



Universiteit
Leiden
The Netherlands

From a biased perspective: quasars, mergers, and planet-forming discs

Pizzati, E.

Citation

Pizzati, E. (2025, October 29). *From a biased perspective: quasars, mergers, and planet-forming discs*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/4281578>

Version: Publisher's Version

License: [Licence agreement concerning inclusion of doctoral thesis in the Institutional Repository of the University of Leiden](#)

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/4281578>

Note: To cite this publication please use the final published version (if applicable).

RIASSUNTO IN ITALIANO

La ricerca in astrofisica progredisce spesso intrecciando contributi provenienti da diversi ambiti: osservazioni e teoria, fenomeni su piccola e grande scala, e talvolta persino ambiti del tutto differenti. Questo lavoro di tesi è un modesto tentativo di navigare queste diverse dimensioni. Riunisce sei studi condotti in collaborazione con colleghi, che spaziano dal clustering dei quasar su larga scala e dalla crescita dei buchi neri supermassicci, alla scoperta di nuove possibili popolazioni di nuclei galattici attivi (AGN) nell'era del James Webb Space Telescope (JWST), fino alle sfide poste dall'astronomia delle onde gravitazionali e dalla fisica dei dischi in cui si formano i pianeti. Nonostante la loro diversità, questi studi condividono un obiettivo comune: sviluppare modelli e metodi che colleghino teoria e osservazione, e utilizzarli come strumenti per interpretare dati che spesso contraddicono le aspettative e talvolta ci costringono a rivedere ipotesi di lunga data.

Il clustering dei quasar e la crescita dei buchi neri supermassicci

I quasar sono i segnali visibili della crescita dei buchi neri supermassicci. Alimentati dal gas che precipita verso i buchi neri supermassicci al centro delle galassie, rilasciano quantità straordinarie di energia che li rendono osservabili a miliardi di anni luce di distanza. Ogni quasar osservato rivela un buco nero colto nell'atto di accrescere materia, offrendo una prospettiva diretta su come questi giganti si siano formati ed evoluti quando l'Universo era ancora giovane.

La distribuzione dei quasar nello spazio non è affatto uniforme. Alcune regioni sono densamente popolate di quasar, altre quasi vuote. Questo fenomeno, chiamato *clustering*, riflette la struttura sottostante degli aloni di materia oscura e contiene informazioni sulle regioni che alimentano la crescita dei buchi neri. Studiando insieme la densità numerica, il clustering e la luminosità dei quasar, possiamo cercare di rispondere a domande fondamentali: con quale frequenza i buchi neri supermassicci sono attivi come quasar? Con quale rapidità crescono fino a raggiungere miliardi di masse solari? E come si collegano le popolazioni di quasar osservate in epoche cosmiche diverse in un quadro coerente di evoluzione dei buchi neri?

La prima serie di studi di questa tesi (*Capitoli 2, 3 e 5*) affronta questi interrogativi sviluppando modelli che collegano funzioni di luminosità e statistiche di clustering dei quasar, e legando la crescita dei buchi neri alla formazione delle strutture cosmiche nel modello cosmologico standard.

Il *Capitolo 2* affronta un enigma di lunga data: i quasar osservati circa 1,5 miliardi di anni dopo il Big Bang sembrano avere un livello di clustering più elevato di quanto atteso. Utilizzando grandi simulazioni cosmologiche,

ho sviluppato un modello che collega abbondanza e distribuzione spaziale dei quasar alle proprietà degli aloni di materia oscura. I risultati del modello suggeriscono che, se le osservazioni sono corrette, quasi tutti i quasar di quell'epoca risiedono negli aloni più massicci, con poca dispersione tra massa dell'alone e luminosità del quasar. Questo implica un legame sorprendentemente stretto tra i buchi neri supermassicci e gli aloni dove risiedono – molto più stretto di quanto osservato in epoche successive – e induce a domandarsi se i quasar evolvano in modi fondamentalmente diversi a diverse epoche cosmiche.

Il *Capitolo 3* estende questo modello a epoche ancora più remote, quando l'Universo aveva meno di un miliardo di anni, includendo insieme ai quasar anche le galassie rilevate da JWST. Utilizzando una delle più grandi simulazioni cosmologiche mai eseguite, ho riprodotto osservazioni chiave di entrambe le popolazioni, quasar e galassie. Il modello indica che i quasar a quei tempi erano attivi solo per una frazione minima del tempo totale di vita dell'Universo. Ciò contrasta nettamente con quanto osserviamo in epoche successive, quando i quasar sembrano brillare in quasi tutti gli aloni massicci, e accentua la tensione con la crescita rapida e quasi continua necessaria per formare così presto buchi neri di miliardi di masse solari. Riconciliare questa tensione resta una sfida cruciale: i buchi neri sono davvero così intermittenti nella loro attività e, se sì, come può una crescita così sporadica produrre le enormi masse dei buchi neri osservati nell'Universo giovane?

Il *Capitolo 5* compie un primo passo per affrontare direttamente queste domande, introducendo un modello evolutivo che segue i buchi neri supermassicci lungo tutta la storia cosmica. In questo modello, la crescita dei buchi neri è collegata direttamente allo sviluppo degli aloni in cui essi risiedono, integrando in modo coerente episodi di accrescimento e “merger”. Nonostante la sua semplicità, il modello riproduce osservazioni che vanno dall'epoca della reionizzazione fino al mezzogiorno cosmico, e rivela l'importanza di episodi di accrescimento rapidi nella formazione dei primi buchi neri supermassicci. Inoltre, fornisce una base flessibile per integrare in futuro nuovi dati osservativi.

Nel loro insieme, questi studi utilizzano i quasar come utili strumenti per tracciare l'accrescimento dei buchi neri supermassicci e il loro legame con la struttura a larga scala dell'Universo. Evidenziano sia i progressi compiuti sia le questioni che rimangono ancora aperte: i quasar offrono una visione diretta della crescita precoce dei buchi neri, ma i loro “pattern” di attività e il loro clustering continuano a sfidare la nostra comprensione dell'evoluzione dei buchi neri nell'Universo.

Nuove popolazioni di buchi neri nell'era di JWST?

Il lancio del telescopio spaziale JWST ha aperto una nuova finestra sull'Universo giovane. Grazie alla sua capacità di rilevare galassie deboli a grandi

distanze, ha rivelato sorgenti che erano invisibili ai telescopi precedenti. Tra le scoperte più sorprendenti vi è una popolazione di oggetti compatti e rossi, molti dei quali mostrano larghe linee di emissione che sono tipicamente associate a buchi neri attivi. Per il loro aspetto, queste sorgenti sono state soprannominate “little red dots” (letteralmente, “piccoli punti rossi”).

Ciò che rende questi oggetti notevoli non è solo il loro aspetto, ma la loro abbondanza. Dopo aver applicato una correzione per l’attenuazione causata da gas e polveri, molti di questi oggetti risultano luminosi quanto i quasar tradizionali, eppure vengono trovati in campagne osservative che coprono aree del cielo molto più piccole. Questo implica che debbano essere molto più comuni dei quasar con pari luminosità – una conclusione che, se confermata, rivoluzionerebbe le teorie correnti sulla frequenza dei buchi neri nell’Universo primordiale.

Nel mio lavoro ho confrontato queste nuove sorgenti con la popolazione di quasar “classici”, che sono luminosi nell’ultravioletto. I risultati mostrano che i *little red dots* superano in numero i quasar di un fattore molto grande che evolve rapidamente con il redshift. Anche il loro clustering rivela una chiara differenza: mentre i quasar si trovano in aloni molto massicci e sono quindi fortemente correlati spazialmente, i *little red dots* si distribuiscono come normali galassie “star-forming”. Questo indica che i *little red dots* non sono semplici quasar oscurati, ma piuttosto rappresentano una fase distinta della crescita dei buchi neri – o, in alcuni casi, che non sono affatto buchi neri ma semplici galassie.

Oltre i quasar: segnali di onde gravitazionali sovrapposti e la fisica dei dischi protoplanetari

Gli ultimi due studi di questa tesi si collocano al di fuori del dominio dei quasar. Il *Capitolo 6* è dedicato alle onde gravitazionali. Futuri rivelatori, come il Cosmic Explorer e l’Einstein Telescope, saranno in grado di osservare fusioni di buchi neri e stelle di neutroni con una sensibilità straordinaria. Questo aprirà nuove opportunità per studiare l’Universo, ma porterà anche nuove sfide. Una di queste è che verranno rilevati così tanti eventi che i loro segnali talvolta si sovrapporranno nel tempo. Quando ciò accade, i metodi standard di analisi possono non funzionare, introducendo bias nelle proprietà che inferiamo per le sorgenti che si stanno fondendo.

Usando simulazioni dettagliate, ho esplorato come i segnali sovrapposti influenzino la nostra capacità di misurare masse e altre proprietà delle binarie in fusione. I risultati mostrano che, se le fusioni avvengono entro meno di mezzo secondo l’una dall’altra, la sovrapposizione può distorcere in modo significativo i risultati. Se invece avvengono a più di un secondo di distanza, e se le informazioni delle pipeline di rilevamento vengono utilizzate nel modo corretto, i segnali possono ancora essere separati in modo affidabile. Questi

risultati sottolineano la necessità di nuove strategie di analisi in grado di gestire la complessità dei dati che i rivelatori di terza generazione forniranno.

Il *Capitolo 7* ritorna a un contesto astrofisico più familiare: i dischi di gas e polvere attorno a giovani stelle, le culle in cui nascono i pianeti. Una questione centrale in questo campo è il ruolo della turbolenza del gas, che influenza tutto: dal modo in cui il gas accresce sulla stella al modo in cui i grani di polvere si aggregano per formare pianeti. Misurare direttamente la turbolenza è difficile, ma un metodo promettente è dedurla dallo spessore verticale dello strato di polvere nei dischi.

Utilizzando osservazioni ad alta risoluzione dell'Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA), ho sviluppato modelli per stimare lo spessore della polvere confrontando come appaiono i gap nei dischi a diverse angolazioni di osservazione. Dove le condizioni lo permettono, i risultati indicano che la polvere è confinata in strati sottili, suggerendo bassi livelli di turbolenza e sollevando interrogativi importanti sul ruolo della turbolenza nell'evoluzione a lungo termine dei dischi protoplanetari.