

ALMA MATER STUDIORUM · UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

Dipartimento di Fisica e Astronomia “Augusto Righi”
Corso di Laurea in Fisica

Le galassie relic: preziosi reperti con più di 10 miliardi di anni

Relatore:
Prof. Carlo Nipoti

Presentata da:
Michela Vigilante

Anno Accademico 2023/2024

Indice

| | |
|---|-----------|
| Introduzione | 3 |
| 1 Proprietà note delle galassie relic | 6 |
| 1.1 Massa stellare | 7 |
| 1.2 Raggio efficace | 10 |
| 1.3 Dispersione di velocità stellare centrale | 11 |
| 1.4 Massa del buco nero centrale | 12 |
| 2 Leggi di scala delle galassie early type | 14 |
| 3 Formazione ed evoluzione delle galassie relic | 20 |
| Conclusioni | 23 |

Abstract

Le galassie relic, oggetti rari e affascinanti, rimaste "congelate" nel tempo per più di 10 miliardi di anni, offrono una preziosa chiave per svelare i segreti dell'universo e il processo di formazione galattica. Queste galassie, trovate nell'universo locale, si distinguono notevolmente dalle altre galassie per la struttura compatta, le popolazioni stellari estremamente vecchie e la presenza di buchi neri centrali ultramassicci. Studi approfonditi su galassie relic come NGC 1277, che è sorprendentemente povera di materia oscura, forniscono nuove informazioni sui processi fisici all'opera nelle prime epoche cosmiche. Comprendere la formazione e l'evoluzione di queste galassie peculiari aiuterà a comprendere meglio le condizioni e i processi che hanno portato alla formazione delle galassie nell'universo primordiale.

Introduzione

Questa tesi si occupa di una categoria peculiare di galassie massicce, dette galassie "relic" (termine che in inglese significa reperto o reliquia). Prima di esplorare l'importanza e l'interesse legato allo studio delle galassie relic, è fondamentale fornire un contesto adeguato. Il primo a stabilire una classificazione delle galassie fu Edwin Hubble, il quale individuò tre classi principali: ellittiche, spirali e irregolari. Le galassie ellittiche vennero ulteriormente classificate secondo un indice di ellitticità, che misura quanto la forma della galassia si discosta da una forma circolare. Le galassie a spirale, invece, vennero classificate in base a quanto i loro bracci sono avvolti attorno al nucleo centrale.

Hubble riteneva che una galassia nascesse come ellittica e successivamente evolvesse in una spirale. Per questo motivo, denominò le galassie ellittiche come "early-type" (ETGs) e le spirali come "late-type" (LTGs). Sebbene questa teoria sull'evoluzione delle galassie si sia rivelata errata (in generale le galassie non evolvono da ellittiche a spirali) la nomenclatura introdotta da Hubble è ancora in uso. Questo sistema di classificazione, noto come "Hubble tuning fork," rimane uno strumento fondamentale per la categorizzazione delle galassie nell'astronomia moderna. Le galassie ETGs comprendono galassie ellittiche e lenticolari, mentre le LTGs includono galassie a spirali e irregolari. Questa classificazione morfologica è strettamente legata alla formazione stellare all'interno delle galassie. Le LTGs sono caratterizzate da una continua formazione stellare e per questo motivo vengono classificate come galassie "che formano stelle" (SFGs). Al contrario, le ETGs sono considerate galassie quiescenti o passive, in quanto hanno formazione stellare debole o assente. Questo lavoro si concentrerà in particolare sulle galassie early-type. Un aspetto cruciale nello studio delle galassie ellittiche è la comprensione dei meccanismi che ne determinano la formazione. Esistono diversi approcci per indagare la formazione di una galassia, che possono essere raggruppati in due categorie principali: modelli teorici e osservazioni dirette.

Uno dei metodi principali consiste nell'ipotizzare modelli teorici che spiegano in modo dettagliato i processi fisici coinvolti nella formazione e nell'evoluzione delle galassie. Questi modelli possono essere sviluppati seguendo due strade principali: simulazioni cosmologiche idrodinamiche e modelli semi-analitici.

Un altro metodo consiste nell'osservazione diretta di questi oggetti, attraverso la quale è possibile raccogliere dati, come immagini e spettri, per derivare le loro proprietà

strutturali. Un esempio di questo approccio è il cosiddetto metodo del "look-back". Quest'ultimo consiste nell'osservazione di galassie a distanze cosmologiche. Poiché la luce viaggia a una velocità finita, i fotoni emessi dalle galassie più lontane ci raggiungono dopo un intervallo di tempo maggiore. Ciò significa che le galassie lontane appaiono oggi come erano nel passato. Pertanto, è possibile osservare direttamente l'evoluzione delle proprietà delle galassie se osserviamo galassie a distanze crescenti. L'assunzione fondamentale che rende possibile l'approccio look-back è che l'universo sia omogeneo su grandi scale, quindi le proprietà globali della popolazione galattica su volumi sufficientemente grandi sono indipendenti dalla posizione nell'universo. Questo implica che le galassie nel volume locale, in cui si trova la nostra galassia, sono rappresentative della popolazione generale delle galassie attuali. Analogamente, le galassie osservate in un volume distante sono considerate rappresentative della popolazione passata di galassie. Naturalmente, più un oggetto è lontano, come nel caso delle galassie ETGs a $z = 2$ (note anche come red nuggets), più è difficile osservarlo a causa della limitata disponibilità di dati spettroscopici e di strumenti con alta risoluzione spaziale.

Studi comparativi tra le proprietà delle ETGs a $z = 0$ e quelle a $z = 2$, rivelano differenze significative, soprattutto nelle dimensioni. In particolare, il raggio efficace, definito come il raggio entro il quale è contenuta metà della luce totale della galassia, risulta notevolmente diverso tra le due epoche. A parità di massa stellare, le ETGs a $z = 2$ risultano essere molto più compatte rispetto a quelle a $z = 0$. Questo suggerisce che, in una fase iniziale, le ETGs come le conosciamo oggi erano molto più compatte. Una spiegazione plausibile per questa evoluzione dimensionale ("*size-evolution*") risiede nei merging non-dissipativi (*dry merging*). Durante la loro evoluzione, le ETGs subiscono fenomeni di merging con altre galassie povere di gas freddo. Questo tipo di merging, che coinvolge galassie già prive di formazione stellare significativa, porta all'accrescimento di stelle e materia oscura dalle galassie coinvolte nel merging. Questi eventi di merging hanno l'effetto di rendere la galassia risultante meno densa, aumentando le sue dimensioni senza innescare nuova formazione stellare. Di conseguenza, la galassia diventa più diffusa, con un volume maggiore e una densità stellare inferiore rispetto alla sua fase iniziale. Questo processo contribuisce a spiegare perché le ETGs locali (a $z = 0$) sono significativamente meno compatte rispetto alle loro controparti ad alto redshift.

A causa della natura stocastica dei merging, si prevede inoltre che alcune di queste galassie evitino ogni interazione, rimanendo inalterate nel corso del tempo cosmico. Recentemente, è stata scoperta l'esistenza di galassie a $z = 0$ che non hanno subito accrescimento significativo di gas o stelle dalla loro formazione iniziale. Queste galassie, chiamate "galassie relic", presentano caratteristiche che differiscono notevolmente da quelle delle galassie quiescenti osservate alla stessa epoca (ovvero nell'universo presente). In termini di relazioni di scala, le galassie relic risultano veri e propri outliers, mostrando differenze significative rispetto alle ETGs. Strutturalmente e dinamicamente, esse sono più simili alle galassie compatte e massicce osservate a redshift elevato ($z > 2$). Infatti, si presentano come galassie compatte, con una popolazione stellare anziana e senza segni

di formazione stellare recente, e altra caratteristica interessante, ospitano buchi neri supermassicci, con massa significativamente maggiore rispetto alle altre galassie con massa stellare simile.

Trovare quindi un oggetto con queste caratteristiche nell'universo locale permette uno studio più da vicino e dettagliato delle ETGs a $z = 2$, il che comporta notevoli progressi nella comprensione dei primi passi nella formazione delle galassie

In questo lavoro si analizza un campione di galassie ETGs massicce e compatte, alcune delle quali sono già classificate come galassie relic, mentre altre sono state identificate come candidate galassie relic. Sulla base della loro morfologia, popolazione stellare e cinematica stellare, esse sembrano essere le discendenti delle ETGs ad alto redshift che abbiano subito evoluzione passiva fino al tempo presente. Maggiori dettagli sull'evoluzione delle galassie early-type e sulle galassie relic si possono trovare in [4], [14], [18], [1], da cui è stato tratto il materiale su cui si basa questa introduzione.

Capitolo 1

Proprietà note delle galassie relic

Le galassie relic rappresentano una finestra sul passato dell'universo. Queste galassie, che hanno terminato la loro formazione stellare miliardi di anni fa, ci offrono l'opportunità di studiare l'evoluzione galattica in uno stadio precoce. Questo capitolo si concentra sulle caratteristiche principali di queste galassie, ponendo una particolare attenzione a massa stellare M_* , raggio efficace R_e , dispersione di velocità stellare centrale σ_e e massa del buco nero centrale M_{BH} . Viene preso in esame un campione di 9 galassie ellittiche compatte: NGC 1277, NGC 1281, NGC 1270, NGC 1271, NGC 2767, PGC 32873, PGC 11179, UGC 2698, Mrk 1216. Tra queste Mrk 1216 e PGC 32873 sono classificate già come relic anche se le loro proprietà non sono estreme come quelle di NGC 1277 che risulta ampiamente studiata e considerata come l'archetipo delle galassie relic. Le altre galassie dello studio invece mostrano avere caratteristiche morfologiche e dinamiche strettamente simili alla popolazione di galassie massicce e passive a $z = 2$ e quindi offrono l'opportunità di ottenere una visione approfondita dei progenitori delle galassie più massicce di oggi. In Figura 1.1, sono riportate immagini delle galassie relic catturate dal telescopio Hubble Space Telescope (HST) della NASA/ESA.

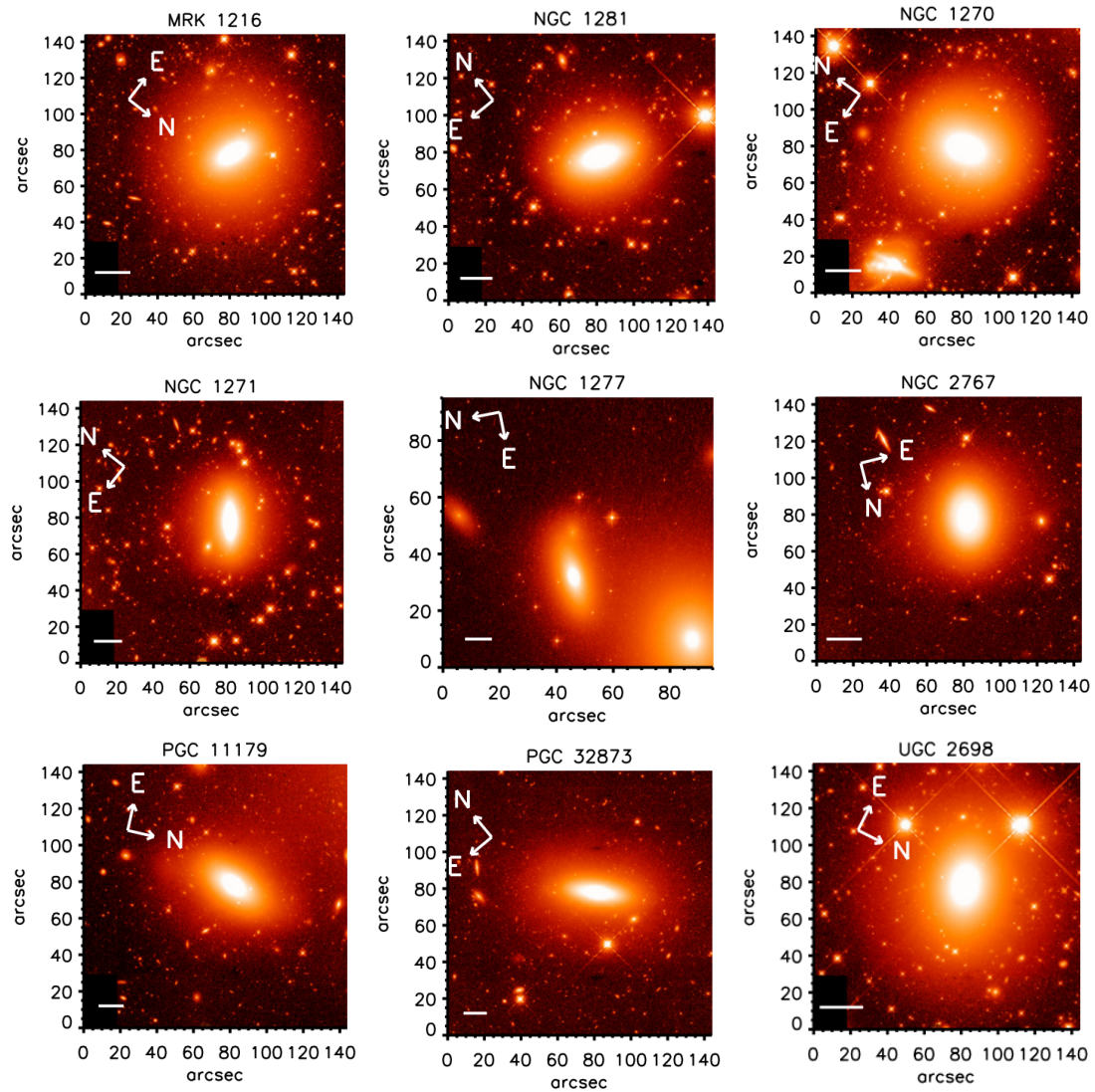


Figura 1.1: Insieme di immagini, tratte da [18], che mostrano le galassie analizzate catturate dal telescopio spaziale Hubble (HST)

1.1 Massa stellare

Una condizione necessaria affinché una galassia venga classificata come relic è la presenza di una popolazione stellare vecchia, senza traccia di formazione stellare recente. Le galassie relic studiate presentano solo stelle con più di 10 miliardi di anni, indicando che la loro formazione si è conclusa in tempi molto antichi. Per capire come la loro massa stellare sia stata costruita nel tempo si fa riferimento alla storia di formazione stellare

(star formation history; SFH). Le galassie analizzate mostrano tutte storie di formazione stellare molto simili, con la maggior parte delle stelle formatesi in un evento rapido e precoce, con tempi di formazione brevi, dell'ordine di centinaia di milioni di anni. Nel caso di NGC 1277, la formazione stellare è stata estremamente rapida, con oltre il 50% della massa stellare costruita entro i primi 0,5 miliardi di anni e il 90% prima che fosse trascorso 1 miliardo di anni. Questo implica che la galassia si sia formata in un tempo molto breve, dell'ordine di centinaia di milioni di anni.

PGC 32873 e Mrk 1216 mostrano storie di formazione simili, ma Mrk 1216 ha una fase di formazione che si estende di più nel tempo, arrivando a formare la sua massa circa 1 miliardo di anni più tardi rispetto a NGC 1277 e PGC 32873. Pertanto, mentre la formazione di NGC 1277 e PGC 032873 è stata estremamente rapida, Mrk 1216 ha avuto una fase di formazione stellare che si è protratta per un periodo più lungo. In Figura 1.3 è illustrata la SFH delle tre galassie descritte pocanzi.

Il profilo di densità stellare nelle galassie relic si ottiene analizzando il profilo di brillantezza superficiale [9].

Questo profilo descrive come la luminosità per unità di area varia in funzione della distanza dal centro della galassia, ed è fondamentale per comprendere la struttura interna e la distribuzione della massa stellare. Una descrizione comune di questi profili è data dalla legge di Sérsic [13]:

$$I(R) = I_e \exp \left\{ -b_n \left[\left(\frac{R}{R_e} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \right] \right\} \quad (1.1)$$

in cui $I(R)$ è la brillantezza superficiale a un dato raggio R dalla galassia, I_e è la brillantezza superficiale al raggio efficace R_e , n è l'indice di Sérsic, che determina la forma del profilo di brillantezza superficiale e b_n è una costante che si approssima come

$$b(n) = 2n - \frac{1}{3} + \frac{4}{405n} [5]. \quad (1.2)$$

Nel caso in cui $n = 4$ si ottiene la legge di de Vaucouleurs [8] e si ha $b(4) \approx 7.67$.

In Figura 1.2 è riportato il profilo di brillantezza superficiale di NGC 1277 normalizzata alla brillantezza superficiale al raggio efficace I_e , dove il raggio è normalizzato a R_e .

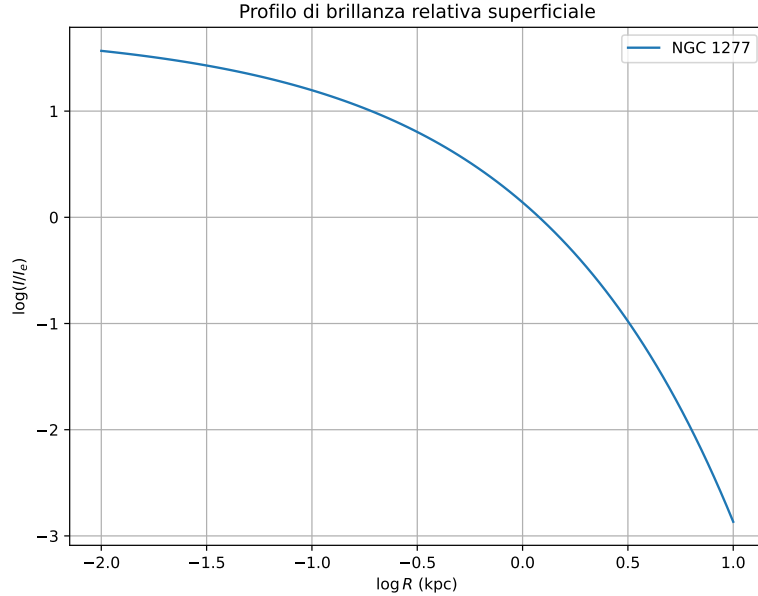


Figura 1.2: Profilo di brillantezza superficiale della galassia relic NGC 1277, con indice di Sérsic $n=2.2$ [15]

Le osservazioni mostrano che la distribuzione delle stelle in queste galassie è molto densa nelle regioni centrali, vicino al nucleo. Questo è in netto contrasto con ciò che si osserva nella maggioranza delle galassie quiescenti a $z = 0$, dove la distribuzione delle stelle è meno concentrata nel nucleo e più diffusa nelle regioni periferiche. In Tabella 1.1 vengono riportate le masse stellari osservate.

| Galassia | M_* ($10^{11} M_\odot$) | Ref |
|-----------|-----------------------------|------|
| NGC 1277 | 1.3 ± 0.3 | [9] |
| NGC 1281 | 1 ± 0.1 | [18] |
| NGC 1270 | 2.0 ± 0.5 | [18] |
| NGC 1271 | 1.2 ± 0.2 | [18] |
| NGC 2767 | 1.32 ± 0.3 | [18] |
| PGC 32873 | 2.3 ± 0.9 | [9] |
| UGC 2698 | 3.8 ± 0.1 | [18] |
| PGC 11179 | 2.3 ± 0.9 | [18] |
| Mrk 1216 | 2.0 ± 0.8 | [9] |

Tabella 1.1: Nella prima colonna sono riportati i nomi delle galassie oggetto dell’analisi, nella seconda colonna sono riportati i valori delle masse stellari espressi in unità di $10^{11} M_\odot$ con relative incertezze e nella terza colonna sono riportate le referenze.

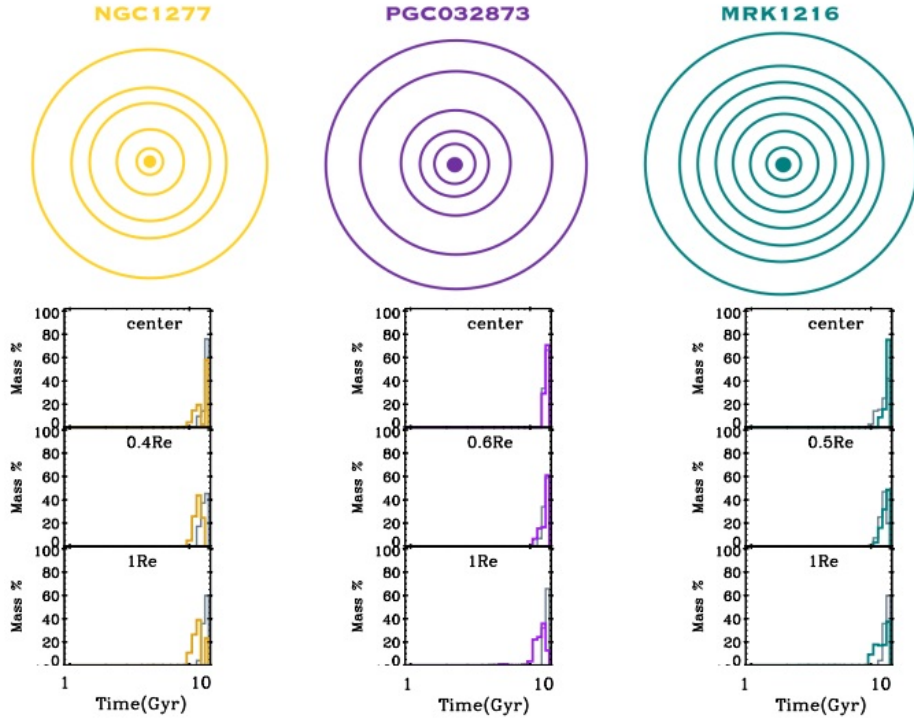


Figura 1.3: Storie di formazione stellare di NGC 1277, PGC 32873 e Mrk 1216, derivate per le aperture anulari, mostrate in alto, fino a $1 R_e$. Immagine tratta da [9].

1.2 Raggio efficace

Il raggio efficace definisce il raggio di un cerchio avente la stessa area dell'isofota¹ che contiene metà del flusso luminoso totale proveniente da una galassia. In altre parole, è il raggio entro cui è racchiusa metà della luminosità osservabile della galassia. Questo parametro fornisce informazioni importanti sulla distribuzione della luminosità e, di conseguenza, sulla distribuzione della massa stellare all'interno della galassia.

Nel caso delle galassie relic, si osserva che il loro raggio efficace è notevolmente inferiore rispetto a quello delle galassie quiescenti con massa stellare simile, osservate a redshift

¹Linea che collega punti di uguale brillantezza superficiale in una galassia. Quando si osserva una galassia la sua forma può essere descritta in modo quantitativo analizzando il modo in cui la brillantezza superficiale varia con la posizione rispetto al centro della galassia, nella mappa di brillantezza superficiale. Questo è noto come profilo di brillantezza superficiale. Le isofote sono linee che tracciano punti di uguale luminosità superficiale in questa mappa [4].

$z = 0$, il che le rende particolarmente compatte. Questo implica che una quantità significativa di luce è concentrata in una regione molto più piccola, suggerendo una densità stellare molto elevata. Una tale concentrazione di massa e luminosità nelle zone centrali è una delle caratteristiche distintive delle galassie relic, spesso osservata in galassie che non hanno subito accrescimenti via merging significativi dopo la loro formazione iniziale.

In Tabella 1.2 sono riportati i valori dei raggi efficaci delle galassie relic studiate,

| Galassia | R_e (kpc) | Ref |
|-----------|---------------|------|
| NGC 1277 | 1.2 ± 0.1 | [9] |
| NGC 1281 | 1.3 ± 0.1 | [18] |
| NGC 1270 | 1.9 ± 0.1 | [18] |
| NGC 1271 | 1.4 ± 0.1 | [18] |
| NGC 2767 | 1.9 ± 0.1 | [18] |
| PGC 32873 | 1.8 ± 0.2 | [9] |
| UGC 2698 | 3.1 ± 0.1 | [18] |
| PGC 11179 | 1.8 ± 0.1 | [18] |
| Mrk 1216 | 2.1 ± 0.1 | [9] |

Tabella 1.2: Nella prima colonna sono riportati i nomi delle galassie oggetto dell'analisi, nella seconda colonna sono riportati i valori del raggio efficace espressi in unità di kpc con relative incertezze e nella terza colonna sono riportate le referenze.

1.3 Dispersione di velocità stellare centrale

La dispersione di velocità stellare in una galassia ellittica rappresenta la distribuzione delle velocità delle stelle attorno alla velocità media della galassia, riflettendo le caratteristiche dinamiche e la massa totale del sistema. Le velocità delle stelle seguono generalmente una distribuzione simile ad una gaussiana, con la maggior parte delle stelle che si muove a velocità vicine al valore medio e una minoranza che si discosta significativamente da esso.

La dispersione di velocità è quantificata attraverso la deviazione standard della distribuzione, che indica quanto le velocità stellari si differenziano rispetto alla velocità media della galassia. Valori più elevati di σ indicano una maggiore varietà nelle velocità stellari, suggerendo una galassia più massiccia o con una buca di potenziale gravitazionale più profonda.

La dispersione di velocità centrale si riferisce alla distribuzione della componente lungo la linea di vista delle velocità stellari nelle regioni interne della galassia, tipicamente entro il raggio efficace.

Per determinare σ_e , si utilizzano spettri della luce integrata proveniente da tutte le stelle presenti nell'area osservata. Questo viene effettuato tramite spettroscopia a campo

integrale, che permette di raccogliere spettri in diverse posizioni della galassia. Analizzando le righe di assorbimento, come quelle del calcio, magnesio o sodio, si osservano gli allargamenti dovuti all'effetto Doppler, causati dal moto delle stelle. Questi allargamenti forniscono la distribuzione delle velocità lungo la linea di vista. Il valore di σ_e viene calcolato integrando la dispersione di velocità locale $\sigma_{\text{los}}(R)$ su tutta l'area considerata, ponderandola in base alla luminosità superficiale $I(R)$. La relazione matematica è espressa dalla seguente formula:

$$\sigma_e^2 = \frac{\int_{S_e} I(R) \sigma_{\text{los}}^2(R) dS}{\int_{S_e} I(R) dS} \quad (1.3)$$

Dove S_e rappresenta l'area di integrazione, tipicamente un'apertura circolare di raggio R_e [4].

Le galassie relic, in particolare, presentano profili di dispersione delle velocità con picchi molto elevati e con alte velocità lungo la linea di vista (relative alla velocità media). Quindi molte stelle si stanno muovendo rapidamente, il che conferma una dinamica interna con alto contenuto in energia cinetica e un forte campo gravitazionale centrale. In Tabella 1.3 sono riportati i valori della dispersione di velocità del campione di galassie.

| Galassia | σ_e (km s ⁻¹) | Ref |
|-----------|----------------------------------|------|
| NGC 1277 | 385±6 | [9] |
| NGC 1281 | 263±6 | [18] |
| NGC 1270 | 376±9 | [18] |
| NGC 1271 | 302±8 | [18] |
| NGC 2767 | 247±9 | [18] |
| PGC 32873 | 358±5 | [9] |
| UGC 2698 | 351±8 | [18] |
| PGC 11179 | 292±7 | [18] |
| Mrk 1216 | 368±3 | [9] |

Tabella 1.3: Nella prima colonna sono riportati i nomi delle galassie oggetto dell'analisi, nella seconda colonna sono riportati i valori delle dispersioni di velocità espressi in unità di km s⁻¹ con relative incertezze e nella terza colonna sono riportate le referenze.

1.4 Massa del buco nero centrale

È ormai noto che le galassie massicce quiescenti presentano buchi neri supermassicci (SM-BH) centrali [9]. Le galassie relic, invece, ospitano buchi neri ultramassicci (overmassive). Si è osservato che la massa del buco nero di una galassia relic è molto maggiore rispetto alla massa di un buco nero di una ETGs con massa stellare simile. Questa caratteristica si pensa che derivi dal loro peculiare percorso evolutivo. Infatti, durante l'evoluzione,

una grande quantità di gas viene consumata rapidamente per formare stelle e alimentare il buco nero centrale, che cresce fino a diventare estremamente massiccio. Come detto in precedenza, le galassie relic non hanno subito merging significativi con altre galassie. Questo è un aspetto cruciale: le ETGs si ritiene che evolvano principalmente attraverso processi di merging. Questo porterebbe ad un aumento della massa stellare senza un corrispondente aumento significativo della massa del buco nero centrale, poiché la massa accresciuta contribuirebbe alla formazione di nuove stelle piuttosto che all'accrescimento del buco nero. Le galassie relic evolvono essenzialmete in maniera passiva (senza formazione stellare né accrescimento) e il rapporto tra la massa del buco nero e la massa stellare risulta molto elevato rispetto a quanto si osserva nelle galassie che hanno subito merging frequenti. Per le galassie prese in esame si riportano i valori della massa del buco nero super massiccio in Tabella 1.4.

| Galassia | $M_{BH}(M_{\odot})$ | Ref |
|------------|----------------------|------|
| NGC 1277 | 5.0×10^9 | [15] |
| PGC 32873* | 2.0×10^9 | [18] |
| Mrk 1216 | 4.9×10^9 | [16] |
| NGC 1281* | 7.9×10^8 | [18] |
| NGC 1270* | 6.3×10^{10} | [18] |
| NGC 1271 * | 2.0×10^9 | [18] |
| NGC 2767* | 6.3×10^8 | [18] |
| UGC 2698 * | 4.0×10^9 | [18] |
| PGC 11179 | 1.9×10^9 | [6] |

Tabella 1.4: Nella prima colonna sono riportati i nomi delle galassie oggetto dell'analisi, nella seconda colonna sono riportati i valori della massa del buco nero centrale, espressi in unità di M_{\odot} con relative incertezze e nella terza colonna sono riportate le referenze. Le misure della massa dei buchi neri centrali sono state effettuate attraverso: misure spettroscopiche a campo integrale per Mrk 1216, misure a campo integrale ad alta risoluzione spaziale usando i modelli Schwarzschild e Jeans Anisotropic Modelling per NGC 1277, misura della massa dinamica del gas con ALMA per PGC 32873 e attraverso le relazioni scala $M_{BH} - \sigma_e$ per le galassie contrassegnate da un "*".

Capitolo 2

Leggi di scala delle galassie early type

Per le galassie early-type si trovano empiricamente diverse leggi di scala, relazioni che legano due a due (e non solo) i parametri che le caratterizzano. Nel seguito si prendono i parametri definiti nel precedente capitolo e studieremo le leggi scala che legano R_e - M_* , σ_e - M_* , M_{BH} - M_* e M_{BH} - σ_e . Queste leggi sono utili per comprendere meglio la struttura e la dinamica di queste galassie. Analizzare queste leggi di scala permette di fare delle considerazioni importanti sul loro comportamento fisico ed evolutivo. Una volta ricostruite le leggi di scala per le ETGs, possiamo calcolare la collocazione delle galassie relic in ciascuna delle relazioni prese in considerazione. Questo confronto permetterà di dimostrare come queste ultime si presentino come veri e propri *outliers* rispetto alle galassie massive quiescenti. Le galassie relic, con le loro caratteristiche uniche, spesso deviano significativamente dalle relazioni di scala tipiche delle ETGs. Questo confronto permette di evidenziare le peculiarità di queste galassie.

Per le relazioni R_e - M_* e σ_e - M_* in un lavoro pubblicato nel 2010 si è eseguito il fit su un campione di 73 ETGs prese da *SLACS surveys*¹, che si sono dimostrate essere rappresentanti delle ETGs massive [3]. Nelle seguenti relazioni si esprime la massa stellare in unità di M_\odot , la dispersione di velocità in unità di km s^{-1} , la massa del buco nero in unità di M_\odot e il raggio efficace in unità di kpc.

Si esamina la correlazione tra la massa stellare M_* e la dimensione R_e :

$$\log R_e = A_* + a_* \log M_*. \quad (2.1)$$

¹Progetto che combina i dati dello Sloan Digital Sky Survey (SDSS) con l'impareggiabile capacità di imaging ad alta risoluzione del telescopio spaziale Hubble per identificare e studiare un campione ampio e uniforme di galassie che presentano lenti gravitazionali forti [2].

Eseguendo il fit si ottengono i coefficienti $A_\star = 0.53$ e $a_\star = 0.81$ e, indicato con ϵ lo *scatter intrinseco*², si trova $\epsilon = 0.05$, corrispondente alla possibile variazione di $\log R_e$ a fissata M_\star . Questo tipo di legge di scala ci aiuta a capire come le dimensioni della galassia siano correlate alla quantità di materia stellare al suo interno.

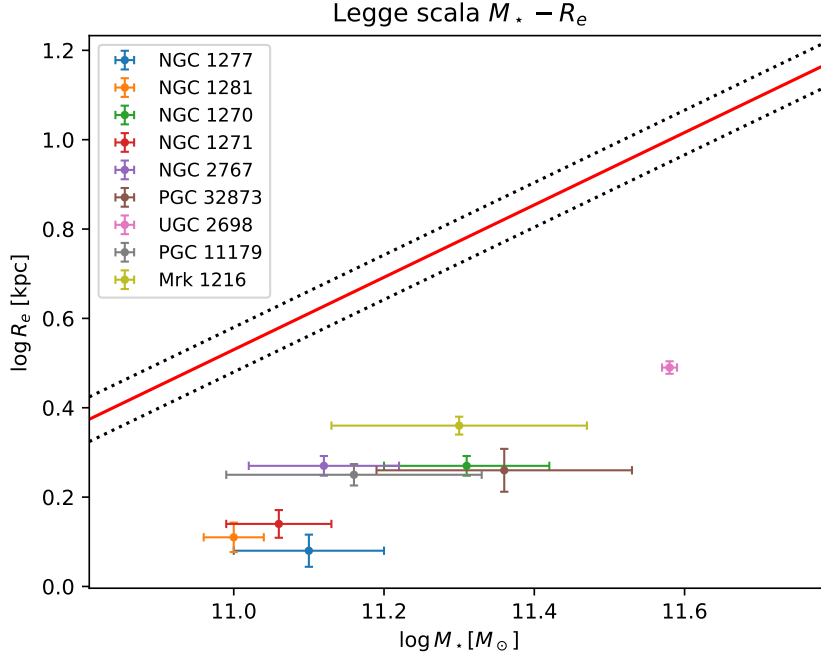


Figura 2.1: Relazione massa stellare-dimensione per il campione SLACS delle ETGs prese da [12]. In rosso è mostrato il fit, le linee nere tratteggiate delimitano lo scatter intrinseco, mentre i punti colorati rappresentano i plot delle galassie relic analizzate in questo studio.

In Figura 2.1, è rappresentato il fit ottenuto con le galassie ETGs, su cui sono state plottate anche le galassie relic esaminate. Già da una prima analisi, emerge chiaramente che queste galassie si distinguono come outliers rispetto alla relazione massa-dimensione delle galassie locali, mostrando proprietà più simili alle galassie a $z = 2$ [18]. Questo suggerisce che, a parità di dimensione, le galassie relic possiedono una massa stellare significativamente maggiore rispetto alle ETGs locali.

²Lo "scatter intrinseco" è la dispersione o la variazione naturale nelle proprietà osservate di oggetti astronomici che non può essere attribuita a errori di misurazione o a incertezze strumentali. Questo scatter rappresenta le differenze reali nei valori osservati, che possono essere causate da variazioni fisiche o intrinseche tra gli oggetti stessi.

Sempre per il campione di ETGs SLACS, Auger e collaboratori [3] trovano che la relazione che correla massa stellare e dispersione di velocità è data da:

$$\log M_* = B_* + b_* \log \sigma_e \quad (2.2)$$

con $b_* = 0.18$ e $B_* = 2.34$ ottenuti dal fit e con scatter intrinseco $\epsilon = 0.04$, corrispondente alla possibile variazione di $\log \sigma_e$ a fissata M_* , rappresenta una misura della velocità media di movimento delle stelle all'interno di una galassia. Questa legge di scala è fondamentale per comprendere la dinamica interna delle galassie e come la massa stellare è in relazione con la buca di potenziale gravitazionale della galassia. Nella figura

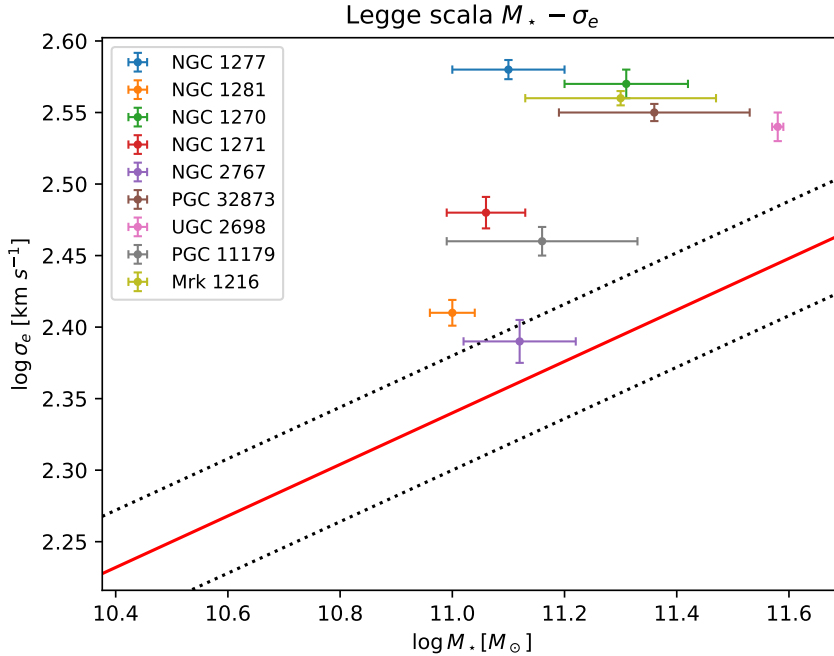


Figura 2.2: Relazione massa stellare-dispersione di velocità per il campione SLACS delle ETGs prese da [12]. In rosso è mostrato il fit, le linee nere tratteggiate delimitano lo scatter intrinseco, mentre i punti colorati rappresentano i plot delle galassie analizzate in questo studio.

2.2 è rappresentato il fit sulle ETGs con il plot delle galassie relic. La tendenza di queste galassie a fissata massa stellare è quella di avere una dispersione di velocità maggiore.

Per le relazioni seguenti, invece, il fit è si riferisce ad un campione di galassie "core ellipticals" e "power-law ellipticals" [12]. Le prime sono ellittiche in cui il profilo di brillantezza superficiale nella regione centrale mostra un deficit di luce rispetto a quanto

previsto dall'estrapolazione della legge di Sérsic, che descrive il profilo delle regioni esterne. Le seconde, invece, sono ellittiche in cui il profilo di brillantezza superficiale non mostra un deficit centrale. Al contrario, spesso si osserva un eccesso di luce centrale, dove il profilo è al di sopra dell'estrapolazione della legge di Sérsic valida per le regioni esterne [4].

La relazione che lega la massa del buco nero e la dispersione di velocità è data da

$$\log M_{BH} = B + b \log \sigma_e. \quad (2.3)$$

Eseguendo il fit Saglia e collaboratori [12] hanno ottenuto i coefficienti $B = 4.546$ e $b = -2.03$, con scatter intrinseco $\epsilon = 0.33$, corrispondente alla possibile variazione di $\log M_{BH}$ a fissata σ_e

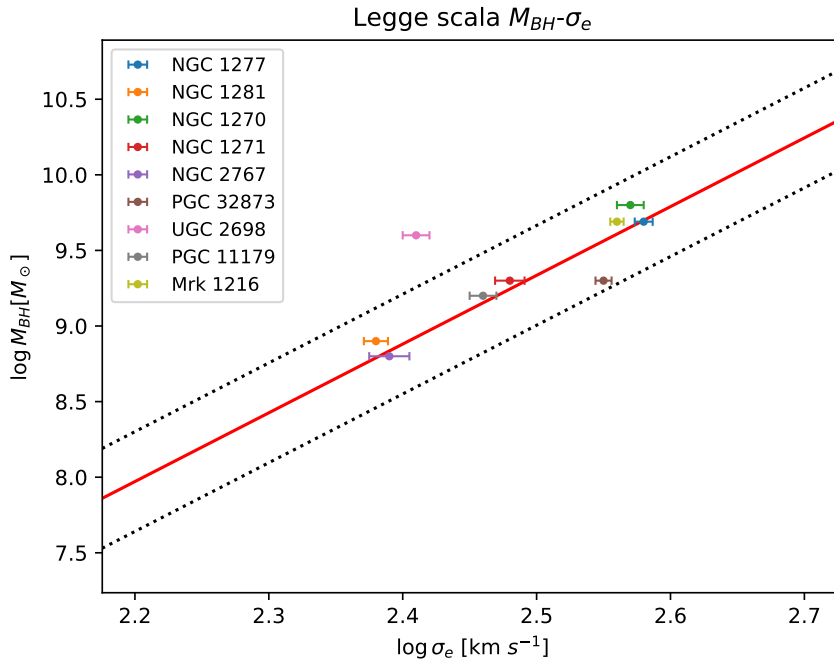


Figura 2.3: Relazione massa del buco nero e dispersione di velocità centrale per il campione SLACS delle ETGs prese da [12]. In rosso è mostrato il fit, le linee nere tratteggiate delimitano lo scatter intrinseco, mentre i punti colorati rappresentano i plot delle galassie analizzate in questo studio.

In Figura 2.3 è illustrata la relazione tra la massa del buco nero e la dispersione di velocità centrale. Questa relazione è un altro importante indicatore della dinamica galattica e mostra che le galassie con una maggiore dispersione di velocità tendono ad

avere buchi neri più massicci. Le galassie relic, in questo caso, seguono il legame empirico tra la massa del buco nero centrale e le proprietà dinamiche delle stelle nelle loro regioni centrali. Infine si riporta la relazione tra massa stellare e massa del buco nero, espressa da:

$$\log M_{BH} = C + c \log M_*. \quad (2.4)$$

C'è da specificare che nella relazione sopra riportata la massa stellare è in realtà la massa del bulge M_{Bu} . Nel caso delle galassie ellittiche, il bulge coincide con l'intera galassia, rendendo corretto considerare la massa stellare totale come rappresentativa di M_{Bu} . Dal fit eseguito da Saglia e collaboratori [12] si ottengono i seguenti coefficienti: $C = 0.885$ e $c = -1.155$, con scatter intrinseco $\epsilon = 0.424$, corrispondente alla possibile variazione di $\log M_{BH}$ a fissata M_* .

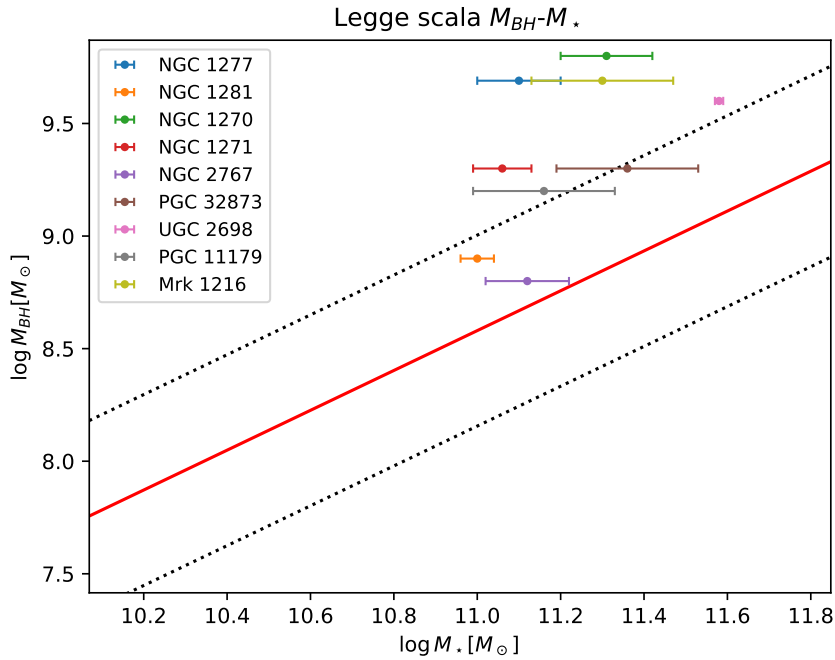


Figura 2.4: Relazione massa del buco nero-massa stellare per il campione SLACS delle ETGs prese da [12]. In rosso è mostrato il fit, le linee nere tratteggiate delimitano lo scatter intrinseco, mentre i punti colorati rappresentano i plot delle galassie relic analizzate in questo studio.

In Figura 2.4 è mostrato il fit risultante dall'analisi del campione delle ETGs. Le galassie relic evidenziano deviazioni significative rispetto alle relazioni di scala tra massa del buco nero e massa stellare osservate per le ETGs locali, posizionandosi come outliers.

Questo è particolarmente evidente in galassie come NGC 1277 e NGC 1270, che raggiungono valori estremi. Dal grafico si osserva che, a parità di massa stellare, la massa del buco nero centrale in una galassia relic può essere significativamente maggiore rispetto a quella di una ETG. Questo comportamento può essere spiegato dal peculiare percorso evolutivo delle galassie relic e all'assenza di una crescita significativa della massa della galassia ospite dopo la sua formazione iniziale, poiché non ha subito eventi di merging significativi, e quindi non ha accresciuto la sua massa stellare nel tempo.

Capitolo 3

Formazione ed evoluzione delle galassie relic

NGC 1277 rappresenta uno degli esempi più straordinari di galassia relic, un oggetto che offre un'opportunità per comprendere i meccanismi di formazione galattica e la loro relazione con la materia oscura. La galassia, infatti, oltre alle proprietà già esplorate, si distingue per la carenza di materia oscura.

Questi aspetti distintivi sollevano una serie di domande fondamentali sulla sua evoluzione: come ha fatto NGC 1277 a formarsi all'interno di un alone di materia oscura così poco denso? E perché è così povera di materia oscura, un elemento ritenuto cruciale per la formazione e l'evoluzione delle galassie? In questo capitolo affronteremo brevemente queste questioni, basandoci principalmente sulla discussione riportata in [7]

La formazione delle galassie, in particolare delle ETGs, è un processo che non è ancora completamente compreso, ma sono state avanzate diverse teorie sulla base di osservazioni e di simulazioni cosmologiche. Si ritiene che la formazione delle ETGs avvenga in due fasi distinte: una prima fase, in-situ, la quale si verifica in epoche molto precoci (a redshift $z > 2$), il nucleo della galassia si forma rapidamente in un evento dissipativo caratterizzato da un'alta formazione stellare. Durante questa fase, si pensa che l'IMF (Funzione di Massa Iniziale) sia tale da avere un contributo significativo di stelle con masse stellari elevate (top-heavy), per poi evolvere rapidamente in una funzione di massa maggiormente dominata da stelle di piccola massa (bottom-heavy) nel tempo. Questo processo è estremamente rapido, con tassi di formazione stellare molto alti, che porta alla creazione di un nucleo galattico compatto e massiccio. Nella seconda fase, di accrezione, la galassia acquisisce materiale proveniente da galassie satelliti di massa inferiore, tramite dry merging. Questi merging coinvolgono per la maggior parte stelle e materia oscura, che vengono aggiunti principalmente nelle parti più esterne della galassia. Durante questa fase, la galassia aumenta in dimensioni, con un cambiamento della morfologia, ma il nucleo centrale, che è stato già formato, rimane relativamente intatto. Questo processo spiega l'evoluzione della dimensione, della massa stellare e della morfologia delle galassie

massicce osservate da $z = 2$ in poi, mentre la dispersione di velocità rimane quasi invariata. Tuttavia, le galassie relic non attraversano questa seconda fase, poiché non subiscono ulteriori acquisizioni di massa stellare tramite merging.

NGC 1277 risulta la galassia più studiata: i risultati degli studi [7] indicano che la frazione di massa accresciuta in questa galassia è di circa il 12%. Al contrario, le ETGs massicce in generale hanno accresciuto tra il 50% e il 90% delle loro stelle tramite merging con galassie satelliti, mentre il resto della loro massa stellare è formato in-situ. Contrasto che evidenzia la natura particolare di NGC 1277 come oggetto di formazione precoce, senza ulteriori arricchimenti significativi di materiale esterno.

Varie teorie sono state avanzate per indagare questo caso unico. Si è pensato, infatti, che se alcune galassie mancassero completamente di un alone di materia oscura, appunto come NGC 1277, si potrebbe spiegare perché non subiscano accrescimento. Senza un alone, le galassie vicine seguirebbero traiettorie di "flyby" paraboliche invece di spiraleggiare verso il centro a causa dell'attrito dinamico. Tuttavia, la mancanza di questo elemento pone la domanda fondamentale: NGC 1277 ha perso la materia oscura in un secondo momento o è nata senza? Sono state proposte diverse opzioni.

NGC 1277 potrebbe essere nata già con un alone di materia oscura molto poco denso. Tuttavia, questo scenario appare improbabile nel contesto della cosmologia standard (Λ CDM), che prevede che le galassie si formino all'interno di aloni di materia oscura massicci. Infatti, studi basati sulla simulazione cosmologica TNG50 (Pillepich e collaboratori [11]) indicano che i progenitori delle attuali galassie relic massicce risiedevano, a $z \approx 4$, in aloni di materia oscura più massicci rispetto ai progenitori di galassie quiescenti con masse stellari simili.

Altra ipotesi suggerisce che NGC 1277 potrebbe aver perso la materia oscura molto presto nella sua storia evolutiva. Questa perdita potrebbe essere avvenuta attraverso interazioni dinamiche all'interno dell'ammasso di Perseo. Le interazioni con altre galassie o con l'alone dell'ammasso potrebbero aver strappato la materia oscura, lasciando NGC 1277 priva del suo alone.

Sono state effettuate delle simulazioni in cui viene presa una galassia che si forma isolata all'interno di un massiccio alone di materia oscura, che viene significativamente strappato quando la galassia entra in un ammasso. Quando la galassia perde la maggior parte della sua materia oscura, lascia anche gran parte del suo gas, impedendo la formazione di nuove stelle [10].

Inoltre, secondo uno studio di Yu e collaboratori [17], un'interazione forte con l'ambiente circostante ad un redshift $z < 1$ avrebbe strappato circa la metà delle stelle dalla galassia e la maggior parte della materia oscura. Questi processi spiegano come NGC 1277 possa essere rimasta priva di materia oscura e con una struttura stellare molto densa, ma senza segni di recenti fusioni o accrezioni significative.

Un'altra ipotesi ancora suggerisce che NGC 1277 potrebbe essersi formata in una collisione ad alta velocità tra frammenti ricchi di gas. In questo scenario, i barioni avrebbero fatto coalescenza rapidamente per formare stelle, mentre la materia oscura, a

causa della sua natura non-collisionale e della velocità relativa elevata, avrebbe lasciato il sistema superando la velocità di fuga.

In sintesi, le ipotesi favorite per spiegare la formazione di un oggetto così peculiare consistono nel fatto che NGC 1277 sia nata con poca materia oscura o che ne abbia perso la maggior parte molto presto, durante o subito dopo la sua fase di "blue nugget" (classe di galassie compatte osservate principalmente a redshift elevati, durante le prime fasi evolutive dell'universo. Prendono il nome dalla loro apparenza "blu", indicativa di una formazione stellare attiva, e dalla loro dimensione compatta). Un meccanismo plausibile per questo è che la maggior parte della materia oscura della galassia sia stata persa attraverso interazioni mentre entrava e si muoveva attraverso l'ammasso di Perseo. In alternativa, NGC 1277 potrebbe essersi formata in una collisione ad alta velocità di frammenti ricchi di gas, dove i barioni hanno fatto coalescenza e hanno formato stelle mentre la materia oscura lasciava il sistema a causa di una velocità superiore a quella di fuga.

Se alcune rare galassie come NGC 1277 possono effettivamente formarsi o sopravvivere con quantità insignificanti di materia oscura, questo solleva nuove domande sul ruolo della materia oscura nella formazione delle galassie. Comprendere questo meccanismo potrebbe rivelare nuove informazioni sulle condizioni iniziali del processo di formazione galattica e sulle interazioni fisiche che governano l'evoluzione delle galassie.

Conclusioni

Questo lavoro ha approfondito lo studio delle galassie relic, fornendo informazioni sulle loro proprietà fisiche e dinamiche, sulle leggi di scala che le caratterizzano e sul loro peculiare percorso evolutivo. Attraverso l'analisi di un campione di 9 galassie early-type, tra cui 3 confermate come relic e altre possibili candidate, abbiamo evidenziato come queste galassie rappresentino un'opportunità per studiare da vicino le condizioni delle galassie a redshift elevati ($z \approx 2$).

In particolare, la galassia NGC 1277 si è rivelata essere un caso di studio eccezionale, con proprietà che la rendono significativamente diversa rispetto alle galassie massive locali. La sua compattezza, l'assenza di un alone esteso di materia oscura e la presenza di un buco nero ultramassiccio sottolineano il suo peculiare percorso evolutivo, caratterizzato da una rapida formazione stellare seguita da un'assenza quasi totale di merging. Questi risultati confermano che NGC 1277 rappresenta un raro esempio di galassia rimasta pressoché "congelata" nel tempo.

Le analisi delle leggi scala hanno mostrato come le galassie relic si comportino da outliers rispetto alle relazioni tipiche delle galassie early-type locali, avvicinandosi invece alle proprietà strutturali e dinamiche delle galassie compatte osservate a $z \approx 2$. Questo risultato conferma ulteriormente che le galassie relic costituiscono una popolazione distinta e fondamentale per comprendere l'evoluzione galattica.

Tuttavia, permangono alcune questioni aperte, come l'origine della mancanza di materia oscura in NGC 1277. Le ipotesi avanzate includono la formazione in un alone inizialmente poco denso o la perdita precoce della materia oscura attraverso interazioni dinamiche. Approfondire queste tematiche richiederà simulazioni più avanzate e nuove osservazioni ad alta risoluzione.

Il presente lavoro quindi contribuisce a delineare meglio il quadro evolutivo delle galassie e l'importanza dello studio delle galassie relic per comprendere i processi che hanno plasmato le prime strutture nell'universo. Ogni nuova informazione su questi rari oggetti permette non solo di affinare i modelli cosmologici, ma anche di esplorare in modo più profondo le leggi fondamentali che governano l'evoluzione delle galassie.

Bibliografia

- [1] The hubble tuning fork. URL: <https://skyserver.sdss.org/dr1/en/proj/advanced/galaxies/tuningfork.asp>.
- [2] What is slacs? URL: https://web.physics.utah.edu/~bolton/slacs/What_is_SLACS.html.
- [3] M. W. Auger, T. Treu, A. S. Bolton, R. Gavazzi, L. V. E. Koopmans, P. J. Marshall, L. A. Moustakas, and S. Burles. The sloan lens acs survey. x. stellar, dynamical, and total mass correlations of massive early-type galaxies. *The Astrophysical Journal*, 724(1):511, nov 2010. URL: <https://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/724/1/511>, doi:10.1088/0004-637X/724/1/511.
- [4] Andrea Cimatti, Filippo Fraternali, and Carlo Nipoti. Introduction to galaxy formation and evolution. From primordial gas to present-day galaxies, 2019, Cambridge University Press. URL: <https://arxiv.org/abs/1912.06216>, arXiv:1912.06216.
- [5] L. Ciotti and G. Bertin. Analytical properties of the $R^{1/m}$ law. , 352:447–451, December 1999. arXiv:astro-ph/9911078, doi:10.48550/arXiv.astro-ph/9911078.
- [6] Jonathan H. Cohn, Maeve Curliss, Jonelle L. Walsh, Kyle M. Kabasares, Benjamin D. Boizelle, Aaron J. Barth, Karl Gebhardt, Kayhan Gültekin, Akın Yıldırım, David Buote, Jeremy Darling, Andrew J. Baker, and Luis Ho. Alma gas-dynamical mass measurement of the supermassive black hole in the red nugget relic galaxy PGC 11179. *The Astrophysical Journal*, 2023. URL: <https://arxiv.org/abs/2310.11296>, arXiv:2310.11296.
- [7] Sébastien Comerón, Ignacio Trujillo, Michele Cappellari, Fernando Buitrago, Luis E. Garduño, Javier Zaragoza-Cardiel, Igor A. Zinchenko, Maritza A. Lara-López, Anna Ferré-Mateu, and Sami Dib. The massive relic galaxy ngc 1277 is dark matter deficient: From dynamical models of integral-field stellar kinematics out to five effective radii. *Astronomy & Astrophysics*, 675:A143, July 2023. URL: <http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361/202346291>, doi:10.1051/0004-6361/202346291.

- [8] Gerard de Vaucouleurs. Recherches sur les Nebuleuses Extragalactiques. *Annales d'Astrophysique*, 11:247, January 1948.
- [9] Anna Ferré-Mateu, Ignacio Trujillo, Ignacio Martín-Navarro, Alexandre Vazdekis, Mar Mezcua, Marc Balcells, and Lilian Domínguez. Two new confirmed massive relic galaxies: red nuggets in the present-day universe. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2017. URL: <http://dx.doi.org/10.1093/mnras/stx171>, doi:10.1093/mnras/stx171.
- [10] Rodrigo Flores-Freitas, Ana L Chies-Santos, Cristina Furlanetto, María Emilia De Rossi, Leonardo Ferreira, Lucas J Zenocratti, and Karla A Alamo-Martínez. Relic galaxy analogues in tng50 simulation: the formation pathways of surviving red nuggets in a cosmological simulation. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 512(1):245–264, 02 2022. arXiv:<https://academic.oup.com/mnras/article-pdf/512/1/245/42901715/stac187.pdf>, doi:10.1093/mnras/stac187.
- [11] Annalisa Pillepich, Dylan Nelson, Volker Springel, Rüdiger Pakmor, Paul Torrey, Rainer Weinberger, Mark Vogelsberger, Federico Marinacci, Shy Genel, Arjen van der Wel, and Lars Hernquist. First results from the TNG50 simulation: the evolution of stellar and gaseous discs across cosmic time. , 490(3):3196–3233, December 2019. arXiv:1902.05553, doi:10.1093/mnras/stz2338.
- [12] R. P. Saglia, M. Opitsch, P. Erwin, J. Thomas, A. Beifiori, M. Fabricius, X. Mazzalay, N. Nowak, S. P. Rusli, and R. Bender. The sinfoni black hole survey: The black hole fundamental plane revisited and the paths of (co)evolution of supermassive black holes and bulges. *The Astrophysical Journal*, 818(1):47, feb 2016. URL: <https://dx.doi.org/10.3847/0004-637X/818/1/47>, doi:10.3847/0004-637X/818/1/47.
- [13] Jose Luis Sersic. *Atlas de Galaxias Australes*. 1968.
- [14] Ignacio Trujillo, Anna Ferré-Mateu, Marc Balcells, Alexandre Vazdekis, and Patricia Sánchez-Blázquez. Ngc 1277: A massive compact relic galaxy in the nearby universe. *The Astrophysical Journal Letters*, 780(2):L20, dec 2013. URL: <https://dx.doi.org/10.1088/2041-8205/780/2/L20>, doi:10.1088/2041-8205/780/2/L20.
- [15] Remco C. E. van den Bosch, Karl Gebhardt, Kayhan Gültekin, Glenn van de Ven, Arjen van der Wel, and Jonelle L. Walsh. An over-massive black hole in the compact lenticular galaxy ngc1277. *Nature*, 491(7426):729–731, November 2012. URL: <http://dx.doi.org/10.1038/nature11592>, doi:10.1038/nature11592.
- [16] Jonelle L. Walsh, Remco C. E. van den Bosch, Karl Gebhardt, Akin Yıldırım, Kayhan Gültekin, Bernd Husemann, and Douglas O. Richstone. A black hole mass determination for the compact galaxy mrk 1216. *The Astrophysical Journal*, 835(2):208,

jan 2017. URL: <https://dx.doi.org/10.3847/1538-4357/835/2/208>, doi:10.3847/1538-4357/835/2/208.

- [17] Hai Yu, Bharat Ratra, and Fa-Yin Wang. Dark matter deficient galaxies in the illustris flat- λ cdm model structure formation simulation, 2018. URL: <https://arxiv.org/abs/1809.05938>, arXiv:1809.05938.
- [18] Akin Yıldırım, Remco C. E. van den Bosch, Glenn van de Ven, Ignacio Martín-Navarro, Jonelle L. Walsh, Bernd Husemann, Kayhan Gültekin, and Karl Gebhardt. The structural and dynamical properties of compact elliptical galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 468(4):4216–4245, March 2017. URL: <http://dx.doi.org/10.1093/mnras/stx732>, doi:10.1093/mnras/stx732.