



Il Colle di  
Galileo

# Cosmic Duets: il primo campione statistico di dual e lensed AGN

*Cosmic Duets: the first statistical sample of dual and lensed AGN*

Martina Scialpi

Università di Firenze, via G. Sansone 1, 50019 Sesto F.no, Firenze, Italy

INAF – Osservatorio Astrofisico di Arcetri, Largo E. Fermi 5, 50125, Firenze, Italy

Università di Trento, Via Sommarive 14, I-38123 Trento, Italy

**Sommario.** Il progetto *Cosmic Duets* sfrutta l'elevata risoluzione angolare di Gaia per selezionare AGN multipli e combina spettroscopia a bassa e alta risoluzione spaziale per distinguere sistemi di buchi neri supermassicci doppi da quelli lensati gravitazionalmente, con separazioni sub-arcsec. Un *Large Program* di 138 ore con MUSE al VLT consentirà di osservare 150 sistemi per misurare masse, luminosità e separazioni dei buchi neri doppi, stimare la *dual fraction* e fornire vincoli osservativi sul tasso di eventi di onde gravitazionali che ci aspettiamo di detectare con la missione spaziale LISA. Inoltre, i sistemi lensati osservati in questo programma permetteranno di studiare in dettaglio la struttura interna delle galassie lente, vincolare la distribuzione di materia barionica e oscura e stimare la funzione iniziale di massa stellare.

**Parole chiave:** astronomia extragalattica, nuclei galattici attivi, spettroscopia, onde gravitazionali, lensing gravitazionale.

Lo studio dei sistemi binari di buchi neri supermassicci ha assunto un ruolo centrale per comprendere l'evoluzione delle galassie e la produzione di onde gra-

**Abstract.** The *Cosmic Duets* project exploits Gaia's high angular resolution to select multiple AGN and combines low and high spatial resolution spectroscopy to distinguish dual AGN from those that are gravitationally lensed, with sub-arcsec separations. A *Large Program* of 138 hours with MUSE at the VLT will allow the observation of 150 systems to measure the masses, luminosities and separations of merging black holes, estimate the dual fraction and provide observational constraints on the rate of gravitational wave events anticipated with the LISA space mission. The lensed systems observed in this programme will also allow the detailed study of the internal structure of lens galaxies, constrain the distribution of baryonic and dark matter, and estimate the initial stellar mass function.

**Keywords:** extragalactic astronomy, active galactic nuclei, spectroscopy, gravitational waves, gravitational lensing.

vitazionali. In questo contesto si è sviluppato *Cosmic Duets*, un programma osservativo che utilizza diversi telescopi e strumenti spettroscopici per identificare e caratterizzare in modo sistematico e statistico dual e lensed Active Galactic Nuclei (AGN) nell'intervallo di redshift  $0.5 < z < 3.0$ .

Secondo il modello cosmologico  $\Lambda$ CDM, le galassie si formano ed evolvono attraverso fusioni gerarchiche: sistemi più piccoli si combinano per generare strutture più massicce, modificandone morfologia, formazione stellare e composizione chimica. Al centro di ogni galassia risiede un buco nero supermassiccio che si alimenta tramite accrescimento di gas. Quando due galassie si fondono, i rispettivi buchi neri entrano in orbita reciproca fino alla coalescenza, emettendo onde gravitazionali. Se entrambi sono attivi, il sistema prende il nome di dual AGN nel caso di separazioni dell'ordine del kiloparsec o di un binary AGN in caso di separazioni dell'ordine del parsec. Questi sistemi rappresentano tra le principali sorgenti di onde gravitazionali a bassa frequenza, rilevabili dagli esperimenti Pulsar Timing Arrays (PTA) e, in futuro, dalla missione spaziale Laser Interferometer Space Antenna (LISA).

La selezione dei candidati avviene mediante il metodo Gaia Multi Peak (GMP), sviluppato per sfruttare l'elevata risoluzione angolare del satellite Gaia. Questa tecnica consente di identificare componenti multiple come picchi distinti nel profilo di luce, individuando sistemi con separazioni comprese tra  $0.1''$  e  $0.7''$ . Tali sistemi possono corrispondere a dual AGN, a immagini multiple di un singolo AGN lensato gravitazionalmente, oppure ad allineamenti casuali tra un AGN e una stella.

Gli allineamenti casuali tra un AGN e una stella rappresentano casi di con-

The study of dual Active Galactic Nuclei (AGN) has taken on a central role in understanding the evolution of galaxies and the production of gravitational waves. This is the context in which *Cosmic Duets*, an observational program that uses various telescopes and spectroscopic instruments to systematically and statistically identify and characterise dual and lensed AGN in the redshift range  $0.5 < z < 3.0$ , was developed.

According to the  $\Lambda$ CDM cosmological model, galaxies form and evolve by means of hierarchical mergers: smaller systems combine to generate more massive structures, altering their morphology, stellar formation and chemical composition. At the centre of every galaxy there is a supermassive black hole that feeds on gas accretion and mergers with other black holes. When two galaxies merge, their respective black holes enter into mutual orbit until they coalesce, emitting gravitational waves. If both are active, the system manifests itself as a dual AGN for separations within the range of kiloparsecs or as a binary AGN for separations within the range of parsecs. These systems are the parent population of the main sources of low-frequency gravitational waves, detectable by Pulsar Timing Array (PTA) experiments and, in the future, by the Laser Interferometer Space Antenna (LISA) space mission.

Candidates are selected using the Gaia Multi Peak (GMP) method, developed to exploit the high angular resolution of the Gaia satellite. This technique allows the identification of multiple components as distinct peaks in the light profile, detecting systems with separations between  $0.1''$  and  $0.7''$ . Such systems may correspond to dual AGN, multiple images of a single gravitationally lensed AGN, or random alignments between an AGN and a star.

taminazione che devono essere accuratamente identificati ed esclusi dall'analisi, mentre i sistemi lensati costituiscono, al contrario, un'importante opportunità scientifica. Il lensing gravitazionale, previsto dalla relatività generale, agisce amplificando e distorcendo la luce della sorgente di fondo, e permette così di indagare in dettaglio la struttura interna delle galassie lente, soprattutto se le separazioni delle immagini sono così piccole ( $<0.7''$ ). Attraverso queste osservazioni è possibile misurare con elevata precisione la massa racchiusa entro il raggio di Einstein, stimare il rapporto massa-luminosità e derivare la funzione iniziale di massa stellare (IMF), fornendo vincoli stringenti sulla distribuzione della materia barionica e oscura. Inoltre, lo studio statistico di un campione ampio di sistemi lensati consente di esplorare l'evoluzione delle proprietà delle galassie lente con il redshift, contribuendo a una migliore comprensione della formazione e crescita delle strutture nell'universo.

### Osservazioni e risultati

Il progetto combina due fasi principali: una fase di spettroscopia non risolta spazialmente, necessaria per determinare redshift e identificare contaminanti stellari, e una seconda fase di spettroscopia ad alta risoluzione spaziale per caratterizzare in dettaglio le componenti multiple.

La prima fase ha impiegato circa 500 ore di tempo osservativo presso il Telescopio Nazionale Galileo (TNG) alle Isole Canarie con lo spettrografo DOLO-

Random alignments between an AGN and a star represent cases of contamination that must be carefully identified and excluded from the analysis, while lensed systems, on the other hand, constitute an important scientific opportunity.

Gravitational lensing, predicted by general relativity, amplifies and distorts the light from the background source, allowing us to investigate the internal structure of lens galaxies in detail, especially when the image separations are so small ( $<0.7''$ ). Via these observations, it is possible to very accurately measure the mass enclosed within Einstein's radius, estimate the mass-luminosity ratio, and deduce the initial stellar mass function (IMF), providing stringent constraints on the distribution of baryonic and dark matter. Moreover, the statistical study of a broad sample of lensed systems allows us to explore the evolution of the properties of lens galaxies with redshift, contributing to a better understanding of the formation and growth of structures in the universe.

### Observations and results

The project combines two main phases: a spatially unresolved spectroscopy phase, which is necessary to determine redshift and identify stellar contaminants, and a second phase of high spatial resolution spectroscopy to characterise the multiple components in detail.

The first phase took approximately 500 hours of observation time at the Galileo National Telescope (TNG) in the Canary Islands using the DOLORES spectrograph, the New Technology

RES, il New Technology Telescope (NTT) a La Silla con EFOSC2 e il Very Large Telescope (VLT) a Paranal con FORS2. Queste osservazioni hanno permesso di costruire un catalogo di oltre 600 AGN multipli e di selezionare i candidati prioritari per follow-up ad alta risoluzione. Grazie a questo ampio campione e alla copertura in redshift, stiamo stimando la dual fraction, ovvero la frazione di AGN doppi rispetto agli AGN singoli in funzione del redshift. Questo parametro osservativo è fondamentale per quantificare la frequenza delle fusioni tra galassie e buchi neri supermassicci nel tempo cosmico e per confrontare direttamente i risultati con modelli teorici e simulazioni cosmologiche.

La seconda fase si avvale di strumenti ad alta risoluzione spaziale per distinguere tra sistemi doppi e lensati. Tre lavori scientifici hanno presentato il campione più esteso finora pubblicato di AGN multipli a separazioni sub-arcsec (Scialpi et al. 2024; Ciurlo et al. 2023; Mannucci et al. 2023). A supporto di questa attività è stato ottenuto un Large Program di 138 ore con MUSE (Multi Unit Spectroscopic Explorer), lo spettrografo a campo integrale del VLT, che consentirà di osservare 150 sistemi con ottica adattiva. Le differenze in redshift, flusso, profili di riga e la presenza di linee di assorbimento strette in uno solo degli spettri costituiscono una firma osservativa chiave per identificare veri sistemi doppi rispetto a immagini multiple prodotte da lenti gravitazionali. Circa un quarto del campione è già stato osservato, con il completamento previsto entro il 2027 (in Figura 1 sono mostrati esempi di dati ottenuti con MUSE).

Telescope (NTT) in La Silla with EFOSC2, and the Very Large Telescope (VLT) in Paranal with FORS2. These observations have made it possible to build a catalogue of over 600 multiple AGN and to select priority candidates for high-resolution follow-up. Thanks to this large sample and redshift coverage, we are estimating the dual fraction, the fraction of dual AGN compared to single AGN in relation to redshift. This observational parameter is fundamental for quantifying the frequency of mergers between galaxies and supermassive black holes in cosmic time and for directly comparing the results with theoretical models and cosmological simulations.

The second phase uses high spatial resolution instruments to distinguish between double and lensed systems. Four scientific papers have presented the most extensive sample of multiple AGN at sub-arcsec separations published to 2024 ; Mannucci et al. 2022, Ciurlo et al. 2023; Mannucci et al. 2023, Scialpi et al. 2024). To support this activity, a Large Program of 138 hours was obtained with MUSE (Multi Unit Spectroscopic Explorer), the VLT's integral field spectrograph, which will allow the observation of 150 systems with adaptive optics. Differences in redshift, flux, line profiles, and the presence of narrow absorption lines in only one of the spectra are a key observational signature for identifying true double systems as opposed to multiple images produced by gravitational lenses. About a quarter of the sample has already been observed, with completion expected by 2027. Figure 1 shows examples of data obtained with MUSE, and the first-year data from the observations can be found in Scialpi et al. (2025).

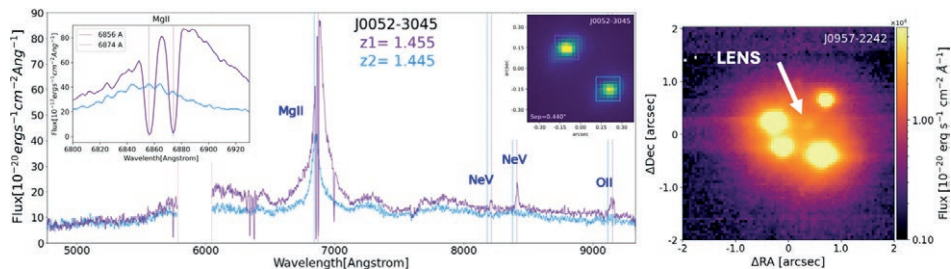


Figura 1. Dati ottenuti con MUSE/VLT. A sinistra: immagine composta di J0052-3045, risultante dalla somma di tutte le lunghezze d'onda, con sovrapposte le aperture quadrate utilizzate per estrarre gli spettri delle due componenti, come indicato nella mappa (Scialpi et al. 2024). A destra: configurazione quadrupla di un AGN lensed, con la galassia lente visibile al centro, osservata nel Large Program MUSE.

Figure 1. Data obtained with MUSE/VLT. Left: composite image of J0052-3045, resulting from the sum of all wavelengths, with the square apertures used to extract the spectra of the two components superimposed, as indicated on the map (Scialpi et al. 2024). Right: quadruple configuration of a lensed AGN, with the lens galaxy visible in the centre, observed in the Large MUSE Programme (Scialpi et al. 2025).

## Prospettive

L'obiettivo principale del progetto *Cosmic Duets* è quantificare con precisione le proprietà fisiche e statistiche della popolazione di dual AGN. Tra i parametri analizzati figurano le masse dei buchi neri, le luminosità bolometriche, i rapporti di Eddington, le separazioni spaziali tra le componenti e la loro distribuzione in funzione del redshift. Un aspetto cruciale è la misura della dual fraction, ovvero la frazione di dual AGN rispetto agli AGN singoli al variare del redshift, che

## Prospects

The main aim of the *Cosmic Duets* project is to accurately quantify the physical and statistical properties of the dual AGN population. The parameters analysed include black hole masses, bolometric luminosities, Eddington ratios, spatial separations between components as well as their distribution as a function of redshift. A key aspect is the measurement of the dual fraction, i.e. the fraction of dual AGN compared to single AGN, which constitutes a direct observational constraint on theoretical models of supermassive black hole coalescence, with current predictions differing by up to two orders of magnitude.

These data offer a robust observational reference for estimating the rates of gravitational wave events resulting from the merger of supermassive black holes and for directly comparing observations with cosmological simulations, improving our understanding of galactic evolution and black holes growth. In this context, the *Cosmic Duets* project represents a strategic and innovative step in the scientific preparation of the LISA (Laser Interferometer Space Antenna) space mission.

The results are essential for interpreting gravitational wave sources from supermassive black hole mergers, refining mission predictions, and expanding our knowledge of the most extreme dynamics in the universe.

At the same time, the study of lensed systems allows extremely accurate measurements of the mass inside the Einstein radius and detailed characterisation of the distribution of dark

costituisce un vincolo osservativo diretto per i modelli teorici di coalescenza di buchi neri supermassicci, i quali attualmente presentano previsioni che differiscono fino a due ordini di grandezza.

Questi dati forniscono un riferimento osservativo solido per stimare i tassi di eventi di onde gravitazionali derivanti dalla fusione di buchi neri supermassicci e per confrontare direttamente le osservazioni con modelli teorici e simulazioni cosmologiche, migliorando la nostra comprensione dell'evoluzione galattica e della crescita dei buchi neri. In questo contesto, il progetto *Cosmic Duets* rappresenta un tassello strategico e innovativo nella preparazione scientifica della missione spaziale LISA (*Laser Interferometer Space Antenna*). I risultati ottenuti sono infatti fondamentali per l'interpretazione delle sorgenti di onde gravitazionali prodotte dalla fusione di buchi neri supermassicci, consentendo di raffinare le previsioni scientifiche della missione e di ampliare le nostre conoscenze sulle dinamiche più estreme dell'universo.

Parallelamente, lo studio dei sistemi lensati consente di ottenere misure estremamente accurate della massa racchiusa entro il raggio di Einstein e di caratterizzare in dettaglio la distribuzione della materia oscura e barionica nelle galassie lente. L'analisi di questi sistemi offre inoltre un'opportunità unica per investigare la funzione iniziale di massa stellare delle galassie, un parametro fondamentale per comprendere i processi di formazione ed evoluzione stellare in ambienti cosmologici differenti.

and baryonic matter in lens galaxies. The analysis of these systems also offers a unique opportunity to investigate the initial stellar mass function of galaxies, a key parameter for understanding the processes of star formation and evolution in different cosmological environments.

I am a third-year PhD student in astrophysics at the University of Florence, in collaboration with Arcetri Astrophysical Observatory, as part of the *Space Science and Technology* PhD programme at the University of Trento. I work mainly on the identification and characterisation of dual and lensed AGN systems, with the aim of studying the evolution of supermassive black holes and their host galaxies. I have experience in analysing optical and near-infrared spectroscopic data, and in managing large astronomical catalogues. I have also coordinated several observational proposals as Principal Investigator, including a Large Program at the Very Large Telescope.

Sono una dottoranda al terzo anno in astrofisica presso l'Università di Firenze, in collaborazione con l'Osservatorio Astrofisico di Arcetri, nell'ambito del corso di dottorato *Space Science and Technology* dell'Università di Trento. Mi occupo principalmente dell'identificazione e caratterizzazione di sistemi di AGN doppi e lensati, con l'obiettivo di studiare l'evoluzione dei buchi neri supermassicci e delle loro galassie ospiti. Ho esperienza nell'analisi di dati spettroscopici ottici e nel vicino infrarosso, oltre che nella gestione di grandi cataloghi astronomici. Ho inoltre coordinato diverse proposte osservative come Principal Investigator, incluso un Large Program al Very Large Telescope.