

ALMA MATER STUDIORUM – UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

DIPARTIMENTO DI FISICA E ASTRONOMIA

CORSO DI LAUREA IN ASTRONOMIA

Formazione delle galassie

TESI DI LAUREA

Presentata da:

Magda Tonelli

Relatore:

Chiar.ma Prof.ssa

Marcella Brusa

Anno Accademico 2025–2026

Sommario

L'obiettivo di questa tesi è osservare le galassie ed iniziare a comprendere come si siano formate. Il punto di partenza per la trattazione sarà dunque la fenomenologia osservativa delle galassie. Il lavoro giungerà a spiegare il quadro cosmologico Λ CDM, oggi accolto come lo schema teorico in base al quale ha avuto luogo la formazione delle galassie. Esso prevede la crescita gerarchica degli aloni di materia oscura nonché i processi fisici che hanno portato alla formazione delle diverse morfologie galattiche. Fra questi si richiamano l'instabilità gravitazionale al raffreddamento del gas e la formazione stellare. Questi processi hanno portato alla creazione di gamme di forme diverse quali gli sferoidi, i dischi e i bracci a spirale. Il quadro teorico sarà infine confrontato con un caso di studio molto locale, ossia il sistema Via Lattea-Andromeda, e con le osservazioni più recenti di JWST e ALMA.

Indice

1	Le galassie: definizione, proprietà e morfologia	4
1.1	Il dibattito sulle nebulose e la scoperta delle galassie esterne	4
1.2	Definizione e proprietà fisiche	4
1.3	La sequenza di Hubble	5
1.4	Parametri strutturali	6
2	L'Universo su grande scala: il modello ΛCDM	6
2.1	Il modello Λ CDM	6
2.2	Dal Big Bang alla reionizzazione	7
2.3	Le anisotropie della radiazione cosmica di fondo	8
2.4	L'espansione accelerata e l'energia oscura	8
3	I fondamenti fisici della formazione delle galassie	9
3.1	Instabilità gravitazionale: il criterio di Jeans	9
3.2	Il collasso sferico e la struttura dell'alone virializzato	9
3.3	Il raffreddamento del gas: la condizione per il collasso barionico	11
3.4	Formazione stellare e feedback: la regolazione dell'efficienza	12
4	La formazione ed evoluzione morfologica delle galassie	13
4.1	Formazione degli sferoidi	13
4.1.1	Collasso monolitico	13
4.1.2	Merging	13
4.1.3	Modello ibrido	15
4.2	Formazione dei dischi	15
4.3	Formazione dei bracci a spirale	15
5	Via Lattea e Andromeda: due galassie a confronto	16
5.1	Struttura e massa	16
5.2	Formazione stellare	16
5.3	Storie di fusione a confronto	16
5.4	Il futuro: fusione o "quasi incidente"?	17

Conclusioni	18
Bibliografia	19

1 Le galassie: definizione, proprietà e morfologia

La parola "galassia" viene dal greco antico *galaxías*, che significa "lattiginoso", perché deriva da *gála*, cioè "latte". Il nome è legato a un mito: Eracle fu allattato da Era e il suo latte, versato nel cielo, formò la Via Lattea. Solo all'inizio del Novecento questa parola di origine mitologica ha assunto il significato che usiamo oggi, quello con cui indichiamo i sistemi stellari extragalattici di cui parla questa tesi.

1.1 Il dibattito sulle nebulose e la scoperta delle galassie esterne

Fin dai primi decenni del Novecento nessuno capiva bene cosa fossero le "nebulose a spirale". Del problema si discusse a lungo, fino al Grande Dibattito del 1920 tra Shapley e Curtis. Erano oggetti dentro la Via Lattea, o sistemi stellari indipendenti e lontanissimi? Fu Hubble a risolvere la questione, misurando la distanza di Andromeda con le Cefeidi¹ che Leavitt aveva appena calibrato: l'oggetto si trovava ben oltre i confini della nostra galassia. Poco dopo si accorse anche di un'altra cosa: le galassie mostravano uno spostamento verso il rosso che cresceva con la distanza. Da questo risultato nacque la legge di Hubble-Lemaître, la prima prova concreta che lo spazio è in espansione. Da qui gli astronomi cominciarono a studiare come nascono, come cambiano e come evolvono le galassie nel tempo cosmico.

1.2 Definizione e proprietà fisiche

Una galassia è un sistema di stelle, gas, polvere e materia oscura tenuto insieme dalla gravità, con tutte le sue parti che ruotano intorno a un unico centro di massa. La galassia è, in sostanza, il modo in cui l'Universo organizza la materia barionica. Le dimensioni cambiano parecchio da un caso all'altro: una nana può misurare solo qualche centinaio di parsec, una gigante arrivare a decine di kiloparsec. Con la massa succede qualcosa di simile – si va dai 10^6 - $10^7 M_\odot$ delle nane sferoidali fino a superare $10^{12} M_\odot$ nelle ellittiche più grandi. Anche i raggi seguono questa scala: sotto il kiloparsec per le nane, 15-20 kpc per la Via Lattea, centinaia di kiloparsec per le ellittiche giganti al centro degli ammassi.

La dispersione di velocità σ è, in questo contesto, un parametro particolarmente utile: il teorema del viriale ($2T = -U$) permette di collegarla alla massa dinamica totale del sistema attraverso $M \propto \frac{\sigma^2 R}{G}$. Quando si calcola la massa con questa formula, il risultato è sempre più alto di quella stellare e gassosa osservata, una delle prime e più solide prove dell'esistenza della materia oscura.

Un altro indizio, forse il più convincente di tutti, arriva dalle curve di rotazione delle galassie a spirale. Se tutta la massa fosse concentrata al centro ci si aspetterebbe un

¹Stelle variabili la cui luminosità pulsa con un periodo direttamente legato alla loro luminosità intrinseca, il che le rende "candele standard" utilizzabili per misurare distanze cosmiche.

andamento kepleriano, $v(R) \propto R^{-1/2}$; le osservazioni mostrano invece curve quasi piatte ben oltre il disco visibile. Queste curve piatte segnalano una massa aggiuntiva, non luminosa, distribuita in un grande alone attorno alla galassia [1, 3].

Ogni galassia ellittica, così come il bulge di una galassia a disco, ospita al proprio centro un buco nero supermassiccio, con una massa pari a circa un millesimo di quella della componente stellare, come suggerito e poi confermato dalla relazione di Magorrian².

1.3 La sequenza di Hubble

Il primo schema di classificazione morfologica, ancora oggi il più usato, fu proposto da Hubble nel 1926 sotto forma di "diapason" (*tuning fork*), con quattro classi che si dividono in due rami a partire da un ceppo comune.

Galassie ellittiche (E0-E7). Niente disco, e isofote (le linee che uniscono punti di uguale luminosità) che restano quasi ellittiche. La classificazione usa il parametro $E = \text{int}(10 \times (1 - b/a))$, con a e b semiassi maggiore e minore dell'isofote: E0 è la forma quasi rotonda, E7 quella più schiacciata che si osservi prima che il sistema diventi dinamicamente instabile. Ci sono poi le sfumature più sottili – le ellittiche *disky*, con isofote leggermente "a lente", contro le *boxy*, più squadrate, a seconda di quanto si allontanano dal fit ellittico ideale. Sono galassie fatte soprattutto di stelle vecchie e povere di gas freddo, per questo dette "quiescenti", e tendono a concentrarsi negli ambienti più densi, come i centri degli ammassi.

Galassie a spirale (Sa-Sc, variante barrata SBa-SBc). Un disco rotante con bracci a spirale di gas e polveri, più un bulge centrale più o meno vistoso. Man mano che si scende da "a" a "c" il bulge si fa meno importante e i bracci si aprono di più; circa due terzi delle spirali hanno anche una barra centrale che spinge il gas verso il nucleo. A differenza delle ellittiche, qui il gas freddo c'è ancora, e con esso la formazione stellare.

Galassie lenticolari (S0/SB0). Stanno a metà tra ellittiche e spirali: un disco c'è, ma senza bracci né una formazione stellare degna di nota. Spesso si interpretano come spirali che hanno semplicemente esaurito il gas.

Galassie irregolari (Irr). Escono dalla sequenza principale, senza una forma simmetrica riconoscibile. Nella maggior parte dei casi sono sistemi di piccola massa (dIrr), ma esistono anche irregolari più grandi, nate da interazioni recenti – le Nubi di Magellano ne sono l'esempio più noto – ricche di gas e con una formazione stellare sproporzionata rispetto alla loro massa.

²Correlazione empirica tra la massa del buco nero centrale di una galassia e la massa (o la dispersione di velocità) della sua componente sferoidale.

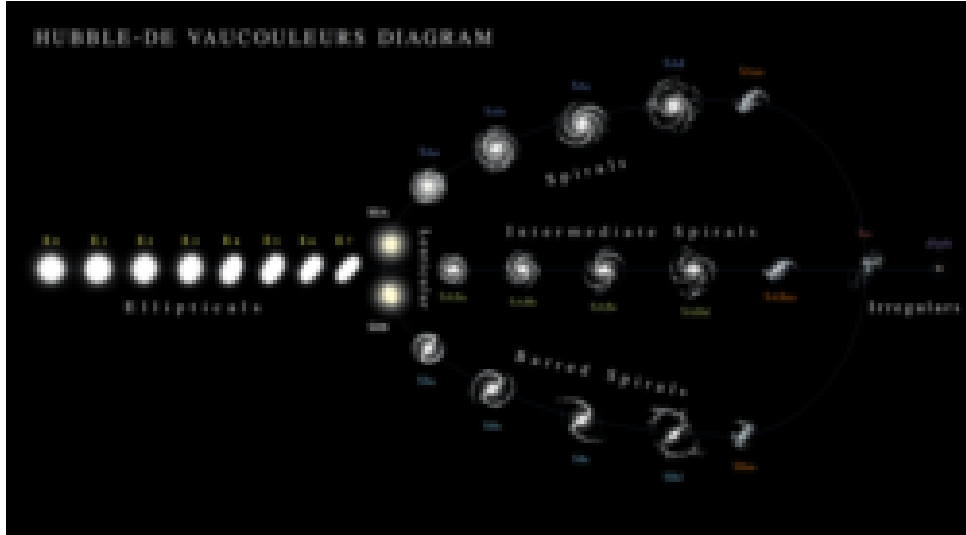


Figura 1: Il diagramma "a diapason" di Hubble-de Vaucouleurs, con le classi morfologiche ellittiche, lenticolari, spirali (normali e barrate) e irregolari.

1.4 Parametri strutturali

La morfologia si caratterizza in modo quantitativo a partire da come la luce è distribuita sulla superficie della galassia: il profilo esponenziale per i dischi, il profilo di de Vaucouleurs (legge $R^{1/4}$) per ellittiche e bulge. Entrambi sono casi particolari del più generale profilo di Sérsic, che descrive con continuità l'intera varietà morfologica osservata.

La sequenza di Hubble resta però uno schema basato sull'osservazione, non una vera sequenza evolutiva: da qui la terminologia impropria "early-type"/"late-type", ancora in uso. Il legame tra le morfologie e i processi fisici che le generano, collasso gerarchico, fusioni, momento angolare del gas, è il tema dei capitoli successivi [1, 2].

2 L'Universo su grande scala: il modello Λ CDM

2.1 Il modello Λ CDM

Oggi lo studio della formazione delle galassie parte da un modello cosmologico ben definito, il modello Λ CDM (*Lambda Cold Dark Matter*), il cui nome indica le due componenti che dominano l'energia dell'Universo. La costante cosmologica Λ è legata all'energia oscura, circa il 68% del totale. La materia oscura fredda pesa invece intorno al 27%: non è fatta di materia ordinaria, interagisce solo con la gravità, ed è su questa struttura che si costruiscono le galassie. Resta un modesto 5% di materia barionica, quella di cui siamo fatti noi e le stelle.

L'aggettivo "fredda" non è un dettaglio secondario: indica che questa materia si muove a velocità non relativistiche, ed è proprio questa lentezza a permettere il collasso delle

strutture piccole. Gli scenari con materia oscura "calda" sono oggi quasi tutti esclusi.

Per esprimere il bilancio energetico dell'Universo si usa la densità critica, la densità media per cui la geometria dello spazio risulta piatta:

$$\rho_{\text{crit}} = \frac{3H^2}{8\pi G} \quad \text{Friedmann 4} \quad (1)$$

con H parametro di Hubble. Le abbondanze relative delle varie componenti si scrivono come $\Omega_i = \rho_i/\rho_{\text{crit}}$, e la piattezza spaziale, misurata oggi con grande precisione, impone $\Omega_m + \Omega_\Lambda \approx 1$. Le incertezze sui parametri cosmologici sono ormai al livello del percento, tanto che si parla di "cosmologia di precisione". C'è però qualcosa di stridente in questa precisione: sappiamo misurare con grande accuratezza quanto pesano materia oscura ed energia oscura, che insieme fanno il 95% dell'Universo, ma non sappiamo ancora cosa siano [2].

2.2 Dal Big Bang alla reionizzazione

L'Universo comincia con una fase di inflazione, un'espansione accelerata ed esponenziale nei suoi primi istanti di vita. È l'inflazione ad amplificare le fluttuazioni quantistiche fino a scale cosmologiche, piantando il seme di tutte le strutture future, ed è sempre l'inflazione a spiegare perché l'Universo appaia oggi così omogeneo e piatto su grande scala. Pochi minuti più tardi, quando temperatura e densità sono ancora molto alte, avviene la nucleosintesi primordiale: idrogeno che diventa elio, con tracce di litio. Le abbondanze chimiche osservate oggi negli oggetti più poveri di metalli corrispondono bene a queste previsioni, ed è una delle conferme più solide del modello del Big Bang caldo.

Le epoche cosmiche si etichettano di solito con il redshift z , legato al fattore di scala $a(t)$ dalla relazione

$$1 + z = \frac{1}{a(t)} \quad \text{FRW 4} \quad (2)$$

dove per convenzione $a(t_0) = 1$ oggi. In quel periodo la materia barionica, ionizzata, restava legata otticamente ai fotoni, e l'Universo era di fatto opaco. Le cose cambiano circa 380.000 anni dopo il Big Bang: a $z \sim 1100$ avviene la ricombinazione, elettroni e protoni si legano formando atomi neutri, e i fotoni – prima intrappolati – sono finalmente liberi di viaggiare. Diventano così la radiazione cosmica di fondo che osserviamo ancora oggi.

Segue un lungo periodo buio, l'epoca oscura, semplicemente perché non esiste ancora nessuna sorgente di luce. La materia oscura continua però a raggrupparsi gerarchicamente, indisturbata, mentre il gas comincia a raffreddarsi nelle buche di potenziale già formate. Sono le prime stelle, quelle di Popolazione III³, insieme alle prime galassie, a rompere il buio: la loro radiazione ultravioletta innesca la reionizzazione dell'idrogeno intergalattico, un processo che si completa intorno a $z \sim 6$.

³Le primissime stelle dell'Universo, formatesi da gas primordiale privo di elementi più pesanti dell'elio.

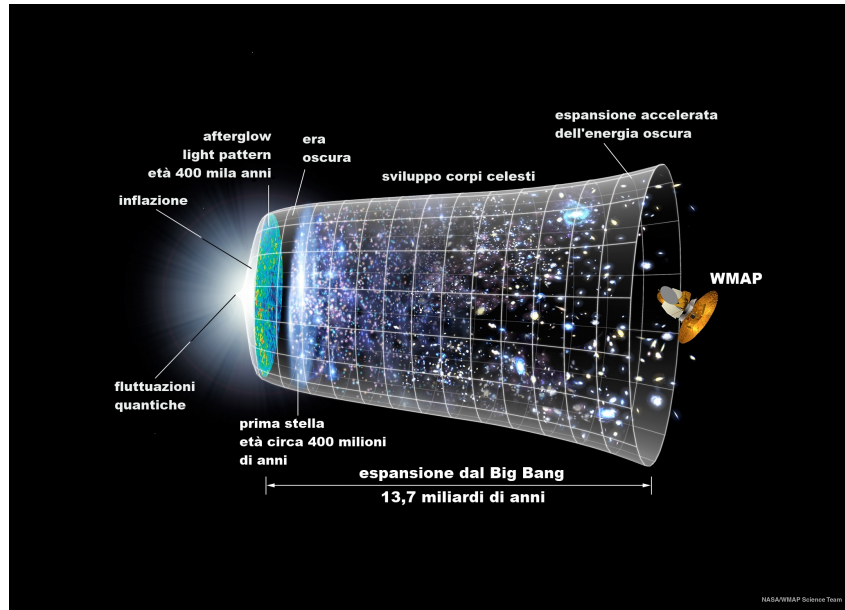


Figura 2: Linea temporale dell'espansione cosmica, dall'inflazione all'epoca attuale, con l'era oscura e la formazione delle prime stelle. Crediti: NASA/WMAP Science Team.

2.3 Le anisotropie della radiazione cosmica di fondo

Da dove viene tutta la struttura che vediamo oggi, dalle singole galassie fino ai filamenti cosmici? Dalle fluttuazioni quantistiche amplificate durante l'inflazione. La prova più diretta sta nella mappa delle anisotropie⁴ di temperatura della CMB, osservata con precisione crescente prima da COBE, poi da WMAP e più di recente da Planck⁵: variazioni di densità di appena una parte su centomila all'epoca della ricombinazione. Per descriverle in modo statistico si usa lo spettro di potenza $P(k)$, che mostra come l'ampiezza delle perturbazioni cambi con la scala spaziale k . La sua forma, ricostruita sia dalla CMB sia dalla distribuzione delle galassie di oggi, resta uno dei banchi di prova più severi per il modello Λ CDM.

2.4 L'espansione accelerata e l'energia oscura

Il modello Λ CDM si basa su un secondo pilastro osservativo, indipendente dalla CMB. Nel 1998 alcune osservazioni di supernovae di tipo Ia a grande distanza, usate come candele standard, mostrarono che l'espansione dell'Universo sta accelerando, più in fretta di quanto ci si aspetterebbe se fosse dominata dalla sola materia. Quell'eccesso di espansione viene attribuito all'energia oscura Λ . La cosa più sorprendente è che CMB, nucleosintesi primordiale e supernovae Ia sono tre sonde cosmologiche completamente indipendenti tra

⁴Piccole variazioni di temperatura, dell'ordine di una parte su centomila, che rompono l'uniformità altrimenti quasi perfetta della radiazione cosmica di fondo.

⁵Tre missioni satellitari succedutesi nel tempo (1989, 2001, 2009) per misurare con precisione crescente le anisotropie della radiazione cosmica di fondo.

loro, eppure portano quasi allo stesso valore dei parametri cosmologici: uno dei risultati più solidi di tutta la cosmologia osservativa moderna [2, 5].

3 I fondamenti fisici della formazione delle galassie

Prima di poter costruire una teoria della formazione delle galassie servono alcuni presupposti fisici di base: come crescono le perturbazioni di densità fino a produrre strutture collassate, come si struttura un alone virializzato di materia oscura, e in quali condizioni il gas barionico al suo interno riesce a raffreddarsi e a collassare ulteriormente.

3.1 Instabilità gravitazionale: il criterio di Jeans

Manca ancora un tassello: capire come quel gas diventi stelle. Si parte, di nuovo, dall'instabilità gravitazionale – il principio per cui, in un mezzo autogravitante, una piccola perturbazione di densità cresce se la sua attrazione gravitazionale basta a vincere la pressione interna che cercherebbe di disperderla. A dare a questo criterio una forma precisa fu Jeans, confrontando due tempi: quello del collasso in caduta libera e quello che un'onda di pressione impiega ad attraversare la perturbazione stessa. Una regione di densità ρ e velocità del suono c_s diventa gravitazionalmente instabile quando la sua dimensione supera la lunghezza di Jeans,

$$\lambda_J \approx c_s \sqrt{\frac{\pi}{G\rho}} \quad \text{Jeans 6} \quad (3)$$

a cui corrisponde una massa di Jeans $M_J \sim \rho \lambda_J^3$. Le perturbazioni più piccole di λ_J oscillano come onde sonore, senza collassare; quelle più grandi collassano per gravità. In un Universo in espansione questo criterio statico va generalizzato, tenendo conto della competizione tra crescita gravitazionale ed espansione cosmica. Nel regime lineare ($\delta\rho/\rho \ll 1$) il contrasto di densità δ cresce nel tempo in proporzione al fattore di scala $a(t)$ durante l'epoca dominata dalla materia,

$$\delta(t) \propto a(t) \propto t^{2/3} \quad \text{Lifshitz 7, Peebles 8} \quad (4)$$

Quando δ raggiunge valori dell'ordine dell'unità l'approssimazione lineare non funziona più, e il collasso entra nel regime non lineare descritto nella sezione seguente.

3.2 Il collasso sferico e la struttura dell'alone virializzato

Il modo più semplice per seguire il collasso oltre il regime lineare è il modello del collasso sferico: la sovradensità si comporta, in buona approssimazione, come un piccolo Universo chiuso indipendente. La sovradensità si espande più lentamente del resto del cosmo,

raggiunge un raggio massimo – il *turnaround* – e da lì comincia a contrarsi. Il collasso si dice completo, formalmente a raggio nullo, quando la densità estrapolata linearmente supera la soglia critica

$$\delta_c \approx 1.686 \quad \text{Gunn \& Gott 9} \quad (5)$$

un valore che resta praticamente costante, indipendente da massa ed epoca, anche nell'Universo Einstein-de Sitter⁶.

In realtà l'oggetto non collassa mai a densità infinita: prima che questo accada, gli urti gravitazionali disordinati tra le particelle ridistribuiscono l'energia orbitale, e il sistema si virializza, raggiungendo una condizione di equilibrio dinamico descritta dal teorema del viriale, già introdotto nel Capitolo 1,

$$2T + U = 0 \quad \text{Clausius 10, Ciotti 1} \quad (6)$$

dove T è l'energia cinetica totale e U l'energia potenziale gravitazionale del sistema [1]. Applicando questo teorema al collasso sferico si dimostra che l'oggetto virializzato ha una densità media pari a circa 200 volte la densità critica dell'Universo all'epoca del collasso: è la definizione operativa comunemente usata per il raggio viriale di un alone di materia oscura.

Un alone virializzato non ha però una densità interna uniforme. Le simulazioni a N-corpi⁷ mostrano che, indipendentemente da massa ed epoca di formazione, la distribuzione di densità interna segue con buona approssimazione un profilo universale, il profilo di Navarro-Frenk-White (NFW),

$$\rho(r) = \frac{\rho_0}{\left(\frac{r}{r_s} \left(1 + \frac{r}{r_s}\right)\right)^2} \quad \text{NFW 11} \quad (7)$$

con un andamento centrale a cuspid⁸ ($\rho \propto r^{-1}$) e un declino esterno più ripido ($\rho \propto r^{-3}$), dove r_s è un raggio di scala il cui rapporto con il raggio viriale definisce il parametro di concentrazione dell'alone.

Tutto questo presuppone che la materia oscura si comporti come un fluido continuo, insensibile a incontri gravitazionali discreti tra singole particelle: un'assunzione giustificata dal fatto che il tempo di rilassamento a due corpi di un sistema con $N \sim 10^{11}$ particelle è enormemente più lungo dell'età dell'Universo. Aloni e galassie sono, in pratica, sistemi non collisionali [1].

⁶Modello cosmologico semplificato in cui l'Universo è spazialmente piatto e dominato interamente dalla materia, senza costante cosmologica.

⁷Simulazioni numeriche che calcolano l'evoluzione gravitazionale di un gran numero di particelle, usate per modellare la formazione delle strutture cosmiche.

⁸Punto in cui la densità cresce rapidamente e in modo non regolare verso il centro, anziché appiattirsi.

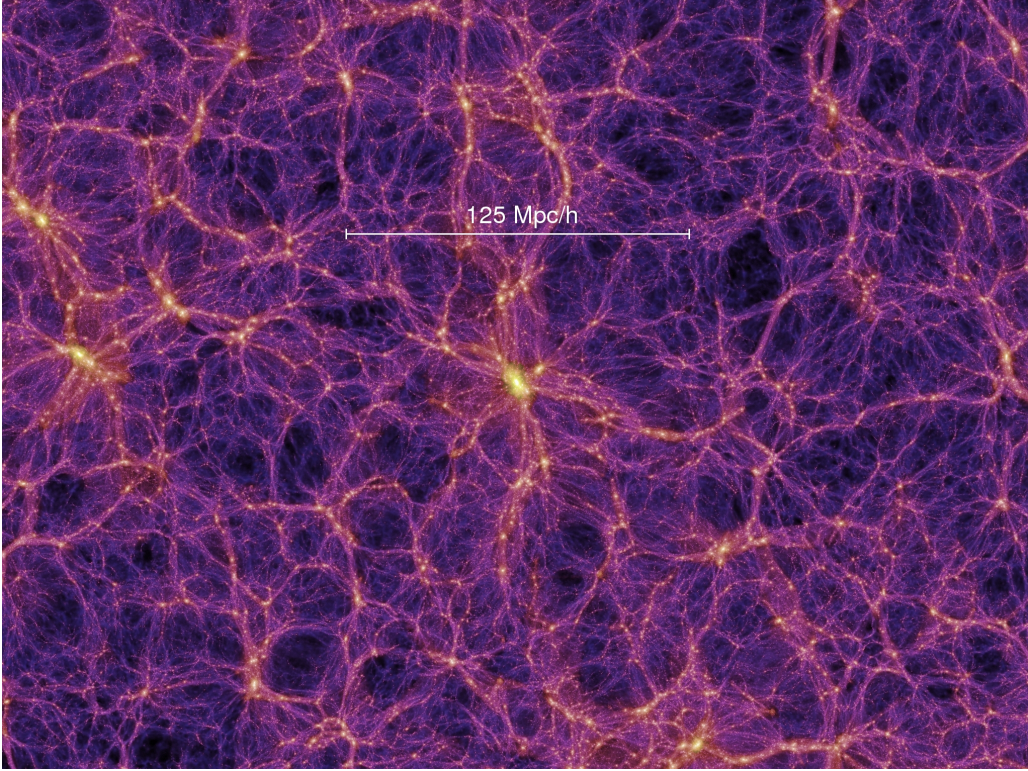


Figura 3: Distribuzione a filamenti della materia oscura su grande scala, dalla Millennium Simulation: la "ragnatela cosmica" risultato della crescita gerarchica degli aloni. Crediti: Max Planck Institute for Astrophysics.

3.3 Il raffreddamento del gas: la condizione per il collasso barionico

La sola virializzazione dell'alone di materia oscura non basta a formare una galassia: il gas barionico che segue il collasso deve anche riuscire a raffreddarsi, perdendo l'energia termica acquisita durante lo shock di virializzazione, per poter continuare a collassare verso il centro dell'alone. Il tempo di raffreddamento di un gas di densità numerica n e temperatura T , che perde energia tramite processi radiativi (bremsstrahlung⁹, righe di emissione atomiche e molecolari) descritti dalla funzione di raffreddamento $\Lambda(T)$, è

$$t_{\text{cool}} \approx \frac{\frac{3}{2}nkT}{n^2\Lambda(T)} \propto \frac{1}{n\Lambda(T)} \quad \text{White \& Rees 12} \quad (8)$$

mentre il tempo di collasso gravitazionale, il tempo dinamico o di caduta libera, dipende dalla sola densità,

$$t_{\text{dyn}} \approx \sqrt{\frac{3\pi}{32G\rho}}. \quad (9)$$

Il criterio proposto da White e Rees nel 1978 confronta questi due tempi scala. Quando $t_{\text{cool}} < t_{\text{dyn}}$ il gas si raffredda più rapidamente di quanto collassi, e il collasso procede in

⁹Radiazione elettromagnetica emessa da una particella carica quando viene decelerata, tipicamente durante l'interazione con un'altra carica.

modo efficiente fino a formare un disco freddo e denso al centro dell'alone; quando invece $t_{\text{cool}} > t_{\text{dyn}}$ il gas resta sostenuto termicamente in una configurazione quasi statica, e la formazione della galassia risulta inefficiente o fortemente ritardata. È uno dei presupposti più importanti dell'intera teoria: distingue gli aloni di piccola massa, in cui il gas si raffredda rapidamente formando galassie, dagli aloni molto massicci – le ellittiche giganti, gli ammassi di galassie – in cui il gas caldo diffuso può avere un tempo di raffreddamento paragonabile o superiore all'età dell'Universo [2, 3].

3.4 Formazione stellare e feedback: la regolazione dell'efficienza

Raffreddato e collassato, il gas denso e freddo comincia a formare stelle. Su scala di intera galassia, il tasso di formazione stellare per unità di superficie Σ_{SFR} segue empiricamente la densità superficiale di gas disponibile Σ_{gas} attraverso la legge di Kennicutt-Schmidt,

$$\Sigma_{\text{SFR}} = A \Sigma_{\text{gas}}^N \quad \text{Schmidt 13, Kennicutt 14} \quad (10)$$

con $N \approx 1.4$, valore misurato su campioni di galassie locali. È una legge puramente empirica, ma resta di fatto il fondamento su cui poggia tutta la conversione del gas in stelle nella teoria della formazione delle galassie.

Non tutto il gas disponibile diventa stelle. L'energia rimessa nell'ambiente dalle esplosioni di supernovae e dai venti stellari, il feedback, riscalda o addirittura espelle parte del gas, abbassando l'efficienza netta di formazione stellare. Perché il feedback funzioni, l'energia meccanica iniettata nel mezzo interstellare, E_{fb} , deve superare l'energia di legame gravitazionale del gas nella buca di potenziale della galassia,

$$E_{\text{fb}} \gtrsim |U_{\text{gas}}| \approx \frac{GM_{\text{gas}}M_{\text{alone}}}{R} \quad \text{Dekel \& Silk 15} \quad (11)$$

Più piccolo è l'alone, più facile è soddisfare questa condizione: ecco perché nelle galassie di piccola massa basta il feedback stellare a regolare la formazione stellare, mentre in quelle più massicce la buca di potenziale è troppo profonda e serve qualcos'altro, un meccanismo legato all'attività dei nuclei galattici attivi¹⁰, il cui approfondimento esula dagli obiettivi di questa tesi [2].

¹⁰Regioni centrali di alcune galassie in cui un buco nero supermassiccio accresce materia, rilasciando enormi quantità di energia.

4 La formazione ed evoluzione morfologica delle galassie

4.1 Formazione degli sferoidi

4.1.1 Collasso monolitico

Come le galassie arrivino ad avere la struttura che osserviamo è una domanda che gli astronomi si pongono da prima ancora del modello Λ CDM. Nel 1962 Eggen, Lynden-Bell e Sandage proposero il primo modello quantitativo per la formazione della Via Lattea: una singola, grande nube di gas primordiale che collassa rapidamente e in modo quasi omogeneo, dando prima origine a un alone di stelle vecchie e povere di metalli, poi al disco galattico, mentre il gas residuo si appiattisce per conservazione del momento angolare. È lo scenario oggi noto come collasso monolitico, o *top-down*, e spiegava bene i gradienti di età e metallicità osservati nella Via Lattea.

Resta ancora il modello di riferimento per come si forma, rapidamente e in modo fortemente dissipativo, il nucleo compatto delle galassie ellittiche più massicce ad alto redshift ($z \gtrsim 2$). Su scala di singola galassia il processo ricorda molto lo scenario del 1962, anche se qui si inserisce nel più ampio contesto gerarchico dell'assemblaggio degli aloni visto nel Capitolo 3.

4.1.2 Merging

Lo scenario del collasso monolitico durò poco. Già nel 1978 Searle e Zinn notarono che gli ammassi globulari¹¹ della Galassia hanno proprietà troppo disperse per essere nati tutti insieme da un unico collasso, e proposero uno scenario opposto, *bottom-up*: la Galassia si sarebbe assemblata più lentamente, in modo caotico, accrescendo e fondendo numerosi frammenti proto-galattici indipendenti. Applicato agli sferoidi, lo scenario mette al centro le fusioni tra galassie. Quando due sistemi di massa simile si uniscono (*major merger*), il potenziale gravitazionale cambia rapidamente e scatta quello che si chiama rilassamento violento, un processo puramente gravitazionale, molto più rapido del rilassamento a due corpi, che in pochi tempi dinamici ridistribuisce l'energia di tutte le stelle coinvolte. Ne risulta uno sferoide virializzato, sostenuto dalla dispersione di velocità piuttosto che dalla rotazione.

Il tipo di fusione cambia con il tempo cosmico. Ad alto redshift, con le galassie ancora piene di gas, le fusioni sono "bagnate" (*wet merger*): il gas si dissipa e collassa in fretta verso il centro, producendo nuclei stellari molto compatti. Non si tratta solo di teoria: negli ultimi vent'anni sono state scoperte galassie quiescenti massicce ($M_* \sim 10^{11} M_\odot$)

¹¹ Agglomerati sferici molto compatti di centinaia di migliaia di stelle antiche, legati gravitazionalmente, che orbitano nell'alone di una galassia.

a $z \sim 2$ con raggi effettivi 3-5 volte più piccoli delle ellittiche locali di pari massa, i cosiddetti "red nugget". Più tardi, quando il gas scarseggia, le fusioni diventano "asciutte" (*dry merger*), senza dissipazione, e sono tipicamente tra galassie di massa molto diversa (*minor merger*). Queste ultime aggiungono stelle soprattutto in periferia, lasciando il nucleo compatto quasi intatto: è questo il meccanismo che oggi si ritiene responsabile della crescita in dimensione, molto più che in massa, delle ellittiche più massicce negli ultimi 10 miliardi di anni [2].

C'è poi un canale diverso, importante soprattutto ad alto redshift: l'instabilità gravitazionale dei dischi stessi. I dischi che accrescono gas velocemente nell'Universo primordiale sono spesso instabili, e si frammentano in grumi giganti di gas e stelle (*clumpy disks*), che migrano verso il centro per attrito dinamico in poche centinaia di milioni di anni. Possono far crescere un bulge centrale anche senza che ci sia stata alcuna fusione vera e propria.

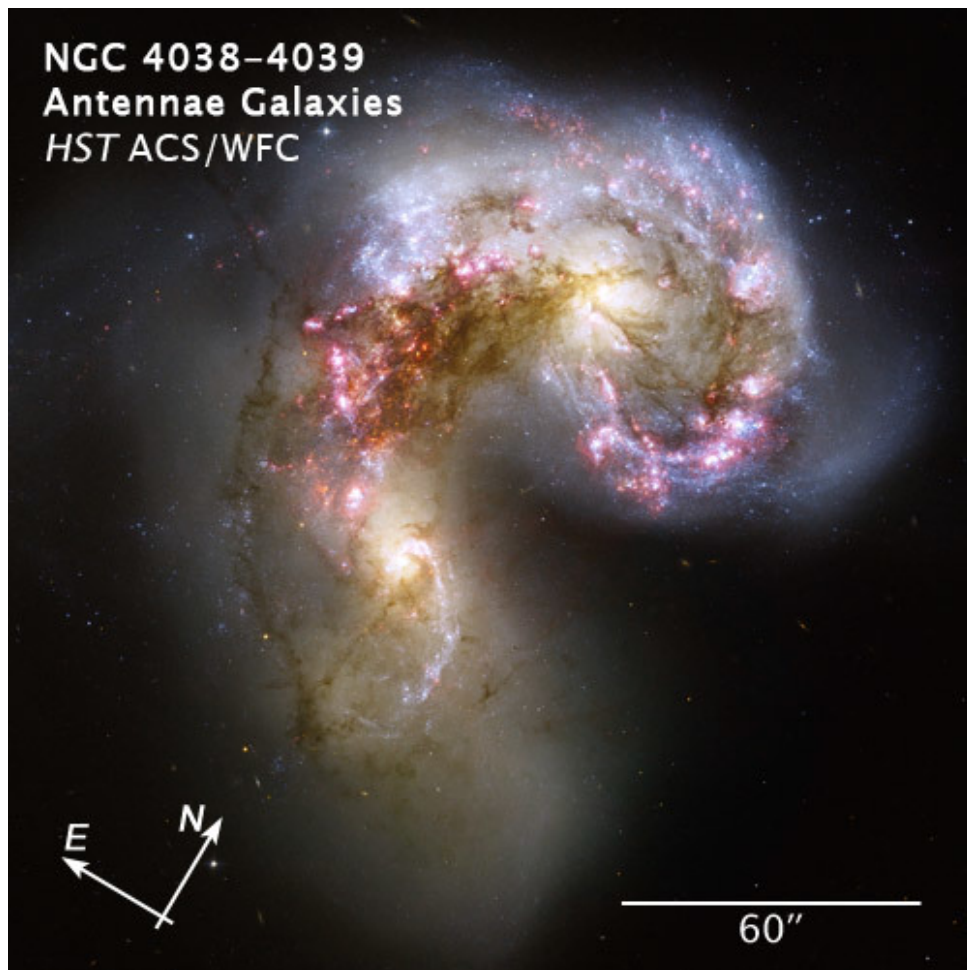


Figura 4: Le Galassie Antenne (NGC 4038/4039), un major merger in corso: le code mareali sono il risultato delle forti interazioni gravitazionali tra i due sistemi.

4.1.3 Modello ibrido

La crescita gerarchica degli aloni prevista dal modello Λ CDM ha dato ragione, in sostanza, allo scenario *bottom-up*: gli aloni, e con essi le galassie, si assemblano dal basso, per fusioni progressive di strutture più piccole. Il quadro attuale, però, non è un *bottom-up* puro, ma una sintesi dei due scenari storici, chiamata formazione a due fasi, particolarmente evidente nelle ellittiche più massicce. Nella prima fase, ad alto redshift, il gas collassa in modo rapido e dissipativo, formando il nucleo compatto della futura ellittica: è l'ingrediente "monolitico" del modello. Nella seconda fase, molto più lenta, quel nucleo cresce soprattutto in dimensione, per fusioni successive perlopiù minori e asciutte: torna qui in gioco l'elemento *bottom-up*, con una crescita *inside-out* che ritroveremo tra poco anche nei dischi [2].

4.2 Formazione dei dischi

Il profilo NFW dell'alone di materia oscura, visto nel Capitolo 3, non è solo un prodotto di simulazioni al computer: lo si ritrova anche nelle misure di *weak lensing* gravitazionale, che ricostruiscono il profilo di massa degli aloni dalla distorsione delle galassie di sfondo. È dentro questo alone che il gas si raffredda e collassa, conservando più o meno il momento angolare guadagnato per interazione mareale con le strutture circostanti (*tidal torquing*): il risultato è un disco rotante, in equilibrio centrifugo attorno al centro del potenziale [2].

Il meccanismo comporta anche qualcosa di piuttosto intuitivo, una crescita *inside-out*: le regioni centrali, con meno momento angolare, collassano e formano stelle per prime, mentre quelle esterne, più ricche di momento angolare, si sviluppano più tardi. Ne nasce un gradiente radiale, con dischi che diventano più giovani e più ricchi di gas man mano che ci si allontana dal centro: è proprio quello che si osserva nelle spirali locali, Via Lattea compresa. Sorprendentemente, il meccanismo sembra funzionare anche a redshift molto alto, dove ALMA e JWST hanno individuato dischi rotanti dinamicamente freddi, con rapporti $\frac{V}{\sigma}$ elevati, già a $z \sim 4 - 6$. La conservazione del momento angolare comincia dunque a operare molto prima di quanto si pensasse fino a un decennio fa.

4.3 Formazione dei bracci a spirale

I bracci a spirale, va detto, non sono affatto strutture materiali fisse. Sono onde di densità, che ruotano attorno al centro della galassia con una velocità angolare tutta loro, la *pattern speed*, diversa da quella con cui ruotano le singole stelle e il gas [1]. La teoria delle onde di densità, di Lin e Shu (1964), descrive un braccio come una regione di sovradensità quasi stazionaria: stelle e gas ci passano dentro e ci escono continuamente. Quando il gas attraversa il braccio si comprime, e questo basta a innescare formazione stellare: le stelle che vi nascono lasciano dietro di sé una scia luminosa e blu, anche se un attimo dopo la sovradensità è già occupata da altro gas.

Non tutte le spirali nascono allo stesso modo. Le "*grand design*", con due bracci netti e simmetrici come M51, si formano di solito per l'effetto mareale di una galassia vicina. Le "*flocculent*", più irregolari e frammentate, nascono invece da instabilità locali del disco, che si accendono, si amplificano e si spengono da sole (*swing amplification*¹²), senza bisogno di alcun innesco esterno. Che strutture a spirale ben definite possano formarsi così presto è confermato da una scoperta recente di JWST: una galassia a spirale *grand-design* già completamente strutturata appena 1,5 miliardi di anni dopo il Big Bang, quando l'Universo aveva solo un decimo dell'età che ha oggi [16].

5 Via Lattea e Andromeda: due galassie a confronto

Via Lattea e Andromeda (M31) sono le due galassie a spirale più massicce del Gruppo Locale, e per questo un caso di studio prezioso. Sono morfologicamente simili, ma la loro struttura e la loro storia raccontano cose piuttosto diverse, e oggi possiamo indagarle con un dettaglio che fino a poco tempo fa era impensabile, grazie alla missione astrometrica *Gaia* e a survey fotometriche profonde come *PAndAS*.

5.1 Struttura e massa

Andromeda vince facilmente sul fronte della luminosità e delle dimensioni: il suo disco si estende per oltre 200.000 anni luce, circa il doppio della Via Lattea, e la sua massa stellare è più alta di un fattore ~ 2 . Sorprende però che questo non valga per la massa dinamica totale, alone di materia oscura compreso: le stime più recenti, basate sulle velocità delle galassie satelliti e su tracciamenti dinamici del Gruppo Locale, indicano aloni di massa sostanzialmente simili per le due galassie, entro le incertezze osservative.

5.2 Formazione stellare

Sul fronte della formazione stellare, invece, le due divergono parecchio: la Via Lattea forma stelle a un ritmo moderato, circa 1-2 masse solari all'anno, mentre Andromeda, pur essendo più massiccia, ne produce relativamente poche, con una popolazione stellare mediamente più vecchia. Il motivo, come vedremo, ha a che fare con storie di merger molto diverse.

5.3 Storie di fusione a confronto

Gaia ha permesso di leggere, nella cinematica e nella chimica delle stelle dell'alone della Via Lattea, le tracce fossili di Gaia-Enceladus (o *Gaia Sausage*): una fusione di massa

¹²Meccanismo per cui piccole sovradensità nel disco vengono amplificate temporaneamente dalla combinazione di rotazione differenziale e autogravità.

relativamente moderata, avvenuta 8-10 miliardi di anni fa, che ha contribuito parecchio a formare l'alone stellare e a scaldare dinamicamente il disco spesso della Galassia [17].

La storia di Andromeda sembra ancora più movimentata. Le survey fotometriche profonde del suo alone, come *PAndAS*¹³, hanno trovato un sistema enorme di flussi stellari (*stellar streams*), residui di satelliti fatti a pezzi dalle forze mareali nel tempo. Il tasso di fusioni minori sembra più alto rispetto alla Via Lattea, e probabilmente c'è stato almeno un evento di fusione decisamente più massiccio in tempi relativamente recenti, pochi miliardi di anni fa [18]. Questa storia di merger più intensa spiega bene perché l'alone stellare di Andromeda sia così esteso e ricco, e perché la sua formazione stellare oggi sia più debole: le perturbazioni dinamiche degli eventi di fusione più recenti tendono a sopprimerla.

5.4 Il futuro: fusione o "quasi incidente"?

Per decenni si è ritenuto pressoché certo che Via Lattea e Andromeda, attualmente in avvicinamento a circa 110 km/s, fossero destinate a fondersi in un'unica galassia sferoidale entro 4-5 miliardi di anni: un'applicazione diretta, su scala locale, della fisica dei merger discussa nel Capitolo 4. Uno studio del 2025, che ha incorporato nelle simulazioni orbitali anche l'influenza gravitazionale di Triangulum (M33) e della Grande Nube di Magellano, ha però mostrato che l'esito è molto più incerto di quanto si pensasse. Includendo tutte le principali incertezze osservative su masse e moti propri, la probabilità di una fusione entro i prossimi 10 miliardi di anni si è rivelata prossima al 50%, un risultato che gli stessi autori hanno descritto come il passaggio "da una quasi certezza a un lancio di moneta" [19]. Studi successivi, basati su moti propri¹⁴ di Andromeda misurati con precisione crescente da *Gaia*, tendono a far risalire di nuovo la probabilità di fusione. L'esito di questo scenario resta, oggi, un problema osservativo aperto più che una previsione consolidata: un buon promemoria di quanto anche i sistemi apparentemente meglio conosciuti, come il nostro Gruppo Locale, possano ancora sorprenderci.

¹³Pan-Andromeda Archaeological Survey, un'indagine fotometrica su larga scala dell'alone di Andromeda condotta con il telescopio Canada-France-Hawaii.

¹⁴Lo spostamento angolare apparente di un oggetto celeste sulla volta celeste nel tempo, dovuto al suo moto reale nello spazio rispetto all'osservatore.



Figura 5: Confronto tra la Via Lattea (sinistra, illustrazione artistica) e Andromeda M31 (destra, immagine osservativa).

Conclusioni

Il nome di questa tesi richiama un mito greco. Per i nostri antenati, vedere quella striscia lattiginosa nel cielo notturno significava raccontare una storia di dèi ed eroi. Il percorso qui seguito mostra quanta strada sia stata fatta da allora: prima la fenomenologia delle galassie, poi il modello cosmologico Λ CDM, con la materia oscura fredda che fornisce lo scheletro gravitazionale su cui si assemblano gerarchicamente gli aloni, e al loro interno il gas barionico che dà origine alle galassie. Eppure resta, nella sostanza, la stessa domanda di fondo. Abbiamo visto come le diverse morfologie galattiche nascano da storie fisiche distinte: collasso e fusioni per gli sferoidi, momento angolare per i dischi, onde di densità per i bracci a spirale, osservabili quasi in presa diretta nel confronto tra Via Lattea e Andromeda.

Il quadro che ne emerge è quello di un modello gerarchico capace di riprodurre le proprietà osservate delle galassie locali, ma oggi messo alla prova dalla risoluzione di JWST e ALMA, che rivelano strutture già mature sorprendentemente presto nella storia cosmica: un vincolo ancora aperto sulla rapidità con cui la materia si organizza in galassie.

La domanda su come nascano le galassie, però, resta aperta ancora oggi. È cambiato il modo in cui la affrontiamo: non più con un racconto, ma con un metodo capace di mettersi costantemente in discussione. È in questo passaggio che si misura il progresso scientifico, ed è quanto ho cercato di imparare in questi tre anni di studio.

Riferimenti bibliografici

- [1] Ciotti, L., *Appunti del corso di Astrofisica Extragalattica*, Università di Bologna.
- [2] Cimatti, A., Fraternali, F., Nipoti, C. (2019), *Introduction to Galaxy Formation and Evolution: From Primordial Gas to Present-Day Galaxies*, Cambridge University Press.
- [3] Della Casa, D., *Processi di Radiazione e MHD — Appunti del corso*, Università di Bologna.
- [4] Friedmann, A. (1922), "Über die Krümmung des Raumes", *Zeitschrift für Physik*, 10, 377.
- [5] Planck Collaboration (2020), "Planck 2018 results VI. Cosmological parameters", *Astronomy & Astrophysics*, 641, A6.
- [6] Jeans, J. H. (1902), "The Stability of a Spherical Nebula", *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 199, 1.
- [7] Lifshitz, E. M. (1946), "On the Gravitational Stability of the Expanding Universe", *Journal of Physics (USSR)*, 10, 116.
- [8] Peebles, P. J. E. (1980), *The Large-Scale Structure of the Universe*, Princeton University Press.
- [9] Gunn, J. E., Gott, J. R. (1972), "On the Infall of Matter Into Clusters of Galaxies and Some Effects on Their Evolution", *The Astrophysical Journal*, 176, 1.
- [10] Clausius, R. (1870), "Über einen auf die Wärme angewandten mechanischen Satz", *Annalen der Physik*, 217, 124.
- [11] Navarro, J. F., Frenk, C. S., White, S. D. M. (1996), "The Structure of Cold Dark Matter Halos", *The Astrophysical Journal*, 462, 563.
- [12] White, S. D. M., Rees, M. J. (1978), "Core condensation in heavy halos: a two-stage theory for galaxy formation and clustering", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 183, 341.
- [13] Schmidt, M. (1959), "The Rate of Star Formation", *The Astrophysical Journal*, 129, 243.
- [14] Kennicutt, R. C. (1998), "The Global Schmidt Law in Star-Forming Galaxies", *The Astrophysical Journal*, 498, 541.
- [15] Dekel, A., Silk, J. (1986), "The origin of dwarf galaxy masses, diameters, surface brightnesses, rotation curves and velocity dispersions", *The Astrophysical Journal*, 303, 39.

- [16] Jain, R., Wadadekar, Y. (2025), "A grand-design spiral galaxy 1.5 billion years after the Big Bang with JWST", *Astronomy & Astrophysics*.
- [17] Helmi, A., et al. (2018), "The merger that led to the formation of the Milky Way's inner stellar halo and thick disk", *Nature*, 563, 85.
- [18] McConnachie, A. W., et al. (2009), "The remnants of galaxy formation from a panoramic survey of the region around M31", *Nature*, 461, 66.
- [19] Sawala, T., et al. (2025), "No certainty of a Milky Way–Andromeda collision", *Nature Astronomy*.