

Misure di continuo e righe in emissione di 50 spettri di Seyfert 1 / QSO con $z < 0.5$

Mattia Castellucci, Nicola Dal Bianco, Elena Piccoli, Marco Siciliano, Luca Tronchin

Liceo Scientifico “Guglielmo Marconi”, Conegliano (TV)

ABSTRACT

The aim of this work is to calculate the mass of 50 AGN by the analysis of their spectra. AGN (Active Galactic Nuclei) are galaxies that have in their centre a supermassive black hole, around which there is an accretion disk that emits strong X-rays. Because of this, the gas around the black hole is excited and emits in some wavelengths, creating a spectrum with emission lines. If these lines are broad, the gas is very turbulent and this means that it is situated near the black hole (BLR); otherwise the gas is more far away (NLR). Analysing these lines it is possible to estimate the radius of the BLR and, from that, calculate the mass of the central black hole.

I. INTRODUZIONE

Gli AGN (Active Galactic Nuclei) rappresentano circa il 10% delle galassie scoperte finora. Sono galassie che hanno al loro interno molto probabilmente un buco nero supermassiccio (10^6 - 10^9 masse solari) che cattura gas, polveri e stelle nelle sue vicinanze e attraverso un disco di accrescimento trasforma metà di questa massa direttamente in energia emettendo una grande quantità di fotoni molto energetici (Fig. 1).

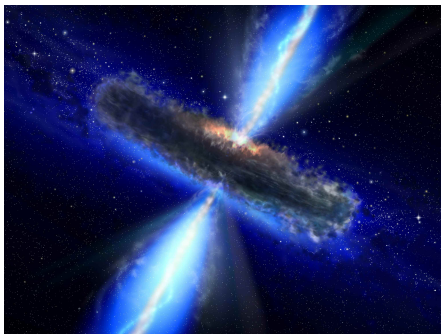


Fig. 1: Verosimile rappresentazione del modello degli AGN. I due getti luminosi fuoriescono dal corpo celeste centrale perpendicolarmente al disco, nube di gas non ionizzati che filtra parte della radiazione emessa.

Lo spettro dell'AGN è dato dalla somma dell'emissione del buco nero più disco di accrescimento che, a causa del fenomeno di frizione tra le particelle di cui è composto, si riscalda fino a essere in grado di emettere raggi X, e dei continui delle stelle

circostanti. Grazie alla elevata luminosità di questi corpi celesti è possibile osservarli fino a redshift molto elevati (finora il massimo confermato è $z = 6,4$), il che, alla luce della legge di Hubble, significa osservare sorgenti molto distanti nello spazio e quindi indietro nel tempo. Una volta esauritosi il disco di accrescimento, si pensa che il nucleo dell'AGN diventi inattivo; a quel punto non vi sarà più alcuna emissione di energia, e l'unico modo per valutare la presenza di un buco nero supermassiccio sarà l'osservazione della deviazione nelle traiettorie delle stelle che passano in quella zona. Un tale fenomeno è osservabile nel centro della nostra galassia.

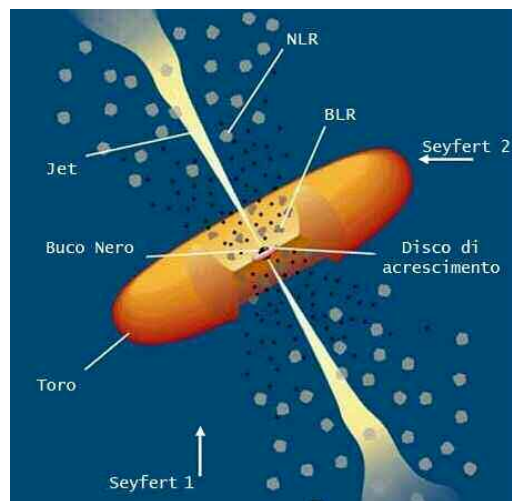


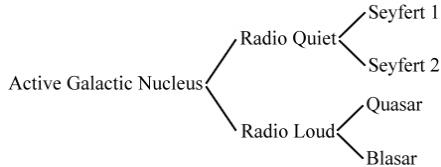
Fig. 2: Lo schema rappresenta tutte le componenti di un AGN secondo il modello standard. Sono presenti inoltre i due punti di vista dell'osservatore che fanno differire le Seyfert1 dalle Seyfert2.

Oltre il disco d'accrescimento è presente una zona chiamata BLR (Broad Line Region), avente raggio paragonabile a quello del Sistema Solare, nella quale si trova gas ionizzato dalle radiazioni emesse dal disco di accrescimento; tale regione non può essere molto estesa dal momento che presenta una variazione di luminosità con una periodicità di qualche giorno. Al contrario c'è un'altra regione di gas ionizzato, la NLR (Narrow Line Region), che praticamente non presenta variabilità e quindi la sua distanza sarà di qualche decina fino a qualche centinaio di anni-luce. Tra queste due regioni è presente una struttura toroidale composta da gas neutri e polveri che assorbono parte della radiazione che giunge loro dal corpo centrale (Fig. 2).

A seconda dell'inclinazione dell'asse del toro rispetto all'osservatore, si distinguono due tipi di AGN *radio quiet*: le Seyfert 1 e le Seyfert 2.

Nelle prime l'asse del toro è rivolto verso l'osservatore e quindi i gas non ionizzati non nascondono le radiazioni della BLR, dando luogo così sia righe strette che larghe nello spettro; al contrario nelle altre le uniche radiazioni che vengono osservate sono quelle della NLR.

Particolari tipi di AGN sono i Blazar e i Quasar, i quali differiscono dalle sopra citate Seyfert perché hanno una forte e spesso violenta emissione nel radio.



Nelle sezioni successive verranno riportati il tipo di dati analizzati, la descrizione del lavoro effettuato con l'approfondimento di tutte le formule utilizzate per l'elaborazione dei dati e alla fine le considerazioni conclusive e i risultati ottenuti.

II. DATI OSSERVATIVI

Sono stati analizzati gli spettri di 50 quasar con un redshift minore di 0.5. Tali spettri sono stati ottenuti dal telescopio da 2,5 metri di diametro situato presso l'osservatorio di Apache Point nel New Mexico, utilizzato nel progetto *Sloan Digital Sky Survey* (SDSS) che ha osservato circa un quarto del cielo fino ad una distanza di 1,5 miliardi di anni luce dalla Terra, catalogando circa 100 milioni di stelle, 1 milione di galassie e 100000 quasar.

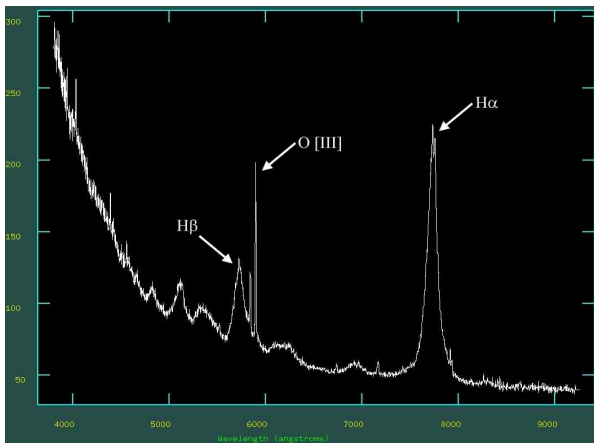


Fig. 3: Spettro ottenuto dall'osservazione di un AGN. Molto evidenti i fenomeni di redshift che causa lo spostamento di tutto lo spettro, in particolar modo dei picchi evidenziati, verso lunghezze d'onda più alte e di *Big Blue Bump*, secondo il quale l'intensità del flusso aumenta avvicinandosi alle radiazioni UV.

Tali spettri coprono le lunghezze d'onda da 3800 Å a 9800 Å, e sono tutti di galassie di Seyfert 1/QSO, solitamente galassie a spirale.

Gli spettri si presentano con una struttura di tipo *Big Blue Bump*, in cui l'intensità del flusso va aumentando a mano a mano che si passa dall'infrarosso

all'ultravioletto e viene attribuita all'emissione del disco di accrescimento. Su tale continuo sono evidenti delle righe di emissione: righe permesse larghe (come Hβ) e righe proibite strette (come [O III]). Questa differenza di ampiezza è da attribuirsi al fatto che le due tipologie di righe vengono prodotte in regioni differenti: quelle larghe corrispondono a velocità del gas più elevate e sono quindi causate dal gas più vicino al corpo centrale, quello della BLR. Si nota inoltre che coesistono, nel profilo di Hβ, una componente larga e una stretta, dovute rispettivamente ai gas della BLR e della NLR (Fig. 3).

III. DESCRIZIONE DEL LAVORO

Per calcolare la massa dei 50 AGN, è necessario conoscere prima la velocità dei gas nella BLR e la loro distanza dal buco nero centrale.

Tutti i dati a disposizione sono stati ricavati manualmente dagli spettri con l'ausilio del programma IRAF; visto che l'attendibilità di tali dati dipende dalla precisione dell'operatore, la misurazione per quanto attenta contiene sempre un errore sistematico. Per ridurre tale incertezza, gli spettri sono stati analizzati più e più volte da diversi operatori facendo poi la media dei diversi risultati.

Per prima cosa si osserva la lunghezza d'onda alla quale avviene l'emissione della riga Hβ, in modo da conoscere l'entità del redshift (z) e poter sia ricondurre lo spettro alle lunghezze d'onda di riposo (λ_0), sia calcolare la distanza degli AGN dalla Terra (d) attraverso l'apposita formula relativistica.

$$z = \frac{\lambda_{center} - \lambda_0}{\lambda_0} \quad d = \frac{c}{H_0} \frac{(z+1)^2 - 1}{(z+1)^2 + 1}$$

Nelle quali λ_{center} è la lunghezza d'onda del picco misurata nello spettro, mentre H_0 è la costante di Hubble ($H_0 = 72 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$).

Una volta fatto ciò è stato possibile ricavare il flusso f [$\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2}$] del continuo a 5100 Å.

$$f(5100) = avg \cdot 5100$$

Dove avg [$\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{Å}^{-1}$] è la media del flusso attorno a 5100 Å per unità di lunghezza d'onda.

Grazie a questo dato è possibile calcolare la luminosità del continuo in quella zona dello spettro:

$$L_{5100} = f_{5100} \cdot 4\pi d^2 \quad [\text{erg} \cdot \text{s}^{-1}]$$

la quale è a sua volta necessaria per ottenere il raggio della BLR, tramite la seguente legge sperimentale:

$$\frac{r[l_d]}{10[l_d]} = 2,23 \left[\frac{L_{5100}}{10^{44} \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1}} \right]^{0,69}$$

Interpolando il profilo delle righe di emissione sia di [O III] che di Hβ con una gaussiana è stato possibile

calcolare la $\Delta\lambda_{FWHM}$ (“Full Width at Half Maximum”) ovvero la larghezza totale della riga a metà del picco. Questo valore dipende dalla turbolenza del gas che ha prodotto tale riga. La velocità di turbolenza è calcolabile attraverso la formula dell’effetto Doppler, imponendo che la variazione di lunghezza d’onda dovuta a questo sia proprio $\Delta\lambda_{FWHM}$.

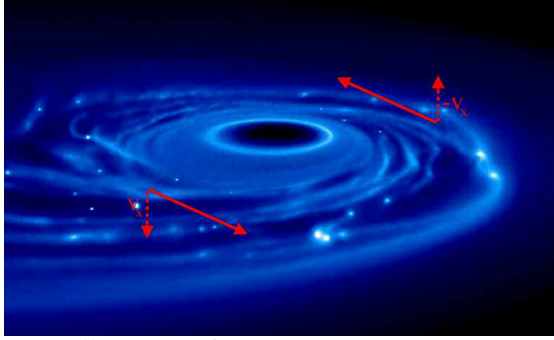


Fig. 4: L’effetto Doppler è percettibile solo per gli spostamenti che avvengono parallelamente alla retta congiungente l’oggetto osservato e l’osservatore stesso. Tale motivo fa supporre che la dispersione di velocità sia relazionata a una sola dimensione dello spazio e valga $\Delta v_x = v_x - (-v_x) = 2v_x$

Associando tale dispersione di velocità (Δv_x) a un moto circolare attorno all’AGN, il valore ottenuto è la somma vettoriale delle due velocità orbitali, radiali rispetto all’osservatore; quindi per ottenere la reale velocità, è necessario dividere il valore per due (Fig. 4).

$$v_x = \frac{\Delta v_x}{2} = \frac{1}{2} \frac{\Delta\lambda_{FWHM}}{\lambda_{center}} c$$

Tuttavia la velocità così ottenuta è solo una delle tre componenti spaziali della velocità effettiva, più precisamente è la sua componente radiale (sempre rispetto all’osservatore). Di conseguenza, supponendo che, statisticamente, il valore della velocità sia uguale nelle tre dimensioni spaziali ($v_x = v_y = v_z$), è possibile ricavare, con il teorema di Pitagora, la velocità orbitale tridimensionale (v).

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} = v_x \sqrt{3}$$

Noti quindi il raggio della BLR e la velocità orbitale, è possibile calcolare la massa di quest’ultimo imponendo l’uguaglianza fra la forza gravitazionale e la forza centripeta del moto circolare.

$$\frac{GMm}{r^2} = m \frac{v^2}{r} \Rightarrow M = \frac{v^2 r}{G}$$

IV. RISULTATI

Con il procedimento sopra elencato, è stato possibile calcolare la luminosità di H β , di [O III] e del continuo. Segue parte dei valori così ottenuti:

Database SDSS	Luminosità [erg/s]			Massa AGN [M $\odot$]
	H β	[O III]	continuo	
51637-0306-634	9,10E+41	2,08E+41	4,71E+43	1,51E+07
51671-0299-098	1,81E+42	4,88E+41	9,28E+43	9,54E+07
51671-0299-133	4,27E+42	8,86E+41	1,02E+44	3,14E+07
51788-0355-528	4,14E+42	9,01E+41	2,08E+44	1,55E+08
51788-0386-086	4,62E+42	2,00E+42	3,37E+44	2,98E+08
51788-0401-247	1,08E+43	2,02E+42	4,77E+44	6,09E+08
51816-0382-166	1,35E+42	5,40E+41	6,09E+43	2,43E+07
51871-0420-397	2,42E+42	1,11E+42	1,20E+44	2,06E+08
51873-0445-018	3,00E+42	6,83E+41	1,52E+44	2,67E+08
51900-0449-062	1,42E+42	6,55E+41	8,07E+43	1,04E+07

Tab. 1: Risultati di luminosità e massa di alcuni dei corpi celesti analizzati.

Questi risultati sono in accordo con la letteratura precedente come in Wandel, Peterson e Malkan (Astrophysical Journal - 1999).

Dal momento che l’energia necessaria a ionizzare l’idrogeno (quindi a produrre le righe di emissione H β) proviene dal disco di accrescimento, è legittimo aspettarsi una relazione tra la luminosità del continuo e di H β . Sono state quindi riportate in un grafico queste due grandezze.

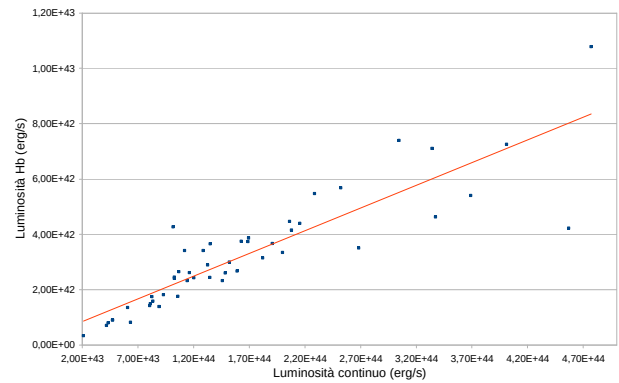


Grafico 1: Luminosità-continuo, luminosità-H β

Come ci si aspettava, il grafico evidenzia una dipendenza lineare tra le due serie prese in esame.

Analogamente è possibile aspettarsi un comportamento simile tra la luminosità del continuo e di [O III], poiché, a un aumento dell’energia irradiata dal disco di accrescimento e quindi del numero degli elettroni liberi nella NLR, corrisponderà un aumento degli urti tra gli elettroni e gli ioni dell’ossigeno, causando una maggiore intensità delle righe proibite [O III].

Ciò è verificato nel grafico 2.

Da notare come nei grafici riportati ci siano sempre dei valori che si discostano dall’andamento generale. Ciò è da attribuirsi alle incertezze che sono state introdotte sia inizialmente con la deduzione manuale dei dati dagli spettri (a causa della quale non è stato possibile

fare una stima degli errori delle diverse grandezze), sia nelle fasi successive di elaborazione degli stessi.

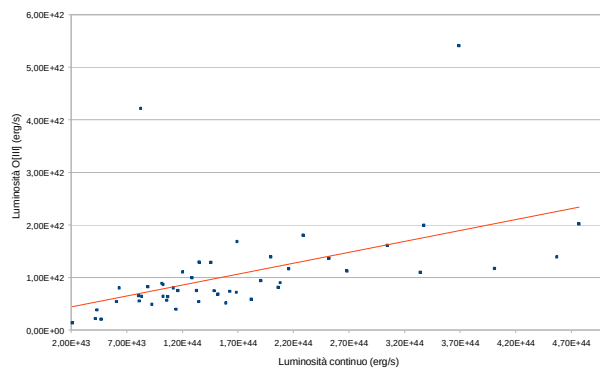


Grafico 2: Luminosità-continuo, luminosità-[O III]

Sono stati poi trovati i valori delle masse degli AGN. I risultati ottenuti sono riportati nell'ultima colonna della Tabella 1.

Questi valori sono in accordo con quelli riportati dalla letteratura precedente che prevedono masse comprese tra 10^6 e 10^9 masse solari, come in Woo & Urry (Astrophysical Journal – 2002).

Sono state poi inserite in un grafico la massa degli AGN e la velocità di turbolenza di H β , supponendo che tra queste due grandezze ci fosse qualche relazione, in quanto la velocità di rotazione del gas attorno al buco nero dipende fortemente dalla massa di quest'ultimo: se la massa aumenta ci si aspetta un aumento anche della velocità.

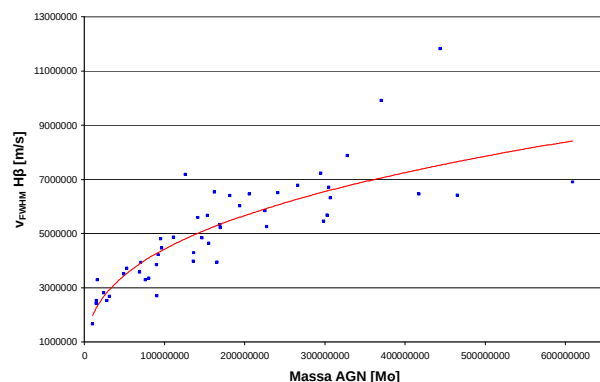


Grafico 3: Massa AGN, velocità di turbolenza H β

Come dalle previsioni, il grafico mostra una dipendenza di tipo radicale tra le due grandezze, come è possibile ricavare dal procedimento seguito, in particolar modo dall'ultima equazione.

Mentre, se si inseriscono su un grafico la massa degli AGN e la velocità di turbolenza di [O III], non è possibile notare alcun tipo di dipendenza. Questo è in accordo con l'ipotesi che le righe proibite [O III] vengano emesse dal gas che si trova nella NLR, più lontano dal corpo centrale, che è meno legato all'attrazione di quest'ultimo.

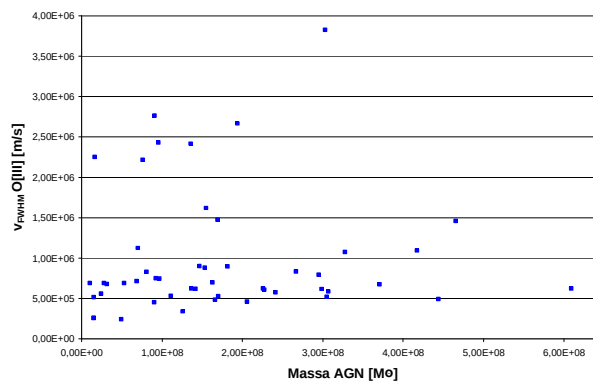


Grafico 4: Massa AGN, velocità di turbolenza [O III]

Per quanto riguarda invece la relazione tra massa degli AGN e luminosità del continuo è stato costruito un grafico che correla queste due grandezze.

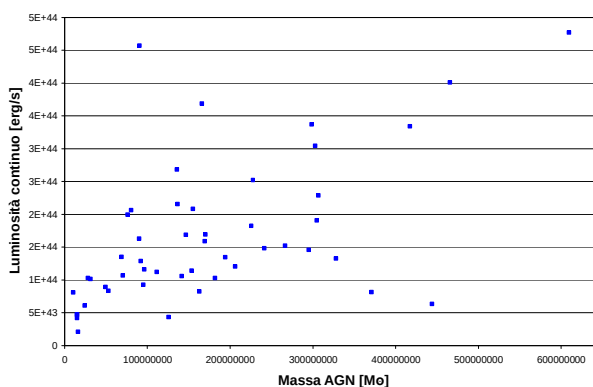


Grafico 5: Massa AGN, luminosità continuo

Da quest'ultimo grafico non si può ritenere che esista una correlazione stretta tra le due grandezze. Infatti la luminosità del continuo è legata soprattutto alla massa presente nel disco di accrescimento, ma questa non è che una piccolissima parte di quella totale dell'AGN. Quindi è possibile ipotizzare una relazione tra la massa del disco di accrescimento e la luminosità del continuo. Si potrebbe presumere che all'aumentare della massa del buco nero, la sua capacità di attrazione diventi maggiore e quindi anche la materia presente nel disco. Tuttavia bisogna sempre considerare i fattori contestuali a ogni galassia: infatti non è sufficiente una grande forza gravitazionale, ma è necessaria la presenza, vicino all'AGN, di una massa da attrarre.

Bibliografia:

Dalle stelle all'universo, lezioni di astrofisica di Alessandro Braccetti - Zanichelli, 2000
Active galactic nucleus black hole masses and bolometric luminosities di Jong-Hak Woo e C. Megan Urry - The Astrophysical Journal, 2002
Central masses and broad-line region sizes of active galactic nuclei di A. Wandel, B. M. Peterson e M. A. Malkan - The Astrophysical Journal, 1999
The relationship between luminosity and broad-line region size in active galactic nuclei di Shai Kaspi, Dan Maoz et al. - The Astrophysical Journal, 2005