

Alma Mater Studiorum – Università di Bologna

Dipartimento di Fisica e Astronomia
Corso di Laurea in Astronomia

Formazione delle galassie

Tesi di laurea

Presentata da:
Claudio Pedrazzi

Relatore:
Chiar.ma Prof.ssa
Marcella Brusa

Anno accademico 2024–2025

*A Valeria ed Heidi
che mi hanno supportato
(e sopportato) durante la
realizzazione di questo
sogno nel cassetto.*

Sommario

La formazione delle galassie è uno dei temi centrali dell'astrofisica moderna. In questo elaborato vengono descritti i processi fisici che, a partire dalle fluttuazioni primordiali di densità, hanno portato alla formazione delle strutture cosmiche osservabili. Nel quadro del modello cosmologico standard Λ CDM si richiamano l'espansione dell'universo, la crescita gerarchica delle perturbazioni e la formazione degli aloni di materia oscura, che costituiscono l'impalcatura gravitazionale su cui si sono formate le galassie.

Dopo una panoramica sulle proprietà delle galassie attuali e sul loro ambiente cosmico, si analizzano la ricombinazione, la reionizzazione e i principali meccanismi che regolano l'evoluzione barionica: raffreddamento del gas, formazione stellare, feedback da supernovae e da nuclei galattici attivi, e fusioni tra galassie. Questi processi determinano la diversità morfologica e le relazioni di scala osservate, come le leggi di Tully–Fisher e Faber–Jackson.

Le osservazioni più recenti, in particolare con JWST, hanno esteso lo studio della popolazione galattica fino a redshift $z \gtrsim 10$, fornendo nuovi vincoli ai modelli teorici. Il lavoro si conclude discutendo le principali prospettive aperte e i limiti ancora presenti nel paradigma Λ CDM nella descrizione dell'evoluzione delle galassie più antiche e massicce.

Indice

1	Introduzione	1
2	Le galassie e il loro ambiente cosmico	2
2.1	Le galassie: banco di prova per gli studi evolutivi	2
2.2	Le galassie star-forming nell'universo attuale	3
2.3	Le galassie quiescenti nell'universo attuale	4
2.4	L'ambiente delle galassie nell'universo attuale	4
3	Il modello cosmologico ΛCDM	6
3.1	Fondamenti del modello Λ CDM	6
3.2	Evoluzione termica e radiazione cosmica di fondo	6
3.3	Sintesi del quadro cosmologico	7
4	Origine delle strutture primordiali	7
4.1	Formazione degli aloni di materia oscura	7
4.2	Dalla ricombinazione alla reionizzazione	8
5	Fisica della formazione galattica	9
5.1	Ingredienti fisici della formazione galattica	9
5.2	Processi evolutivi e modelli di formazione delle galassie	11
6	Prospettive e problemi aperti	15
A	Appendici	16
A.1	Abbreviazioni	16
A.2	Parametri cosmologici	16
A.3	Storia termica dell'universo	17
A.4	Meccanismi di formazione	17

1. Introduzione

È sorprendente pensare che l'universo, nato da uno stato iniziale densissimo ma estremamente semplice — quasi perfettamente omogeneo e privo di struttura — abbia potuto evolvere fino a formare sistemi tanto complessi quali le galassie, le stelle, i pianeti e la vita stessa.

Piccole fluttuazioni di densità nel plasma primordiale, amplificate dalla gravità nel corso dell'espansione cosmica, costituirono i semi da cui è emersa, nel corso di miliardi di anni, la vasta rete cosmica di galassie e ammassi. La formazione e l'evoluzione delle galassie è un aspetto cardine per tracciare la storia del cosmo, dalla quasi-uniformità e in quasi equilibrio termodinamico alla morfologia complessa delle strutture a grande scala. La scoperta della radiazione cosmica di fondo (*Cosmic Microwave Background*, CMB) nel 1965, con il suo spettro in frequenza ben consistente con quello di corpo nero, è una prova fondamentale della fase primordiale dell'universo prevista nel modello del *Big Bang*, di cui, in un certo senso, rappresenta l'eco.

L'attuale conoscenza delle galassie e della loro evoluzione è frutto di un secolo di ricerca [1, 2, 8]. All'inizio del XX secolo la natura delle cosiddette *nebulose a spirale* era incerta, finché Edwin Hubble (1924-29) comprese che si trattava di "*universi isola*" esterni alla nostra galassia (la Via Lattea) e in allontanamento da noi. In seguito si capì che le galassie sono sistemi in evoluzione, organizzate in una struttura a "ragnatela cosmica", con ammassi, superammassi e filamenti che si estendono su scale enormi in un universo in espansione.

Già dagli anni '30 si cominciò a sospettare l'esistenza della materia oscura (*Dark Matter*, DM), a seguito delle osservazioni di Zwicky sull'ammasso della Chioma, mentre prove più convincenti giunsero negli anni '70 con le curve di rotazione galattiche misurate da Vera Rubin e collaboratori. La DM, a differenza della materia barionica (ordinaria), non emette né assorbe radiazione elettromagnetica ed è rilevabile solo indirettamente attraverso i suoi effetti gravitazionali: essa costituisce l'impalcatura gravitazionale su cui si formano le strutture visibili. Negli anni '80 si affermò il modello di *Cold Dark Matter* (CDM) che ipotizza l'esistenza di particelle di DM fredda come componente essenziale nella formazione delle prime galassie e ammassi di galassie e, in generale, delle strutture cosmiche, a causa della gravità.

Il modello Λ CDM (o Modello Cosmologico Standard) rappresenta l'attuale migliore descrizione delle proprietà dell'universo e della sua evoluzione dal Big Bang ad oggi. La costante cosmologica Λ ¹, che può essere interpretata come un'energia oscura (*Dark Energy*), così chiamata in quanto anch'essa non è rilevabile tramite la radiazione, sta causando l'espansione accelerata osservata nell'universo relativamente recente. Il modello Λ CDM è quello più semplice che si adatta alle osservazioni, oggi di riferimento per la cosmologia e la formazione galattica.

Dagli anni '70 si affermò l'idea che le galassie si formino all'interno di aloni di DM, tramite un meccanismo di collasso e accrescimento gerarchico, guidato dalla dinamica della DM. Le fluttuazioni di densità primordiali, rilevate nelle anisotropie del CMB e successivamente amplificate per gravità, formarono i primi aloni di DM che attrassero il gas barionico, costituendo la base per la formazione di stelle e galassie, regolata da complessi processi di feedback. L'energia rilasciata dalle Supernovae e dai Nuclei Galattici Attivi (AGN), alimentati dal buco nero centrale, riscalda e agita il gas interstellare, limitando la formazione stellare

¹Introdotta da Einstein nel 1917 per ottenere un universo statico, e successivamente abbandonata quando l'espansione cosmica fu scoperta da Hubble. Einstein stesso la definì "la più grande sciocchezza della sua vita". Λ venne poi reintrodotta alla fine degli anni '90 per spiegare l'accelerazione dell'espansione cosmica osservata tramite supernove di tipo Ia.

e modulando l'efficienza di accrescimento. Nel quadro gerarchico, gli aloni più massicci si formano più tardi, ma ospitano galassie con popolazioni stellari più antiche: un fenomeno noto come *downsizing*. Le fusioni e interazioni gravitazionali, insieme ai processi di feedback, modellano nel tempo le proprietà morfologiche e cinematiche dei sistemi galattici.

Le grandi survey multi-banda e il *James Webb Space Telescope* hanno esteso l'osservazione di galassie a redshift molto elevato, con candidati fino a $z \approx 14$ [7], permettendo di collegare le fasi iniziali dell'universo con le popolazioni di oggetti astrofisici a epoche più tarde.

2. Le galassie e il loro ambiente cosmico

2.1 Le galassie: banco di prova per gli studi evolutivi

Le galassie locali, risultato di oltre 13 Gyr di evoluzione cosmica, rappresentano il banco di prova dei modelli di formazione ed evoluzione [1, 2].

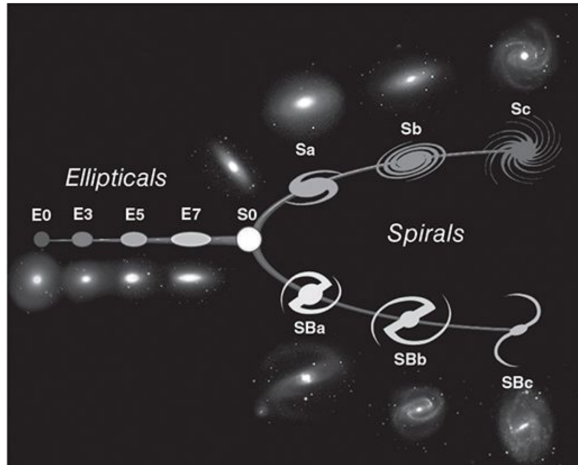


Figura 2.1: Sequenza di Hubble (*tuning fork diagram*): rappresentazione morfologica delle principali classi di galassie, dalle ellittiche (*Early-Type Galaxies*, ETG) alle spirali, con o senza barra (*Late-Type Galaxies*, nel seguito *Star-Forming Galaxies*, SFG). I termini *early* e *late*, di origine storica, non hanno alcuna connotazione temporale. Fonte: [1].

Morfologia e proprietà fisiche. La classificazione di Hubble–de Vaucouleurs (Fig. 2.1) distingue galassie *early-type* (ellittiche e lenticolari) e *late-type* (spirali e irregolari). La morfologia è correlata a massa, metallicità e contenuto di gas, riflettendo un'evoluzione gerarchica regolata da interazioni e feedback [9]. Queste differenze si manifestano nel diagramma colore–magnitudine (Fig. 2.2), con la *blue cloud* di galassie giovani e attive, la *red sequence* di sistemi quiescenti e una *green valley* intermedia in transizione.

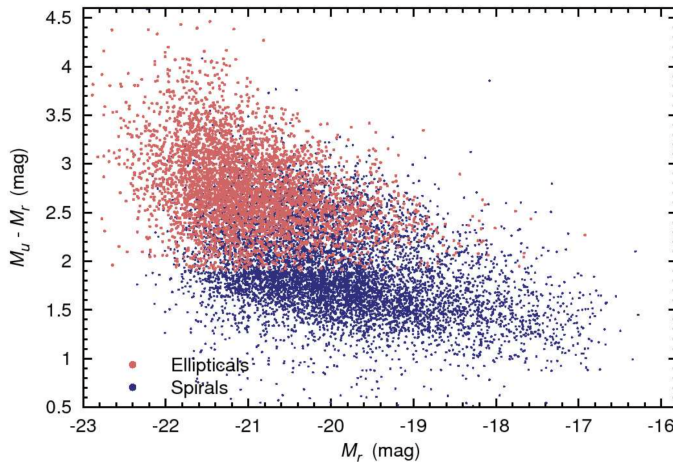


Figura 2.2: Diagramma colore–magnitudine per le galassie della SDSS DR7. Le spirali (punti blu) formano la *blue cloud*, caratterizzata da colori più freddi e luminosità minori, mentre le ellittiche (punti rossi) definiscono la *red sequence*, popolata da sistemi quiescenti. Fonte: [6].

Spettri e distribuzioni di energia. Le distribuzioni di energia spettrale (SED) combinano l'emissione stellare, quella del mezzo interstellare e, talvolta, di un nucleo attivo. La loro

analisi fornisce stime di massa stellare, attenuazione e tasso di formazione stellare (SFR). Le funzioni di luminosità (Fig. 2.3) e di massa, descritte da una funzione di Schechter^{1,2},

$$\Phi(L) dL = \Phi^* \left(\frac{L}{L^*} \right)^\alpha \exp\left(-\frac{L}{L^*}\right) d\left(\frac{L}{L^*}\right),$$

riassumono la demografia galattica e costituiscono la base di confronto con le osservazioni a redshift elevato [5].

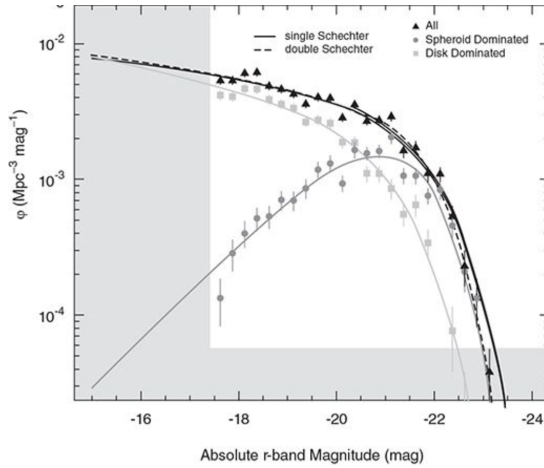


Figura 2.3: Funzione di luminosità delle galassie locali ($0.025 < z < 0.06$) in banda ottica r . I punti mostrano la densità numerica per intervallo di luminosità; la funzione totale (nero) è suddivisa in galassie dominate dal bulge (grigio scuro) e dal disco (grigio chiaro), e approssimata da funzioni di Schechter singola e doppia. Fonte: [1].

Nuclei galattici attivi. Molte galassie ospitano un buco nero supermassiccio (SMBH) la cui accrezione produce un nucleo attivo (AGN). Il *modello unificato*, con disco di accrescimento e toro di polvere, interpreta Seyfert, quasar e blazar come lo stesso fenomeno visto con angoli diversi. Il feedback energetico degli AGN rappresenta un meccanismo essenziale per regolare la formazione stellare nelle fasi evolutive più avanzate.

2.2 Le galassie star-forming nell'universo attuale

Le galassie a formazione stellare attiva (SFG), spirali e irregolari ricche di gas freddo, costituiscono la componente “blu” della popolazione galattica, in contrasto con le quiescenti della sequenza rossa. Sono costituite da un disco rotante con rigonfiamento centrale (*bulge*) e spesso da una barra; aloni stellari diffusi contengono stelle di campo, ammassi globulari e flussi (*stellar streams*) [1].

Stelle, gas e polvere. Il contenuto stellare è dominato da popolazioni giovani e intermedie, con età inferiori a pochi Gyr. Il mezzo interstellare contiene idrogeno neutro (H I) esteso fino a decine di kpc e gas molecolare (H₂) concentrato nei bracci a spirale, dove si trovano le *nubi molecolari giganti* (GMC) e le *regioni H II* generate dalle stelle appena formate. Supernovae e venti stellari innescano un ciclo di feedback che regola il bilancio tra gas e formazione stellare.

Dinamica e relazioni di scala. Le curve di rotazione piatte rivelano aloni di materia oscura con masse fino a $10^{12-13} M_\odot$. Le SFG seguono numerose relazioni empiriche strette: la *Tully–Fisher* tra luminosità e velocità di rotazione,

$$\log L = B + \beta \log v_{\text{rot}}$$

¹qui riportata nel caso della luminosità. In realtà sia per la LF che per la SMF il fit migliore (incluso tutte le morfologie di galassie) si ottiene con una somma di due funzioni di Schechter distinte.

²Per questa e per tutte le altre formule si rinuncia consciamente, per ragioni di spazio, ad una elencazione del significato di tutte le variabili, dato che si tratta di equazioni ben note reperibili in tutti i testi generali della bibliografia, in particolare [1].

la *mass–metallicity relation*, la legge di *Schmidt–Kennicutt* tra densità di gas e SFR³,

$$\Sigma_{\text{SFR}} \propto \Sigma_{\text{gas}}^{\alpha}$$

la relazione di Fall tra momento angolare specifico e massa stellare, la relazione *SFMS* (*Star Formation Main Sequence*) e le relazioni *size-mass*. Tali correlazioni definiscono la “sequenza principale” delle galassie star-forming.

Galassie starburst. Una piccola frazione delle SFG presenta tassi di formazione stellare globali fino a 1–2 ordini di grandezza superiori a quelli di galassie di pari massa e, nelle regioni centrali, densità di SFR ancora più elevate in episodi intensi ma brevi ($t_{\text{burst}} \lesssim 10^8$ yr). L’intensa emissione di polvere rende queste galassie fortemente luminose nell’infrarosso: si parla di LIRG se $\log(L_{\text{IR}}/L_{\odot}) > 11$ e di ULIRG se > 12 .

Esempio: la Via Lattea. La nostra Galassia è una tipica SFG di massa intermedia ($M_{\star} \simeq 5 \times 10^{10} M_{\odot}$), con SFR di $1\text{--}3 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ e alone viriale di $10^{12} M_{\odot}$ [2], classificabile come spirale barrata di tipo SBbc. La distribuzione verticale delle stelle nel disco, ben riprodotta dal profilo $\text{sech}^2 z$ atteso per un sistema autogravitante con dispersione di velocità costante, è descritta osservativamente dalla somma di due esponenziali (per z grandi $\text{sech}^2 z \approx e^{-2z}$): un disco sottile ($h_{\star} \simeq 300$ pc) e uno spesso ($h_{\star} \simeq 1000$ pc), che contiene circa il 15% delle stelle locali. I due componenti differiscono per cinematica, età e composizione chimica, riflettendo fasi distinte della storia di formazione della Galassia.

2.3 Le galassie quiescenti nell’universo attuale

Le galassie quiescenti (*early-type*, ETG) — ellittiche e lenticolari — hanno scarso gas freddo e SFR trascurabile; ospitano popolazioni vecchie ($> 5\text{--}10$ Gyr), metallicità elevate e abbondanze $[\alpha/\text{Fe}]$ sovrasolari, indizio di formazione rapida [1]. La dinamica è dominata dalla dispersione di velocità; si distinguono *slow* e *fast rotators* in base al parametro rotazionale λ_R . I profili di luminosità seguono leggi di Sérsic;

$$I_{\lambda}(R) = I_{e,\lambda} \exp \left\{ -b(n) \left[\left(\frac{R}{R_e} \right)^{1/n} - 1 \right] \right\}$$

da cui per $n \simeq 4$ si ottiene la legge di de Vaucouleurs tipica delle ellittiche classiche. In prima approssimazione le isofote sono ellissi concentriche, con possibili *isophotal twist* (assi non perfettamente coassiali) [9]; in seconda, possono mostrare deviazioni (forme *discy* o *boxy*).

Struttura e relazioni di scala. Le ETG seguono relazioni regolari — *Faber–Jackson* ($L\text{--}\sigma$) e *Kormendy* (brillantezza– R_e) — interpretabili come proiezioni del *piano fondamentale* che lega R_e , σ_0 e $\langle I \rangle_e$ (Fig. 2.4). Esistono anche correlazioni con i SMBH (relazione di *Magorrian*). Tali vincoli riflettono l’equilibrio dinamico nel potenziale combinato stelle–DM [2]. Le ETG più massicce ospitano spesso gas caldo ($T \sim 10^{6-7}$ K) rivelabile in X, retaggio del loro passato evolutivo.

2.4 L’ambiente delle galassie nell’universo attuale

L’ambiente cosmico influenza profondamente la morfologia e la formazione stellare. Le interazioni gravitazionali — dalle deboli distorsioni mareali alle fusioni maggiori (Fig. 5.2) — modificano la struttura delle galassie e possono attivare starburst o AGN [4, 5]. La maggior parte delle galassie risiede in gruppi gravitazionalmente legati, dove le velocità

³qui riportata in termini di densità superficiali, più facili da misurare. $\alpha \simeq 1.4$ per le galassie a spirale e le starburst.

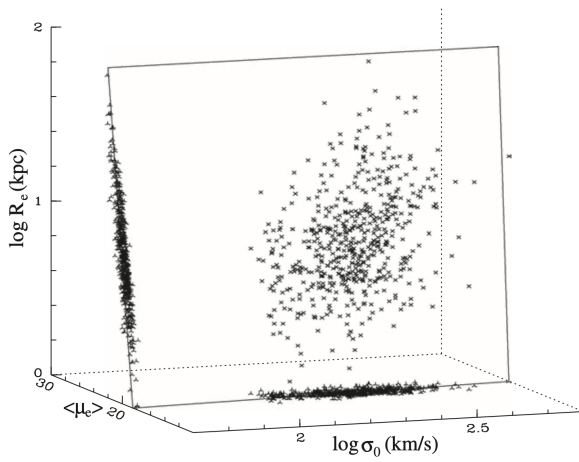


Figura 2.4: Piano fondamentale delle galassie ellittiche nello spazio $(\log R_e, \log \sigma_0, \langle \mu \rangle_e)$. I punti sono galassie; gli assi mostrano raggio efficace (kpc), dispersione di velocità centrale (km s^{-1}) e brillantezza media entro R_e (mag arcsec^{-2}). Una volta calibrato su un campione di galassie aventi distanze misurate indipendentemente, il piano fondamentale può essere usato, a basso redshift, per stimare le distanze di galassie ETG, dato che correla due osservabili indipendenti dalla distanza σ_0 e $\langle I \rangle_e$ con R_e misurato in unità fisiche (di solito kpc), che, combinato con la sua misura angolare, fornisce la distanza assoluta. Fonte: [2, 9]

moderate favoriscono fusioni e trasformazioni morfologiche. Negli ammassi, invece, il mezzo intra-cluster caldo ($T \sim 10^7 - 10^8$ K) provoca *ram pressure stripping* e soppressione della formazione stellare. Il gas caldo, osservabile in raggi X e tramite l'effetto *Sunyaev-Zeldovich* — lo scattering Compton inverso dei fotoni del CMB con gli elettroni termici del mezzo intra-cluster — produce una lieve distorsione dello spettro del fondo cosmico, utile a rivelare ammassi anche a grande distanza [1, 10].

Dalla Via Lattea alla rete cosmica. La Via Lattea e M31 dominano il Gruppo Locale (~ 1 Mpc), che ospita numerose galassie nane soggette a stripping mareale. Su scale maggiori, le galassie tracciano la *cosmic web* (Fig. 2.5), rete di filamenti e vuoti segnata anche dalla materia oscura [3]. La funzione di correlazione a due punti⁴

$$\xi_{\text{gal}}(r) = \left(\frac{r}{r_0} \right)^{-\gamma}$$

quantifica il clustering, più forte per le ETG rispetto alle SFG. Le galassie massicce e rosse (E/S0) tendono a trovarsi in ambienti densi, mentre le SFG abitano regioni a bassa densità. Solo una piccola frazione della densità barionica cosmica è rappresentata da stelle: la maggior parte risiede nel gas diffuso caldo dei filamenti (*WHIM*), che completa il bilancio barionico dell'universo attuale.

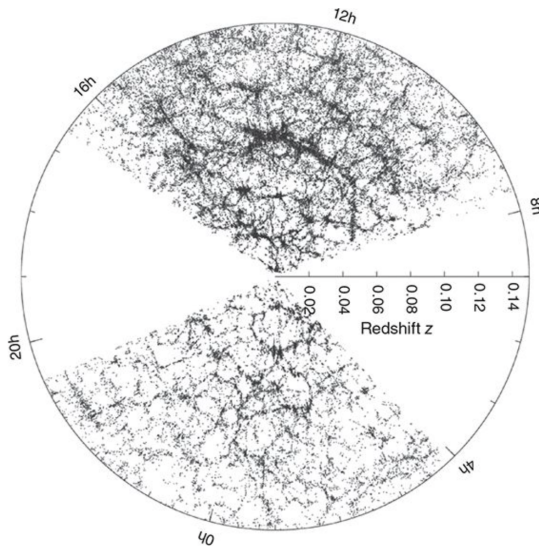


Figura 2.5: Struttura a grande scala dell'universo locale, mostrata nel piano ascensione retta-redshift ($z < 0.15$) dai dati SDSS. Ogni punto rappresenta una galassia con redshift spettroscopico; le due regioni coniche indicano la copertura del cielo osservata da un osservatore nel centro ed entro 6° dall'equatore. Fonte: [1]

⁴ $\xi_{\text{gal}}(r)$ misura l'eccesso di probabilità, rispetto a una distribuzione casuale, di trovare una galassia a distanza r . La forma a legge di potenza vale su scale $\lesssim 10$ Mpc, con $\gamma \approx 1.8$ e $r_0 \approx 5$ Mpc.

3. Il modello cosmologico Λ CDM

3.1 Fondamenti del modello Λ CDM

Le osservazioni di Edwin Hubble mostrarono che le galassie si allontanano con velocità proporzionale alla distanza ($v = H_0 d$), indicando che l'universo è in espansione. La Relatività Generale descrive questa evoluzione tramite la metrica di Friedmann–Lemaître–Robertson–Walker e il fattore di scala $a(t)$, che cresce nel tempo. Le equazioni di Friedmann collegano l'espansione alla densità totale di energia, prevedendo epoche dominate da radiazione, materia e, oggi, da energia oscura. Una forma comunemente usata, valida per un universo piatto, esprime il tasso di espansione in funzione del redshift¹:

$$H^2(z) = H_0^2 \left[\Omega_{m,0}(1+z)^3 + \Omega_{rad,0}(1+z)^4 + \Omega_{\Lambda,0} \right]$$

Il modello Λ CDM, che rappresenta il paradigma cosmologico attuale, è completamente determinato da un piccolo numero di parametri cosmologici che quantificano la composizione e la geometria dell'universo (Tab. A.1). L'universo osservabile risulta piatto ($\Omega_{tot} \simeq 1$) e composto per circa il 70% da energia oscura, 25% da materia oscura fredda e 5% da materia barionica. Le fluttuazioni di densità primordiali, generate da processi quantistici durante l'inflazione, hanno innescato la formazione delle strutture cosmiche per instabilità gravitazionale. Le principali osservazioni — anisotropie della CMB, supernove di tipo Ia, oscillazioni acustiche barioniche e distribuzione delle galassie — concordano su un'età dell'universo di circa 13.8 miliardi di anni [1].

3.2 Evoluzione termica e radiazione cosmica di fondo

Nei primi minuti dopo il Big Bang, a temperature di 10^9 – 10^{10} K, le reazioni nucleari produssero i nuclei leggeri (H, He, Li) in accordo con le abbondanze osservate, confermando la *Big Bang Nucleosynthesis*. Quando l'universo ebbe circa 0.4 Myr ($z_{rec} \sim 1000$), protoni ed elettroni si combinarono in atomi neutri: è la fase di *ricombinazione*. I fotoni si disaccoppiarono dalla materia formando la radiazione cosmica di fondo a microonde (CMB), oggi osservata a 2.73 K. Le minuscole anisotropie della CMB riflettono le fluttuazioni di densità iniziali (Fig. 3.1). In seguito, la radiazione ultravioletta emessa dalle prime stelle e dai quasar ionizzò nuovamente il gas intergalattico (*reionizzazione*, $z \sim 6$ –10). (Tab. A.2).

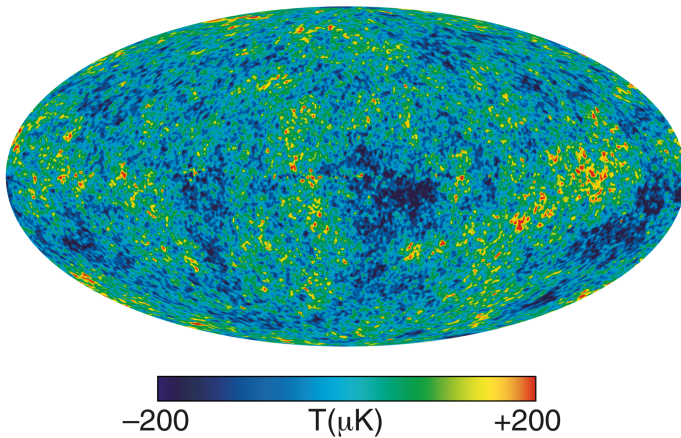


Figura 3.1: Anisotropie di temperatura della radiazione cosmica di fondo (CMB) osservate dal satellite WMAP. L'immagine mostra la *Nine-year Internal Linear Combination (ILC) map*, combinazione di nove anni di osservazioni in cinque bande di frequenza per rimuovere i contributi galattici. I colori rappresentano fluttuazioni di temperatura di $\pm 200 \mu\text{K}$ rispetto al valore medio di 2.725 K. Crediti: NASA / WMAP.

¹ dove H_0 è il valore attuale della costante di Hubble e i tre termini rappresentano i contributi della materia, della radiazione e dell'energia oscura.

3.3 Sintesi del quadro cosmologico

Nel modello Λ CDM l'universo è nato da uno stato caldo e denso, si è espanso e raffreddato secondo $T \propto 1/a(t)$, passando da una fase dominata dalla radiazione a una dominata dalla materia, fino all'attuale fase di espansione accelerata dovuta all'energia oscura. Le fluttuazioni primordiali osservate nella CMB costituiscono i semi da cui, attraverso la crescita gravitazionale, si formarono gli aloni di materia oscura e, successivamente, le galassie. Questo scenario, sostenuto da un ampio consenso osservativo e teorico, rappresenta oggi la cornice cosmologica di riferimento per lo studio della formazione galattica [1].

4. Origine delle strutture primordiali

4.1 Formazione degli aloni di materia oscura

Le strutture cosmiche odierne — galassie e ammassi — si sono formate per instabilità gravitazionale a partire da piccole fluttuazioni di densità primordiali. La materia oscura, che costituisce quasi tutta la massa cosmica, ha generato i potenziali entro cui si sono raccolti i barioni, fornendo l'impalcatura su cui sono nate le galassie [1].

Evidenze osservative. Le curve di rotazione delle spirali, la dinamica degli ammassi e le lenti gravitazionali mostrano che la massa visibile spiega solo una parte della gravità osservata. Tali indizi, insieme alle anisotropie della CMB e alla distribuzione su larga scala delle galassie, indicano che la materia oscura fredda e non barionica domina la massa dell'universo.

Crescita delle strutture. Nel modello Λ CDM la materia oscura è collisionless e priva di pressione, quindi le fluttuazioni di densità crescono precocemente per instabilità gravitazionale. I barioni, inizialmente accoppiati alla radiazione, possono collassare solo dopo il disaccoppiamento, seguendo i potenziali della materia oscura. Le simulazioni mostrano una crescita gerarchica: piccoli aloni si formano per primi e si fondono in strutture più massicce (Fig. 4.1).

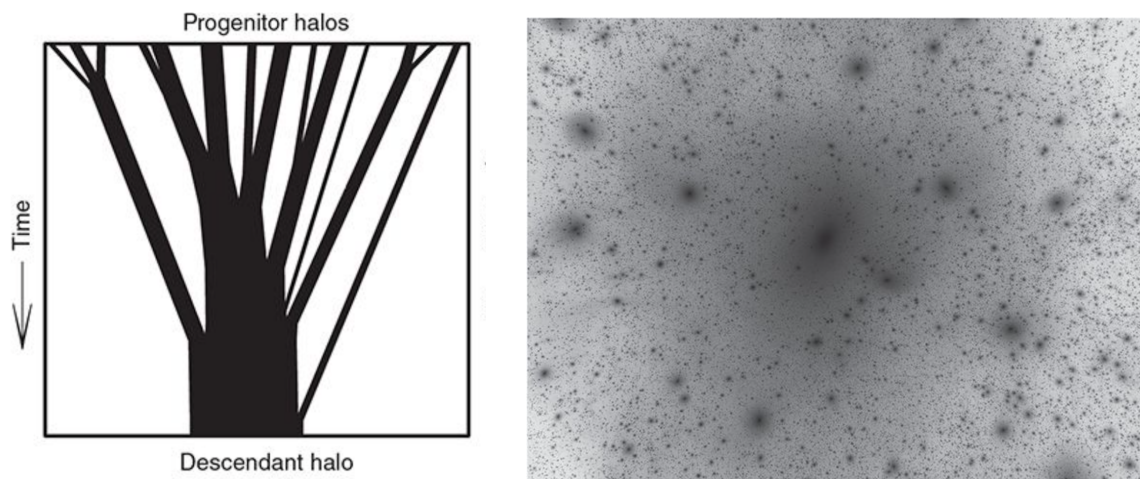


Figura 4.1: **A sinistra:** crescita gerarchica di un alone di materia oscura (*merger tree*); le linee orizzontali rappresentano gli aloni progenitori, le fusioni i punti di connessione. **A destra:** snapshot al redshift $z = 0$ di un alone simile a quello della Via Lattea (Aq-A-1) nella simulazione *Aquarius*. La scala di grigi indica la densità proiettata della materia oscura. Dimensione orizzontale ~ 1 Mpc. Fonte: [1].

Collasso e virializzazione. Le regioni più dense si espandono più lentamente, raggiungono un massimo raggio (*turnaround*) e poi collassano. L'equilibrio si stabilisce quando il sistema diventa virializzato, con densità circa 200 volte quella media dell'universo (valore

convenzionale derivante dal modello del collasso sferico in un universo di Einstein–de Sitter, ove $\rho_{\text{vir}} \approx 18\pi^2 \bar{\rho} \approx 178 \bar{\rho}$). La materia oscura, non collidendo con se stessa, attraversa il centro del potenziale gravitazionale e raggiunge rapidamente l’equilibrio tramite *violent relaxation*. Le strutture di piccola massa collassano per prime, le grandi più tardi.

Distribuzione e proprietà degli aloni. Le fluttuazioni primordiali seguono uno spettro di potenza $P(k)$ quasi gaussiano. Il formalismo di Press–Schechter descrive la *funzione di massa degli aloni*, mostrando che quelli piccoli sono numerosi, mentre i più massicci sono rari. Nelle regioni più dense il collasso è favorito, generando il *galaxy bias*, ossia la tendenza delle galassie a risultare più concentrate della materia totale. Le simulazioni cosmologiche [2, 5, 3] mostrano che gli aloni virializzati hanno profili di densità universali, ben descritti da Navarro–Frenk–White (due parametri) o Einasto (tre parametri):

$$\rho_{\text{NFW}}(r) = \frac{4\rho_s}{(r/r_s)[1 + (r/r_s)]^2}, \quad \rho_{\text{Einasto}}(r) = \rho_s \exp\left[-\frac{2}{\alpha}\left(\left(\frac{r}{r_s}\right)^\alpha - 1\right)\right].$$

Gli aloni sono triassiali, contengono sottostrutture e possiedono un modesto momento angolare ($\lambda \sim 0.04$) dovuto alle coppie mareali esercitate dalle sovradensità circostanti¹. La concentrazione decresce con la massa e aumenta con l’epoca di formazione: gli aloni antichi sono più compatti. Queste proprietà determinano la profondità del potenziale e la capacità di trattenere e raffreddare il gas, influenzando direttamente la formazione galattica.

4.2 Dalla ricombinazione alla reionizzazione

Dopo il disaccoppiamento materia–radiazione, l’universo passò da un plasma ionizzato e opaco a uno neutro e trasparente, poi nuovamente ionizzato dalle prime sorgenti luminose. Questa doppia transizione segna il passaggio dall’universo primordiale a quello popolato da stelle e galassie [1].

Ricombinazione² ed età oscura (*dark ages*). Quando la temperatura scese sotto 3000 K ($z \approx 1000$), protoni ed elettroni formarono atomi neutri e il gas divenne trasparente, generando la CMB. Seguì un lungo intervallo privo di sorgenti luminose: il gas neutro si raffreddò per espansione mentre le fluttuazioni di densità continuavano a crescere.

Collasso e raffreddamento del gas. Nei primi aloni di materia oscura (10^5 – $10^6 M_\odot$; vedi §4.1) il gas si accumulò e si riscaldò. Il raffreddamento radiativo dovuto alle molecole di H_2 permise di raggiungere poche centinaia di kelvin, soglia per l’innesco della formazione stellare. Questi *minialoni* furono i primi laboratori di formazione stellare cosmica.

Le prime stelle e i primi buchi neri. Le stelle di *Popolazione III*, formate da gas primordiale ($z \approx 20$ – 30), erano molto massicce ($M \gtrsim 100 M_\odot$) e di vita breve. La loro radiazione ionizzò localmente il mezzo, mentre le supernovae arricchirono di metalli l’ambiente, aprendo la strada alla formazione delle prime galassie ($z \approx 10$)³ e a una formazione stellare più efficiente (Fig. 4.2). Il collasso delle stelle più massicce generò i primi buchi neri (10^2 – $10^3 M_\odot$), semi dei futuri supermassicci che alimenteranno i quasar già osservati a $z \gtrsim 6$ – 7.5 .

Reionizzazione e feedback cosmico. La radiazione ultravioletta emessa da stelle, galassie e quasar produsse regioni di idrogeno ionizzato (H II), analoghe a grandi sfere di Strömgren [10],

¹Le coppie mareali derivano dal campo gravitazionale non uniforme che agisce su aloni non sferici, inducendo un momento torcente e quindi rotazione.

²Il termine *ricombinazione* è improprio, poiché si trattò della *prima* combinazione fra elettroni e nuclei per formare atomi [2].

³Le osservazioni del *JWST* hanno identificato galassie candidate fino a $z \approx 14$ [7], anticipando l’epoca di formazione rispetto alle stime precedenti basate su *HST*.

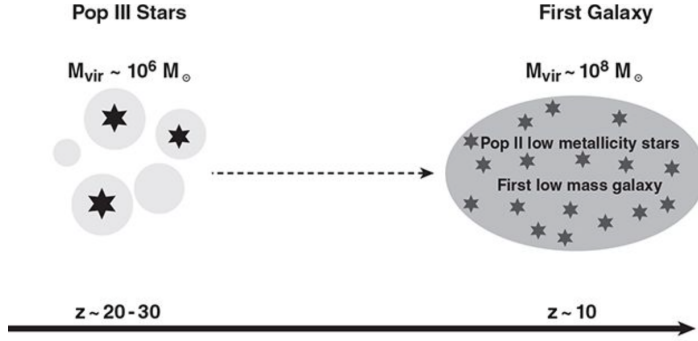


Figura 4.2: Transizione dalle stelle Pop III alle prime galassie. A $z \approx 20-30$ le Pop III si formano in aloni di DM di massa $\sim 10^6 M_\odot$, dove il gas primordiale si raffredda tramite molecole primordiali. Le prime galassie compaiono a $z \approx 10$ in aloni più massicci, con T_{vir} sufficiente a rendere efficiente il raffreddamento atomico. Fonte: [1].

che si estessero fino a rendere l'universo globalmente ionizzato tra $z \approx 6$ e 10. Un'evidenza diretta è il *Gunn–Peterson trough* (Fig. 4.3), cioè la soppressione del flusso a lunghezze d'onda inferiori alla riga Lyman- α negli spettri dei quasar ad alto redshift, segno della presenza di idrogeno neutro nel mezzo intergalattico prima della reionizzazione. Ulteriore conferma proviene dalla polarizzazione su larga scala della CMB: la diffusione Thomson dei fotoni sui nuovi elettroni liberi genera un debole segnale polarizzato, rilevato da *WMAP* e *Planck*. Il gas riscaldato a $T \sim 10^4$ K ridusse l'efficienza del collasso nei piccoli aloni, condizionando la formazione delle prime galassie e la successiva evoluzione cosmica. La reionizzazione segna così la fine dell'età oscura e l'inizio dell'universo osservabile dominato da galassie e quasar.

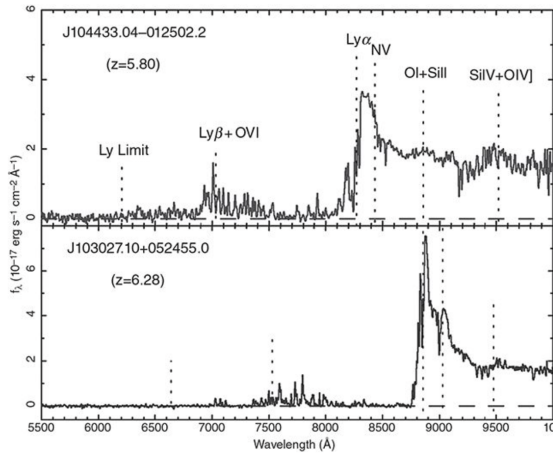


Figura 4.3: Spettri SDSS di due quasar a $z \approx 5.8$ (in alto) e $z \approx 6.28$ (in basso). Le linee tratteggiate indicano le principali transizioni e il Lyman limit; il flusso quasi nullo per $\lambda < \lambda_{\text{Ly}\alpha}$ nel pannello inferiore mostra il *Gunn–Peterson trough*, segno di un IGM più neutro a $z \sim 6$. Fonte: [1].

5. Fisica della formazione galattica

5.1 Ingredienti fisici della formazione galattica

Nel quadro gerarchico del modello cosmologico Λ CDM, le galassie si formano all'interno degli aloni di materia oscura che crescono per collasso gravitazionale e successive fusioni. La loro evoluzione dipende dall'interazione tra materia oscura, gas e processi energetici interni, che regolano la conversione del gas in stelle e la morfologia finale del sistema. L'equilibrio tra riscaldamento, raffreddamento, accrescimento e feedback regola l'efficienza della formazione stellare e la varietà di strutture osservate [1].

Raffreddamento e accrescimento del gas. Durante la contrazione gravitazionale di un alone di materia oscura, il gas contenuto al suo interno si riscalda fino alla temperatura viriale ($T_{\text{vir}} \sim 10^4 - 10^7$ K a seconda della massa dell'alone):

$$T_{\text{vir}} = \frac{G \mu m_p M_{\text{gas}}}{3 k_B r_g}.$$

Se la densità è sufficiente, il gas perde energia per irraggiamento (Fig. 5.1), permettendo al gas di fluire verso il centro e di formare stelle. Sia i calcoli analitici che le simulazioni [2, 4] distinguono due modalità principali: un *accrescimento caldo*, in cui il gas è riscaldato per shock alla temperatura viriale fino a $T_{\text{vir}} \sim 10^{6-7}$ K, e un *accrescimento freddo*, dove il gas è ancora freddo quando raggiunge il centro dell'alone; questo accrescimento è più efficiente negli aloni poco massicci e ad alto redshift, dove flussi filamentari (*cold streams*) penetrano fino al centro senza subire il riscaldamento da onda d'urto. L'efficienza di raffreddamento, dipendente da densità, temperatura e metallicità, stabilisce la quantità di gas disponibile per la formazione stellare.

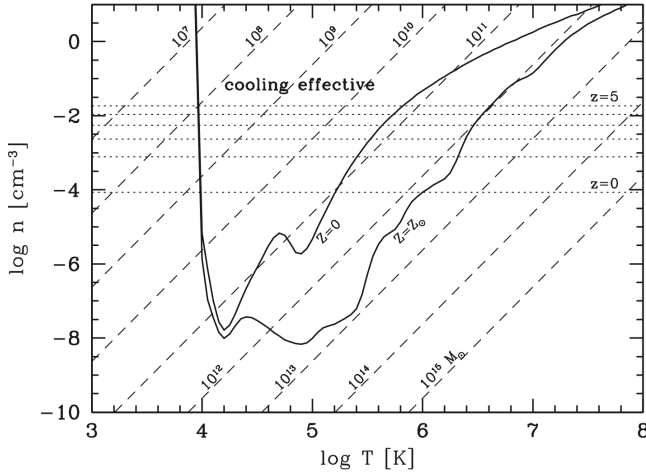


Figura 5.1: Diagramma di raffreddamento del gas in funzione di temperatura e densità. Le curve continue mostrano le condizioni per cui $t_{\text{cool}} = t_{\text{freefall}}$ in gas a composizione primordiale e solare ($Z = 0, Z_{\odot}$). Le linee orizzontali puntinate indicano la densità tipica degli aloni formati ai redshift segnati, circa 200 volte la densità critica cosmica. Le linee tratteggiate diagonali rappresentano la relazione n - T per massa gassosa costante M_g . Il raffreddamento è efficace per aloni con n e T al di sopra di tali curve, consentendo il collasso del gas e la formazione galattica. Tutti i calcoli assumono $f_{\text{gas}} = 0.15$, $\Omega_{m,0} = 0.3$ e $h = 0.7$. Fonte: [2].

Formazione stellare e ciclo del gas. Le stelle nascono nelle regioni più dense e fredde del mezzo interstellare, dove la pressione termica¹ non basta più a contrastare il collasso gravitazionale (*criterio di Jeans*):

$$M > M_J = \frac{\pi^{5/2}}{6} \frac{c_s^3}{G^{3/2} \rho^{1/2}}$$

tali regioni sono le cosiddette *nubi molecolari giganti* (GMC), dove il gas può raffreddarsi fino a temperature di $T \sim 10$ – 15 K grazie alle transizioni rotazionali delle molecole. La distribuzione delle masse stellari alla nascita è descritta dalla *Initial Mass Function* (IMF), che determina il rapporto tra stelle massive e di bassa massa. La sua forma, spesso assunta come universale nei modelli di formazione galattica, può essere rappresentata da diverse formulazioni — ad esempio quelle di Salpeter, Scalo, Kroupa, Chabrier o Larson [1]:

$$\phi_{\text{Salpeter}}(m) = \phi_0 m^{-2.35} \quad \phi_{\text{Scalo}}(m) \propto \begin{cases} m^{-1.8}, & 0.1 \leq m < 1 \\ m^{-3.25}, & 1 \leq m < 10 \\ 0.16m^{-2.45}, & m \geq 10 \end{cases}$$

Essa influenza la luminosità integrata, la produzione di metalli e la retroazione energetica (*stellar feedback*) delle popolazioni stellari. La conversione del gas in stelle è regolata dal feedback: venti stellari e supernovae riscaldano il gas, impedendo che tutto il materiale venga rapidamente consumato. Il risultato è un equilibrio dinamico tra accrescimento, consumo e restituzione di materia che determina la durata della fase di attività di una galassia.

Evoluzione chimica e proprietà spettrali. L'evoluzione delle stelle modifica la composizione chimica del gas. Le supernovae II (*core-collapse*) arricchiscono rapidamente l'ambiente in

¹Anche l'energia magnetica può dare un contributo dello stesso ordine di grandezza di quello gravitazionale.

elementi α , mentre le supernovae Ia (*thermonuclear*) forniscono ferro su tempi scala più lunghi. La metallicità crescente aumenta l'efficienza di raffreddamento (più righe radiative) e rende più rosse le popolazioni stellari (maggiore opacità e presenza di polvere). I modelli di popolazione e di evoluzione chimica consentono di calcolare gli *spettri sintetici* delle galassie, da cui si ricavano masse stellari, età medie e tassi di formazione stellare a partire dalla distribuzione spettrale di energia (SED). L'estinzione e la riemissione da parte della polvere modificano lo spettro e devono essere incluse per un confronto accurato con le osservazioni.

Feedback stellare e da AGN. Le stelle massicce e le supernovae rilasciano energia e metalli nel mezzo interstellare, riducendo l'efficienza della formazione stellare e, nei piccoli aloni, espellendo parte del gas. Nelle galassie più massicce l'evoluzione è dominata invece dal *feedback da AGN*: l'accrescimento di gas sui buchi neri supermassicci produce radiazione, venti e getti che possono riscaldare o espellere il gas circostante, spegnendo la formazione stellare (*quenching*). Questo meccanismo, ormai consolidato nei modelli di formazione galattica [5], può contribuire a spiegare la relazione osservata tra la massa del buco nero e le proprietà del rigonfiamento stellare: quando l'energia emessa dall'AGN diventa sufficiente a espellere o riscaldare il gas, interrompe l'accrescimento e la formazione stellare, stabilendo il legame empirico tra M_\bullet e il bulge, e rappresentando un elemento chiave per la quiescenza delle galassie massicce.

Fusioni e trasformazioni morfologiche. Le fusioni galattiche (*merger*) sono una componente naturale del quadro gerarchico Λ CDM. Gli incontri *major* (fra galassie di massa comparabile, $M_1/M_2 \lesssim 3:1$) distruggono i dischi e producono sistemi cinematicamente caldi con morfologie ellittiche, spesso associati a intensi burst di formazione stellare e ad attività AGN. A seconda del contenuto di gas, le fusioni possono essere *dissipative (wet)*, quando il gas interstellare subisce compressione e raffreddamento radiativo che alimentano la formazione stellare, oppure *dissipationless (dry)*, quando avvengono tra galassie povere di gas e portano solo a una riorganizzazione dinamica delle stelle. Le fusioni *minor* contribuiscono invece alla crescita dei rigonfiamenti e all'aumento graduale della massa stellare. Anche interazioni ravvicinate non distruttive (*fly-by*) possono avere effetti significativi, generando distorsioni gravitazionali e fenomeni di *galaxy harassment*², pur non comportando una vera fusione. Le simulazioni idrodinamiche (Fig. 5.5) [3, 4, 5] mostrano che questi processi determinano gran parte della diversità morfologica osservata oggi.

5.2 Processi evolutivi e modelli di formazione delle galassie

La formazione delle galassie ha origine dal collasso delle sovradensità di materia nell'universo primordiale. Durante l'assemblaggio gerarchico degli aloni di materia oscura — che contengono una frazione barionica di gas primordiale ($f_b \simeq 0.16$) — il gas si raffredda e avvia la formazione stellare, generando nel tempo le galassie che osserviamo oggi. La grande varietà morfologica suggerisce percorsi evolutivi diversi, ma la presenza di classi ben definite e di relazioni di scala indica che pochi meccanismi fisici fondamentali governano l'intero processo. In questa sezione vengono esaminati i principali meccanismi responsabili della formazione delle componenti galattiche — dischi, rigonfiamenti, aloni e nuclei — e il loro ruolo nell'evoluzione complessiva (Tab. A.3) [1, 2, 5, 4].

Formazione dei dischi galattici. Il gas che si raffredda all'interno di un alone conserva il momento angolare acquisito durante il collasso (§4.1), disponendosi in un disco rotante in equilibrio centrifugo dove la formazione stellare procede gradualmente. La stabilità del

²Si tratta di un'evoluzione indotta da molteplici interazioni deboli in ambienti densi, che accumulano effetti dinamici fino ad alterare la morfologia galattica.

disco, regolata dal bilancio fra contenuto di gas e feedback stellare, controlla l'efficienza di formazione stellare: le instabilità locali producono *bracci a spirale* che concentrano il gas e innescano nuovi episodi di star formation. Le simulazioni idrodinamiche [5, 2] indicano che i dischi si formano già a $z > 2$ e crescono in modo secolare³ tramite accrescimento di gas freddo dai filamenti cosmici. Nei dischi giovani e ricchi di gas la turbolenza è elevata e la formazione stellare diffusa, mentre nei dischi maturi il feedback riduce la frammentazione, producendo strutture più sottili. Le relazioni di scala, come la legge di Tully–Fisher, riflettono la connessione tra dinamica e contenuto barionico.

Barre e pseudorigonfiamenti. Nei dischi evoluti le instabilità interne possono generare barre stellari, che trasferiscono momento angolare verso l'esterno e convogliano gas verso il centro, alimentando starburst e formando rigonfiamenti appiattiti (*pseudobulges*) sostenuti dalla rotazione. Tali strutture, distinte dai *bulges* classici di origine collisionale, derivano da un'evoluzione lenta e interna. Le osservazioni infrarosse mostrano che le barre sono comuni nelle spirali intermedie e influenzano fortemente l'evoluzione morfologica a lungo termine.

Formazione dei rigonfiamenti sferoidali. Le galassie ellittiche e i rigonfiamenti classici si formano invece tramite fusioni e collisioni (Fig. 5.2). Le fusioni *major*, che coinvolgono sistemi di massa comparabile, trasformano le strutture discoidali in sistemi più compatti e cinematicamente caldi, con profili di luminosità di tipo de Vaucouleurs. Le fusioni *minor* e le instabilità secolari contribuiscono poi alla crescita successiva del rigonfiamento. Questi eventi, spesso accompagnati da intensi burst di formazione stellare e da attività AGN, plasmano l'evoluzione successiva. Le simulazioni [5, 3] mostrano che quasi tutte le galassie massicce hanno attraversato fusioni di questo tipo, mentre nei sistemi meno massicci prevalgono processi secolari. Gli sferoidi più antichi risultano più compatti, suggerendo una crescita *inside-out* per accrezione esterna, coerente con l'evoluzione del *piano fondamentale*.

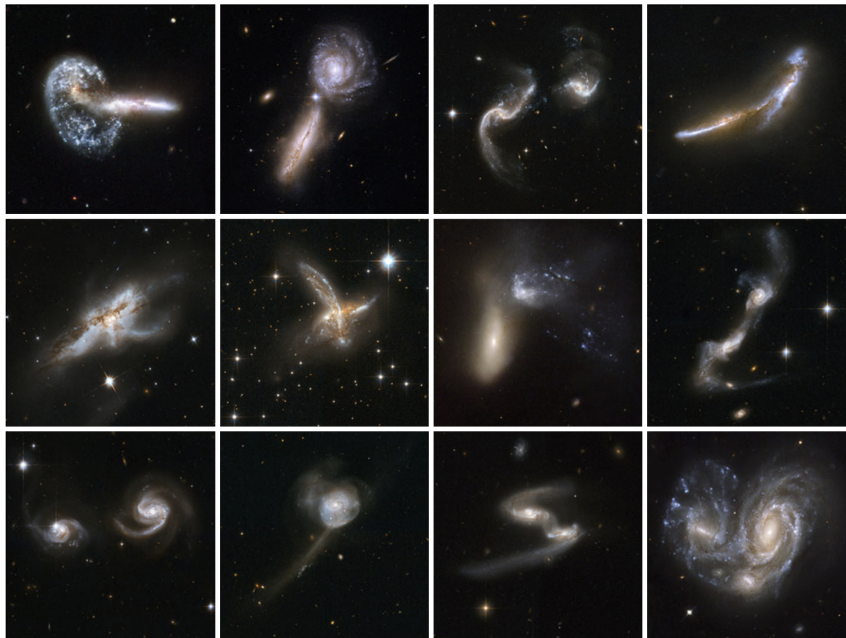


Figura 5.2: Collezione di galassie interagenti e peculiari osservate con *HST*. Le interazioni e le fusioni contribuiscono alla formazione della popolazione attuale di galassie. Fonte: [4].

Formazione degli aloni stellari. Gli aloni stellari, composti da stelle antiche e povere di metalli, si formano per accrezione di galassie satelliti e *stripping* mareale. Le simulazioni mostrano una costruzione gerarchica, tramite accumulo di contributi stellari da molte progenitrici minori:

³In astrofisica, un processo secolare è un'evoluzione lenta e interna, non dovuta a fusioni o interazioni esterne.

la loro composizione conserva la memoria della storia di merging del sistema, fungendo da “fossile” dell’evoluzione galattica.

Efficienza di formazione e scale caratteristiche. Il confronto tra funzione di massa degli aloni (HMF) e funzione di luminosità (LF) mostra che l’efficienza di conversione del gas in stelle è massima per $M_{\text{halo}} \sim 10^{12} M_{\odot}$ ([4], Fig. 5.3). Negli aloni meno massicci, il feedback e

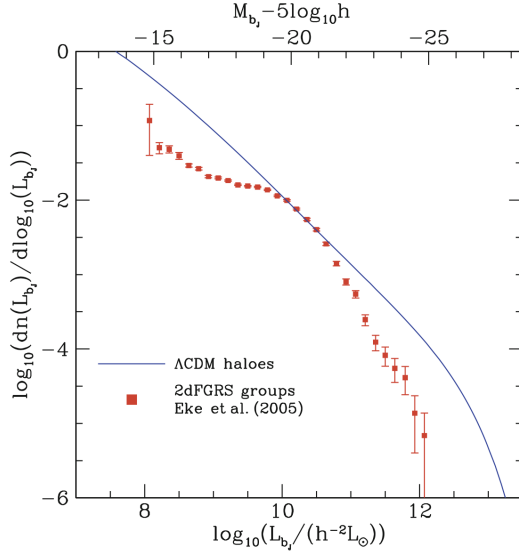


Figura 5.3: Funzione di luminosità delle galassie (punti rossi) confrontata con la funzione di massa degli aloni di materia oscura prevista da un modello Λ CDM, assumendo un rapporto massa–luminosità costante. La discrepanza tra le due curve indica che l’efficienza di conversione dei barioni in stelle varia con la massa dell’alone, risultando massima per $M \sim 10^{12} h^{-1} M_{\odot}$. Fonte: [4].

la reionizzazione riducono drasticamente la formazione stellare, mentre in quelli più massicci il raffreddamento inefficiente (Fig. 5.1) e il feedback da AGN la sopprimono, fissando le scale di massa e luminosità tipiche [2, 5].

Quenching. Le galassie quiescenti hanno interrotto la formazione stellare per effetto del *quenching*, dovuto a diversi meccanismi: (i) nei sistemi massicci, l’alta temperatura del gas e il feedback da AGN portano al *mass quenching*; (ii) in ambienti densi, fenomeni di *ram-pressure* o *tidal stripping* causano *environmental quenching*; (iii) il feedback energetico di AGN o supernovae può espellere o riscaldare il gas (*negative feedback*); (iv) meccanismi di mantenimento, come il riscaldamento da getti radio, impediscono al gas caldo di raffreddarsi (*maintenance quenching*).

Storia di assemblaggio. Le SFG crescono in modo graduale e secolare, alimentate da flussi di gas freddo che sostengono la formazione stellare per tempi cosmici lunghi. La scarsità di fusioni *major* a $z \lesssim 1$ indica che l’evoluzione delle galassie a disco è dominata da processi lenti e non violenti, coerenti con la presenza di pseudorigonfiamenti e bassi rapporti bulge–disco. Le ETG si formano invece in due fasi: (i) a $z \gtrsim 2-3$ da fusioni *wet major* di dischi ricchi di gas, che innescano starburst e attività AGN; (ii) in seguito, fusioni *dry* tra ellittiche già quiescenti producono le ETG più massicce, con crescita *inside-out*. La sequenza di tali processi evolutivi è illustrata in Fig. 5.4. Questo scenario spiega la predominanza delle ETG in ambienti densi e la correlazione tra massa, età stellare e compattezza osservata nelle popolazioni locali [4, 2, 5]. Nel complesso, la formazione delle strutture segue uno schema gerarchico, mentre la formazione stellare mostra un comportamento “anti-gerarchico”, più marcato nelle ETG e alle alte masse: le galassie più massicce si formano prima e si spengono più rapidamente (*downsizing*), pur in un quadro di crescita gerarchica degli aloni [1, 3]). Questo quadro, supportato dalle simulazioni [3], spiega la transizione dalla *blue cloud* alla *red sequence* (§2.1) e la presenza di galassie nane quiescenti nel Gruppo Locale.

Demografia galattica e modelli numerici. Le differenze tra galassie a disco e sferoidali, o tra sistemi attivi e quiescenti, emergono dalla combinazione di massa, ambiente e feedback.

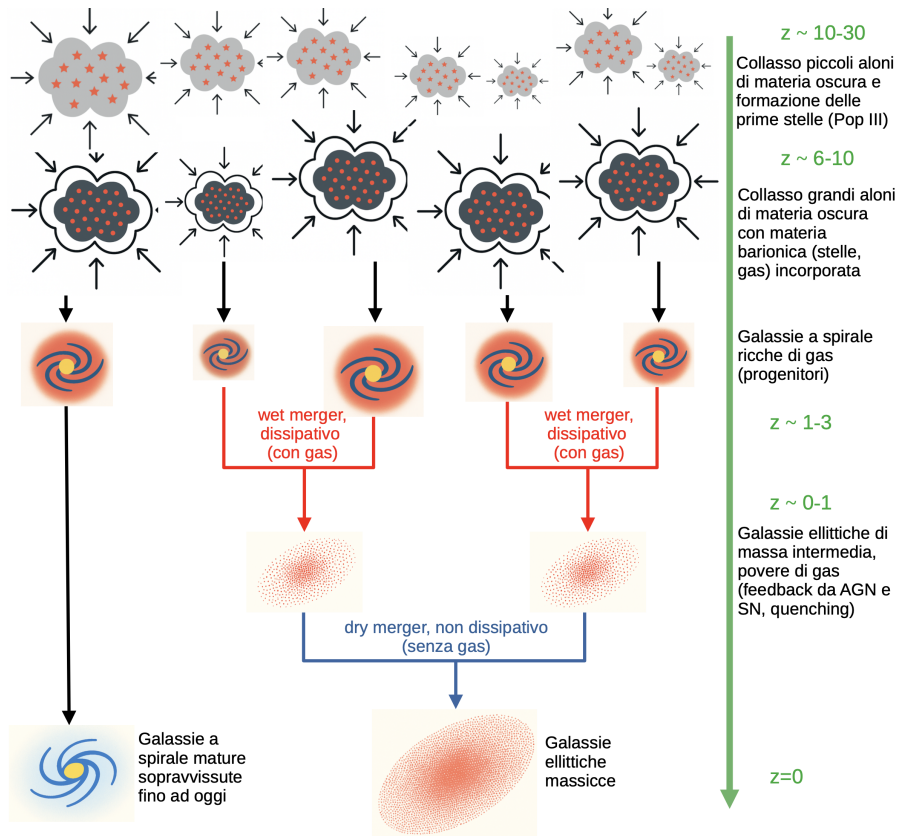


Figura 5.4: Schema illustrativo della sequenza evolutiva nella formazione delle galassie: dai primi aloni di materia oscura e stelle di Pop III alle galassie spirali e alle ellittiche massicce, attraverso fusioni dissipative (*wet mergers*) e non dissipative (*dry mergers*). Elaborazione dell'autore, basata sui cap. 10.4 e 10.5 di [4].

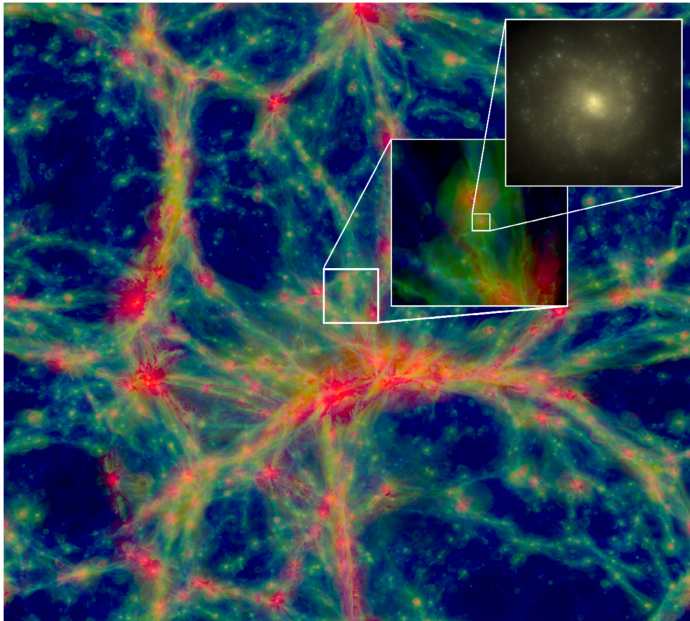


Figura 5.5: Una sezione di $100 \times 100 \times 20$ cMpc attraverso la simulazione EAGLE, che illustra l'intervallo dinamico raggiungibile con le moderne simulazioni numeriche idrodinamiche. L'intensità rappresenta la densità del gas, mentre il colore indica la temperatura del gas (dal blu al verde al rosso, da più freddo a più caldo). L'inserito mostra una regione di 10 cMpc e 60 ckpc di lato. Lo zoom su una singola galassia, con massa stellare pari a $3 \times 10^{10} M_{\odot}$, mostra la luce stellare nella banda ottica. Fonte: [5].

I modelli numerici più avanzati, idrodinamici e semi-analitici (Fig. 5.5), includono ormai un'ampia gamma di processi fisici — accrescimento, raffreddamento, formazione stellare, retroazione da stelle e AGN — e riproducono molte proprietà osservate della popolazione galattica: (i) la *stellar mass function* e la relazione massa stellare–massa dell'alone; (ii) la *bimodalità* in colore e SFR; (iii) le *relazioni di scala* Tully–Fisher, Faber–Jackson e il piano fondamentale. L'accordo tra simulazioni e osservazioni [5, 3] rappresenta una delle principali conferme della validità del modello cosmologico Λ CDM applicato alla formazione galattica, sebbene rimangano aperte questioni sui meccanismi di feedback, sulla morfologia e sulla distribuzione dei barioni, discusse nel capitolo seguente.

6. Prospettive e problemi aperti

Negli ultimi decenni la teoria della formazione galattica ha raggiunto un notevole grado di coerenza interna. Il modello cosmologico standard Λ CDM descrive con successo la crescita gerarchica delle strutture e la distribuzione delle galassie su larga scala, come mostrato dai modelli teorici classici [2]. Tuttavia, nonostante il forte accordo globale tra simulazioni e osservazioni, restano numerosi aspetti ancora incerti, che oggi costituiscono il centro della ricerca in cosmologia galattica.

Convergenza dei modelli fisici. Secondo la rassegna [5], le moderne simulazioni cosmologiche e i modelli semi-analitici convergono su un insieme minimo di processi chiave: accrescimento di gas lungo i filamenti cosmici, venti stellari che regolano la formazione stellare nelle galassie a bassa massa, feedback da buchi neri supermassicci che limita la crescita di quelle più massicce, e trasformazioni morfologiche dovute a fusioni ed effetti ambientali. Tutti questi meccanismi, tuttavia, sono ancora descritti in modo fenomenologico e richiedono calibrazioni empiriche: i modelli non sono quindi ancora completamente predittivi, ma restano in parte “tarati” sulle osservazioni disponibili.

Difficoltà osservative. Come evidenziato da [4], un problema ancora aperto è la difficoltà di collegare tra loro le popolazioni galattiche osservate a redshift diversi, a causa dei differenti criteri di selezione. Questo limita la possibilità di seguire in modo diretto l’evoluzione di una stessa popolazione nel tempo cosmico. Le osservazioni più recenti, che hanno rivelato galassie già massicce e luminose a redshift superiori a dieci, suggeriscono che la formazione stellare primordiale sia stata più efficiente del previsto, o che i modelli attuali sottostimino la velocità di accrescimento del gas nei primi aloni.

Sfide al paradigma Λ CDM. Le osservazioni più recenti, analizzate nella review [3], hanno messo in luce diverse tensioni tra teoria e dati (Fig. 6.1). Oltre alle discrepanze cosmologiche su larga scala — la cosiddetta “Hubble tension” e la differenza tra l’ampiezza delle fluttuazioni misurata nel fondo cosmico e quella dedotta dalle lenti deboli (S_8 tension) — esistono anomalie a piccola scala: il numero ridotto di satelliti rispetto alle previsioni, i profili di densità centrali troppo concentrati (*cusp-core problem*), la diversità morfologica dei sistemi di bassa massa e la possibile esistenza di galassie prive di materia oscura. Le soluzioni proposte spaziano da una materia oscura autointeragente o calda, fino a una revisione dei modelli di feedback barionico.

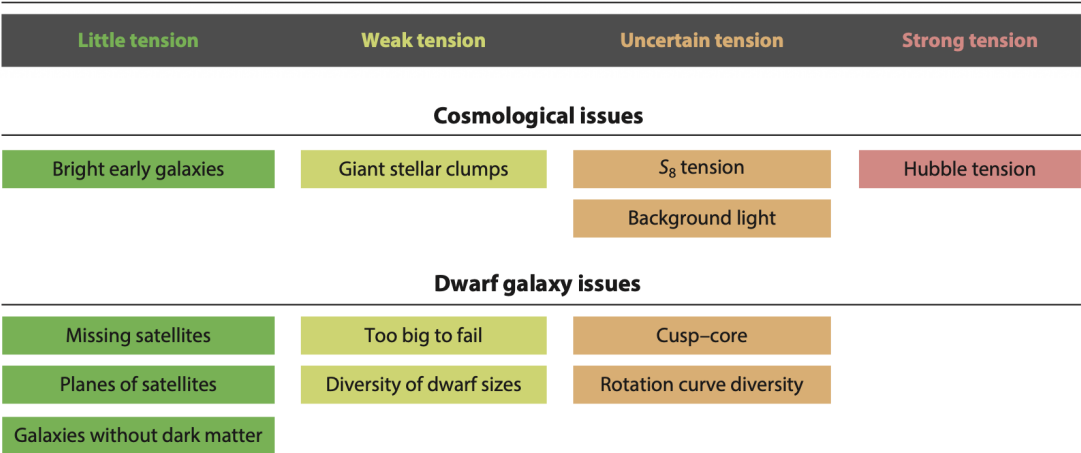


Figura 6.1: Livello di tensione o di sfida al modello cosmologico Λ CDM, suddiviso per intensità (da “little tension” a “strong tension”) e per tipo di problema cosmologico o galattico. Fonte: [3].

A. Appendici

A.1 Abbreviazioni

Sigla	Significato
AGN	<i>Active Galactic Nucleus</i> – nucleo galattico attivo
CMB	<i>Cosmic Microwave Background</i> – radiazione cosmica di fondo
CDM	<i>Cold Dark Matter</i> – materia oscura fredda
DM	<i>Dark Matter</i> – materia oscura
ETG	<i>Early-Type Galaxy</i> – galassia quiescente (ellittica o lenticolare)
GMC	<i>Giant Molecular Cloud</i>
H I	Idrogeno neutro
H II	Idrogeno ionizzato
HMF	<i>Halo Mass Function</i>
HSP	<i>Hubble Space Telescope</i>
IMF	<i>Initial Mass Function</i>
JWSP	<i>James Webb Space Telescope</i>
Λ CDM	Modello cosmologico standard con costante cosmologica e CDM
LF	<i>Luminosity Function</i>
LISA	<i>Laser Interferometer Space Antenna</i>
SDSS	<i>Sloan Digital Sky Survey</i>
SFG	<i>Star-Forming Galaxy</i> – galassia a formazione stellare attiva
SFR	<i>Star Formation Rate</i> – tasso di formazione stellare
SED	<i>Spectral Energy Distribution</i> – distribuzione di energia spettrale
SN	<i>Supernova</i>
SMBH	<i>Super Massive Black Hole</i> – buco nero supermassiccio
SMF	<i>Stellar Mass Function</i>
(U)LIRG	<i>(Ultra) Luminous Infrared Galaxy</i>
WHIM	<i>Warm–Hot Intergalactic Medium</i> – mezzo intergalattico caldo

A.2 Parametri cosmologici

Tabella A.1: Principali parametri cosmologici del modello piatto Λ CDM (Planck, 2018). Il parametro di densità della radiazione attuale si ottiene come $\Omega_{r,0} = \Omega_{m,0}/(1 + z_{\text{eq}}) \approx 9.26 \times 10^{-5}$, usando i valori in tabella. Fonte: [1], Table 2.1.

Parametro	Valore	Descrizione
$\Omega_{m,0}$	0.315 ± 0.007	Materia totale (barionica + oscura)
$\Omega_{\Lambda,0}$	0.685 ± 0.007	Energia oscura (costante cosmologica)
$\Omega_{b,0}h^2$	0.0224 ± 0.0001	Densità barionica
h	0.674 ± 0.005	Costante di Hubble adimensionale ¹
z_{eq}	3402 ± 26	Redshift di uguaglianza materia–radiazione

¹Quando h viene misurato con un metodo indipendente, basato sull'osservazione di supernovae, si ottiene un valore $h \approx 0.732 \pm 0.017$. L'origine di tale discrepanza tra le due stime, nota come *Hubble tension*, è tuttora oggetto di intenso dibattito nella cosmologia osservativa.

A.3 Storia termica dell'universo

Tabella A.2: Storia termica dell'universo nel modello cosmologico standard. Fonte: [1], Table 2.2.

t Tempo cosmico	T Temperatura	z Redshift	Evento
10^{-43} s	10^{32} K	10^{32}	Tempo di Planck
10^{-36} – 10^{-34} s	10^{25} – 10^{28} K	10^{25} – 10^{28}	Inflazione
1 s	10^{10} K	10^{10}	Disaccoppiamento dei neutrini
10–1000 s	10^8 – 10^9 K	10^8 – 10^9	Nucleosintesi primordiale
5×10^4 yr	9×10^3 K	3400	Equivalenza materia–radiazione
0.4 Myr	3×10^3 K	1000	Ricombinazione e disaccoppiamento dei fotoni
0.5–1 Gyr	19–30 K	6–10	Reionizzazione
9.5 Gyr	3.5 K	0.30	Equivalenza Λ –materia
13.8 Gyr	2.7 K	0	Epoca attuale

A.4 Meccanismi di formazione

Tabella A.3: Principali meccanismi rilevanti per la formazione delle componenti galattiche. Fonte: [1], Table 10.1.

Componente galattica	Meccanismi di formazione
Disco	Collasso dissipativo; Momento angolare da coppie mareali; Ridistribuzione del momento angolare; Interazioni (bracci di spirale); Instabilità (bracci di spirale).
Barra	Instabilità globale; Interazioni.
Pseudobulge	Instabilità di <i>buckling</i> .
Sferoide/rigonfiamento (bulge)	Rilassamento violento; Merging; Instabilità violenta del disco.
Alone stellare	Collasso dissipativo; Accrescimento di stelle da satelliti.

Bibliografia

- [1] A. Cimatti, F. Fraternali, C. Nipoti, *Introduction to Galaxy Formation and Evolution: From Primordial Gas to Present-Day Galaxies*, Cambridge University Press, 2019.
- [2] H. Mo, F. van den Bosch, S. White, *Galaxy Formation and Evolution*, Cambridge University Press, 2010.
- [3] J. R. Primack, “Galaxy Formation in Λ CDM Cosmology”, *Annual Review of Nuclear and Particle Science*, 74 (2024), 173–206.
- [4] P. Schneider, *Extragalactic Astronomy and Cosmology: An Introduction*, 2nd ed., Springer, 2015.
- [5] R. S. Somerville, R. Davé, “Physical Models of Galaxy Formation in a Cosmological Framework”, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 53 (2015), 51–113. [arXiv:1412.2712].
- [6] Tempel, E., Saar, E., Liivamägi, L. J., Tamm, A., Einasto, J., Einasto, M., & Müller, V. (2011). *Galaxy morphology, luminosity, and environment in the SDSS DR7*. *Astronomy & Astrophysics*, **529**, A53.
- [7] ESA/Webb Collaboration, *JWST reveals the most distant known galaxy, JADES-GS-z14-0*, European Space Agency, 2024. URL: <https://esawebb.org/images/jades4/>.
- [8] M. Brusa, *Storia dell’Astronomia – Slide e appunti del corso*, Università di Bologna, Dipartimento di Fisica e Astronomia, A.A. 2024–2025.
- [9] L. Ciotti, *Astrofisica Extragalattica – Appunti dalle lezioni*, Università di Bologna, Dipartimento di Fisica e Astronomia, A.A. 2023–2024.
- [10] D. Dallacasa, *Processi radiativi e MHD – Slide e appunti del corso*, Università di Bologna, Dipartimento di Fisica e Astronomia, A.A. 2024–2025.