

Alma Mater Studiorum – Università di Bologna

Dipartimento di Fisica e Astronomia
Corso di Laurea in Astronomia

Formazione delle Galassie

Tesi di laurea

Presentata da:

Alessia Fideli

Relatore:

Chiarissimo Professor

Daniele Dallacasa

Anno accademico 2020-2021

*“Everything we call real is
made of things that cannot be
regarded as real.”*

— Niels Bohr

Abstract

In questa tesi si introdurranno il concetto di galassia, le sue caratteristiche e classificazioni. Se ne descriverà la distribuzione e il raggruppamento in strutture superiori, oltre alle varie condizioni e ipotesi di formazione. Si discuteranno la CMBR e la materia oscura, per poi evidenziare i metodi che rendono possibile la ricerca di evidenze sperimentali a sostegno dei modelli di formazione, quali l'astrofisica computazionale. Si chiarirà come la branca che si interessa della formazione galattica sia molto attiva ad oggi e non sia ancora giunta ad una spiegazione omnicomprensiva ed esatta dei processi di creazione di questi agglomerati di materia ordinaria e oscura. Si esemplificheranno gli approcci principali di tipo top-down e bottom-up, mostrando come possano coesistere.

Indice

1. I protagonisti storici della formazione del concetto delle galassie	5
2. Le condizioni per la nascita delle galassie	6
2.1 L'espansione dell'Universo	6
2.2 La radiazione cosmica di fondo	6
2.3 Le strutture dell'Universo	7
2.4 La materia oscura	8
3. La classificazione morfologica e l'osservazione	9
3.1 La classificazione morfologica	9
3.2 L'osservazione	10
4. Le ipotesi di formazione	11
4.1 L'ipotesi top-down	11
4.2 L'ipotesi bottom-up	12
4.3 I modelli alternativi	14
4.4 I metodi d'indagine	14
5. La Via Lattea	16
5.1 L'ipotesi del collasso monolitico	17
5.2 L'ipotesi del merging	18
5.3 Il futuro della Via Lattea	19

1. I protagonisti storici della formazione del concetto delle galassie

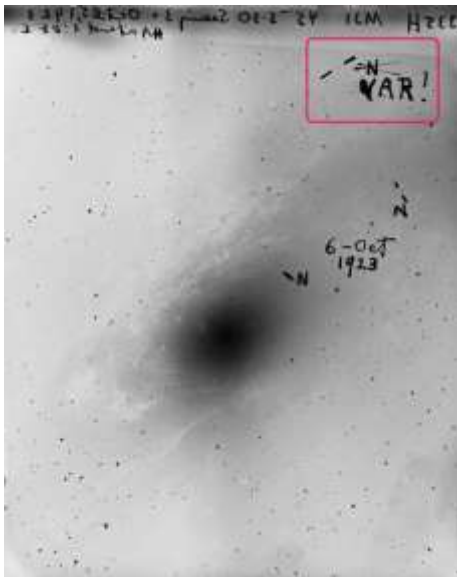
Fino al 1920, con Edwin Hubble, si credeva che la Via Lattea occupasse tutto l'Universo.

Precedentemente, si consideravano le stelle come pressoché tutte equidistanti dal Sole, se non per due eccezioni, ovvero la stessa Via Lattea e la *nebula* Andromeda, nominata anche in scritti antecedenti (come quello del 964 di al Sufi).

Queste “nubi”, secondo I. Kant, erano simili alla Via Lattea, ovvero dischi di stelle, ma esterne ad essa. Kant propose l'ipotesi della nebulosa, riguardante la loro formazione: le nubi, analogamente ad un sistema solare, si sarebbero generate dalla condensazione di una nebulosa attorno al centro di rotazione, ovvero il futuro centro galattico (corrispondente alla stella di un sistema planetario). Questa ipotesi fu portata avanti da P.S. Laplace, importante protagonista per quanto riguarda la meccanica celeste. Egli postulò l'esistenza dei buchi neri e del collasso gravitazionale, elaborando gli studi di Lagrange e l'ipotesi nebulare.

Poi, nel 1781 C. Messier compilò un catalogo di 110 corpi celesti, utile ai cosiddetti “cacciatori di comete” per distinguere gli oggetti osservati e sapere se fossero o meno una cometa. Le nubi catalogate, al contrario di ciò che pensava Kant, erano considerate da molti contemporanei di Messier come non risolvibili in stelle.

Un altro catalogo fu stilato nel 1785 da F. W. Herschel e conteneva la descrizione di 2500 nebulose. Da queste misurazioni e da quelle del figlio, Herschel teorizzò il moto solare verso la costellazione di Ercole e provò a dare una forma alla Via Lattea, ma pose il Sole al centro dell'accurata rappresentazione che realizzò. Il suo pensiero era affine a quello di Giordano Bruno e di altri filosofi, e lo portò a formulare una proto-teoria di quella che fu poi sostenuta da H. Curtis nel Grande Dibattito del 1920. Con questa teoria, detta degli universi-isola, si affermava che, inizialmente, le stelle ed i pianeti orbitanti attorno ad esse fossero distribuiti uniformemente nello spazio, ma che poi si fossero raggruppati a formare i suddetti universi-isola. Conseguentemente, ogni nube osservata poteva essere risolta in stelle e non era formata da un fluido luminescente, come sostenevano altri studiosi.



Andromeda e la Cefeide V1 - Hubble

L'astronomo scoprì anche gli infrarossi: appena si ebbero le tecnologie necessarie, lo studio della volta celeste diventò multibanda, ovvero integrante osservazioni in raggi X, onde radio (radioastronomia, con zone HI osservate a 21 cm), infrarosso e ultravioletto.

Grazie allo sviluppo tecnologico di quegli anni, i telescopi permettevano un'osservazione più accurata e, il 30 dicembre 1924, E. Hubble scoprì che le nebulose a spirale¹ osservate e catalogate, che si credevano parte della Galassia, erano in realtà ulteriori galassie. In particolare, con l'Hooker risolse (nel visibile) M31 in stelle e osservò V1, una Cefeide di Andromeda e, grazie alle relazioni elaborate da H. S. Leavitt², ne determinò la distanza (2,5 mln di a.l. per le stime attuali), dichiarandola extragalattica.

Così si concluse il cosiddetto “Grande Dibattito” (1920-1927) sull’esistenza di “nebulose extragalattiche” e si scoprirono le galassie, nell’accezione odierna, e si iniziò a studiarne le proprietà, osservandole in un Cosmo le cui dimensioni erano diventate ormai incommensurabili, dell’ordine di miliardi di anni luce, di gran lunga maggiori rispetto alle prime stime fornite dalla misura di parallasse di F.W. Bessel del 1831, già rivoluzionarie.

2. Le condizioni per la nascita delle galassie

2.1 L’ESPANSIONE DELL’UNIVERSO

Nel 1929 Hubble scoprì che le dimensioni dell’Universo si espandevano. Osservò per la prima volta il redshift, ovvero uno spostamento verso il rosso nello spettro di alcune galassie. Il redshift è tanto più evidente, quanto più la galassia studiata è lontana: così si confermò non solo l’esistenza di miliardi di galassie, ma anche il loro allontanamento a velocità elevatissime. Con questa legge i modelli statici di Universo, sostenuti anche da Einstein, vennero praticamente confutati. Egli provò sperimentalmente la legge di Hubble-Lemaître, teorizzata nel 1927 (Lemaître aveva anche presentato l’ipotesi dell’atomo primigenio, ovvero il Big Bang):

$$v = H_0 D$$

Come si può notare, la velocità di allontanamento è proporzionale alla distanza in base alla costante di Hubble (attualmente pari a $71,9 \pm 2,7$ km/s/Mpc) e spesso raggiunge migliaia di km/s, o velocità superluminali. In questo modo si possono misurare le distanze in base al redshift (o blueshift) e, approssimativamente, l’età del cosmo: $1/H_0 = 13,7 \pm 0,8$ Gy (mld). La legge è valida per un Universo omogeneo isotropo ed in espansione ed è formalmente identica per tutti i possibili punti di osservazione. Ora, si pone un limite alle possibilità di osservazione dell’uomo, infatti solo una parte delle galassie è visibile e, se visibile, la sua radiazione subisce uno spostamento verso il rosso. Si parla di Universo osservabile. Oltre la distanza di Hubble (circa 15mld a.l., se “espansa nel tempo” pari a 46.5mld a.l.), è impossibile osservare ciò che accade poiché la luce non riuscirà mai ad arrivare alle lenti dei telescopi terrestri. Tutti i fenomeni che avvengono in questa zona esulano dalla realtà dell’osservatore.³

2.2 LA RADIAZIONE COSMICA DI FONDO

Considerato il fatto che si avranno sempre meno galassie a disposizione per approfondire e proporre teorie e che, se guardiamo molto indietro nel tempo scandagliando nelle profondità dell’Universo, gli oggetti disponibili sono pochissimi, un aiuto fondamentale in numerosi campi dell’astrofisica è dato dalla Radiazione Cosmica di Fondo (CMBR)⁴.

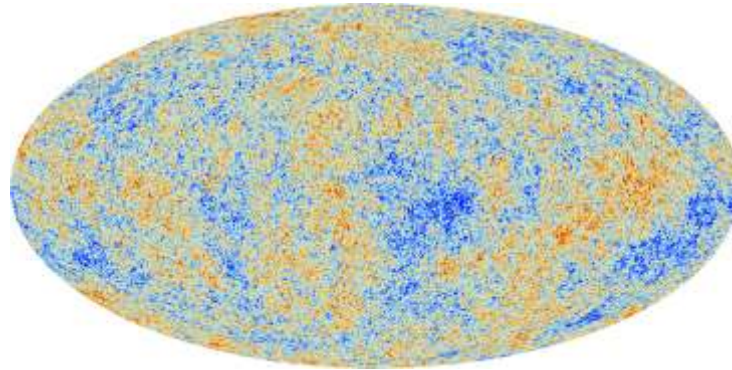
¹ Le *nebulae* che si osservavano erano “normali” e a spirale, quali la “Great Andromeda Nebula”. Proprio su queste nebulose a spirale, che poi si rivelarono essere le galassie, nacquero i vari dibattiti.

² Il metodo della parallasse non poteva essere usato poiché le distanze che si andavano a trattare erano troppo grandi, quindi è servito il sistema delle Cefei della Leavitt, con la relazione tra il periodo di pulsazione e la luminosità intrinseca (quindi sapendo la luminosità si trova la distanza). Andromeda fu dichiarata extragalattica perché si era già misurata la distanza del Sole dal centro galattico (8kpc, circa a metà del raggio).

³ È probabile che proprio grazie all’espansione dell’Universo le strutture quali ammassi e superammassi non collasino su se stesse.

⁴ La CMBR ha evidenziato alcune incongruenze nel valore della costante di Hubble, che è in accordo con le osservazioni dell’Universo locale, ma non con quelle della CMBR. Per di più, le misure della CMBR effettuate dal satellite WMAP, lanciato nel 2001, fanno pensare che l’Universo abbia curvatura pressoché nulla, indicando la presenza di una imponente quantità di energia oscura, che spiegherebbe l’accelerata espansione dell’Universo a partire da 4 Gyr fa. Questo tipo di energia sarebbe antigravitazionale e potrebbe essere spiegata dalle fluttuazioni quantistiche del vuoto.

Scoperta per caso nel 1964 e da allora origine di moltissime teorie sulla nascita dell'Universo, quale la teoria inflazionaria a partire dal Big Bang (13.8 Gyr), negli ultimi anni è stata rilevata e studiata più accuratamente, con COBE, WMAP e Planck Surveyor, arrivando all'articolazione del modello cosmologico standard Λ CDM. La CMBR è una radiazione di corpo nero, emessa dalla superficie di ultima diffusione dal Big Bang, quando l'Universo è diventato otticamente sottile, e ha temperatura di picco pari a 2.725 K (160.2 GHz, microonde).



CMBR rilevata dal satellite Planck Surveyor, ripulita dalla componente di dipolo e della Via Lattea. Le zone in rosso rappresentano una maggiore temperatura di picco, quelle in blu, una minore.

Più specificatamente, secondo la teoria del Big Bang, l'Universo era inizialmente una singolarità di densità e temperatura inimmaginabilmente alti, tendenti ad infinito. Questo scenario può essere estrapolato anche dalla legge di Hubble, proiettata sull'asse negativo del tempo. In seguito, il volume si è espanso e raffreddato, attraversando presumibilmente diverse ere. Tra esse, quella più rilevante per gli scopi di questa tesi è l'era della ricombinazione, avvenuta 380.000 anni dopo il Big Bang. In questo periodo il plasma primordiale (fotoni, elettroni e protoni) si è raffreddato fino a permettere la creazione dei primi atomi (era della nucleosintesi), non più distrutti dall'energia termica elevatissima, e l'assorbimento dei fotoni. Così finì l'era dell'opacità e lo spazio divenne otticamente sottile, dando vita alla CMBR, che è sostanzialmente l'impressione della prima luce liberata dall'Universo a 380.000 anni.

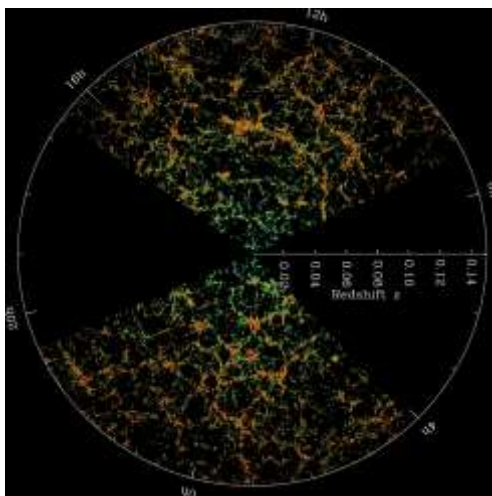
2.3 LE STRUTTURE DELL'UNIVERSO

Dato che l'Universo primordiale non aveva una distribuzione omogenea, nemmeno la radiazione di fondo è perfettamente omogenea: essa presenta delle fluttuazioni estremamente piccole della temperatura di picco dell'ordine di 10^{-6} K. Le anisotropie primarie sono dipendenti principalmente dalla densità del fluido primordiale. Queste minuscole fluttuazioni quantistiche della materia, prima racchiuse nello spazio ristretto del Cosmo dei primi anni, si sono poi espanse fino alle dimensioni dell'Universo attuale.

Le zone a maggior temperatura corrispondono ad una maggiore densità e concentrazione di materia, ed è proprio in queste zone che continuano tuttora a formarsi le strutture cosmiche, quali muri di galassie, superammassi, ammassi, gruppi, galassie e stelle. Viceversa, le zone a temperatura minore corrispondono alle "bolle" della spugna cosmica e sono ora dei grandi spazi di vuoto, con dimensioni anche di ~1 miliardo di anni luce (supervuoto di Eridano).

Nonostante l'estrema varietà di configurazioni possibili in uno spazio "ristretto", il Cosmo risulta pressoché isotropo nel complesso. Dalle mappature, come quella della Sloan Digital Sky Survey, si è visto che le galassie sono distribuite in strutture quasi filamentose attorno

a dei vuoti, andando a formare una “rete cosmica”, che fa assumere alla materia dell’Universo una configurazione simile a quella di una spugna.⁵



La rete cosmica – mappa della SDSS

2.4 LA MATERIA OSCURA

La causa scatenante di queste strutture e, di conseguenza, dell’Universo per come lo conosciamo è stata ricondotta ad un ipotetico tipo di materia esotica, chiamata materia oscura (DM)⁶. Infatti, la materia ordinaria non è sufficiente a giustificare il collasso gravitazionale in galassie, ammassi, ecc... E nelle fasi iniziali del cosmo, la temperatura non era abbastanza bassa da consentire la formazione autonoma di strutture per via della gravità della materia ordinaria. Un’altra evidenza a sostegno della DM è l’abbondanza di deuterio presente nell’ISM (mezzo interstellare) poco contaminato da SN. Questo elemento è particolarmente sensibile alla densità di materia; inoltre, quello che si osserva ad oggi è praticamente quello primordiale, di quando l’Universo era composto da idrogeno, elio e deuterio. Confrontandone l’abbondanza con la quantità di materia ordinaria, si può rilevare la necessità di altra materia (DM) per giustificarne il valore.

Comunque, l’esistenza della materia oscura è stata ipotizzata a partire dal discostamento dalle previsioni teoriche della velocità di rotazione delle galassie a spirale (da V. Rubin, che ne osservò l’andamento lineare e non quadratico rispetto al raggio) e da alcune lenti gravitazionali. La DM dovrebbe costituire il 90% della massa dell’Universo e non è mai stata rilevata, poiché teoricamente debolmente interagente e in parte non barionica, quindi di tipo completamente esotico. I dati prevedono aloni di DM di estensioni anche dieci volte superiori a quelle della parte di galassia visibile, ad esempio.

⁵ Una conferma dello sviluppo di strutture filamentose grazie alla DM è fornito da un buco nero supermassiccio di $\sim 10^9 M_{\text{sun}}$ piuttosto peculiare osservato dal VLBA. Intorno ad esso ci sono sei galassie risalenti all’Universo di quasi 1 Gyr, che formano una struttura con estensione di 30 volte quella della Via Lattea e che alimenta il buco nero a ritmi elevatissimi. I calcoli svolti dal team (Mignoli M. et al.) prevedono un alone di DM di $\sim 10^{12} M_{\text{sun}}$. (Agosto 2021)

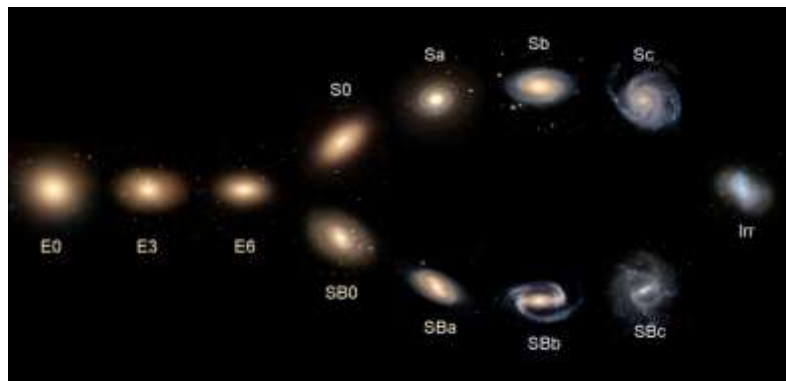
⁶ Da processi dissipativi, raffreddamento (irraggiamento e perdita di energia): una carica accelerata irraggia perché interagisce col campo elettromagnetico, ma la materia oscura non può raffreddare perché ha sezione d’urto nulla, non emette e non interagisce; i barioni (fermioni), cadendo nelle buche di potenziale, vanno a formare stelle e strutture più complesse, quali le galassie.

3. La classificazione morfologica e l'osservazione

Le galassie sono insiemi legati gravitazionalmente di stelle, gas, polvere e materia oscura, che possono presentarsi in varie proporzioni e distribuzioni.

3.1 LA CLASSIFICAZIONE MORFOLOGICA

Nel 1926 Hubble sviluppò una convenzione per classificare le galassie in base alla loro morfologia:



Sequenza di Hubble

- Ellittiche (E)

Visivamente, hanno forma circa ellittica e in osservazione possono essere divise in zone più o meno luminose tramite linee isofote. Contengono pochissimo gas, infatti il colore prevalente è sicuramente il rosso/arancione, dovuto alla larga presenza di stelle vecchie, che orbitano in direzioni casuali, con velocità che si discostano anche di molto dalla velocità di rotazione complessiva, comunque bassa (circa 30 km/s). I numeri ad esse associate nella nomenclatura vanno da 0 a 7 ed indicano l'ellitticità:

$$\varepsilon = 1 - \frac{b}{a}$$

ove b rappresenta il semiasse minore ed a quello maggiore. Si va poi a considerare unicamente la parte intera del valore ottenuto e decuplicato.

Le ellittiche possono essere nane, ma dominano tra le galassie massive (oltre 100 mld M_{sun}). Ruotano di meno rispetto alle spirali a causa del moto casuale delle stelle al proprio interno e hanno meno DM. Si trovano spesso nei *clusters*. Le stelle al centro di questi conglomerati sono tra le più vecchie dell'Universo e sono ormai estremamente ricche di metalli. In generale, comunque, la metallicità dipende dalla densità locale di stelle⁷ e dalla dispersione di velocità. Al loro centro possono contenere un buco nero supermassiccio, di massa direttamente proporzionale a quella delle stelle contenute nella galassia.

- Lenticolari (S0, SB0)

Possiedono un bulge e un disco, ma sono prive della struttura a bracci tipica delle spirali. Hanno un basso ritmo di formazione stellare (SFR) e alta velocità di rotazione.

⁷Le perdite di bremsstrahlung vanno col quadrato della densità: se si comprime un gas, sul momento si riscalda, ma poi si raffredda per le perdite di radiazione, iniziando la produzione di stelle. Per questo le stelle più vecchie sono metal rich: nel centro galattico vengono "cotte" tantissime volte.

⁸ $M_{\text{BH}} = 2 \times 10^{-3} M_{\text{star}}$

- A spirale (S)

Sono principalmente blu, a causa dell'elevato contenuto di stelle giovani (anche di tipo O/B). Sono composte da un *bulge* centrale, simile a una piccola galassia ellittica e ospitante gli astri più antichi, al quale sono collegati dei bracci, al cui interno ci sono le zone di formazione stellare (osservabili molte stelle blu, ammassi aperti e supernovae di tipo II), e un disco circondato da un alone di forma pressoché sferica di minore densità di stelle di Pop. II. Il 90% della loro massa sarebbe riconducibile alla DM. In base alle proporzioni tra il bulge e il disco si assegnano i nomi: le Sa, ad esempio, hanno un bulge grande rispetto al disco e bracci più avvolti. Allo stesso modo si classificano le galassie a spirale barrata, (es. SBa) che hanno un bulge a forma di barra, il quale fa affluire al nucleo gas, influenzando la SFR e il buco nero centrale. Il gas è presente in quantità ingenti. Sono circondate da materiale molto denso, opaco nelle frequenze ottiche, ma non in quelle IR e radio (21 cm), a causa delle gigantesche nubi di HI. Le galassie a spirale ruotano attorno al centro galattico e le orbite delle stelle sono piuttosto ordinate, con velocità medie che arrivano ai 300 km/s. Spesso si trovano nelle vicinanze dei clusters.⁹

- Irregolari

Sono di dimensioni piuttosto modeste, possono contenere qualsiasi tipo di stelle ed essere molto attive, e tendono quindi ad apparire blu.

Ci sono anche altre tipologie morfologiche: le galassie di Arp, comunque riconducibili alle altre, dato che sono normalmente sistemi interagenti, quindi in fusione, oltre ad un piccolo quantitativo di forme piuttosto anomale.

3.2 L'OSSERVAZIONE

Più si osserva in lontananza, più le galassie¹⁰ cambiano: probabilmente le prime galassie avevano una struttura e quindi un processo di formazione differente da quello odierno, a causa delle diverse condizioni. Inoltre, esse sono estremamente "immateriali" e "trasparenti"¹², il che equivale a dire che il cammino ottico è infinito, poiché la distanza tra stelle è di gran lunga superiore alle dimensioni delle stelle, e quindi, osservando una galassia, se ne può vedere ogni componente e si può spingere lo sguardo oltre: galassie lungo la stessa linea di vista si sommeranno e non si oscureranno. Il problema nello studio è dato dalla risoluzione dei telescopi¹³.

⁹ La Via Lattea, galassia a spirale, costituisce il Gruppo Locale, assieme ad Andromeda e ad altre galassie minori, a 60 mln di a.l. dall'Ammasso della Vergine. Il Sole si trova a 8/9 kpc dal bulge, nel braccio di Orione.

¹⁰ Per avere un'idea di quante di queste strutture ci siano: le galassie dovrebbero essere ~170 miliardi, con raggi effettivi¹¹ tra 100 pc e 50 kpc, tra 10^7 e 10^{14} stelle contenute, dispersioni di velocità σ tra 50 e 400 km/s e masse tra le 10^9 e le $10^{14} M_{\text{sun}}$.

¹¹ Raggio effettivo: raggio entro il quale esce la metà della luminosità totale ($L_p(r_e) = 0.5 L_{\text{tot}}$)

¹² Questa proprietà permette la fusione delle galassie senza scontri tra astri.

¹³ L'osservazione del cosmo ha a disposizione sempre più modalità di studio degli oggetti celesti, grazie allo sviluppo della radioastronomia e di un ventaglio amplissimo di metodi: dalla parallasse al redshift, dal diagramma Hertzsprung-Russel alle Cefeidi e supernovae. Gli strumenti disponibili ad oggi sono enormemente più potenti, le osservazioni vengono effettuate al di sopra dell'atmosfera terrestre, con l'Hubble Telescope, lanciato nel 1990. Il telescopio è riuscito a catalogare galassie risalenti alla fase iniziale dell'Universo (e a dare slancio all'esplorazione di esopianeti potenzialmente abitabili). Ad aggiungersi all'HST, arriverà il James Webb Space Telescope, sensibile ad altre lunghezze d'onda nell'infrarosso, che lo faranno guardare oltre le nubi di gas e altri corpi oscuranti. Il JWST cercherà conferme dell'esistenza della materia e dell'energia oscura. Ad oggi, alcuni degli strumenti osservativi più imponenti a nostra disposizione sono i Ritchey-Chrétien Very Large Telescope dell'ESO sul Paranal ('96) e l'Hubble Space Telescope della NASA sull'orbita terrestre ('90).

Dalle osservazioni, il 29% delle galassie sono ellittiche, il 68% spirali e meno del 3% sono irregolari. Queste percentuali cambiano se calcolate in regioni dense (ad es. centri di ammassi o di altre macrostrutture). In questo caso il 90% sono ellittiche (e S0), il 10% sono spirali, mentre il numero di irregolari risulta trascurabile. Ciò dice qualcosa sui meccanismi di formazione: se la densità è alta, è più facile che avvengano merging. Le ellittiche sono probabilmente il risultato di fusioni galattiche. Le spirali, come detto prima, si trovano spesso in gruppi galattici, meno densi.

All'interno delle galassie si trovano dei gruppi di stelle particolari. Sotto il milione di M_{sun} ci sono degli oggetti (non sono galassie) la cui origine è abbastanza ignota: gli ammassi globulari, formati da decine di migliaia a qualche milione di stelle, appartenenti alla Popolazione II, molto antica. Sono tra gli oggetti più vecchi del Cosmo (circa 12 Gyr, il Sole ha meno della metà della loro età). Negli ammassi globulari non c'è materia oscura: probabilmente hanno avuto un processo di formazione diverso, estremamente rapido, e subito dopo il Big Bang. Altri ancora più piccoli gruppi stellari (es. Pleiadi) di decine a migliaia di stelle, sono detti ammassi aperti.

4. Le ipotesi di formazione

Secondo una survey spettroscopica del 2020 di ASPECS sull'Hubble Ultra Deep Field, moltissime galassie si sono formate tra 13 e 10 Gyr fa, a causa di un incremento dell'idrogeno molecolare in quell'epoca.

4.1 L'IPOTESI TOP-DOWN

Nell'ipotesi top-down, ci sarebbe stata l'azione di un tipo di DM, che potrebbe essere rappresentata in gran parte dai neutrini¹⁴. Dato che essi si muovono a $\sim c$, in un'analogia con i gas ordinari, questa DM viene detta calda. Tramite la concentrazione dei v avrebbe avuto inizio un collasso gravitazionale durato circa 1 Myr, a monte delle macrostrutture filamentose odierne e, a partire da esse, ci sarebbero stati ulteriori collassi parziali a formare strutture via via più limitate, quali le galassie.

Storicamente, il primo modello top-down sulla formazione delle galassie fu proposto nel 1962 da Eggen, Lynden, Bell e Sandage (ELBS). Da allora ci sono state varie rielaborazioni, anche in base al tipo morfologico in studio.

- Ellittiche antiche: scenario top-down

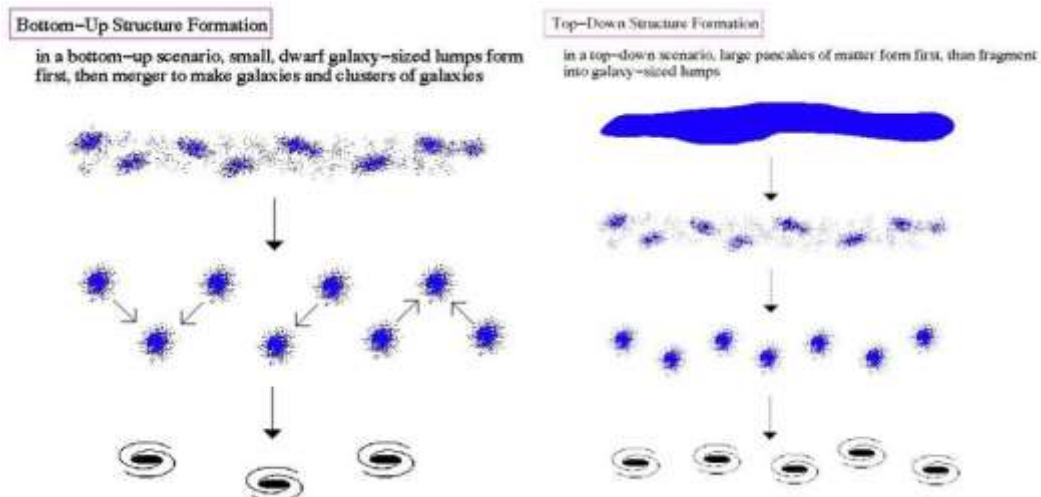
La nube collassa in tempi brevi, con formazione rapida della galassia ellittica.

A favore di questo modello, si hanno i quasar¹⁴, nuclei galattici attivi estremamente luminosi, probabilmente dei buchi neri supermassicci che si "alimentano" del gas galattico. L'attrito causato da questo movimento produce un disco di accrescimento, più visibile di tutto il resto della galassia. Per avere dei buchi neri, ci dovevano essere delle galassie formatesi nell'Universo primordiale, quindi qualche centinaio di migliaia o qualche milione di anni dopo il Big Bang, quando la temperatura si era abbassata e i gas avevano iniziato a formare le strutture cosmiche. Per poter dare vita alle galassie, le nubi sono collassate formando le galassie prime ellittiche e le varie regioni delle nubi hanno continuato l'addensamento fino a formare le stelle.

¹⁴ Secondo ultime misurazioni sulla massa dei neutrini, essi sono solo una piccola percentuale della DM e non sono sufficienti a spiegare la formazione delle galassie. Inoltre, dalle simulazioni, non creerebbero strutture contenute come la galassie, ma macrostrutture più diffuse.

I quasar presentano tracce di elementi metallici (oltre He), che hanno portato ad ipotizzare una fase esplosiva di produzione stellare da parte delle galassie (*starbursts*). Si pensa che, al principio della loro esistenza, sia stata creata la cosiddetta popolazione III¹⁵.

Conclusivamente, questo modello propone un andamento dal macro al micro, ovvero la formazione in blocco di galassie ellittiche nei “primi” anni del Cosmo, a partire dal collasso di nubi massive, che hanno dato vita prima alle strutture più colossali e poi a quelle di dimensioni più contenute. In questo scenario non si ha la creazione di un disco a causa dello scarso momento angolare totale.



Esemplificazioni dei due modelli

4.2 L'IPOTESI BOTTOM-UP

Invece, per questo scenario si è ipotizzata la DM fredda, costituita da sconosciute particelle massive debolmente interagenti (WIMPs), di moto più lento. Essa creerebbe le strutture con un approccio gerarchico: a partire da addensamenti contenuti, tramite fusioni (merging), si andrebbero a costruire gli ammassi di stelle, poi le galassie nane, ecc... Le simulazioni svolte secondo questo modello assomigliano maggiormente a ciò che osserviamo nella realtà rispetto alle precedenti, inoltre la ALPINE-ALMA survey ha constatato che il ~40% delle galassie primordiali si osservano in fase di merging, ma le WIMPs non sono mai state rilevate, nonostante le ricerche svolte (come XMASS).

- Ellittiche giganti: scenario bottom-up

Allo stesso tempo, non si osservano ellittiche giganti in epoche precedenti a circa 6 Gyr dal Big Bang, nonostante la loro elevata luminosità. Per questo, un altro modello proposto è quello del merging gerarchico: varie proto-galassie di dimensioni contenute si combinano nel tempo, fino a formare la galassia ellittica gigante. Come si può notare, questa ipotesi “viaggia” in verso opposto rispetto al top down, in quanto sono le microstrutture (in senso lato) che, combinandosi, vanno a formare le macrostrutture.

¹⁵Il fatto che si siano osservati quasar soprattutto nell'Universo primordiale (anche a circa 770 Myr dal Big Bang, quindi all'inizio dell'era delle galassie) indica che essi si attivano quando sono circondati da sufficiente materiale per la produzione di energia. Infatti, la maggioranza dei quasar recenti sono stati osservati in galassie interagenti, quindi anche in merging, in quanto viene fornito gas e polvere all'agglomerato. Di conseguenza, si pensa che le galassie possano avere, per lo meno per la gran parte, un periodo iniziale da galassia attiva.

Per quanto riguarda le ellittiche, il disco è assente. Per comprendere perché il disco non si forma, bisogna considerarne il meccanismo di formazione nelle galassie a disco: le particelle della nube di gas, durante il collasso, collidono a causa dell'alta densità. Alla fine, il momento angolare totale non è elevato¹⁶, ma l'allineamento progressivo del moto delle varie molecole causa la rotazione definita della nube e l'appiattimento in disco. Nel caso bottom-up, c'è già stata in gran parte formazione stellare, quindi non c'è un grande quantitativo di gas rimanente. Di conseguenza, non ci potranno essere abbastanza collisioni tra le particelle da garantire l'appiattimento dello sferoide. Per questo le galassie risultanti da processi di merging¹⁷ massivi sono spesso irregolari o ellittiche, con le stelle orbitanti in direzioni pressoché casuali.

Più in generale, le galassie maggiori tendono a consumare in tempi più brevi il gas disponibile per la formazione stellare (inoltre, anche il vento galattico prodotto dal gran numero di stelle del nucleo espelle il gas) e morirebbero in lassi di tempo più brevi, allungati però dai merging continui e dall'attrazione di ISM. In pratica, hanno SFR molto alta nelle prime fasi di vita e poi esauriscono tutto il materiale necessario per essere ancora attive. In galassie massive dell'Universo di 12 Gyr fa, ad esempio, è stata osservata una produzione di 1000 stelle l'anno, che porterebbe a una cessata attività in circa 1 Gyr. Però, nel caso in cui si trovino in ambiente denso, possono sopravvivere molto a lungo catturando materia esterna. Allo stesso tempo, le galassie satellite subiscono un arresto della produzione stellare rapidissimo, a causa della perdita di gas e materia attratti dalle massive. In generale, l'ambiente in cui è immersa una galassia influenza pesantemente molte caratteristiche di essa e la sua evoluzione.

I due modelli ipotizzati, top-down e bottom-up, possono coesistere, in quanto si hanno evidenze osservative per entrambi. Si pensa che le ellittiche più piccole abbiano avuto un processo di sviluppo di tipo top-down, mentre le più colossali ne abbiano avuto uno di tipo bottom-up. Inoltre, le stelle più antiche si trovano nel centro e nelle periferie, si immagina a causa dell'influenza del buco nero centrale e di precedenti catture di stelle da galassie satellite.

- **Spirali: scenario top-down e bottom-up**

Le galassie a spirale contengono principalmente stelle vecchie nel bulge e stelle giovani nel disco. Ciò porta ad ipotizzare una formazione di tipo top-down per quanto riguarda il bulge, con una creazione successiva del disco. Il nucleo si sarebbe formato dai primi aggregati di materia, che hanno catturato progressivamente la materia circostante, addensandosi al punto da dare vita al buco nero centrale. Nelle spirali primordiali, sarebbe iniziato sia il merging che la produzione della Popolazione III (stelle di H, He) nell'alone. Queste avrebbero poi arricchito l'ISM di metalli, portando alle nuove popolazioni stellari. Inoltre, all'interno di una galassia, si possono osservare astri di diversa composizione chimica in base alla regione di studio (in particolare, l'analisi è stata svolta sulla Via Lattea). Si può immaginare uno scenario di crescita progressiva tramite merging di galassie

¹⁶ Ad oggi non ci sono state osservazioni certe di stelle di popolazione III. Se la situazione non dovesse cambiare, non si riuscirebbe più a giustificare l'elevata metallicità dei quasar e si dovrebbero abbandonare molti modelli sul cosmo. Però, all'inizio del 2022 è stata osservata HD1, la galassia più antica mai vista, il cui segnale proviene da 13.5 Gyr fa. Esso è inusualmente luminoso negli UV, cosa giustificabile da un quasar (ma risulterebbe abbastanza grande rispetto ai tempi di formazione per i modelli attuali sui buchi neri) o da una *burst* di produzione di stelle dell'ipotetica popolazione III. Si osserverà ulteriormente con il JWST, assieme a molte altre galassie primitive considerate anomale e/o di interesse.

¹⁷ Dopo il merging il momento angolare della galassia risultante è minore del momento angolare delle galassie iniziali.

piuttosto piccole di diverso tipo. Le strutture con cui una spirale può effettuare merging senza cambiare struttura devono essere piccole: se la fusione avvenisse tra due galassie più massive, la struttura a spirale verrebbe completamente distrutta per interazione gravitazionale e si avrebbe la nascita di una ellittica gigante, come spiegato precedentemente.



Spirale in merging

4.3 I MODELLI ALTERNATIVI

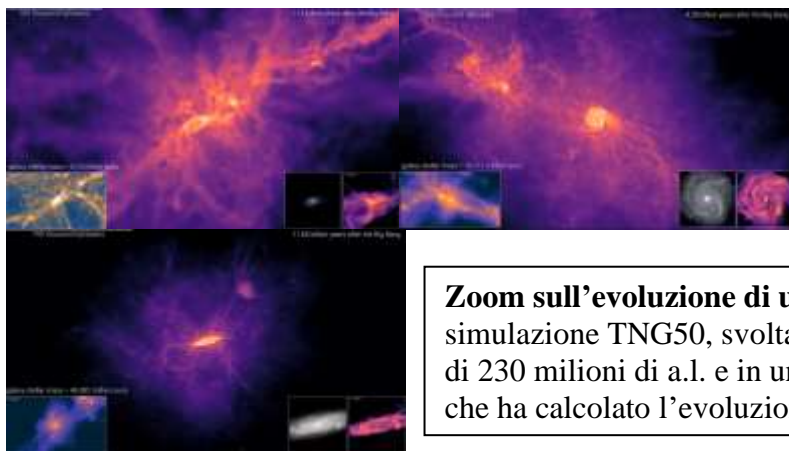
E' giusto menzionare l'esistenza di modelli che non contemplano la DM ed usano una versione modificata della legge di gravitazione universale di Newton (MOND), la cui versione classica viene considerata valida solo per raggi dell'ordine del Sistema Solare: oltre questi valori la gravità diminuirebbe linearmente con la distanza, facendo cadere il problema trovato da Rubin. I risultati di questa ipotesi sono coerenti con le osservazioni, anche a costo di sacrificare uno dei pilastri della fisica. Addirittura, uno studio del 2020 di Chae K. et al. avrebbe confermato un'ipotesi propria della MOND, detta EFE, che prevede una forte influenza dei corpi celesti vicini sulla velocità di rotazione esterna delle galassie.

4.4 I METODI DI INDAGINE

Ovviamente, non si può osservare direttamente l'evoluzione di una galassia, poiché i tempi scala sono estremamente lunghi. Quello che si può fare è sfruttare il tempo di viaggio della luce e guardare più lontano per guardare indietro nel tempo. In questo modo, si possono ottenere informazioni "puntuali" del processo evolutivo, da cui estrapolare i processi di formazione più probabili. Bisogna inoltre considerare come le immagini delle galassie più lontane siano meno definite e portino con sé meno dati sulle proprietà; oltre al fatto che ai telescopi arrivano solo le radiazioni di maggior potenza, quindi emesse da galassie più luminose, il che non dà un'accurata rappresentazione di tutte le tipologie galattiche primordiali. Di conseguenza, è fondamentale costruire un modello che, a partire dalle poche informazioni iniziali, sviluppi degli andamenti evolutivi che portino a delle galassie in stadi successivi simili a quelle osservate e più recenti, che si conoscono con maggior precisione.

Una branca dell'astrofisica che cerca di fare proprio questo (anche in molti altri campi di studio) è l'astrofisica computazionale, che utilizza la combinazione di teoria e simulazioni al computer per poter visualizzare in maniera più immediata il modo in cui potrebbero formarsi le galassie. Nella pratica, all'interno di un volume virtuale di spazio, si forniscono le condizioni iniziali e le leggi fisiche (in particolare quelle di gravitazione e di fluidodinamica) utili alla scala considerata, per poi far partire la simulazione (ovviamente

con dei tempi estremamente velocizzati) ed analizzare i risultati, confrontandoli con i suddetti dati “puntuali”. I “fermo immagine” continuano a risultare in accordo con le osservazioni astronomiche¹⁸.



Zoom sull'evoluzione di una galassia della simulazione TNG50, svolta in un cubo virtuale di lato di 230 milioni di a.l. e in un tempo virtuale di 13 Gyr, che ha calcolato l'evoluzione di migliaia di galassie.

In secondo luogo, un elemento che aiuta nell'analisi delle galassie è fornito dalle popolazioni stellari: in generale, si ha una comprensione ottima dell'evoluzione stellare e, conoscendo alcune proprietà degli astri di una determinata galassia, si possono ricavare simili informazioni anche per quanto riguarda il corpo celeste ospitante¹⁹. Si possono avere fusioni tra due o più galassie. Questo fenomeno può avere risultati molto diversi, ma che si sono rivelati coerenti con le osservazioni, sia per quanto riguarda le possibili forme assunte che per il ringiovanimento della popolazione stellare. Infatti, lo scontro tra due galassie, per quanto immateriali esse possano essere, induce la formazione di nuove stelle, che faranno apparire la neo galassia più blu. Concentrandosi solo su una galassia e poche adiacenti, se ne può simulare l'evoluzione: col passare del tempo, le vicine tendono a collidere con la più massiva, spesso “cadendo” nel suo centro galattico e fondendosi con essa. Il processo avviene gerarchicamente: la galassia più grande aumenta la sua massa attirando a sé le sue simili. La fusione fa riscaldare il gas precedentemente freddo e dà vita a delle esplosioni di formazione stellare, che allontanano parte del materiale circostante. Come risultato si avrà una galassia con popolazioni di stelle massive di recente nascita e blu, oltre a delle regioni rosso-marroni dove si trova la polvere residua che blocca la luce dalle regioni più luminose e la diffonde, rendendola più debole e quindi meno blu.

¹⁸ dalle simulazioni (in particolare dai dati del MOSEL) lo scenario più probabile risulta essere quello di collasso del gas in nucleo galattico, circondato da DM, formazione successiva di stelle; e per le galassie giganti o comunque grandi, merging continuativi da ancora prima della fase di produzione stellare. Ciò è confermato anche dalle diverse popolazioni stellari presenti nelle galassie più massive.

¹⁹ Se si osserva una predominanza di stelle rosse, si può desumere che la galassia sia di remota formazione, mentre è vero il contrario se si ha una predominanza di stelle blu. Per le galassie più vicine, si può anche utilizzare lo spettro delle singole stelle e la datazione radioattiva, in particolare degli isotopi dell'uranio, in modo da trovare l'età del conglomerato. Le stelle si formano a partire da giganti nubi di gas che si comportano come carburante per la formazione stellare. Alcune zone si addensano, portando ad ulteriore addensamento a causa della gravità. Le zone addensate sono proto-stelle e iniziano ad emettere radiazione, allontanando il restante gas di formazione. Spesso queste stelle giovani sono blu e molto massive, inizialmente sono raggruppate e creano dei flussi di gas caldo. Poi, dato che le più massive tendono a morire prima e a diventare delle supernovae, ciò che resta sono le stelle più piccole e rosse, anche se le SN causano delle onde di shock che riscaldano nuovamente il gas circostante. Per questo una galassia più anziana apparirà rossa.

Tornando alle simulazioni, per avere una migliore idea della nascita delle galassie, bisognerebbe porre come condizioni iniziali quelle dell'Universo primordiale. Quindi, considerando le infinitesime anisotropie dei 380.000 anni dal Big Bang, nella simulazione le zone più dense continueranno ad attrarre gravitazionalmente più massa e a formare delle strutture via via più dense e dunque filamentose in un effetto runaway, mentre le zone meno dense si svuoteranno progressivamente.



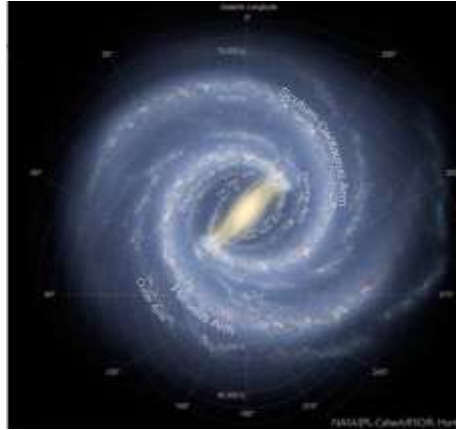
Simulazione della rete cosmica di DM

I risultati virtuali sono estremamente simili alla struttura spongiosa del Cosmo che è stata mappata negli ultimi anni.

Ancora, andando a considerare l'evoluzione della distribuzione di materia oscura, che è causa della maggior parte delle buche di potenziale universali, si può simulare il suo addensamento, in particolare alle intersezioni tra i vari filamenti. Proprio in questi nodi si va ad accumulare gas, denso e a temperature elevate, che darà inizio a formazione stellare e galattica e, infine, agli ammassi galattici. Purtroppo la materia oscura non interagisce con la radiazione elettromagnetica e, per questo, risulta invisibile e non direttamente mappabile.

5. La Via Lattea

Come già detto, sempre dai dati osservativi si è rilevato come le galassie più antiche non siano quasi mai delle giganti ellittiche, il che porta ad ipotizzare la loro formazione a partire da altri tipi di galassie. Un esempio si può trovare più vicino del previsto, ovvero nella Via Lattea e nelle vicine. La Via Lattea si trova nel Gruppo Locale, parte del superammasso della Vergine, e ospita il nostro sistema solare. Morfologicamente è una spirale di tipo SBbc, contenente circa 400mld di stelle e un disco di diametro di circa 100.000 a.l. e spessore di 1000 a.l. Ha un periodo di rotazione di 250mln di anni ed un'età compresa tra 6,5 e 10,1 miliardi di anni. Si illustrano in seguito i probabili meccanismi di formazione della Via Lattea.



Modello di galassia a spirale

5.1 L'IPOTESI DEL COLLASSO MONOLITICO

Nell'ipotesi del collasso monolitico (top-down), una vasta nube di gas si è frammentata per formare le strutture più piccole.

- Formazione del disco

Durante il collasso delle nubi di gas nelle zone definite dalle anisotropie primordiali ormai espanse nel tempo, le particelle si muovono in direzioni casuali; nonostante ciò, normalmente, il momento angolare totale risulta essere non nullo, ovvero si riscontra una rotazione del gruppo. Le particelle tendono ad allineare il proprio moto con quello generale, fino a risultare in una rotazione evidente della nube di gas. Conseguenzialmente, si avrà la formazione del disco.

- Formazione dell'alone di materia oscura

La materia oscura, invece, rimane sparsa attorno alla galassia in forma sferoidale poiché non interagisce con la radiazione elettromagnetica, che è proprio una causa delle collisioni delle particelle ordinarie. Per definizione, la materia oscura non interagisce con la luce e non può effettuare questo tipo di interazioni necessarie all'appiattimento.

- Formazione degli ammassi di stelle

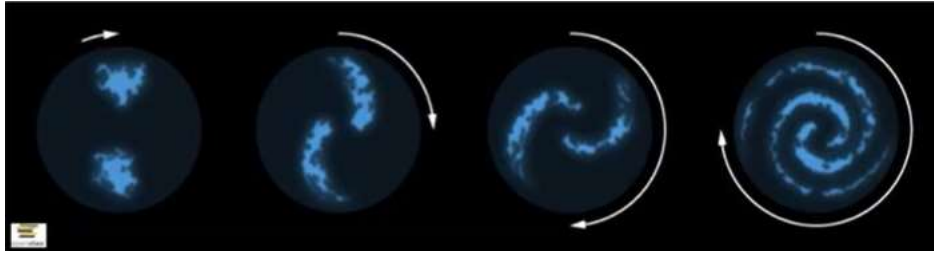
Analogamente a quanto precedentemente spiegato, ci sono delle zone di sovradensità ove il gas collassa e forma le stelle. Esse vengono create spesso in gruppo, a partire dai frammenti della nube iniziale. I raggruppamenti più stretti dell'alone galattico vengono detti ammassi globulari.

- Formazione della struttura a spirale

Corpi orbitanti attorno ad un centro subiscono l'azione attrattiva della forza di gravità e l'azione repulsiva della forza centrifuga. Uguagliando le due forze si ottiene la terza legge di Keplero:

$$T^2 = \frac{4\pi^2}{GM_{sun}} r^2$$

Gli oggetti più lontani dal centro galattico orbitano quindi più lentamente. Questo crea un tipo di rotazione detto differenziale: le velocità di rivoluzione dipenderà dal raggio. Ciò porterebbe alla struttura a spirale.



Esemplificazione della formazione dei bracci

Il problema nasce quando si va a perpetrare questo effetto nel tempo: la spirale finirebbe per autodistruggersi o, comunque, divenire caotica, fenomeno non riscontrato nei dati osservativi. Una possibile spiegazione è fornita dai flussi di venti stellari che allontanano il materiale dalle zone di formazione stellare, il che produrrebbe onde di shock che andrebbero a ripulire le zone circostanti e a mantenere la forma a spirale.

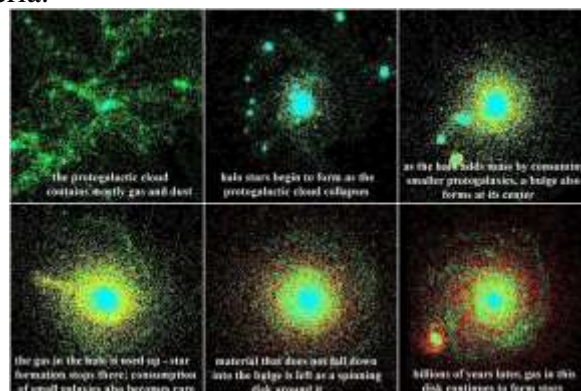
Una spiegazione più verosimile è quella fornita dalla teoria delle onde di densità, formulata negli anni '60 da C. C. Lin e F. Shu, secondo la quale la struttura a spirale e gli ammassi di stelle sono due entità separate che orbiterebbero a velocità differenti. In pratica, gli astri attraverserebbero le zone di densità più elevata (i bracci), dove si hanno dei *bursts* di ulteriore formazione stellare, con un aumento di luminosità. Inoltre, a causa della maggiore attrazione gravitazionale dei bracci, le stelle trascorrerebbero più tempo in essi che nelle regioni a densità inferiore. Questa ipotesi è supportata dalle osservazioni di SOFIA, che hanno riportato come i campi magnetici seguono i bracci, poiché deformati dall'interazione gravitazionale. Così si spiegherebbe l'aspetto complessivo di questo tipo di galassie.

Le due ipotesi possono coesistere. Odiernamente, questa è una branca molto attiva dell'indagine astrofisica.

5.2 L'IPOTESI DEL MERGING

Nell'ipotesi del merging (bottom-up), multipli agglomerati di materia ordinaria e oscura di dimensioni ridotte, formatesi nelle prime fasi dell'Universo, si combinano per dare vita alla galassia. I processi che hanno portato alla costituzione delle varie componenti della Via Lattea sono analoghi a quelli del modello precedente; in ogni caso, quest'ultima ipotesi è più verosimile a causa della differenziazione delle *signatures* chimiche delle stelle in base alla parte di galassia osservata. Questo fenomeno è facilmente spiegabile attraverso un approccio di tipo bottom-up, come descritto prima, e quindi con un certo numero iniziale di galassie più piccole che vanno poi a confluire e a fondersi in un'unica galassia a spirale come la Via Lattea.

Attualmente, le Nubi di Magellano orbitano attorno alla nostra galassia e interagiscono con essa, scambiando materia.

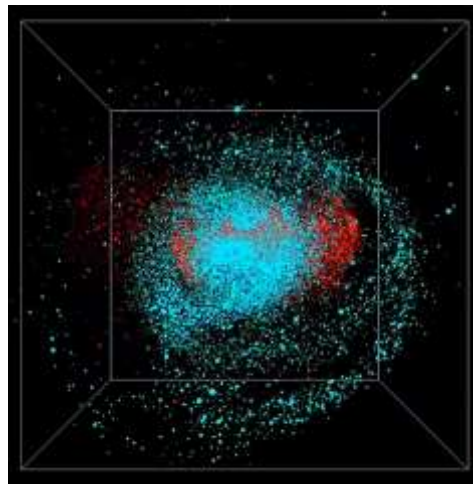


Schematizzazione della formazione della Via Lattea

Le galassie nane o gli ammassi globulari che sono “caduti” nella Via Lattea vengono disgregati dalle forze mareali e deformati fino ad assumere un aspetto nastriforme. Questi nastri sono chiamati correnti stellari e hanno al loro interno proprietà simili, dovute alla provenienza comune.

- Formazione del disco spesso e dell’alone

Il disco spesso e l’alone sono il risultato delle stelle che sono state espulse dalla zona iniziale del disco sottile a causa dell’interazione con le merger o, semplicemente, delle stelle delle galassie “in caduta” che non sono arrivate a fondersi con il disco sottile. In particolare, gli ammassi globulari deriverebbero dai nuclei delle galassie coinvolte nell’accrescimento, quando le merger erano ormai state spogliate del resto.



Simulazione del risultato di un merging della Via Lattea.

5.3 IL FUTURO DELLA VIA LATTEA

La Via Lattea, essendo la più massiva del Gruppo Locale assieme ad Andromeda, attira a sé le galassie vicine e si fonde con esse, aumentando ulteriormente il suo contenuto di materia e quindi, stelle, anche grazie alle formazioni indotte dal merging.

Andromeda si sta avvicinando ad una velocità di circa 100 km/s e tra 3 o 4 Gyr colliderà con la Via Lattea, dando inizio a dei *bursts* di formazione stellare, causati dalla “somma” dei gas presenti nelle due galassie, e alla successiva espulsione di gran parte del gas restante. Alla fine, tra 7.5 Gyr, si avrà la formazione di una neo-galassia ellittica, quindi più rossa e con bassa SFR, a causa del basso contenuto di gas. Ipoteticamente ed utopicamente, dalla Terra non si potrebbe più osservare la striscia della Via Lattea a spirale, perché sarà stata sparsa a creare una “patina luminosa”, tipica delle ellittiche.



Risultato della fusione della Via Lattea e Andromeda

Riferimenti (bibliografia e sitografia)

- [1] Dallacasa, D., *Appunti personali di processi di radiazione e MHD.*
- [2] Ciotti, L., *Appunti personali di astronomia extragalattica.*
- [3] Focardi, P., *Appunti personali di storia dell'astronomia.*
- [4] Karttunen, H., et al., (2007) *Fundamental Astronomy.*
- [5] Hummels, C., *Understanding the Formation and Evolution of Galaxies.*
- [6] Meisel, Z., *Introduction to galaxy evolution, for Ohio University ASTR 1000.*
- [7] Meisel, Z., *Introduction to Milky Way formation ASTR 1000.*

- [HD1] Pacucci, F., et al., (2022), *Are the Newly-Discovered $z \sim 13$ Drop-out Sources Starburst Galaxies or Quasars?*