

# Towards a precise determination of cosmic distances with quasars

Student: Matilde Signorini (matilde.signorini1@stud.unifi.it)

Supervisor: Prof. Guido Risaliti (guido.risaliti@unifi.it)

Active Galactic Nuclei show an extremely wide emission, ranging from radio to hard X-ray wavelengths. The origin of the primary emission is an optically thick accretion disk surrounding a central Super Massive Black Hole, with an emission peak in the optical-UV region. The X-ray emission is thought to be produced by inverse Compton scattering of UV photons coming from the disk by a hot electron plasma called the “Corona”. This process should cool down the hot electrons in a short time, however, the X-ray emission is observed to be persistent. Therefore, there must be an efficient energy transfer mechanism from the disk to these electrons. Although the exact nature of this process is still unclear, there exists an observational result that can shed light on it: the nonlinear logarithmic relation between X-ray and UV luminosity, that can be parameterized as

$$\log(L_X) = \alpha \cdot \log(L_{UV}) + \beta \quad (1)$$

with  $\alpha \simeq 0.6$ . Known for 30 years, it has recently drawn attention since it has been shown that the high observed dispersion ( $\geq 0.35$  dex) can be significantly reduced, down to  $\sim 0.23$  dex, by accurately taking into account observational effects; it has been proven that the intrinsic dispersion of the relation (1) is much lower,  $\leq 0.15$  dex.

This finding reveals that there must be a tight link between the disk and the Corona; furthermore, the non-linearity of the relation makes it possible to use quasars as standard candles. However, many questions about this powerful tool are still open.

In former studies, relation (1) has been studied employing the monochromatic 2 keV and 2500 Å luminosities as proxies of the X-ray and UV luminosities, respectively. Since the reasons behind these choices are mainly historical, in this thesis we analyzed whether these quantities are actually the *right* ones or if they are merely proxies of the real physical quantities linked by the still not understood physical process.

We worked on a sample of  $\sim 2000$  quasars, accurately selected to avoid observational biases. These objects have available UV spectra from the Sloan Digital Sky Survey (DR14) and X-ray spectra from the 4XMM-DR9 catalogue of XMM-Newton sources.

We performed a complete UV spectral analysis of each source in our sample, using the IDL package QSFIT. We tested relation (1) using, as  $L_{UV}$ , several different indicators, such as monochromatic luminosities at different wavelengths, broad band near-UV luminosity and luminosities of broad emission lines, such as MgII. We found out that the MgII line luminosity works as the best UV proxy for  $L_{UV}$ .

Regarding the X-ray luminosity, we found that the best X-ray proxy is the monochromatic 1 keV luminosity. Implementing the MgII line luminosity as  $L_{UV}$  and the monochromatic 1 keV luminosity as  $L_X$ , the observed dispersion of the  $L_X - L_{UV}$  relation decreases down to  $\sim 0.17$  dex.

We also studied possible relations with other spectral properties and found a significant correlation between the X-ray luminosity and the Full Width at half maximum (FWHM) of the MgII emission line.

In the second part of this work, we carried out an accurate analysis of the contributions to the observed dispersion. We showed that the residual dispersion can be fully explained with the contributions of the X-ray variability, X-ray observational issues and the effect of the inclination of the accretion disk with respect to the line of sight. Therefore, the *intrinsic* dispersion of the  $L_X - L_{UV}$  relation must be very low, possibly close to zero. This corroborates the use of quasars as standard candles and validates the cosmological results that come from their implementation.

These results imply that a tight physical relation exists between the accretion disk and the hot “Corona”, holding over more than five decades in luminosity and at all observed redshifts, and with a negligible intrinsic dispersion.

Besides their obvious relevance for the physics of quasars, our results have important application on the determination of the distance-redshift relation (the so-called “Hubble diagram”). We used the average distance determination from our complete analysis to test the standard cosmological model, finding a strong tension with a flat- $\Lambda$ CDM model in the redshift range 0.38-2.58.

# Misure precise delle distanze cosmologiche mediante i quasar

Candidata: Matilde Signorini (matilde.signorini1@stud.unifi.it)

Relatore: Prof. Guido Risaliti (guido.risaliti@unifi.it)

I Nuclei Galattici Attivi emettono su un ampio intervallo dello spettro elettromagnetico, che va dalle lunghezze d'onda radio a quelle X. L'origine di questa emissione è da ricercarsi in un disco di accrescimento otticamente spesso che si trova intorno a un buco nero supermassivo. L'emissione da parte di questo disco ha il suo massimo nell'ottico-ultravioletto. L'emissione nei raggi X si ritiene sia prodotta da processi di scattering Compton inverso su fotoni ultravioletti provenienti dal disco, da parte di un plasma di elettroni caldi chiamato "Corona". Questo processo di emissione dovrebbe raffreddare in breve tempo gli elettroni ma, al contrario, l'emissione X risulta essere costante nel tempo. Di conseguenza, deve esistere un meccanismo di trasferimento di energia dal disco (che è la fonte primaria di energia del Nucleo Galattico Attivo) alla "Corona". L'esatta natura di questo meccanismo è ancora sconosciuta; tuttavia, vi è un risultato che può aiutare a comprenderla: vi è infatti l'evidenza osservativa di una relazione non lineare tra la luminosità X e quella UV, che può essere parametrizzata come:

$$\log(L_X) = \alpha \cdot \log(L_{UV}) + \beta$$

con  $\alpha \simeq 0.6$ . L'esistenza di questa relazione è nota da più di 30 anni; tuttavia, solo recentemente è stata fonte di particolare interesse, dal momento che è stato dimostrato che l'elevata dispersione osservata ( $\geq 0.35$  dex) può essere ridotta in maniera significativa, fino a  $\sim 0.23$  dex, attraverso un processo di selezione del campione di quasar che tenga conto in maniera accurata di possibili effetti osservativi. Inoltre, è stato dimostrato che la dispersione intrinseca della relazione è molto minore di quella osservata,  $\leq 0.15$  dex.

Questi risultati mostrano che deve esistere uno stretto legame tra il disco di accrescimento e la "Corona"; inoltre, la non linearità della relazione permette di utilizzare i quasar come candele standard. Rimangono, però, diverse questioni aperte riguardo a questo metodo.

Nei precedenti studi, la relazione (1) è stata analizzata utilizzando come indicatore della luminosità ultravioletta la luminosità monocromatica a  $2500\text{\AA}$  e, come indicatore della luminosità X, la luminosità monocromatica a  $2\text{ keV}$ . Poiché le motivazioni dietro la scelta di queste due quantità sono prevalentemente storiche, in questo lavoro di tesi ho analizzato se queste fossero effettivamente le scelte migliori o se invece potessero esistere indicatori più appropriati per la descrizione della relazione  $L_X - L_{UV}$ .

Ho eseguito la mia analisi partendo da un campione di  $\sim 2000$  quasar, selezionati accuratamente in modo da evitare possibili effetti di selezione. Si tratta di sorgenti per cui sono disponibili osservazioni in banda UV nel catalogo della Sloan Digital Sky Survey (DR14) e osservazioni in banda X

nel catalogo 4XMM-DR9 del satellite XMM-Newton.

Ho eseguito un'analisi spettrale completa per ogni sorgente del campione, utilizzando il codice QSFit. Ho analizzato la relazione (1) utilizzando, come  $L_{UV}$ , vari indicatori, come le luminosità monocromatiche a varie lunghezze d'onda e le luminosità di righe di emissione come il MgII. Dall'analisi è emerso che la luminosità del MgII è il miglior indicatore per la  $L_{UV}$ .

Riguardo la luminosità X, ho svolto un'analisi analoga il cui risultato è stato che il miglior indicatore per  $L_X$  risulta essere la luminosità monocromatica a 1 keV. Implementando questi due nuovi indicatori per  $L_{UV}$  e  $L_X$  si ottiene a una significativa riduzione della dispersione media, che passa da 0.23 dex a 0.16 dex.

Inoltre, ho analizzato possibili ulteriori correlazioni tra quantità spettrali; emerge una significativa correlazione tra la luminosità X e la larghezza a metà altezza della riga di emissione del MgII.

Nella seconda parte del mio lavoro di tesi, ho analizzato nel dettaglio i fattori che contribuiscono alla dispersione residua della relazione tra luminosità. Ho mostrato come questa dispersione possa essere completamente spiegata dalla somma quadratica di questi contributi osservativi, ovvero, la variabilità X, le problematiche osservative in X e l'effetto dell'inclinazione del disco di accrescimento del quasar rispetto alla linea di vista. Di conseguenza, la dispersione *intrinseca* della relazione  $L_X - L_{UV}$  deve avere un valore estremamente piccolo, vicino a zero. Questo risultato corrobora l'uso dei quasar come candele standard e di conseguenza valida i risultati cosmologici che si possono ricavare dalla loro implementazione.

I risultati di questo lavoro confermano che debba sussistere una relazione fisica molto stretta tra il disco di accrescimento e la Corona X nei quasar, che sussiste per più di cinque ordini di grandezza in luminosità e a tutti i redshift osservati. Inoltre, questa relazione deve avere una dispersione intrinseca prossima allo zero.

Oltre all'ovvia rilevanza di questi risultati per lo studio della fisica dei quasar, questi presentano un'importante applicazione per l'analisi della relazione distanza-redshift (noto generalmente come "Diagramma di Hubble"). Ho utilizzato la relazione per stimare la distanza di ogni oggetto del campione e ho confrontato i risultati osservativi con le previsioni del modello cosmologico standard. Emerge una forte tensione rispetto a un modello  $\Lambda$ CDM piatto, nell'intervallo di redshift 0.38-2.58.