l'attenzione sulle due interpretazioni riguardo la natura di questi oggetti: l'interpretazione geometrica secondo cui le peculiarità di queste galassie possono essere spiegate in termini dell'inclinazione preferenziale con cui le osserviamo e l'interpretazione evolutiva secondo cui queste galassie non sono viste sistematicamente sotto certe condizioni e costituiscono invece una classe a parte di AGN. È stato rilevato che uno dei fattori principali per discernere quale di queste interpretazioni sia la più plausibile è rappresentato dalla massa del buco nero al centro di queste galassie e il conseguente tasso di accrescimento. Infatti le masse dei buchi neri al centro delle galassie NLS1 risultano più alte se si applicano le correzioni relative all'interpretazione geometrica rispetto a quanto calcolato senza queste correzioni. Una delle conseguenze dell'incertezza sulle masse è relativa alle relazioni di scala trovate per gli altri AGN, in particolare le relazioni di Magorrian e $M_{\text{BH}} - \sigma$. Si trova infatti che la collocazione delle galassie NLS1 in queste relazioni di scala risulta incerta.

Un altro aspetto estremamente importante relativo alle galassie NLS1 è rappresentato dalle loro proprietà rilevate in banda X. Si evince infatti che lo studio di questi oggetti in tale banda sia un potente ed efficace metodo per affrontare il dilemma sull'interpretazione della natura delle galassie NLS1, in quanto tale radiazione è prodotta nelle regioni più centrali e, di conseguenza, la spettroscopia X è uno dei metodi più adatti ad indagare la struttura intrinseca di questi oggetti.

Le differenze fra galassie NLS1 radio - quiete e radio - brillanti rappresenta anche una questione aperta, soprattutto per quanto riguarda i getti relativistici ad alta energia. Mancano infatti dei campioni completi e non affetti da selezione per quanto riguarda galassie radio - brillanti con getti relativistici osservate a grandi inclinazioni. Accanto a questo anche le proprietà in banda IR e in generale in banda radio richiedono maggiori

studi per essere interpretate al meglio.

Per tutti questi motivi le galassie NLS1 rappresentano un importante tema di ricerca, non solo perché la loro natura intrinseca risulta ignota, ma anche perché la loro comprensione risulterebbe utile sia nell'interpretazione dei processi in atto negli AGN, che nell'interpretazione degli effetti dell'attività nucleare sulla formazione ed evoluzione delle galassie. Di conseguenza sono necessari, per il futuro, degli studi approfonditi in banda X di queste galassie per comprendere meglio la struttura reale del nucleo attivo, il che potrebbe anche permettere una stima corretta delle masse e di come le galassie NLS1 si inseriscano nelle relazioni di scala trovate per gli altri AGN. Lo studio in questa banda risulta quindi molto importante anche per risolvere il dilemma in merito a quale sia il modello interpretativo più adatto per queste galassie. Inoltre sono richiesti anche studi in banda IR per sondare le loro proprietà nello spettro infrarosso, nonché delle indagini spettroscopiche in radio per far luce sulla natura dei getti relativistici e delle differenze fra NLS1 radio - quiete e radio - brillanti. Infine, come suggerito da Komossa (2008), è necessario ottenere degli ampi campioni di galassie sia NLS1 che S1 non affetti da selezione, in modo da poter delineare nella maniera più completa quali siano le differenze intrinseche fra questi oggetti.

Capitolo 5

Bibliografia

- Antonucci R.; Unified models for active galactic nuclei and quasars; Annual review of astronomy and astrophysics; 1993; 31; 473-521
- Antonucci R. R. J., Miller J. S.; Spectropolarimetry and the nature of NGC 1068; Astrophysical Journal; 1985; 297; 621-632
- Baade W., Minkowski R.; Identification of the Radio Sources in Cassiopeia, Cygnus A, and Puppis A.; Astrophysical Journal; 1954; 119; 206
- Barth A. J., Greene J. E., Ho L. C.; Dwarf Seyfert 1 Nuclei and the Low-Mass End of the $M_{\text{BH}}-\sigma$ Relation; The Astrophysical Journal; 2005; 619; L151-L154
- Beckmann V., Shrader C. R.; Active Galactic Nuclei; WILEY-VCH; 2012
- Berton M., Foschini L., Caccianiga A., Ciroi S., Congiu E., Cracco V., Frezzato M., La Mura G., Rafanelli P.; An orientation-based unification of young jetted active galactic nuclei: the case of 3C 286; Frontiers in Astronomy and Space Sciences; 2017; 4
- Berton M., Foschini L., Ciroi S., Cracco V., La Mura G., Lister M. L., Mathur S., Peterson B. M., Richards J. L., Rafanelli P.; Parent population of flat-spectrum radio-loud narrow-line Seyfert 1 galaxies; Astronomy and Astrophysics; 2015; 578; 12
- Bian W., Zhao Y.; M- σ relation in radio-loud AGNs and NLS1s; Cambridge University Press; 2004; 222; 79-80
- Bian W., Zhao Y.; The black hole-bulge relation in active galactic nuclei; Monthly Notices of the Royal Astronomical Society; 2004; 347; 607-612

- Boller T., Brandt W. N., Fink H.; Soft X-ray properties of narrow-line Seyfert 1 galaxies; *Astronomy and Astrophysics*; 1996; 305; 53
- Boroson T. A., Green R. F.; The emission-line properties on low-redshift QSOs: What physical parameters drive the observed properties?; Testing the AGN paradigm. *AIP Conference Proceedings*; 1992; 254; 584-587
- Botte V., Ciroi S., Rafanelli P., Di Mille F.; Exploring Narrow-Line Seyfert 1 Galaxies through the Physical Properties of Their Hosts; *The Astronomical Journal*; 2004; 127; 3168-3179
- Botte V., Ciroi S., Di Mille F., Rafanelli P., Romano A.; Stellar velocity dispersion in narrow-line Seyfert 1 galaxies; *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*; 2005; 356; 789-793
- Brandt W. N., Mathur S., Elvis M.; A comparison of the hard ASCA spectral slopes of broad- and narrow-line Seyfert 1 galaxies; *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*; 1997; 285; L25-L30
- Brinkmann W., Arévalo P., Gliozzi M., Ferrero E.; X-ray variability of the Narrow Line Seyfert 1 Galaxy PKS 0558-504; *Astronomy and Astrophysics*; 2004; 415; 959-969
- Caccianiga A., Antón S., Ballo L., Foschini L., Maccacaro T., Della Ceca R., Severgnini P., Marchã M. J., Mateos S., Sani E.; WISE colours and star formation in the host galaxies of radio-loud narrow-line Seyfert 1; *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*; 2015; 451; 1795-1805
- Calderone G., Ghisellini G., Colpi M., Dotti M.; Black hole mass estimate for a sample of radio-loud narrow-line Seyfert 1 galaxies; *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*; 2013; 431; 210-239
- Collin S., Kawaguchi T.; Super-Eddington accretion rates in Narrow Line Seyfert 1 galaxies; *Astronomy and Astrophysics*; 2004; 426; 797-808
- Collin S., Kawaguchi T., Peterson B. M., Vestergaard M.; Systematic effects in measurement of black hole masses by emission-line reverberation of active galactic nuclei: Eddington ratio and inclination; *Astronomy and Astrophysics*; 2006; 456; 75-90
- Crenshaw D. M., Kraemer S. B., Gabel J. R.; The Host Galaxies of Narrow-Line Seyfert 1 Galaxies: Evidence for Bar-Driven Fueling; *The Astronomical Journal*; 2003; 126; 1690-1698

- D'Ammando F., Acosta-Pulido J. A., Capetti A., Raiteri C. M., Baldi R. D., Orienti M., Ramos Almeida C.; Uncovering the host galaxy of the γ -ray-emitting narrow-line Seyfert 1 galaxy FBQS J1644+2619; *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*; 2017; 469; L11-L15
- Decarli R., Dotti M., Fontana M., Haardt F.; Are the black hole masses in narrow-line Seyfert 1 galaxies actually small?; *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*; 2008; 386; L15-L19
- De Robertis M. M., Hayhoe K., Yee H. K. C.; A CCD Study of the Environment of Seyfert Galaxies. I. The Survey; *The Astrophysical Journal Supplement Series*; 1998; 115; 163-183
- Doi A., Fujisawa K., Inoue M., Wajima K., Nagai H., Harada K., Suematsu K., Habe A., Honma M., Kawaguchi N., Kawai E., Kobayashi H., Koyama Y., Kuboki H., Murata Y., Omodaka T., Sorai K., Sudou H., Takaba H., Takashima K., Takeda K., Tamura S., Wakamatsu K.; Japanese VLBI Network Observations of Radio-Loud Narrow-Line Seyfert 1 Galaxies; *Publications of the Astronomical Society of Japan*; 2007; 59; 703-709
- Edelson R., Vaughan S., Warwick R., Puchnarewicz E., George I.; The ROSAT Wide Field Camera Extragalactic Survey; *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*; 1999; 307; 91-98
- Gadotti D.A., Kauffmann G.; The growth of supermassive black holes in pseudobulges, classical bulges and elliptical galaxies; *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*; 2009; 399; 621-627
- Ghisellini G., Haardt F., Matt G.; Aborted jets and the X-ray emission of radio-quiet AGNs; *Astronomy and Astrophysics*; 2004; 413; 535-545
- Gioia I. M., Maccacaro T., Schild R. E., Stocke J. T., Liebert J. W., Danziger I. J., Kunth D., Lub J.;
- Goodrich R.W.; Spectropolarimetry of 'narrow-line' Seyfert 1 galaxies; *Astrophysical Journal*; 1989; 342; 224-234
- Greenstein J. L.; Red-Shift of the Unusual Radio Source: 3C 48; *Nature*; 1963; 197; 1041-1042
- Greenstein J. L., Schmidt M.; The Quasi-Stellar Radio Sources 3C 48 and 3C 273; *Astrophysical Journal*; 1964; 140; 1

- Grupe D., Mathur S.; $M_{\text{BH}}-\sigma$ Relation for a Complete Sample of Soft X-Ray-selected Active Galactic Nuclei; *The Astrophysical Journal*; 2004; 606; L41-L44
- Gültekin K., Richstone D. O., Gebhardt K., Lauer T. R., Tremaine S., Aller M. C., Bender R., Dressler A., Faber S. M., Filippenko A. V., Green R., Ho L. C., Kormendy J., Magorrian J., Pinkney J., Siopis C.; The $M-\sigma$ and $M-L$ Relations in Galactic Bulges, and Determinations of Their Intrinsic Scatter; *The Astrophysical Journal*; 2009; 698; 198-221
- Halpern J. P., Oke J.B.; Detection of forbidden NI II λ 7378 in six Seyfert galaxies; *Astrophysical Journal*; 1986; 301; 753-758
- Hu J.; The black hole mass-stellar velocity dispersion correlation: bulges versus pseudo-bulges; *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*; 2008; 386; 2242-2252
- Hunt L. K., Malkan M. A.; Morphology of the 12 Micron Seyfert Galaxies. I. Hubble Types, Axial Ratios, Bars, and Rings; *The Astrophysical Journal*; 1999; 516; 660-671
- Järvelä E., Lähteenmäki A., León-Tavares J.; Statistical multifrequency study of narrow-line Seyfert 1 galaxies; *Astronomy and Astrophysics*; 2015; 573; 24
- Kaspi S., Smith P. S., Netzer H., Maoz D., Jannuzi B. T., Givon U.; Reverberation Measurements for 17 Quasars and the Size-Mass-Luminosity Relations in Active Galactic Nuclei; *The Astrophysical Journal*; 2000; 533; 631-649
- Kellermann K. I., Sramek R., Schmidt M., Shaffer D. B., Green R.; VLA observations of objects in the Palomar Bright Quasar Survey; *Astronomical Journal*; 1989; 98; 1195-1207
- Komossa S.; Narrow-line Seyfert 1 Galaxies; *Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica (Serie de Conferencias)*; 2008; 32; 86-92
- Komossa S., Xu D.; Narrow-Line Seyfert 1 Galaxies and the $M_{\text{BH}}-\sigma$ Relation; *The Astrophysical Journal*; 2007; 667; L33-L36
- Kormendy J.; Brightness distributions in compact and normal galaxies. II - Structure parameters of the spheroidal component; *Astrophysical Journal*; 1977; 218; 333-346
- Kreikenbohm A., Schulz R., Kadler M., Wilms J., Markowitz A., Chang C. S., Carpenter B., Elsässer D., Gehrels N., Mannheim K., Müller C., Ojha R., Ros E.,

Trüstedt J.; The gamma-ray emitting radio-loud narrow-line Seyfert 1 galaxy PKS 2004-447. I. The X-ray View; *Astronomy and Astrophysics*; 2016; 585; 12

- Lawrence A.; Classification of active galaxies and the prospect of a unified phenomenology; *Astronomical Society of the Pacific, Publications*; 1987; 99; 309-334
- Liu X., Yang P., Supriyanto R., Zhang Z.; Properties of the Narrow Line Seyfert 1 Galaxies Revisited; *International Journal of Astronomy and Astrophysics*; 2016; 6; 166-174
- Magorrian J., Tremaine S., Richstone D., Bender R., Bower G., Dressler A., Faber S. M., Gebhardt K., Green R., Grillmair C., Kormendy J., Lauer T.; The Demography of Massive Dark Objects in Galaxy Centers; *The Astronomical Journal*; 1998; 115; 2285-2305
- Mathur S.; New insights into the narrow-line Seyfert 1 phenomenon; *New Astronomy Reviews*; 2000; 44; 469-475
- Mathur S., Fields D., Peterson B. M., Grupe D.; Supermassive Black Holes, Pseudobulges, and the Narrow-line Seyfert 1 Galaxies; *The Astrophysical Journal*; 2012; 754; 1-9
- Mathur S., Grupe D.; The Locus of Highly Accreting Active Galactic Nuclei on the $M_{\text{BH}}-\sigma$ Plane: Selections, Limitations, and Implications; *The Astrophysical Journal*; 2005; 633; 688-692
- Mathur S., Kuraszkiewicz J., Czerny B.; Evolution of active galaxies: black-hole mass-bulge relations for narrow line objects; *New Astronomy*; 2001; 6; 321-329
- McConnell N. J., Ma C.P., Gebhardt K., Wright S. A., Murphy J. D., Lauer T. R., Graham J. R., Richstone D. O.; Two ten-billion-solar-mass black holes at the centres of giant elliptical galaxies; *Nature*; 2011; 480; 215-218
- NASA <https://www.nasa.gov/index.html>
- Netzer H.; Revisiting the Unified Model of Active Galactic Nuclei; *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*; 2015; 53; 365-408
- Netzer H.; The physics and evolution of active galactic nuclei; *Cambridge University Press*; Cambridge; 2013
- Nikolajuk M., Papadakis I. E., Czerny B.; Black hole mass estimation from X-ray variability measurements in active galactic nuclei; *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*; 2004; 350; L26-L30

- Ohta K., Aoki K., Kawaguchi T., Kiuchi G.; A Bar Fuels a Supermassive Black Hole?: Host Galaxies of Narrow-Line Seyfert 1 Galaxies; *The Astrophysical Journal Supplement Series*; 2007; 169; 1-20
- Orban de Xivry G., Davies R., Schartmann M., Komossa S., Marconi A., Hicks E., Engel H., Tacconi L.; The role of secular evolution in the black hole growth of narrow-line Seyfert 1 galaxies; *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*; 2011; 417; 2721-2736
- Oshlack A. Y. K. N., Webster R. L., Whiting M. T.; A Very Radio Loud Narrow-Line Seyfert 1: PKS 2004-447; *The Astrophysical Journal*; 2001; 558; 578-582
- Osterbrock D.E.; Seyfert Galaxies: Classification, Morphology, Observations at Optical of Wavelengths, Environmental Factors Seyferts; *International Astronomical Union. Symposium no. 121*, Kluwer Academic Publishers; 1987; 109
- Osterbrock D.E., Ferland G.J; *Astrophysics of gaseous nebulae and active galactic nuclei (Second Edition)*; University Science Books; Sausalito; 2006
- Osterbrock D.E., Pogge R.W.; The spectra of narrow-line Seyfert 1 galaxies; *Astrophysical Journal*; 1985; 297; 166-176
- Papadakis I. E.; The scaling of the X-ray variability with black hole mass in active galactic nuclei; *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*; 2004; 348; 207-213
- Peterson B. M., Horne K.; Echo mapping of active galactic nuclei; *Astronomische Nachrichten*; 2004; 325; 248-251
- Peterson B. M., Wandel A.; Evidence for Supermassive Black Holes in Active Galactic Nuclei from Emission-Line Reverberation; *The Astrophysical Journal*; 2000; 540; L13-L16
- Peterson B. M., Wandel A.; Keplerian Motion of Broad-Line Region Gas as Evidence for Supermassive Black Holes in Active Galactic Nuclei; *The Astrophysical Journal*; 1999; 521; L95-L98
- Pogge R.W.; A quarter century of Narrow-Line Seyfert 1s; 2011; *Narrow-Line Seyfert 1 Galaxies and their place in the Universe*; NLS1
- Pounds K. A., Done C., Osborne J. P.; RE 1034+39: a high-state Seyfert galaxy?; *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*; 1995; 277; L5-L10

- Puchnarewicz E. M., Branduardi-Raymont G., Mason K. O., Sekiguchi K.; Optical and X-ray observations of the EUV-selected Seyfert galaxy RE J2248-511: a true ‘soft X-ray excess’ AGN?; Monthly Notices of the Royal Astronomical Society; 1995; 276; 1281-1286
- Puchnarewicz E. M., Mason K. O., Cordova F. A., Kartje J., Branduardi-A., Mittaz J. P. D., Murdin P. G., Allington-Smith J.; Optical properties of active galaxies with ultra-soft X-ray spectra; Monthly Notices of the Royal Astronomical Society; 1992; 256; 589-623
- Quasars and Active Galactic Nuclei
<http://pages.astronomy.ua.edu/keel/agn/>
- Rakshit S., Stalin C. S., Chand H., Zhang X.; A Catalog of Narrow Line Seyfert 1 Galaxies from the Sloan Digital Sky Survey Data Release 12; The Astrophysical Journal Supplement Series; 2017; 229; 16
- Rakshit S., Stalin C. S., Chand H., Zhang X.; Properties of Narrow line Seyfert 1 galaxies; eprint arXiv; 2017
- Remillard R. A., Bradt H. V., Buckley D. A. H., Roberts W., Schwartz D. A., Tuohy I. R., Wood K.; The discovery of eight bright active galactic nuclei observed with the HEAO 1 scanning modulation collimator; Astrophysical Journal 1986; 301; 742-752
- Schmidt M.; 3C 273 : A Star-Like Object with Large Red-Shift; Nature; 1963; 197; 1040
- Shakura N. I., Sunyaev R. A.; Black holes in binary systems. Observational appearance; Astronomy and Astrophysics; 1973; 24; 337-355
- Shen J., Vanden Berk D. E., Schneider D. P., Hall P. B.; The Black Hole-Bulge Relationship in Luminous Broad-Line Active Galactic Nuclei and Host Galaxies; The Astronomical Journal; 2008; 135; 928-946
- Smith J. E., Robinson A., Young S., Axon D. J., Corbett, E. A.; Equatorial scattering and the structure of the broad-line region in Seyfert nuclei: evidence for a rotating disc; Monthly Notices of the Royal Astronomical Society; 2005; 359; 846-864
- Stephens S. A.; Optical spectroscopy of X-ray-selected active galactic nuclei; Astrophysical Journal; 1989; 97; 10-35

- Tavecchio F., Ghisellini G.; "Flat" broad line region and gamma-ray absorption in blazars; eprint arXiv; 2012
- Tran H.D.; Hidden Broad-Line Seyfert 2 Galaxies in the CFA and 12 μ M Samples; The Astrophysical Journal; 2001; 554; L19-L23
- Véron-Cetty M.P., Véron P.; Gonçalves A. C.; A spectrophotometric atlas of Narrow-Line Seyfert 1 galaxies; Astronomy and Astrophysics; 2001; 372; 730-754
- Wandel A., Peterson B. M., Malkan M. A.; Central Masses and Broad-Line Region Sizes of Active Galactic Nuclei. I. Comparing the Photoionization and Reverberation Techniques; The Astrophysical Journal; 1999; 526; 579-591
- Wang T., Lu Y.; Black hole mass and velocity dispersion of narrow line region in active galactic nuclei and narrow line Seyfert 1 galaxies; Astronomy and Astrophysics; 2001; 377; 52-59
- Wang, J.-M.; Netzer, H.; Extreme slim accretion disks and narrow line Seyfert 1 galaxies: The nature of the soft X-ray hump; Astronomy and Astrophysics; 2003; 398; 927-936
- Wills B. J., Browne I. W. A.; Relativistic beaming and quasar emission lines; Astrophysical Journal; 1986; 302; 56-63
- Yuan W., Zhou H. Y., Komossa S., Dong X. B., Wang T. G., Lu H. L., Bai J. M.; A Population of Radio-Loud Narrow-Line Seyfert 1 Galaxies with Blazar-Like Properties?; The Astrophysical Journal; 2008; 685; 801-827