Formazione e evoluzione delle galassie in un contesto cosmologico

Nathalie Ziehl

23 marzo 2012

Docente responsabile: prof. Nicolas Cretton

Esperta di materia: Chiara Mastropietro

Liceo cantonale di Lugano 2

Indice

1 Introduzione **3**

2 Galassie **3**
2.1 Classi di galassie 4
2.1.1 Galassie ellittiche 5
2.1.2 Galassie a spirale 7
2.1.3 Galassie irregolari 10
2.2 Classificazione 11
2.2.1 Aggiunte di de Vaucouleurs 12
2.2.2 Progetto ATLAS^{3D} 13

3 Materia oscura **19**
3.1 Dispersione di velocità negli ammassi di galassie 20
3.2 Curve di rotazione di galassie a disco 21
3.3 Lenti gravitazionali 23
3.4 Ipotesi e ricerca 25
3.4.1 CLASH 25
3.4.2 Profili di densità di galassie nane 27

4 L'espansione dello spazio **28**
4.1 Il redshift cosmologico 29
4.2 La legge di Hubble 30

5 Formazione delle galassie **32**
5.1 Ai primordi dell'universo 32
5.2 Bottom-up o top-down? 33
5.3 Le prime stelle 34
5.4 Ellittiche giovani 35

6 Interazioni tra galassie **36**
6.1 Segni di merger 37
6.1.1 Galassie nane 40
6.1.2 Nuclei galattici attivi 41
6.1.3 Galassie ad anello 41
6.2 Formazione di galassie ellittiche 42

7 Altri scenari evolutivi **45**
7.1 L'insufficenza dei merger nell'evoluzione galattica 45
7.2 Evoluzione secolare 46
7.2.1 Galaxy harassment 46
7.2.2 Pseudobulges 47

8 Simulazioni N-body **48**

9 Conclusioni **51**

1 Introduzione

La storia dell'evoluzione delle galassie ha ricevuto molta attenzione negli ultimi decenni da parte dei ricercatori. Telescopi sempre più potenti sono ormai in grado di osservare galassie giovanissime, a partire dai primi centinaia di milioni di anni dopo il Big Bang. Ma cosa sappiamo effettivamente delle galassie? Cosa pensiamo che vada ancora bene, cosa invece deve essere cambiato? Le scienze naturali non danno certezze assolute, piuttosto delle teorie che tentano di spiegare efficacemente i fenomeni e che vanno mantenute finché diventano insostenibili di fronte a nuove conoscenze. Al fronte della ricerca scientifica appaiono in continuazione nuove ipotesi, quasi sempre più di una per domanda, in risposta a nuovi dati e indizi, a volte persino contraddittori. In queste acque torbide è facile perdere lo sguardo d'insieme.

Lo scopo di questo lavoro non è dare delle risposte, ma dare una conoscenza di base abbastanza buona per essere in grado di comprendere le domande attuali e perché sono così cruciali. Oltre alle informazioni inerenti direttamente al tema principale, cioè l'evoluzione delle galassie, ci saranno momenti dedicati a ricerche attuali, ai problemi che intendono risolvere e alle implicazioni dei loro risultati.

Il secondo capitolo è destinato alla classificazione delle galassie, ai diversi tipi, alle loro peculiarità e a come si possono inserire in un quadro evolutivo a partire dalle diverse proprietà che mostrano. Nel terzo e quarto capitolo sono chiariti alcuni concetti di base che riguardano il contesto del lavoro, ovvero il modello ΛCDM dell'universo. Il quarto capitolo è il cuore del lavoro e spiega più in dettaglio formazione e processo evolutivo delle galassie. Infine è dato spazio a uno dei metodi di verifica più importanti dei modelli di questi argomenti, le simulazioni al computer.

2 Galassie

Con il termine di 'galassia' si intende un grande ammasso di materia legato assieme dalla forza di gravità composto da stelle, gas interstellare, polvere e materia oscura. Tipicamente le dimensioni delle galassie variano da un diametro di 1000 a 100.000 parsec[1] e possono contenere da 10^7, nel caso di galassie nane, fino a 10^{14} stelle per giganti ellittiche. Le galassie si uniscono per formare grandi ammassi dove ogni galassia è in orbita attorno al centro di massa del sistema. Questi ammassi possono unirsi per formare super ammassi che però non sono più legati in modo gravitazionale e rappresentano soltanto una vasta regione dello spazio con un'elevata densità. Nonostante sia noto che le prime galassie sono state osservate già nel X secolo, quando furono descritte per la prima volta Andromeda e la grande nube di Magellano, esse sono state classificate per lungo tempo erroneamente come nebulose appartenenti alla Via Lattea, invece

[1] Il parsec, abbreviato pc, è un'unità di misura della distanza, abbreviazione di "parallasse di un secondo d'arco". È definito come cateto adiacente di un triangolo rettangolo il cui cateto opposto è un'UA (unità astronomica) e ampiezza d'angolo un secondo d'arco. 1pc corrisponde a circa 3,261507 anni luce oppure a $3{,}085678 \cdot 10^{16}$m.

di sistemi indipendenti e molto distanti dalla nostra galassia. Solo nel XX secolo, Edwin Hubble dimostrò che queste nebulose a spirale sono troppo distanti da noi per fare parte della Via Lattea.

2.1 Classi di galassie

Tradizionalmente le galassie sono state classificate secondo uno schema proposto da Edwin Hubble nel 1936. Nel suo modello di classificazione Hubble divide le galassie secondo le loro proprietà morfologiche in due grandi gruppi, quello delle galassie a spirale e quello delle ellittiche, mentre galassie lenticolari, dotati di un disco senza però avere una struttura a spirale, fanno da nesso tra i due gruppi. Questo schema è noto come **Hubble tuning fork** (diapason di Hubble) per la sua forma caratteristica ed è tuttora in uso.

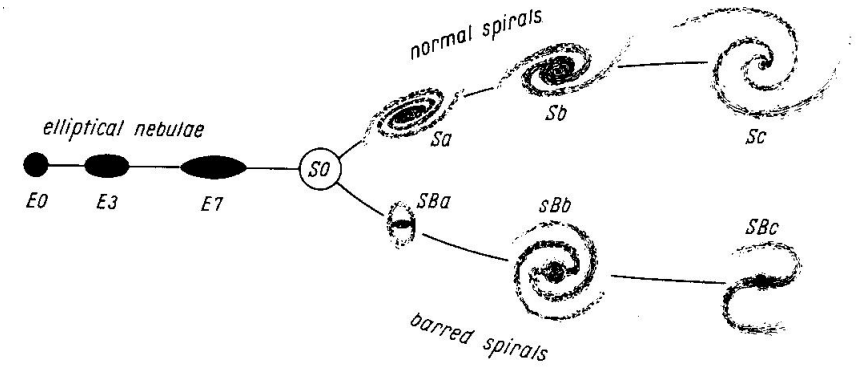

Figura 1: Schema di classificazione di E. Hubble, disegnato da Hubble (1936).

Usando ciò che a suo tempo era un telescopio molto potente, Hubble fu in grado di osservare alcune centinaia di galassie, comunque una cifra molto piccola se paragonata al numero osservabile nei giorni nostri, che si aggira attorno ai 50 miliardi. In più queste galassie erano molto vicine e dunque avevano un redshift basso. Ciò rese praticamente impossibile a Hubble di tenere conto dell'evoluzione, in quanto fu in grado di osservare soltanto galassie nell'epoca contemporanea. Inoltre il suo modello si basa unicamente su criteri morfologici, escludendo altri parametri importanti che potrebbero dare degli indizi sul passato di una galassia e dunque sulla sua evoluzione. La ragione per cui il modello di Hubble non è ancora stato sostituito, è soltanto la mancanza di alternative valide. Lo studio della morfologia delle galassie è un aspetto cruciale per la comprensione della loro evoluzione. Dalla conoscenza della loro forma attuale e della loro composizione si possono dedurre teoricamente e poi sperimentalmente attraverso simulazioni N-body gli eventi che potrebbero aver portato alla loro morfologia attuale, o meglio, come la vediamo oggi. Il confronto tra le forme delle galassie a diverse epoche dell'universo (osservando galassie a diver-

si redshift) può dare ulteriori importanti informazione sui tipi di cambiamenti necessariamente avvenuti.

2.1.1 Galassie ellittiche

Queste galassie sono chiamate così perché hanno una forma ellissoidale indipendente dall'angolo di osservazione. La loro forma varia da E0, per galassie perfettamente sferiche, a E7, cioè fortemente allungate. Il numero dopo la E indica il primo numero decimale dell'eccentricità e dipende dal rapporto tra i due assi degli isofoti della galassia:

$$e = 1 - \frac{b}{a}, \tag{1}$$

dove b è il semiasse minore e a quello maggiore. Dunque galassie sferiche sono di tipo E0 (per cui a=b). Dato che la forma degli isofoti dipende fortemente dall'angolo di osservazione della galassia e dalla sua cinematica interna, questo criterio di classificazione non è sempre utile. Galassie ellittiche generalmente non contengono né gas né polvere interstellare, o comunque solo quantità molto ridotte. Non avendo a disposizione del medio interstellare, il loro tasso di formazione stellare è molto ridotto. Spesso sono vecchie e di colore rosso, ciò si spiega dal fatto che contengono solo stelle di popolazione II con un'alta speranza di vita e poca metallicità. Stelle calde e blu, infatti, vivono poco, solo circa $100{\cdot}10^6$ anni rispetto ai $9{\cdot}10^9$ anni che raggiungerà il nostro sole prima di lasciare la sequenza principale. Se non è possibile formare nuove stelle, a lungo termine sopravvivono solo quelle più rosse, cioè quelle più longeve.

Figura 2: La gigante ellittica NGC 1316. Immagine di ESO ottenuta dal telescopio VLT/ANTU.

Le stelle circolano attorno al centro galattico in modo casuale, lungo orbite non uniformi e non su un unico piano, contrariamente a quanto avviene in galassie a spirali, dove le orbite sono tendenzialmente circolari e tutte sullo stesso piano, infatti in sistemi triassiali stelle non solo orbitano attorno all'asse maggiore ma anche attorno a quello minore. La grande maggioranza delle galassie ellittiche è triassiale (de Zeeuw, 1994), ovvero ha tre assi principali di dimensioni diverse. Le orbite nelle galassie ellittiche sono approssimate dagli isofoti, ovvero linee generalmente concentriche sulle quali la luminosità è costante. Esistono due tipi di isofoti, quelle che assomigliano a un disco, denominate **disky**, e quelle più a forma di scatola, chiamate **boxy**. In generale galassie ellittiche cono isofoti a forma di disco hanno una velocità media più alta rispetto alla dispersione di velocità che indica il movimento caotico in tutte le direzioni delle stelle, inoltre sono meno luminose, mentre quelle a forma di scatola hanno una velocità di rotazione molto più lenta (Schweizer, 1998). Nonostante ciò i due tipi di isofoti possono coesistere in una stessa galassia. Dato che non ruotano come in un disco, cioè tutte nello stesso senso, l'eccentricità di una galassia non può dipendere dalla cinematica stellare. La densità stellare e la luminosità decresce esponenzialmente dalle zone centrali verso l'esterno. Si pensa, che un buco nero dalla massa di alcuni per mille della massa totale risieda al centro di ogni nucleo galattico.

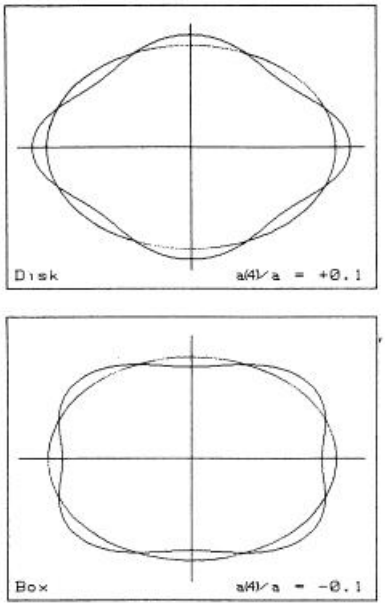

Figura 3: Illustrazione schematica dei due tipi di isofoti, disky (in alto) e boxy, di una galassia ellittica. Immagine di (Bender et al. 1988).

Simulazioni al computer (Burkert et al., 2008), mostrano che galassie ellit-

tiche possono formarsi dalla collisione di due galassie a disco. Durante questi merger i dischi di galassie a spirale di massa paragonabile sono distrutti completamente, mentre le loro stelle si ridispongono nella forma ellittica molto meno fragile. La validità di questa teoria è confermata da osservazioni che mostrano che almeno 20-30% delle giganti ellittiche possiedono un nucleo che ruota in senso opposto e/o molto più velocemente rispetto alle regioni più esterne (Franx et al, 1989b), un fenomeno chiamato **kinematically decoupled cores**. Questi nuclei hanno un raggio tipicamente dell'ordine di 1 kpc e masse da 10^9-10^{10} $M_\odot$. Si pensa che queste strutture si formino quando una galassia ellittica cannibalizza una compagna più piccola e ricca di gas che cade verso il centro dove il suo gas forma un nucleo a forma di disco, oppure come conseguenza naturale del merger di due galassie a spirale di cui almeno una è ricca di gas.

Galassie ellittiche sono presenti in maggior numero in grandi ammassi. In queste regioni le galassie ellittiche costituiscono approssimativamente la metà di tutte le galassie, mentre altrove solo il circa 10% sono ellittiche.

2.1.2 Galassie a spirale

Queste galassie hanno una forma appiattita a disco con una struttura a spirale. Il disco è composto da gas, polvere e da stelle prevalentemente blu e giovani, che sono più concentrate nelle regioni dei bracci a spirale. Lo schema di classificazione di Hubble (Figura 1) differenzia tra spirale con una struttura a barra (SB) che parte dal bulge centrale e si collega ai bracci, e quelle senza barra (S). Inoltre divide le galassie a seconda di quanto strettamente i bracci sono avvolti attorno al centro, variando da molto stretti (Sa) a molto larghi (Sc). Lungo questa sequenza la quantità di gas molecolare presente aumenta e conseguentemente anche il tasso di formazione stellare.

Figura 4: Immagine ipotetica della Via Lattea come la vedremmo se la potessimo guardare dall'alto, da notare la barra al centro. Immagine di R. Hurt (SSC), JPL-Caltech, NASA.

La maggior parte delle galassie a spirale ospita un bulge centrale, cioè una regione ad alta densità stellare che contiene la maggior parte delle stelle della galassia, composta da stelle vecchie di popolazione II che non necessariamente si muovono in orbite parallele rispetto al piano del disco, ma, come le galassie ellittiche, hanno poca o nessuna rotazione risultante e un alto livello di movimento caotico. I bulge contengono quasi nessun medio interstellare. Rispetto alle altre parti della galassia i bulge sono molto luminosi, il rapporto tra luminosità del bulge e quella totale decresce da sinistra verso destra lungo la sequenza di Hubble. Per la loro somiglianza con le galassie ellittiche si pensava a lungo che fossero di fatto ellittiche circondate da una struttura a spirale. Tuttavia, è stato chiarito da (Kormendy et al., 2011) che la maggior parte dei bulge sono in realtà dei bulge solo a prima vista e in realtà hanno caratteristiche, soprattutto cinematiche, come per esempio la velocità di rotazione, più simili a dei dischi si comportano più come galassie a spirale, mentre solo una parte dei bulge sono bulge classici.

Le stelle del disco sono di popolazione I, perciò hanno una breve durata di vita e un'alta metallicità. Si muovono attorno al centro del disco in orbite pressoché circolari. I bracci a spirale, invece, non orbitano assieme alle stelle. Infatti, se fosse così, poiché le regioni esterne del disco hanno periodo di rotazione molto maggiore rispetto alle regioni più centrali, perché, a parità di velocità tangenziale, la distanza che devono percorrere è maggiore, queste stelle resterebbero indietro rispetto alle altre e i bracci perciò dovrebbero avvolgersi attorno al centro e presto sparire completamente. Perciò, invece di ruotare assieme alle stelle nel disco, i bracci sono soltanto una regione ad alta densità, che sì ruotano, ma ad un passo molto più lento del materiale che li compone.

Il loro movimento è molto simile a quello di un' onda sonora che si propaga nell'aria. Quando le molecole di aria sono spostate in avanti da un impulso, si scontrano con altre molecole e in questo modo si propaga l'onda. Similmente, le regioni di maggiore densità e quindi con più massa hanno una più grande forza di attrazione gravitazionale sulla materia circostante. Ciò causa le stelle, che si trovano a monte dei bracci di muoversi più velocemente verso di essi, mentre le stelle che si allontanano sono ancora attratte dalla forza di gravità verso i bracci e conseguentemente avranno una velocità leggermente minore. Sia le stelle sia i bracci a spirale quindi ruotano, ma gli ultimi a una velocità così bassa da permetterli di resistere un arco di tempo ragionevole senza avvolgersi completamente attorno al centro. Questo modello, proposto dagli astronomi C.C. Lin e Frank Shu (Lin & Shu, 1964) verso la metà degli anni '60, denominato poi **density wave theory**, spiega sia come mai così tante stelle si formano nei bracci, sia perché sono le parti più luminose del disco.

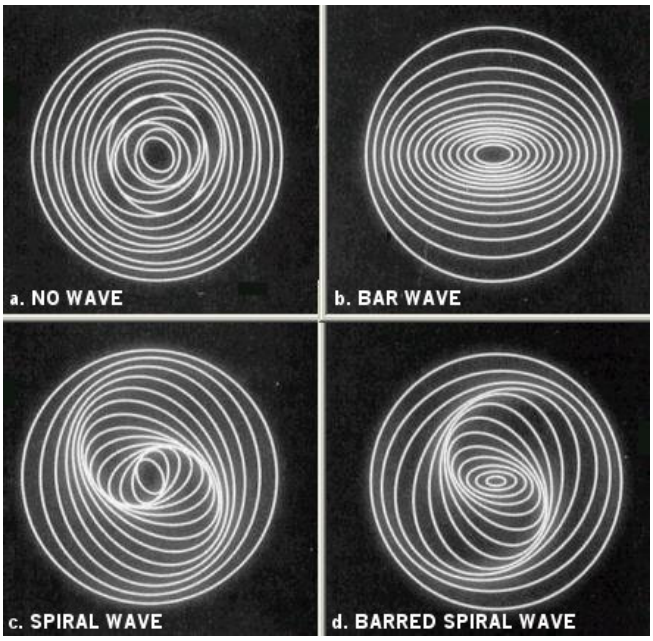

Figura 5: Secondo la density wave theory i bracci a spirale si formano in zone dove i picchi dell'onda si addensano. A dipendenza dell'onda i bracci a spirale saranno diversi.

Di fatto non solo stelle ma anche gas e polvere orbitano il centro. Nelle regioni a densità elevata, il gas è compresso fino a formare una nebulosa che di seguito collassa, innescando il processo di formazione stellar. Le stelle che si formano sono esclusivamente di popolazione I, perciò calde e ricche di metalli. Questo si spiega dal fatto che, quando una stella esplode, il materiale che lo componeva è espulso nuovamente nel medio interstellare e prima o poi raggiun-

gerà un braccio a spirale dove potrà essere compresso nuovamente in una stella. Dato che la fusione nucleare, che avviene nell'ultimo periodo della vita stellare, produce metalli sempre più pesanti il livello di metallicità delle stelle tende ad aumentare con ogni generazione. Stelle di popolazione I hanno una vita molto breve e passano soltanto dai 3 ai 15 milioni di anni nella sequenza principale. In confronto al tempo che impiega il nostro Sole per completare la sua orbita attorno al centro della Via Lattea, cioè circa 220 milioni di anni, è un arco di tempo piuttosto breve. Le stelle saranno quindi in grado di avanzare solo una breve distanza prima di morire, perciò le stelle blu si troveranno sempre un po' a valle dei bracci a spirale, ma non è possibile osservare le a grandi distanze dai bracci.

Non è chiaro però da dove i bracci a spirale vengono in primo luogo, anche se è possibile che certi si siano formati durante interazioni tra galassie. Per spiegare la struttura di galassie a spirali i cui bracci non sono così chiari e ben definiti, è stato proposto il modello di **self-propagating star formation** (Mueller & Arnett, 1976). Se in una regione all'interno di una nube molecolare collassa del gas e innesca il processo di formazione stellare, i venti prodotti dalla radiazione delle nuove stelle e le esplosioni di supernove causeranno la formazione di stelle in regioni circostanti. In questo modo il processo si propaga fino a coinvolgere una parte piccola ma rilevante del disco. Dato che le stelle interne hanno un periodo di rotazione più basso, avanzeranno più velocemente delle stelle più esterne, che rimangono indietro. In questo modo si formano dei bracci a spirale, che però non sono ben definiti. Le parti della nuvola di gas dove il processo è iniziato si calmeranno prima e le loro stelle moriranno più presto, lasciando dei buchi nei bracci, dando al disco un aspetto piuttosto caotico.

È generalmente accettato che al centro di ogni galassia vi è un buco nero supermassivo. Attorno ad ogni galassia a spirale sta un alone di materia oscura il cui raggio sorpassa di gran lunga quello del disco. La materia oscura è responsabile della grande maggioranza della massa totale delle galassie. Inoltre nell'alone ci sono anche stelle molto vecchie e ammassi globulari in orbita attorno al centro.

2.1.3 Galassie irregolari

Galassie di questo gruppo non hanno una struttura abbastanza regolare da poterle assegnare ad un altro gruppo. La classificazione di Hubble distingue tra due tipi Irr-I e Irr-II, a dipendenza se mostrano di avere per lo meno qualche forma di struttura, oppure no. Spesso hanno una struttura caotica, una forma asimmetrica e non presentano né bulge né struttura a disco o a spirale, perciò esse formano una categoria separata.

Figura 6: La galassia irregolare NGC 1427A. Non si riconosce alcuna forma di struttura, le zone blu, stelle calde e giovani, indicano un alto tasso di formazione stellare. Immagine di NASA, ESA, The Hubble Heritage Team (STScI/AURA).

In generale galassie irregolari sono fatte di stelle giovani e molta polvere interstellare. Si pensa, che circa il 5-10% di tutte le galassie faccia parte di questo gruppo e che si siano evolute da spirali o ellittiche attraverso alcuni processi possibili. Per esempio potrebbero essere state distorte dalle forze di marea di una compagna più massiccia, oppure essersi formate da fusioni di galassie.

Oggetto di particolare interesse per gli astronomi sono le galassie irregolari nane (dI o dIrrs) che tendono ad avere bassi livelli di metallicità e a contenere grandi quantità di gas molecolare. Ciò le rende molto simili a come si pensa che siano state le prime galassie formatesi nell'universo e per questo potrebbero aiutarci a comprendere meglio l'evoluzione generale delle galassie.

2.2 Classificazione

Il problema principale della classificazione di Hubble è, che i criteri sono basati unicamente sulla forma delle galassie. Distinguere tra un corpo sferoidale e un disco è un compito banale sulla Terra, ma non nello spazio. Poiché gli oggetti nell'universo sono così distanti da noi, la nostra visione di loro è completamente piatta. Perciò la luce di tutti gli oggetti nell'universo che vediamo è proiettata su un piano. Data questa condizione appare chiaro che la differenziazione tra una comune galassia ellittica e una spirale leggermente inclinata, oppure tra una

galassia a disco vecchia, senza i caratteristici bracci a spirale, vista di fronte e una sferoidale diventa estremamente difficile, se non impossibile, in quanto entrambi hanno la stessa forma proiettata sul cielo. Non è possibile misurare lo spessore di una galassia, poiché proiettando tutta la luce su un piano si perde l'informazione della terza dimensione. Inoltre è solo possibile misurare la distanza delle stelle individuali se la galassia è molto vicina e le stelle sono distinguibili, altrimenti la distanza misurata è quella dell'intera galassia. Per la classificazione quindi si ricorre spesso a criteri di colore oppure a criteri cinematici, infatti abbiamo visto che galassie ellittiche tendono ad essere più rosse e ad avere meno gas e polvere. Comunque il problema rimane ed è stato fatto notare quasi subito.

2.2.1 Aggiunte di de Vaucouleurs

Da quando Hubble ha presentato il suo schema di classificazione, molti altri astronomi hanno proposto delle alternative. Noto in particolare è lo schema sviluppato da Gérard de Vaucouleurs e Allan Sandage (1959) che propongono di estendere lo schema di Hubble ritenendolo non abbastanza preciso. De Vaucouleurs mantiene sostanzialmente la divisione di base delle galassie, aggiungendo però alcune sottocategorie. Innanzitutto aggiunge, oltre alle spirali con barre (SB) e quelle senza (SA), una categoria di galassie a metà strada tra barrate e non (SAB). Lenticolari sono pure o barrate (SB0) o senza barra (SA0), oppure di tipo (S0) in caso non sia determinabile se abbiano una barra oppure no. Galassie che presentano degli anelli viene aggiunta la notazione (r), a quelle senza (s). La distinzione da (a) a (c) del grado di strettezza con cui i bracci a spirale sono avvolti attorno al centro, già presente nello schema di Hubble, rimane, vengono aggiunti però tre classi che effettivamente sostituiscono la classe degli irregolari; sono (d), che denota bracci molto diffusi o addirittura rotti, accompagnati da un bulge centrale poco luminoso, (m), dall'aspetto irregolare e senza bulge, e (Im), cioè galassie altamente irregolari. Per classificare una galassia questi elementi vengono combinati, per esempio la Grande Nube di Magellano è di tipo SBm.

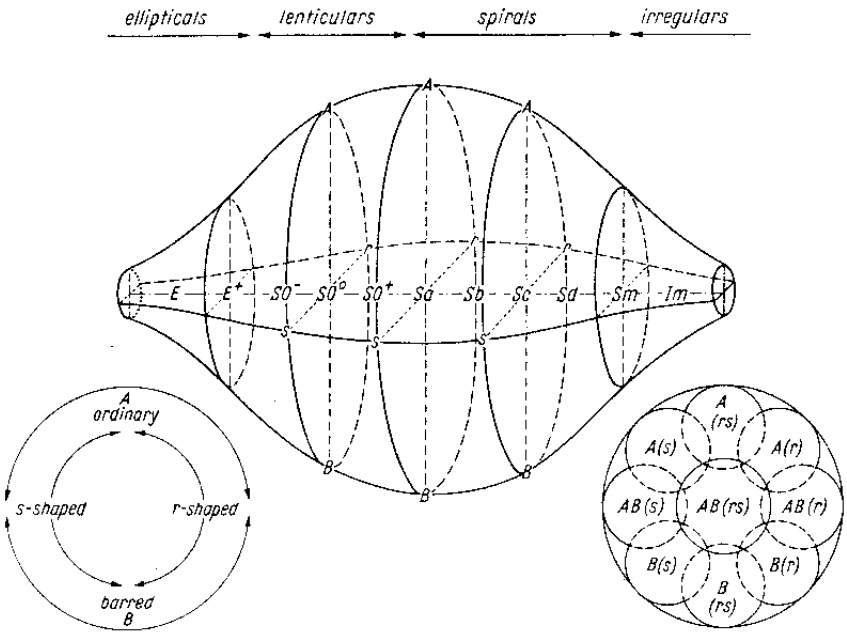

Figura 7: Modello tridimensionale di de Vaucouleurs e Sandage.

Inoltre de Vaucouleurs divide le classi di galassie in 17 tappe assegnandole valori numerici da -6 a 10, dove i numeri negativi rappresentano galassie vecchie, cioè ellittiche e lenticolari, e quelli positivi le più giovani galassie a spirale e quelle irregolari. In questo modo l'intenzione di ordinare le galassie secondo una sequenza evolutiva diventa decisamente più chiara di quanto lo era nello schema di Hubble, malgrado la direzione evolutiva, cioè passando da ellittiche che si evolvono in spirali, rimane uguale.

2.2.2 Progetto ATLAS^{3D}

Una proposta più recente è stata avanzata nel 2007 da un gruppo di astronomi inteso a studiare la funzione di luminosità di galassie fino a z = 1 (Faber et al. 2007) usando . Il modello sviluppato in seguito ai loro risultati divide le galassie in due gruppi a dipendenza del loro colore e della loro massa. Una nube blu (ing. Blue cloud) è popolata da galassie a spirale o irregolari giovani che formano stelle e ruotano velocemente. Quando esse sono coinvolte in merger importanti, perdono tutto il materiale necessario per formare delle stelle riducendo il tasso di formazione stellare a quasi zero. A questo punto cominciano a fare parte della sequenza rossa (ing. Red sequence, figura 7), che consiste di galassie vecchie che ruotano lentamente e possiedono poco materiale interstellare. Accadono anche merger all'interno della sequenza rossa. Essi sono responsabili della formazione delle galassie più massicce come le giganti ellittiche.

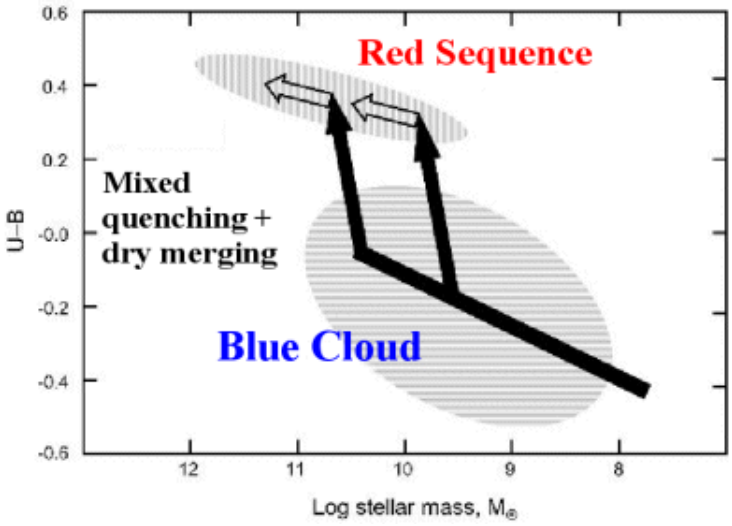

Figura 8: Galassie della nube blu si spostano sulla sequenza rossa tramite merger, galassie della sequenza rossa si spostano lungo di essa tramite merger al loro interno. Immagine di (Faber et al., 2007)

Paragonandolo con lo schema di Hubble questo modello mostra di avere il vantaggio di prendere in considerazione il **processo evolutivo** delle galassie secondo il modello standard di evoluzione galattica discusso nel capitolo 4. Dato che il modello non dipende da proprietà morfologiche, non c'è rischio di classificare male una galassia per colpa dell'angolo di osservazione. Infatti l'unico caso in cui questo può accadere è, se il piano di rotazione netta delle stelle è perpendicolare alla linea di vista, cioè in un caso veramente straordinario. Inoltre elimina completamente le incertezze di classificazione, poiché è difficile essere in dubbio sul fatto che una galassia sia ricca di gas o meno.

Basandosi su questo modello, partecipanti del progetto ATLAS^{3D}, una collaborazione internazionale di astronomi intesa a studiare la cinematica stellare delle galassie, recentemente hanno lanciato un progetto determinato a studiare un ampio campione di galassie lenticolari e ellittiche.

Hanno eseguito un sondaggio a diverse lunghezze d'onda di 260 galassie vecchie nel volume locale. Invece di usare la tecnica finora comune, cioè long-slit spectroscopy, e misurare la cinematica di stelle lungo una retta ad al massimo un paio di angoli diversi, il gruppo ha usato spettroscopia a integrale di campo con cui sono stati in grado di misurare la cinematica bidimensionale delle galassie osservate (Cappellari et al., 2010).

Essenzialmente sono stati misurati gli spettri delle stelle nelle galassie. Spettri di stelle che si allontanano da noi a una velocità più alta saranno più spostati verso il rosso che quelli di stelle che si allontanano da noi a passo più lento o che addirittura si avvicinano (a dipendenza di quanto distante è la galassia in questione). Paragonando i diversi redshift è possibile misurare le velocità relative

tra le stelle lungo la linea di vista in varie posizioni dell'immagine della galassia e determinare in che modo esse si muovono all'interno della galassia.

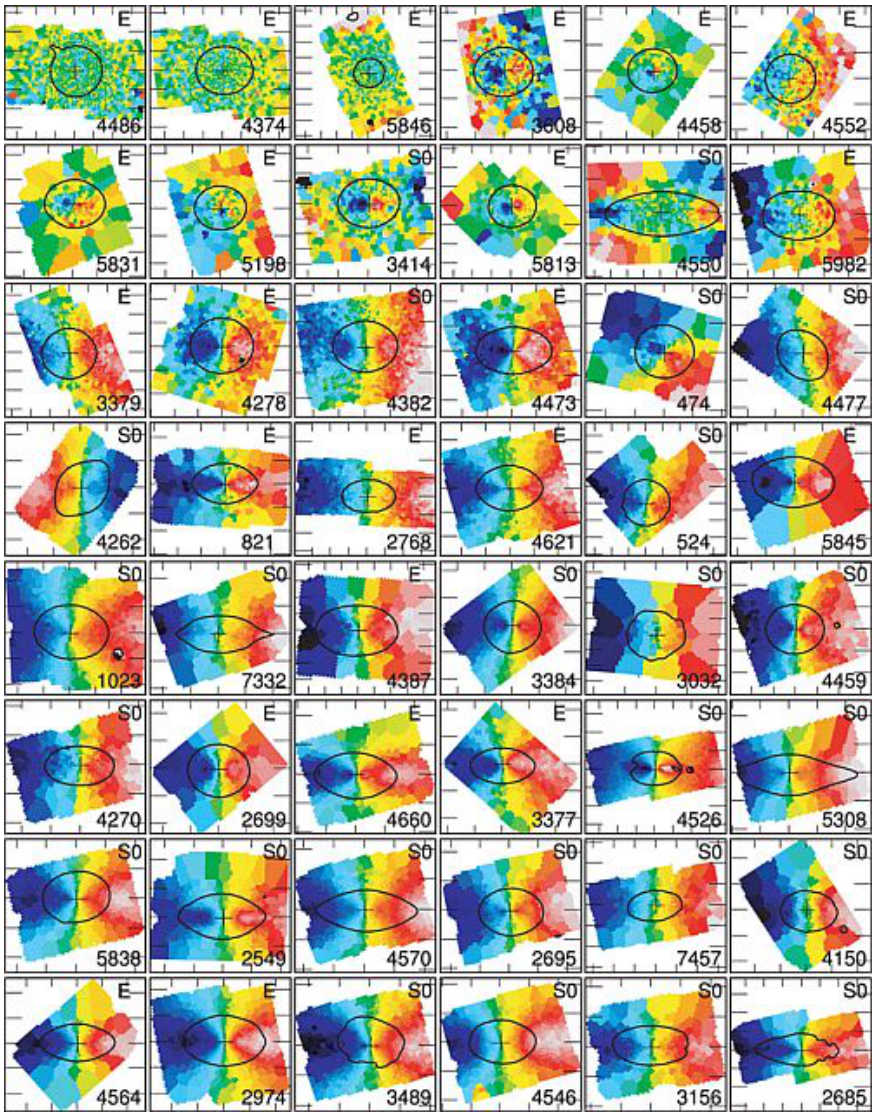

Figura 9: Profili di velocità delle galassie. I rotatori lenti (prime due righe in alto) non mostrano alcunarotazione netta, i rotatori veloci invece hanno due metà di cui una si muove chiaramente verso, l'altra si allontana dall'osservatore. Immagine di (Emsellem et al., 2007), fatta dallo spettrografo SAURON (Spectroscopic Areal unit for Research on Optical Nebulae) che è parte del WHT (William Herschel Telescope).

Secondo questi risultati le galassie possono essenzialmente essere divise in due grandi gruppi, rotatori lenti e veloci, secondo i loro campi di velocità. Ci si aspetterebbe che la maggior parte delle galassie ellittiche ruotano piuttosto lentamente, se ruotano del tutto, infatti in alcune ellittiche si osserva che la loro velocità media è quasi uguale a zero.

Rotatori veloci invece mostrano chiaramente di avere una direzione di movimento perché la maggior parte delle stelle orbita il centro nello stesso senso. Il campo di velocità è allora diviso in due parti, di cui una mostra di avere stelle che si avvicinano mentre nell'altra si allontanano dall'osservatore. É un fatto ben noto che la materia in un disco ruota generalmente molto più veloce che in una struttura sferica. Ciò che probabilmente nemmeno gli astronomi sospettavano è, che una tale quantità di galassie vecchie si comporta più da spirale che non da ellittica. Di fatto circa il 66% delle galassie vecchie del campione studiato sono rotatori veloci, perciò le ellittiche non-ruotanti costituiscono di questo gruppo solo una minoranza! Rotatori veloci sono cinematicamente molto simili alle galassie a spirale, però senza struttura a spirale e senza gas e polvere.

Appare evidente ora che il diapason di Hubble non solo comporta il rischio che alcune galassie siano messe nella sezione sbagliata, ma che è in verità abbastanza fuorviante. Fondandosi su questi risultati il gruppo ATLAS di conseguenza ha proposto un nuovo schema di classificazione basato sulla cinematica interna piuttosto che su proprietà morfologiche. In questo modello le galassie vecchie che ruotano velocemente sono poste in una sequenza parallela alle altre galassie a disco, mentre la sequenza dei rotatori lenti è perpendicolare alle altre, legandole in termini di strada evolutiva. Chiamato pettine di ATLAS (dall' inglese: ATLAS comb), questo modello ha il potenziale necessario per sostituire lo schema di Hubble.

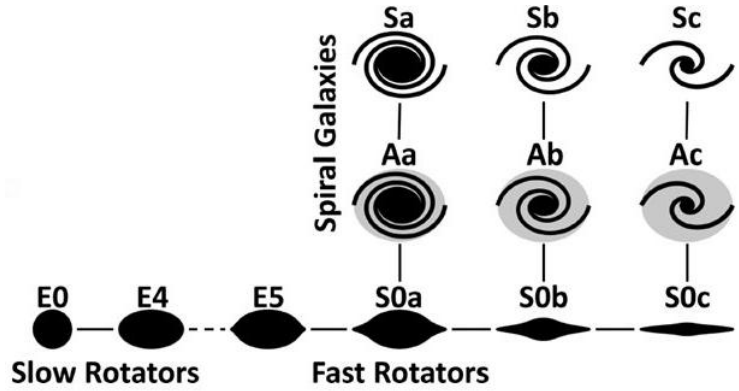

Figura 10: Il pettine di ATLAS. Da sinistra a destra aumenta la velocità di rotazione e diminuisce la sfericità. Dal basso verso l'alto aumentano le dimensioni della galassia e il contenuto di gas mentre il colore si sposta verso il blu. Immagine di (Cappellari et al., 2011)

Il fatto che rotatori veloci sono a quanto pare così comuni tra le galassie

vecchie appare come una vera sorpresa e naturalmente leva molte domande. Per esempio, in che modo queste galassie hanno perso tutto il loro gas e la polvere interstellare? E come mai ruotano ancora così velocemente? È noto che meccanismi come starburst intensi ed esplosioni di supernove possono espellere del gas e della polvere nel medio intergalattico, ma questi fenomeni occorrono prevalentemente in galassie interagenti in modo gravitazionale. Non solo le galassie vecchie a disco non mostrano alcuni segni di interazioni presente o passate, ma in più il loro disco è ancora intatto. É altamente improbabile che un numero così ingente di merger non sia stato abile a distruggere il disco e rallentare la velocità di rotazione delle stelle mentre però essere stato in grado di prosciugare le galassie del loro materiale necessario alla formazione stellare.

A dare un indizio su come questo problema potrebbe essere risolto, è la galassia NGC1266. Classificata come S0, si pensava a lungo che fosse completamente priva di gas. Essendo stata selezionata per il progetto ATLAS^{3D} però, gli astronomi hanno scoperto un disco di gas molto concentrato in rotazione rapida di un diametro di circa 300 anni luce non molto lontano dal buco nero centrale. Parte di questo gas è espulso dal disco sotto forma di due getti in direzioni opposte a delle velocità fino a 400 m/s, che quindi bastano per permettere al gas di fuggire dal campo gravitazionale della galassia e diventare parte del medio intergalattico. In questo modo 13 $M_\odot$ sono espulse annualmente dalla galassia e si può calcolare che, se il processo continuerà a questo passo, NGC1266 sarà vuota di gas entro meno di un milione di anni, un arco di tempo molto breve in confronto all'età delle galassie.

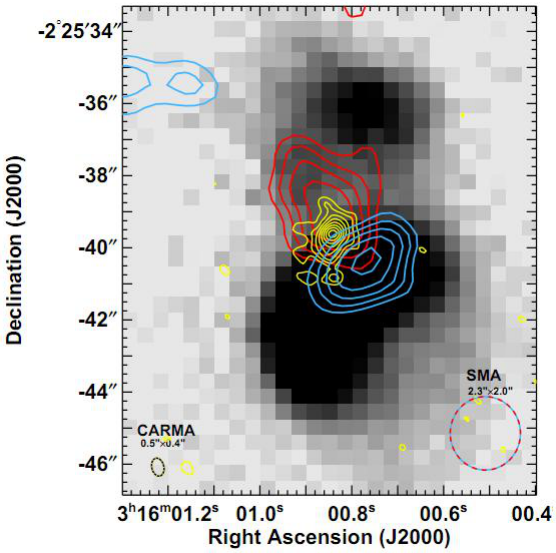

Figura 11: Immagine del nucleo di NGC 1266. Si vedono in rosso e blu getti in direzioni opposte. In giallo è rappresentata la nube di gas molecolare. (Alatalo et al., 2011) Immagini di: Spitzer Space Telescope, CARMA, SMA

Cercare di spiegare sia cosa alimenta I getti che espellono il gas sia il perché esso ha formato un disco in primo luogo è un compito piuttosto difficile. Alte concentrazioni di gas molecolare si trovano spesso in regioni al centro di galassie in interazione, nei luoghi in cui avviene la formazione stellare quando la forza di gravità causa la collisione delle nubi di gas delle due galassie. Di conseguenza le molecole, attraverso la forza di attrito, perdono il loro momento angolare e cadono verso il centro. Tuttavia non ci sono segni che NGC1266 sta attualmente interagendo con una compagna.

L'energia necessaria per alimentare questi getti è nell'ordine di circa 10'000 esplosioni di supernove. La possibilità che ciò avviene in questo caso può però essere esclusa, date che le esplosioni dissocerebbero le molecole di gas e potrebbero persino ionizzarle. Il gas può essere espulso anche da starburst, ma il tasso di formazione stellare di solo 3 $M_\odot$ all'anno nel disco è lontano dal produrre la quantità di energia richiesta. Un'altra spiegazione possibile potrebbe essere che un nucleo galattico attivo alimenti i getti. Si pensa che all'interno di ogni galassia ellittica e bulge ci sia un buco nero la cui massa è correlata alla dispersione di velocità della galassia, la cosiddetta **M-sigma relation** per cui:

$$M \propto \sigma^{\alpha} \tag{2}$$

dove M è la massa del buco nero, σ la dispersione di velocità e α una costante pari a circa 5 (Silk & Rees, 1998).

Questa teoria è promettente, poiché osservazioni del centro del disco hanno scoperto elevate emissioni di raggi X che sono tipici segni di un buco nero supermassivo che accresce della materia. Se questo fenomeno sarà scoperto anche in altre galassie, potrebbe spiegare il meccanismo con cui le galassie vecchie a disco hanno perso il loro gas.

Per molti anni astronomi hanno cercato di spiegare in che modo le galassie vecchie si siano svuotate di gas, ora però il problema sembra diventare l'opposto: se si pensava che le galassie vecchie fossero 'morte', come mai così tante di loro contengono più gas della, se pur minima, quantità aspettata e mostrano ancora segni di formazione stellare, bassi, ma presenti?

Il caso di NGC1266 è interessante anche per l'aspetto evolutivo, infatti il suo stato attuale può essere interpretato come periodo transitorio tra la nuvola blu dei rotatori veloci e le galassie massicce della sequenza rossa (Figura 7). Più precisamente, se anche in futuro non si scopriranno segni di merger importanti presenti o passati, ciò implicherà che merger non sono strettamente necessari per permettere a una galassia di muoversi lungo una sequenza evolutiva.

3 Materia oscura

La materia oscura è responsabile della grande maggioranza di materia nell'universo e gioca un ruolo fondamentale nella struttura ed evoluzione di una galassia. Ma cosa è esattamente la materia oscura? Innanzi tutto è scura. Non esiste assolutamente nessun modo di osservarla direttamente poiché non interagisce attraverso la forza elettromagnetica. Conseguentemente non emette né riflette luce o radiazione elettromagnetica. In effetti, stando direttamente di fronte ad un blocco di materia oscura non sarebbe osservabile con la vista, ma apparirebbe invisibile, poiché i fotoni riflessi dagli oggetti che si trovano dall'altra parte passerebbero la materia oscura senza essere minimamente deviati dal loro percorso per effetti di interazione elettromagnetiche. Questa proprietà rende la materia oscura estremamente difficile da osservare. Nonostante ciò è possibile vedere gli effetti che l'interazione gravitazionale che la materia oscura ha sulla materia comune, infatti essa interagisce ma solo attraverso la forza di gravità.

Astronomi ipotizzarono per la prima volta l'esistenza di una finora sconosciuta forma di materia verso la fine degli anni 20, per spiegare la dispersione di velocità delle galassie negli ammassi (Zwicky, 1933) o le discrepanze tra la velocità attesa e osservata di rotazione delle stelle nei dischi di galassie a spirale (Rubin, anni '70). Oggi è comunemente accettato che la materia oscura, qualunque cosa sia, è responsabile del 23% dell'energia totale dell'universo, mentre atomi formano solo il 4,6%. La dispersione di velocità, indicata con la lettera σ, da un'indicazione su quanto le velocità delle singole galassie si discostano dalla media.

$$\sigma = \sqrt{\int_V (v - \int_V vp\,(v)\,dv)^2 p\,(v)\,dv} \tag{3}$$

Se la dispersione è grande, ciò vuol dire che alcune galassie si muovono molto più lentamente del valore medio, mentre altre, per compensare la velocità mancante, si muovono più in fretta. La velocità delle galassie dipende essenzialmente dalle forze di gravità in gioco tra di loro, se le forze sono grandi, lo sarà anche la velocità. Poiché la responsabile della forza di gravità è la massa, una stima della dispersione della velocità può dare un indizio importante sulla quantità di massa del sistema necessaria per giustificare anche il limite superiore delle velocità raggiunte.

3.1 Dispersione di velocità negli ammassi di galassie

I primi indizi dell'esistenza della materia oscura furono scoperti dall'astronomo Fritz Zwicky all'inizio degli anni 30 quando condusse una ricerca sulla cinematica di galassie ellittiche negli ammassi giganti applicando per la prima volta il teorema del viriale a questo tipo di sistema (Zwicky, 1933).

Il teorema del viriale essenzialmente lega la media dell'energia cinetica totale in un certo lasso di tempo di un sistema stabile all'energia media potenziale nello stesso tempo. La sua importanza è data dal fatto che rende possibile calcolare l'energia media cinetica totale anche per sistemi molto complicati, come lo è un ammasso di galassie.

$$2\langle T\rangle = -\sum_{k=1}^{N} \langle \mathbf{F}_\mathrm{k} \cdot \mathbf{r}_\mathrm{k}\rangle \tag{4}$$

Dove T rappresenta l'energia cinetica media per unità di tempo, N le particelle considerate, $\mathbf{F}_k$ la forza della k-esima particella che si trova in una posizione $\mathbf{r}_k$. La parte destra dell'uguaglianza rappresenta l'energia potenziale media per unità di tempo. Applicando questo teorema alle galassie dell'ammasso della Chioma, Zwicky fu in grado di stimare la massa dell'ammasso, in quanto l'energia totale potenziale dovrebbe essere la metà di quella cinetica in un sistema uniforme. Paragonando il risultato ottenuto da questi calcoli con delle stime condotte sulla base del numero e della luminosità delle galassie, ovviamente proporzionale alla massa che contengono, trovò che il primo dava un valore per la massa più grande di circa 400 volte. Data la formula ben nota dell'energia potenziale gravitazionale,

$$E = G\frac{mM}{r} \tag{5}$$

possiamo notare che i parametri che determinano l'energia potenziale sono la distanza r di una particella dal centro di massa e la massa coinvolta mM . Poiché sembra altamente improbabile che il problema possa risiedere nel primo parametro, in quanto i metodi di misurazione della distanza figurano sì degli errori di misura, ma non abbastanza importanti da spiegare la discrepanza tra i dati e le aspettative, il metodo più semplice per risolvere questo problema, sembra invece essere quello di concentrarsi sulla massa in questione. Ci rendiamo

conto che la massa prevista dal teorema viriale è molto più grande di quella calcolata, sembra quindi che ci debba essere una forma di massa che non è tenuta in considerazione dalle stime sulla base della luminosità totale. Giungendo a questa conclusione, Fritz Zwicky invocò l'esistenza di una nuova forma di materia, che non interagisce con la forza elettromagnetica e quindi non può emettere luce. La sua proposta ricevette però ben poca attenzione, non essendoci altre osservazioni che ottennero lo stesso risultato per i prossimi decenni.

3.2 Curve di rotazione di galassie a disco

Consideriamo una distribuzione di massa non uniforme attorno a cui è in orbita un corpo di massa unitaria nella posizione $\mathbf{x}$. Per calcolare la forza netta che agisce sul corpo è possibile sommare il contributo di tutte le parti infinitesimali che si trovano nei punti $\mathbf{x}'$ che compongono la massa grande. Secondo la legge di gravità di Newton si può scrivere il problema nel seguente modo

$$d\mathbf{F}\left(\mathbf{x}\right) = G\frac{d\rho\left(\mathbf{x}\right)d{\mathbf{x}'}^{3}}{\left(\mathbf{x}-\mathbf{x}'\right)^{2}} \tag{6}$$

Per comodità esprimiamo la massa come il prodotto tra densità e volume infinitesimale nel punto $\mathbf{x}'$. Integrando rispetto a $\mathbf{x}$ otteniamo

$$\mathbf{F}\left(\mathbf{x}\right) = G\int\frac{d\rho\left(\mathbf{x}\right)d{\mathbf{x}'}^{3}}{\left(\mathbf{x}-\mathbf{x}'\right)^{2}} \tag{7}$$

A questo punto introduciamo il potenziale gravitazionale. Esso si definisce come il lavoro per unità di massa svolto dalla forza di gravità per muovere una massa all'interno di un campo gravitazionale. Più comunemente si usa la differenza di potenziale, cioè l'opposto del lavoro necessario per muovere una unità di massa da una superficie equipotenziale all'altra

$$\Phi = -\frac{L}{m}. \tag{8}$$

Tenendo presente che il Lavoro è uguale a forza per distanza dobbiamo moltiplicare per la distanza e dividere per l'unità di massa da entrambe le parti dell'equazione (7) per trasformare la forza in potenziale. Allora avremo

$$\Phi(\mathbf{x}) = -G\int\frac{1}{\left(\mathbf{x}-\mathbf{x}'\right)}d\rho\left(\mathbf{x}\right)d{\mathbf{x}'}^{3}. \tag{9}$$

Ci accorgiamo che

$$\nabla_{\mathbf{x}}\left(\frac{1}{\left(\mathbf{x}-\mathbf{x}'\right)}\right) = \frac{1}{\left(\mathbf{x}-\mathbf{x}'\right)^{2}} \tag{10}$$

ovvero, calcolando la derivata del vettore $\frac{1}{(\mathbf{x}-\mathbf{x}')}$ ritroviamo una espressione già presente nell'equazione (7). Sostituendo possiamo esprimere la forza allora come:

$$\mathbf{F}(\mathbf{x}) = \nabla_{\mathbf{x}} \int \frac{G d\rho(\mathbf{x})\, d\mathbf{x}'^3}{(\mathbf{x} - \mathbf{x}')} \tag{11}$$

Sostituendo la parte sotto l'integrale con il potenziale, come visto nell'equazione (10), possiamo scrivere:

$$\mathbf{F}(\mathbf{x}) = -\nabla_{\mathbf{x}} \Phi(\mathbf{x}) \tag{12}$$

Operare con il potenziale piuttosto che direttamente con la forza in molti casi è più semplice, anche perché è più semplice da trovare.

L'intensità della forza di gravità, come abbiamo visto nell'equazione (6), decresce con il quadrato della distanza, mentre la velocità tangenziale di un corpo in orbita attorno all'altro è proporzionale all'accelerazione centripeta che a sua volta dipende dalla forza di gravità. Allontanandoci dal centro di una galassia possiamo quindi aspettarci, che la velocità delle stelle diminuisca con l'aumentare del raggio. Tra la fine degli anni '60 all'inizio degli anni '70 le osservazioni di Vera Rubin hanno invece hanno dimostrato che ciò non avviene. Misurazioni di Doppler shift di un campione di galassie a spirale indicano che la velocità delle stelle rimane pressoché costante lungo tutto il raggio dei dischi. Il problema della massa mancante, proposto da Zwicky quasi trent'anni prima, viene così risollevato da un esperimento completamente diverso. Da lì a poco si affermerà la teoria, che ci sia una forma di materia sconosciuta, invisibile, che provoca queste discrepanze. L'ipotesi della materia oscura è accolta dagli scienziati e diventa presto uno dei più grandi misteri dell'astronomia contemporanea.

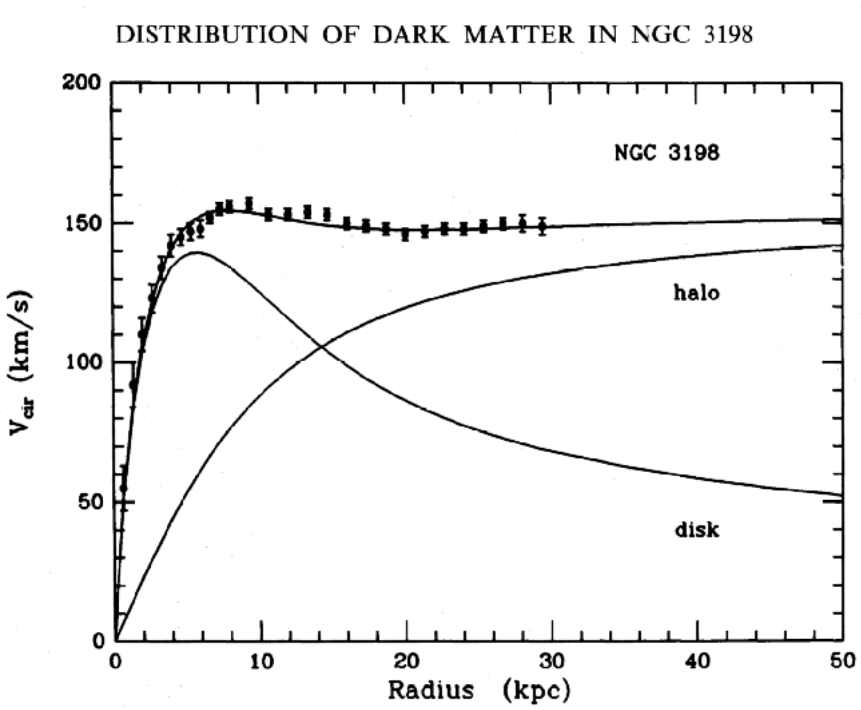

Figura 12: Curva di rotazione di una galassia a spirale. La curva dell'alone corregge la discrepanza tra dati aspettati e osservati. Immagine di (van Albada et al., 1985)

3.3 Lenti gravitazionali

La materia oscura spiega anche l'effetto quantitativo di lente gravitazionale, un fenomeno previsto dalla teoria della relatività generale. Se tra una sorgente di luce, per esempio una galassia lontana, e l'osservatore si trova un denso ammasso di materia, lo spaziotempo attorno a questo ammasso è curvato. Poiché la luce segue la curvatura dello spazio, è deviata verso l'osservatore.

La luce di una galassia lontana sottoposta a questo effetto apparirà all'osservatore come un cerchio perfetto a condizione che la sorgente, l'ammasso e l'osservatore siano perfettamente allineati (Figura 12). In generale questo non è il caso, allora si riconosce questo fenomeno da oggetti distorti o addirittura moltiplicati. Un altro effetto delle lenti gravitazionali è un apparente aumento della luminosità della sorgente. Infatti viene deviata verso l'osservatore anche quella luce, che normalmente non lo avrebbe colpito. La luce arriva dunque più concentrata e l'oggetto da cui parte appare più luminoso.

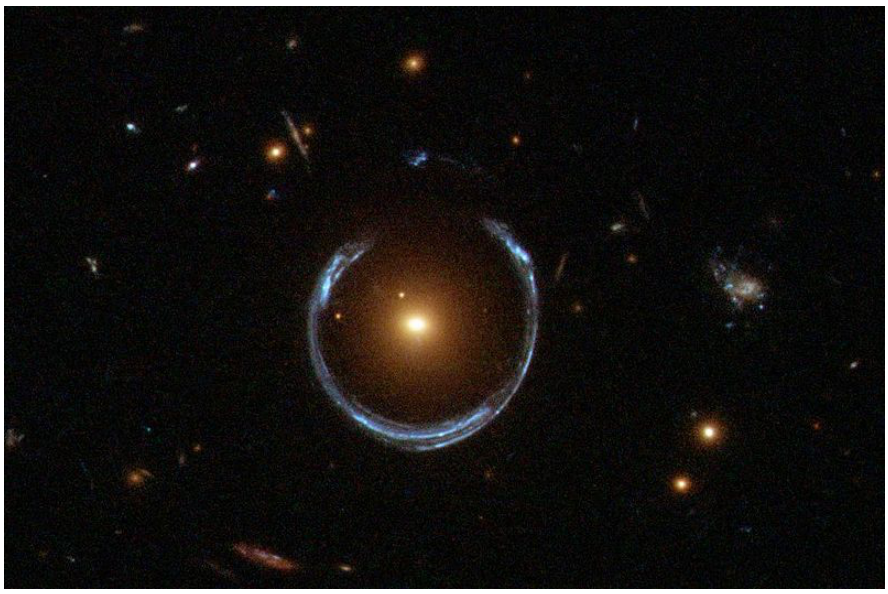

Figura 13: La massa della galassia LRG 3-757 curva lo spazio attorno ad essa e distorce l'immagine della galassia dietro. In questo caso l'allineamento è quasi perfetto dunque la galassia dietro appare chiaramente come un cerchio. Credito: ESA/Hubble & NASA Hubble Space Telescope.

Questo fatto permette una visione migliore di galassie con un redshift molto alto, la cui luce è debole. Inoltre è possibile riconoscere una lente gravitazionale attraverso un breve aumento della luminosità. Ciò è soprattutto utile quando la lente e la sorgente sono di dimensioni non troppo grandi e paragonabili, come per esempio quella di un pianeta e una stella, dove non è possibile vedere delle distorsioni. In questo caso si può osservare un breve aumento di luminosità quando la lente passa davanti alla sorgente, poiché questo accade in un periodo relativamente breve (da pochi secondi a qualche anno, rispetto a milioni di anni). In questo modo è anche possibile scoprire pianeti extrasolari, poiché la curva di luminosità dipende fortemente dalla distribuzione di materia della lente e cambierà quindi se esiste un pianeta in orbita attorno alla stella..

Questo effetto può essere provocato da un ammasso di materia di qualsiasi tipo, spesso da lente fungono ammassi di galassie ellittiche, il grado di curvatura provocato dalla lente è però strettamente collegato alla sua massa. Invece ci sono discrepanze notevoli tra la curvatura e la massa luminosa della lente calcolata. Effetti di lente gravitazionale di questo tipo perciò sono un ulteriore indizio che punta all'esistenza effettiva della materia oscura.

3.4 Ipotesi e ricerca

Dalla sua scoperta, molte teorie sulla natura della materia oscura sono state formulate. L'ipotesi al momento considerata la più promittente è quella della materia oscura fredda (cold dark matter). Il termine non indica la temperatura, bensì la velocità con la quale si muovono le particelle, cioè a velocità non relativistiche (fino al massimo a 0.1c). Sono stati considerati anche modelli secondo i quali la velocità della materia è più alta (warm e hot dark matter), ma hot dark matter non permetterebbe la formazione di strutture come le galassie, siccome particelle a velocità troppo alte tendono a non ammassarsi e in generale non permettono la formazione di ammassi di altre sostanze. Warm dark matter invece ammette la formazione di strutture e sembra essere un candidato plausibile quanto la materia oscura fredda (Smith & Markovic, 2011). Malgrado non risolva tutti i problemi, la materia oscura fredda (abbreviata d'ora in poi con CDM) è al momento la più plausibile per spiegare l'evoluzione dell'universo. Ci sono anche teorie miste, molto promettenti come quella della CHDM, materia scura calda e fredda (Primack, 1997).

Secondo il modello CDM le particelle che formano la materia oscura sono i cosiddetti WIMP (weakly interacting massive particles). Queste particelle interagiscono attraverso la forza di gravità e la forza nucleare debole. Non possono essere osservati direttamente poiché non interagiscono in maniera elettromagnetica. Un'altra ipotesi sulla natura della materia oscura prevede che è formata da oggetti composti di semplice materia barionica, come piccoli buchi neri, stelle di neutroni, nane brune o pianeti interstellari. Questi corpi, chiamati MACHOs, che sta per massive compact halo objects, emettono nessuna o poca radiazione elettromagnetica, ma sono rilevabili attraverso l'effetto di microlente gravitazionale. Osservazioni di questo tipo ebbero successo, ma la quantità di MACHOs scoperti è molto inferiore a quella che ci si aspetterebbe se la materia oscura fosse composta unicamente da essi. Secondo alcune stime meno dell'1% della massa dell'alone di una galassia a disco è composta da MACHOs (Graff & Freese, 1996) In effetti, solo qualche percento della materia oscura totale può essere spiegato con questo modello, una quantità trascurabile (Rix et al. 1993).

3.4.1 CLASH

L'effetto di lente gravitazionale è tanto più forte quanto è alta la quantità di massa della lente. Perciò grandi ammassi di galassie si prestano molto bene per osservare questo fenomeno, in quanto sono gli oggetti più massicci nell'universo che sono ancora tenuti assieme dalla loro forza di gravità e sono composti per l'85% da materia oscura. Approfittando dell'effetto di lente si possono non solo studiare galassie ad alto redshift, ma anche la distribuzione di massa all'interno della galassia che funge da lente, in quanto il grado di distorsione delle immagini di oggetti dietro agli amassi è determinato dalla massa totale della lente e dalla sua distribuzione. Un progetto che combina queste due possibilità di ricerca è il CLASH (Cluster Lensing And Supernova survey with Hubble). Il sondaggio è condotto con il telescopio spaziale di Hubble, comprende 25 ammassi di galassie

osservate in un ampio spettro che va dall'UV vicino all'IR vicino, a distanze che vanno da $0.18 < z < 0.9$ (Postman et al., 2011).

Il progetto mira a ottenere mappe dettagliate della distribuzione di materia oscura negli ammassi tramite l'uso dell'effetto di lente gravitazionale. Simulazioni N-body, infatti, producono ammassi apparentemente diversi da quelli osservati, a parità di massa totale hanno un centro meno denso di quest'ultimi. CLASH intende verificare se le previsioni delle simulazioni trovano una conferma in osservazioni a larga scala.

Un fattore che potrebbe avere causato questi centri densi è l'energia oscura vecchia. La quantità totale di energia nell'universo è formata per circa il 72% da energia oscura (il resto è fatto di materia oscura e luminosa), essa è responsabile dell'accelerazione dell'espansione dello spazio, ragione principale per la quale è stata evocata. Poiché la densità dell'energia oscura rimane costante nel tempo essa non è diluita dall'espansione dell'universo come è il caso per la materia normale. In passato l'energia gravitazionale della materia oscura prevaleva notevolmente su quella repulsiva dell'energia oscura, ma con l'aumento dell'espansione dello spazio la forza attraente della materia diventa sempre più trascurabile rispetto all'energia oscura che tende ad assumere un ruolo sempre più di rilievo. Se l'energia oscura in qualche modo però ha già in passato avuto un impatto a larga scala, anche poco importante, questo potrebbe aver causato la formazione di centri degli ammassi più densi. Infatti, l'energia oscura avrebbe ostacolato la formazione di galassie e di ammassi in quanto tende a contrastare la forza attrattiva della gravità e a separare gli oggetti. Per fare in modo che gli ammassi siano tanti quanti oggi osserviamo, devono essersi dunque formati prima di quanto si pensava fino ad ora (Postman et al., 2011).

In simulazioni cosmologiche si osserva che la densità del centro di aloni di materia oscura di un ammasso di galassie è direttamente proporzionale alla densità di sfondo dell'universo nel periodo della sua formazione. Poiché la densità dell'universo diminuisce continuamente dal Big Bang ammassi con centri più densi devono essersi formati prima. A rafforzare questa ipotesi sono le osservazioni di ammassi inaspettatamente massicci a $z > 1$ e di ammassi a z intermedi che hanno centri più densi di quanto previsto dalle simulazioni N-body di universi ΛCDM. Il compito di CLASH ora è quello di raccogliere dati di un campione imparziale, infatti gli ammassi studiati meglio fino adesso sono anche le lenti gravitazionali più forti, quindi hanno sistematicamente una concentrazione più alta che può portare a degli errori fino oltre il 50%, che non spiegherebbero comunque la discrepanza tra concentrazioni osservate e simulate. Recentemente però è stata condotta una simulazione al computer (Prada et al., 2011) che ha prodotto concentrazioni all'interno di ammassi più alti del 50% del solito, rivedendo dunque la concentrazione osservata con un campione imparziale si spera che sarà possibile conciliare i dati.

Inoltre il sondaggio osserva anche supernove di tipo Ia, delle candele standard che emettono luce a luminosità pressoché sempre uguale per tutte le supernove di questo tipo, oltre ad essere di per sé molto luminose e quindi distinguibili anche in galassie molto lontane. Conoscendo la luminosità reale di queste supernove e osservando quella apparente si può facilmente dedurre la distanza,

poiché la luminosità apparente decresce con il quadrato della distanza. Paragonando la distanza delle supernove e, conseguentemente, dalle galassie che le ospitano, alla velocità di recessione di questi oggetti, si può misurare il tasso di espansione dell'universo in funzione del tempo per quel determinato periodo. Da considerazioni di questo genere è stata scaturita l'ipotesi dell'esistenza dell'energia oscura, in quanto il tasso di espansione dello spazio aumenta con la diminuzione della distanza. CLASH intende continuare le osservazioni in questo campo per raccogliere ulteriori informazioni sulla variazione del fattore scala R(t) che descrive il comportamento dell'espansione nello spazio in funzione del tempo. Poter datare l'immagine di una galassia lontana attraverso il calcolo della sua distanza è ance molto importante per lo studio dell'evoluzione delle galassie. Infatti attraverso l'effetto amplificante della lente è possibile osservare galassie molto giovani, le prime ad essersi formate nell'universo e forse le più distanti mai viste.

3.4.2 Profili di densità di galassie nane

Simulazioni di formazione di galassie fatte da (Walker & Peñarrubia, 2011) attraverso l'attrazione di materiale da parte della materia oscura indicano la presenza di un problema simile ma opposto a quello della concentrazioni di massa negli ammassi di galassie studiato da CLASH. In questo caso le osservazioni costatano che la distribuzioni di materia oscura all'interno di galassie nane, invece di concentrarsi al centro, è distribuita omogeneamente al loro interno. Queste osservazioni mettono in questioni la validità del modello standard cosmologico, infatti contraddicono la previsione basilare sulla struttura della materia oscura nelle galassie nane, cioè che la densità di materia oscura decresce drasticamente a breve distanza dal centro. In questo caso la materia oscura fredda prevista dal modello cosmologico ΛCDM, quello più comunemente accettato, sembra non essere compatibile con i dati osservativi. In questo caso le teorie bisogneranno essere modificate.

Una possibilità sta nell'ammettere che la materia oscura interagisca di più con quella comune di quanto finora si fosse creduto di modo che la materia barionica la possa diluire maggiormente evitando che si formi un ammasso centrale. Teorie e osservazioni sarebbero conciliate pure se la materia oscura non fosse così fredda, cioè se non si trattasse veramente di cold dark matter. Particelle che si muovono a velocità maggiori resistono la forza di gravità, che tende ad ammassarli al centro, più facilmente. Le osservazioni saranno continuate e portate a scala più ampia per verificare quale soluzione è più adatta a risolvere l'incompatibilità tra osservazioni e teoria. Se la seconda possibilità si rivelerà quella giusta, bisognerà vedere se il movimento più rapido della materia oscura non ostacoli la formazione delle galassie in primo luogo in modo da impedire del tutto la loro formazione.

Per identificare la distribuzione di materia oscura all'interno delle galassie, Walker & Peñarrubia hanno misurato il potenziale gravitazionale in due pun-

ti discreti delle galassie in questione. Moltiplicando il halflight radius[2] con il quadrato della dispersione di velocità di una popolazione di stelle si ottiene una stima della massa racchiusa nella sfera con raggio uguale al halflight radius. Certe nane sferoidali contengono almeno due popolazioni chimico-dinamiche stellari distinte (Battaglia et al., 2006). L'esperimento definisce un modello matematico che usa misure di velocità e indici spettrali per distinguere due popolazioni stellari e stimare il loro halflight radius e dispersione di velocità. Per una nana sferoidale con due popolazioni stellari si ottengono stime per la massa in due punti discreti. Due punti in un piano definiscono una retta, usando una scala logaritmica perciò è possibile ottenere una curva semplificata per stimare la densità della galassia rispetto alla distanza dal centro.

Aloni di materia oscura prodotti in simulazioni cosmologiche N-body senza collisioni hanno un profilo di massa-densità che diverge nel centro, quando r tende a zero. Allora vale

$$\rho(r) \propto r^{-\gamma}$$

dove $\rho(r)$ indica la densità in funzione del raggio e $\gamma \geq 1$. Le osservazioni che vogliono provare questo scenario tendono ad essere inconcludenti. Le misurazioni, infatti, sono complicate dal fatto che ogni incertezza nel profilo di massa dei barioni si propaga automaticamente a quello di materia oscura. Esiste la possibilità che poco compresi processi dinamici che involvono barioni possono cambiare la struttura dell'alone di materia oscura. Per questo motivo è importante scegliere galassie in cui questi problemi sono ridotti ad un minimo, per esempio galassie con bassissima percentuale di massa barionica. Per questo motivo Walker & Peñarrubia hanno scelto di osservare galassie nane con una percentuale altissima, del 99%, di materia oscura rispetto alla massa barionica.

4 L'espansione dello spazio

Per studiare l'evoluzione delle galassie bisogna naturalmente tenere conto delle particolarità presenti e passate delle galassie. Poiché oggetti astronomici tendenzialmente hanno un periodo di vita nemmeno lontanamente paragonabile a quello di un uomo, è difficile osservare cambiamenti evolutivi direttamente. In questo caso è di aiuto la grande distanza, che separa corpi enormi come le galassie. Infatti, la velocità della luce, pur essendo la cosa più rapida esistente nell'universo secondo la teoria della relatività speciale di Einstein, è pur sempre limitata. La luce impiega circa 25.000 anni per percorrere la distanza dalla nostra galassia più vicina, la galassia nana ellittica del Cane Maggiore, alla terra, e l'oggetto più lontano dista ben 13 miliardi di anni luce. Da notare bene è, che la luce che giunge a noi oggi è partita dalla sorgente miliardi di anni fa, dunque da un'immagine di come l'oggetto era allora, ciò rende le ipotesi sull'evoluzione delle galassie in molti casi direttamente osservabili. Letteralmente si può dire che gli astronomi, quando osservano oggetti così lontani, guardano direttamente nel passato dell'universo.

[2] Il halflight radius è il raggio di una sfera ipotetica con centro nel nucleo di una galassia all'interno della quale si trova metà della luce totale della galassia.

4.1 Il redshift cosmologico

Spesso, in astronomia le distanze si esprimono in redshift piuttosto che in anni-luce. Il termine redshift significa propriamente spostamento verso il rosso e indica un allungamento proporzionale della lunghezza d'onda apparente della luce. Al contrario il blueshift indica uno spostamento verso il lato blu dello spettro. Questo fenomeno spesso è collegato all'effetto Doppler. Di un effetto Doppler si parla, quando il cambiamento della lunghezza d'onda apparente di un qualsiasi tipo di onda è dovuto allo spostamento della sua sorgente, dell'osservatore o di entrambi. Il redshift può dunque essere un caso particolare di effetto Doppler, cioè quando le onde in questione sono di tipo elettromagnetico e la sorgente che emette la luce si allontana dall'osservatore. In questo senso il redshift da un indizio sulla velocità di recessione di una sorgente, non però sulla distanza da essa, che non è in nessun modo ricavabile da quell'informazione. L'effetto Doppler relativistico considera in più gli effetti descritti dalla teoria della relatività speciale, che si manifestano in modo importante solo quando uno dei soggetti si muove a velocità relativistiche. In questo caso il redshift prodotto è espresso dall'equazione:

$$z = \frac{\lambda_{oss} - \lambda_{emit}}{\lambda_{emit}} = \sqrt{\frac{1 + \frac{v}{c}}{1 - \frac{v}{c}}} - 1 \tag{13}$$

dove λ indica la lunghezza d'onda e v la velocità relativa tra osservatore e sorgente. Quando ci troviamo in situazioni non-relativistiche, ovvero quando $v \ll c$, notiamo che il redshift può essere approssimato da

$$z \approx \frac{v}{c} \tag{14}$$

il che corrisponde alla formula dell'effetto Doppler classico.

La ragione per cui in astronomia esiste comunque una relazione stretta tra redshift e distanza, è, che in questo caso non si tratta di un effetto Doppler, poiché l'aumento della lunghezza d'onda è dovuto non a un movimento di sorgente o ricevitore, ma all'espansione dello spazio. In questo caso la dilatazione dello spazio allunga proporzionalmente al tempo di viaggio anche la lunghezza delle onde elettromagnetiche che lo attraversano. Più lontana è la sorgente, più tempo impiega a raggiungere il ricevitore e più alto è il redshift osservato. Si parla allora di un redshift cosmologico, poiché appare soltanto in questo ambito, che è definito dalla differenza tra lunghezza d'onda osservata e emessa diviso la lunghezza d'onda emessa:

$$z = \frac{\lambda_{obsv} - \lambda_{emit}}{\lambda_{emit}} \tag{15}$$

Notiamo che questa formula è uguale a quella per l'effetto Doppler relativistico. In effetti è essenzialmente l'interpretazione del fenomeno che cambia.

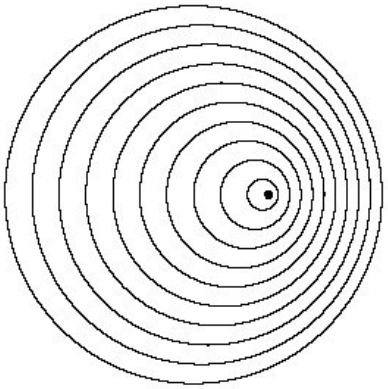

Figura 14: .L'effetto Doppler è causato da una sorgente o un reicevitore in movimento e accorcia o aumenta rispettivamente la lunghezza d'onda ricevuta, In questo caso la sorgente si muove verso destra, infatti i picchi delle onde appaiono più concentrati a destra e separati a sinistra.

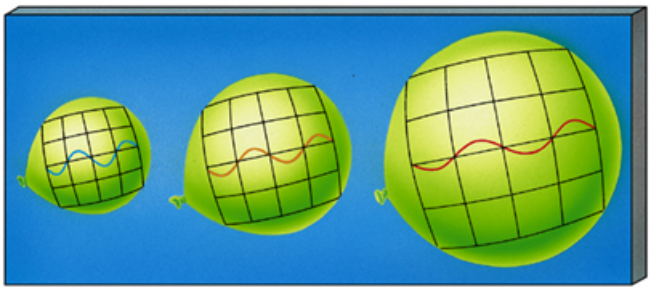

Figura 15: Il redshift cosmologico è causato dallo spazio che si espande e "stira" l'onda. Esso dipende direttamente dalla distanza tra sorgente e ricevitore, l'effetto Doppler no.

4.2 La legge di Hubble

La fisica newtoniana prevede che l'universo sia statico e infinito. Se fosse altrimenti, la forza di gravità tra le singole stelle causerebbe prima o poi il collasso dell'intero sistema fino al punto ad avere tutta la materia dell'universo concentrata in un solo luogo. Per Newton ipotizzare un universo infinito era dunque l'unica spiegazione a stare in piedi. O così sembrava. Nel 1826 l'astronomo tedesco Heinrich Wilhelm Olbers fece notare che questo modello poneva un problema non trascurabile. Infatti se l'universo fosse veramente infinito e la distribuzione di stelle in esso omogenea, allora si dovrebbe poter vedere una stella in ogni punto del cielo. Allora è lecito chiedersi perché il cielo di notte è scuro e non

invece chiaro come se ci fosse il Sole. Contemporaneamente e indipendentemente da Olbers l'astronomo svizzero Jean-Philippe Loys de Chéseaux si è posto lo stesso problema e, cercando una soluzione matematica, ha dimostrato che estendendo l'universo uniforme a un raggio di $3 \cdot 10^{15}$ anni luce l'intero cielo dovrebbe essere ricoperto di stelle e in ogni parte così luminoso come il sole. Questo problema noto come il paradosso di Olbers fu risolto solo un secolo più tardi con la scoperta che l'universo, di fatto, non è infinito.

Nel 1929 Edwin Hubble, misurando gli spettri di alcune galassie, trovò una proporzionalità tra la distanza delle galassie e i rispettivi redshift. Formulò allora quella che oggi è chiamata la legge di Hubble:

$$v = H_0 D \tag{16}$$

Dove v è la velocità di recessione della galassia, D la sua distanza e H_0 la cosiddetta costante di Hubble. Letta così la legge sembra indicare la presenza di un effetto Doppler, causato dalla velocità di recessione. Che questo è fondamentalmente sbagliato si capisce anche, dal redshift di galassie molto lontane, che possono facilmente avere una 'velocità di recessione' maggiore a quella della luce (Kaufmann & Freedman, *Universe*). Ciò che causa le galassie lontane ad avere uno spettro spostato verso il rosso, è l'espansione dello spazio. Quando un'onda elettromagnetica parte da una galassia lontana e viaggia attraverso lo spazio, subisce lo stesso 'allungamento' dell'universo, quando giunge a noi, la sua lunghezza d'onda è dunque aumentata. L'aumento, poiché lineare, ovviamente è proporzionale al tempo di viaggio del fotone e conseguentemente (la velocità della luce nel vuoto è costante), alla distanza. In questo caso si parla di un redshift cosmologico. All'interno di sistemi tenuti assieme dalla loro stessa attrazione gravitazionale, che possono essere da atomi fino a galassie e ammassi di galassie la forza attrattiva della gravità prevale sull'espansione. Questo comunque non vuol dire che le galassie sono assolutamente ferme nello spazio, altrimenti collisioni sarebbero impensabili. In realtà le velocità relative delle galassie visibili come effetto Doppler esistono sì, ma si aggiungono al flusso di Hubble e hanno un peso sempre più trascurabile con l'aumentare della distanza in quanto sempre più piccole rispetto alla velocità apparente del redshift cosmologico. Le collisioni dunque avvengono grazie a velocità locali tra le galassie.

Poiché la velocità della luce è limitata, lo è anche la nostra visione dell'universo. Non solo ci sono molte galassie, la cui luce non ha ancora avuto il tempo di giungere a noi, ma una parte sempre più grande dell'universo non sarà mai visibile, e in più galassie lontane in futuro potrebbero sparire completamente. Infatti, se la distanza è troppo grande, l'espansione dello spazio rischia di raggiungere una velocità non più superabile dalla luce.

La costante di Hubble (H_0) misurata con il Hubble Space Telescope (Riess et al., 2011) vale circa 73.8±2.4 km/s/Mpc, ciò significa, che se una galassia A ha un valore di v superiore a quello di una galassia B di 73.8±2.4 km, allora la galassia A si trova più lontana rispetto all'osservatore della galassia B di una distanza di 1 Mpc. In altre parole si può dire, che ogni Mpc si allunga

ogni secondo di 73.8±2.4 km. Tenendo conto che 1 Parsec = $3.08568025 \cdot 10^{16}$ l'espansione non è per niente rapida.

Il valore inverso $1/H_0$ della costante è chiamato tempo di Hubble e indica l'età precisa dell'universo se fosse vuoto e se la sua espansione durante il passato fosse stata costante. In realtà si stima che l'universo abbia circa 13,73 miliardi di anni, mentre il tempo di Hubble vale solo 13,3 miliardi di anni. Ciò significa che l'espansione finora è accelerata (l'universo ha impiegato più tempo per raggiungere la stessa dimensione). La costante di Hubble dunque non è una vera costante, ma piuttosto un parametro, perché varia nel tempo. In tutto lo spazio però il valore a un certo tempo t è costante, infatti è possibile, essendo l'espansione dell'universo omogenea, misurare lo stesso valore per H_0 in ogni punto del cosmo.

5 Formazione delle galassie

5.1 Ai primordi dell'universo

Dopo il Big Bang, l'universo ha vissuto un periodo in cui è stato estremamente omogeneo. Nella cosiddetta epoca dei quark, un periodo tra 10^{-12} e 10^{-6} secondi dopo il Big Bang, l'universo era pieno di un plasma fatto di quark, leptoni e le loro antiparticelle. Si pensa che in questo periodo le particelle abbiano acquisito massa dall'interazione con il campo di Higgs, un fenomeno noto come meccanismo di Higgs. L'universo si è raffreddato gradualmente permettendo alle particelle elementari di formare prima adroni, poi atomi, molecole e di seguito strutture sempre più complesse. Uno dei problemi principali da risolvere è però spiegare come l'universo è passato dallo stato di omogeneità a formare delle strutture in primo luogo.

Oggi si pensa, che la formazione delle struttura sia stata resa possibile dalle cosiddette fluttuazioni primordiali. Si tratta di variazioni di densità nell'universo giovane, fluttuazioni quantiche previste dal principio di indeterminazione di Heisenberg. Esso costata che il tempo e l'energia sono due grandezze non misurabili contemporaneamente con una precisione assoluta, in particolare:

$$\Delta t \cdot \Delta E \geq \frac{h}{4\pi}$$

Se la precisione di una misura aumenta, la precisione dell'altra decresce proporzionalmente. Ora è possibile aumentare ΔE fino a raggiungere l'energia di una particella che conseguentemente può materializzarsi dal nulla per un arco di tempo Δt brevissimo prima di annichilarsi nuovamente. L'universo primordiale è pieno di coppie di particelle e antiparticelle[3] che si formano in questo modo e alterano momentaneamente la densità del loro intorno. Di solito questi

[3] Particelle e antiparticelle vengono prodotte simmetricamente e dunque dovrebbero essere presenti in numero perfettamente equilibrato. Per spiegare la netta predominanza della materia sull'antimateria è stata formulata la teoria della bariogenesi.

fenomeni sono poco importanti ma durante l'era dell'inflazione cosmica[4] furono amplificate a scala macroscopica dalla rapida crescita del fattore di scala. La crescita dello spazio fu così drammatica che le singole particelle si trovarono al di fuori dell'orizzonte cosmico, ovvero non riuscirono più a mettersi in equilibrio tra di loro poiché l'espansione dello spazio fu più rapida della velocità della luce. Nel vuoto intanto il principio di indeterminazione di Heisenberg continuò ad operare e creò altri punti più o meno densi sempre meno importanti. Alla fine dell'era inflazionistica, quando l'orizzonte, che si espande alla velocità della luce, torna ad inglobare le singole particelle esse interagiscono nuovamente tra di loro e si instaura un equilibrio che però non è più quello di un universo omogeneo. L'universo, espandendosi, si è raffreddato, materia oscura condensa nelle zone di densità più elevata e forma degli ammassi. Ciò innesca un processo a catena, le zone a densità maggiore attirano particelle in modo gravitazionale e diventano ancora più dense.

In quest'epoca la massa dell'universo è composta principalmente da materia oscura, idrogeno ed elio, ma le particelle coinvolte in questo processo sono per la grande maggioranza non-barioniche. Infatti la pressione delle radiazioni degli stessi barioni ostacolano il processo di ammassarsi. Materia oscura invece non è soggetta alle radiazioni e molto più libera di formare degli ammassi. Così nascono le protogalassie.

5.2 Bottom-up o top-down?

Ci sono attualmente due teorie antitetiche che cercano di spiegare come avviene la formazione di strutture nell'universo primordiale. Una possibilità è che le galassie si sono formate gerarchicamente dall'alto verso il basso, cioè top-down. Secondo questo modello si sono formate prima delle strutture enormi, nubi di gas idrogeno gigantesche, dalla massa di molte galassie, che, al punto che la loro stessa forza di gravità vince la pressione interna del gas e collassano e si separano, formando delle galassie. Se un frammento di questa nube gigante primordiale ha un alto momento angolare, il gas in quella regione tenderà dissipare la sua energia e a concentrarsi in un disco, la galassia risultante sarà a disco. Se invece il momento angolare della nube iniziale è basso, essa collasserà formando stelle ad un tasso molto maggiore di galassie a spirali, in questo modo si formano galassie ellittiche. Questo modello richiede l'esistenza di warm dark matter per funzionare, infatti deve essere possibile per la materia formare strutture larghe e non piccoli grumi separati come li crea la materia oscura fredda. CDM perciò favorisce piuttosto una formazione di galassie bottom-up.

Il processo bottom-up è esattamente l'opposto. Prima si formano piccoli ammassi di materia, grumi di materia oscura, stelle iniziano a formarsi molto presto e poi tendono ad aggregarsi in strutture più grandi. Queste strutture

[4] L'inflazione è un periodo brevissimo nei primordi dell'universo, più precisamente da 10^{-36} a 10^{-33} o 10^{-32} secondi dopo il Big Bang durante il quale lo spazio si è espanso di un fattore di circa 10^{50} in volume. Questa teoria è stata invocata per risolvere alcuni problemi cosmologici, tra cui il problema dell'orizzonte e della piattezza dell'universo e si presta molto bene anche a spiegare come mai l'universo non è più omogeneo.

piccole e numerosissime si fondono presto attraverso violenti merger formando a mano a mano le grandi galassie di oggi. Gli ammassi, infatti, essendo più compatti dell'area circostante, tendono ad attrarre in maniera gravitazionale altre particelle innescando un processo a catena. Mentre crescono per accrescimento di materiale dall'esterno, gas idrogeno e elio condensano al loro interno. Nubi di idrogeno diventano sempre più massicce fino collassare scaldandosi tanto da innescare il processo di fusione nucleare formando le prime stelle. Il modello bottom-up prevede che ci sia una quantità di galassie piccole molto maggiore a quelle di grandi dimensione nel passato e implica che la formazione di grandi ammassi continui fino al giorno d'oggi. Questi due fenomeni sono stati osservati, inoltre si sono scoperte delle piccole galassie ad alto redshift che puntano ulteriormente ad una formazione di strutture bottom-up. Infatti, questo modello è attualmente quello largamente accettato.

Quando le nubi primordiali formano le prime galassie a disco la materia barionica si separa da quella oscura che non è in grado di dissipare energia e formare un disco e quindi continuerà ad orbitare il centro gravitazionale negli aloni che ancora oggi sono presenti.

Recentemente da Guo et al. (2011) è stato scoperto che, contrariamente a quanto prevede il modello bottom-up, le galassie dell'universo lontano **non** crescono principalmente fondendosi. In uno studio di più di 70 galassie lontane (da 1 a 2 miliardi di anni dopo il Big Bang) con il Spitzer Space Telescope, il 70% delle galassie osservate emettono alti livelli di H_α, cioè radiazione di idrogeno che è stato colpito da luce ultravioletta emessa da stelle giovani. Radiazioni H_α così marcate sono segno di un alto tasso di formazione stellare. Infatti è stato scoperto che queste galassie formano stelle circa 100 volte più velocemente della Via Lattea oggi. Inoltre i risultati mostrano che la formazione stellare è durata per un lungo periodo, centinaia di milioni di anni. Questo arco di tempo è troppo grande per spiegare il tasso di formazione stellare attraverso merger, che durano solo poco tempo rispetto alla durata di vita di una galassia. Il gruppo che investiga la questione ha proposto che le prime galassie crescono alla grandezza di oggi assimilando costantemente del gas dal medio intergalattico, mentre il cannibalismo galattico in questo contesto è piuttosto raro. Questa ipotesi però non favorisce nemmeno il modello top-down, poiché richiede una durata di formazione completa molto maggiore di quella di un semplice collasso.

5.3 Le prime stelle

Le prime stelle formatesi nell'universo sono di popolazione III, stelle ipotetiche, finora mai osservate, evocate per spiegare come mai persino oggetti più vecchi e più distanti come i quasar lontani presentano dei metalli. All'inizio della loro vita stelle di popolazione III erano completamente prive di metalli con masse di centinaia di volte quella del Sole. Si pensa che queste stelle verso la fine della loro vita abbiano creato i primi 26 elementi della tavola periodica attraverso la nucleosintesi stellare. Essendo così massicce avrebbero presto consumato tutto il loro carburante, ciò giustificherebbe che ora non se ne vede più traccia. Infatti, stelle così massicce hanno un periodo nella sequenza principale molto breve.

O sarebbero esplose in supernove, disperdendo i metalli che hanno formato finora nel cosmo e ionizzando il gas che le circonda, oppure, se troppo massicce, collassate fino a formare buchi neri nel processo di fotodisintegrazione (Fryer et al., 2001). Durante questo processo getti relativistici di metalli avrebbero potuto fuggire dalla forza di gravità del buco nero. In questo modo i primi metalli si diffondono nell'universo, il materiale necessario per la formazione di nuove stelle. D'ora in avanti le galassie crescono rapidamente, fondendosi con altre galassie o assorbendo compagne più piccole.

5.4 Ellittiche giovani

L'energia oscura, responsabile della forza che espande lo spazio, tende a prendere sempre di più il sopravvento sulla forza di gravità. Mentre sistemi tenuti assieme dalla propria forza di gravità resistono tra di loro a questa tendenza, le distanze tra galassie e sistemi indipendenti cresce in continuazione. In un lontano futuro il fattore scala sarà così grande da isolare completamente ogni sistema da tutti gli altri. In un universo simile non ci saranno ovviamente più alcuni merger, se non all'interno di ammassi, un numero comunque limitato. È lecito aspettarsi quindi che il numero di merger decresca gradualmente con il passare del tempo e che sia stato così sin dalla formazione delle prime galassie.

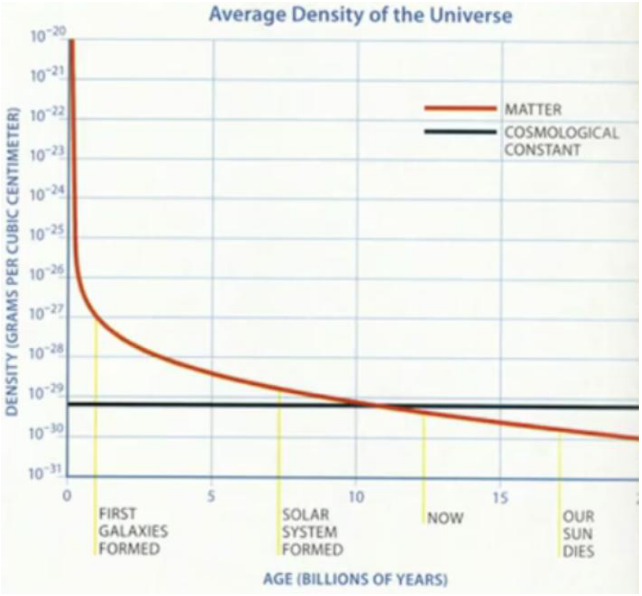

Figura 16: La densità media dell'universo espressa in funzione del tempo. Notiamo che la densità dell'energia oscura, essendo proporzionale allo spazio, non cambia, mentre la densità della materia diminuisce. Immagine da una presentazione di Lawrence Krauss, 2009.

Teorie hanno stimato il tasso di merger, ora per, un'osservazione che fa parte del progetto ATLAS^{3D} rischia di smentire le aspettative. Giganti ellittiche sono tra i sistemi più vecchi nell'universo secondo misure che considerano la loro popolazione stellare. Ciò si spiega del fatto che le galassie, per diventare così enormi, devono avere già divorato da molto tempo il materiale nel loro intorno, trovandosi ora in zone relativamente vuote dove merger non avvengono più. Invece ora sono stati trovati due esempi di giganti ellittiche, NGC 680 e NGC 5557 che mostrano chiari segni di merger recenti, per esempio code mareali che non sopravvivono per più di qualche miliardo di anni. Non è ancora sicuro se queste galassie sono rappresentative dei loro gruppi o se si tratta di casi singolari, ma una conferma dei risultati a larga scala potrebbe smentire la teoria di una formazione di galassie ellittiche top-down attraverso il collasso monolitico di una nube di gas.

6 Interazioni tra galassie

Galassie interagenti sono due o più galassie si influenzano vicendevolmente in maniera gravitazionale. Ciò porta a distorsioni parziali o complete delle galassie, a dipendenza del tipo di interazione in cui si trovano. In alcuni casi possono addirittura trapassarsi.

Figura 17: Nota anche come whirlpool galaxy, M51 (a sinistra), che attualmente sta divorando la galassia nana NGC 5195 (a destra) è uno degli esempi più noti di cannibalismo galattico. Credito: NASA, Hubble Heritage Team, (STScI/AURA), ESA, S. Beckwith (STScI), immagine fatta con il Hubble Space Telescope.

Se la loro quantità di moto non è abbastanza alta da permetterle di fuggire l'una dall'altra, l'interazione avrà esito nella completa fusione delle due galassie, in questo caso si parla di un **galaxy merger**. Il termine cannibalismo galattico si usa, quando una delle due galassie in considerazione è nettamente più grande dell'altra e assorbe la sua compagna senza subire a sua volta grosse distorsioni. Un esempio di questo fenomeno è dato dalla Via Lattea, che attualmente sta 'divorando' la galassia nana ellittica del Sagittario. Alcune simulazioni mostrano che interazioni gravitazionale possono generare dei bracci a spirale nelle galassie, come è il caso per M51 (Oh et al., 2008).

I merger avvengono frequentemente in zone più dense dell'universo, per esempio in ammassi, e giocano un ruolo molto importante nella storia dell'evoluzione delle galassie. Si pensa, infatti, che galassie attuali siano il risultato dei frequenti merger tra le galassie nane formatesi circa un miliardo di anni dopo il Big Bang.

6.1 Segni di merger

Merger di regola durano da qualche milione fino a circa due miliardi di anni. Durante questo periodo le galassie si scontreranno più volte, a volte anche trapassandosi, anche se, a causa del vasto spazio tra le stelle, è improbabile che avvengano vere e proprie collisioni di stelle. Si scontrano però le nubi di gas, soprattutto nei cosiddetti **tidal signatures**, indici di merger avvenenti o passati che si formano a causa delle forze di marea.

Figura 18: Le galassie dei topi NGC 4676B (a sinistra) e NGC4676A stanno chiaramente interagendo. Da notare le lunge scie di stelle blu a destra e a sinistra dei nuclei, le code, e il ponte che li unisce. Le stelle calde blu si formano quando il gas dei ponti e delle code mareali viene compresso, sono indice di un alto tasso di formazione stellare. Credito: ACS Science & Engineering Team, Hubble Space Telescope, NASA.

Questi tidal signatures sono zone ad alto tasso di formazione stellare, perciò di regola appaiono blu, formano stelle molto calde e massicce, destinate a vivere per poco tempo. Mentre le galassie si avvicinano, le forze di marea che agiscono su di esse comprimono il gas in due strisce lungo la retta che unisce i centri delle due galassie. HI (idrogeno atomico neutrale), carburante per la formazione stellare, risiede prevalentemente nelle parti esterne del disco dove è più facilmente soggetto alle forze di marea. Le forze di marea agiscono sul gas e sulla polvere per formare una lunga striscia che unisce direttamente i due centri, chiamata ponte, e due code in direzioni opposte di materiale che viene lasciato indietro durante gli incontri ravvicinati. In forti interazioni gravitazionali circa il 10-30% della massa visibile delle galassie è espulso in questi tidal signatures. La pressione creata in questi posti destabilizza le nubi di gas che conseguentemente perdono l'equilibrio idrostatico. Il gas allora collassa sotto la sua forza di gravità e la pressione esterna e si formano stelle. Questo processo, dove un numero elevato di galassie si forma in un arco di tempo molto piccolo, è chiamato *starburst*. Le nuove stelle producono delle radiazioni così forti da o comprimere altre nubi di gas non ancora collassate o da spazzare il gas residuo dal sistema, così impedendo la formazione di altre stelle in futuro. La galassia formatasi dal merger allora avrà un'alta percentuale di stelle della stessa età con un tasso di formazione stellare quasi nullo a causa della mancanza di carburante.

I tidal signatures sono ancora visibili molto tempo dopo la fine del merger, ma prima o poi, nel giro di qualche miliardo di anni, spariscono anch'essi. La loro esistenza perciò è un segno di un merger relativamente recente. Ma se il modello di formazione delle galassie prevede, che esse crescono principalmente fondendosi o assorbendo compagne piccole potremmo aspettarci di vedere questi segni di merger in molte galassie, più di quante non vediamo attualmente in interazione. In effetti, è stato scoperto (Martinez-Delgado et al., 2010) che i tidal signatures, debolissimi rispetto alle zone più luminose delle galassie e quindi spesso per contrasto non visibili, sono presenti anche in galassie "modello" del volume locale, che non presentano irregolarità, tanto meno distorsioni apparenti. Invece con lunghi tempi di osservazione si possono vedere delle deboli strisce di stelle che circondano anche queste galassie e che sono segni evidenti di merger (Martinez-Delgado et al., 2010).

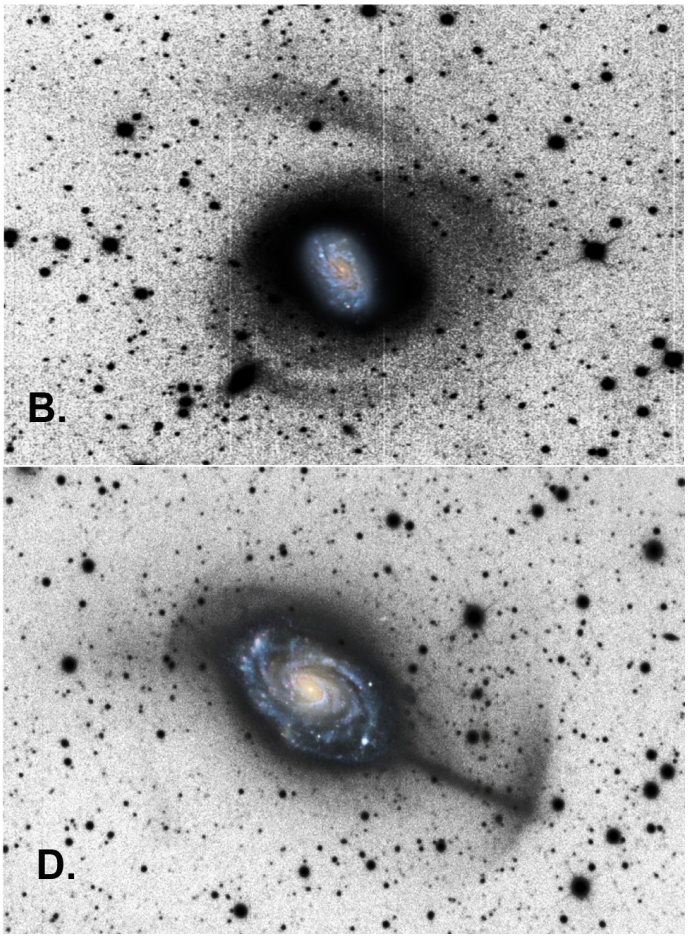

Figura 19: Le galassie a spirale NGC 1085 (in alto) e NGC 4651. Scie di stelle che si estendono sono visibili ben oltre il disco delle galassie e sono molto probabilmente indici di interazioni passate. In NGC 1085 le scie si estendono al di sopra e al di sotto della galassia in alto, in NGC 4651 si estende una struttura a forma di ombrello a destra e una analoga è forse visibile a sinistra, celata dal disco della galassia. Credito: Telescopio del BBO, (Martinez-Delgado et al., 2010).

Un merger è da considerare completo, quando i centri delle galassie in questione si sono fusi completamente, comunque il tempo impiegato dalla nuova galassia per riequilibrarsi è molto più lungo; al centro può durare cento milioni di anni, nelle zone periferiche, invece, gli effetti delle forze di marea, specialmente le code, saranno ancora visibili per qualche miliardo di anni.

Figura 20: La galassia a disco NGC 5907. Attorno al disco sono visibili delle deboli strisce di stelle, residui di una piccola compagna divorata nel passato. Immagine di R Jay GaBany, ottenuta con il telescopio BBRO 20-inch.

6.1.1 Galassie nane

Oltre a causare starburst il gas e la polvere nelle code possono anche ammassarsi in nodi fino a diventare sistemi indipendenti in modo gravitazionale, delle vere e proprie galassie nane che continuano a orbitare le galassie da cui sono originate

(Schweizer, 1998). Queste galassie hanno alcune caratteristiche peculiari. Possono avere popolazioni di stelle con età molto differenti, chiaramente anche delle stelle più vecchie del sistema stesso. Hanno un contenuto di metalli solitamente più alto di quello di stelle nelle parti esterne dei dischi di galassie a spirale. Infatti, il gas di cui sono fatte le stelle di queste galassie nane originariamente deriva dalle parti più interne e più ricche di metalli delle galassie a disco.

6.1.2 Nuclei galattici attivi

Un nucleo galattico attivo, abbreviato con AGN (active galactic nucleus), è una zona compatta al centro della galassia con una luminosità molto alta emessa lungo quasi tutto lo spettro elettromagnetico. Una galassia che ospita un AGN è detta attiva.

Gli AGN sono gli oggetti più luminosi in assoluto nell'universo e perciò sono visibili anche a redshift molto alti. La loro radiazione deriva dall'accrescimento di massa da parte di un buco nero supermassivo. Quando una nuvola di materia ruota attorno al buco nero formando un disco di accrescimento, si formano turbolenze al suo interno che permettono alle particelle che ruotano dalla parte interna di cedere il loro momento angolare alle particelle più esterne (che sono perciò spostate all'infuori) e di quindi cadere verso l'interno. Si forma in questo modo un disco di accrescimento attorno al buco nero che si scalda attraverso l'attrito e si ionizza, generando un forte campo magnetico che produce radiazioni elettromagnetiche, emesse sotto forma di raggi X. Inoltre certi dischi di accrescimento producono dei getti di radiazioni perpendicolari al piano del disco. Una volta che il buco nero supermassiccio ha assorbito tutto la massa del disco, ritorna in stato di quiete.

Studi sulla loro popolazione hanno rivelato che erano molto più frequenti nell'universo giovane, come anche le collisioni di galassie, quando c'era più abbondanza di gas e di polvere interstellare. Si pensa, infatti, che si possano attivare proprio durante un merger quando le galassie e i loro materiali si scontrano, oppure quando il gas catapultato dalle forze di marea nelle code ricade per forza di gravità al centro. In questo senso AGN hanno un effetto simile del fenomeno di starburst, in quanto svuotano le galassie del materiale necessario per formare altre stelle.

6.1.3 Galassie ad anello

Un altro segno evidente di un merger passato, seppure molto raro, sono le galassie ad anello. Si tratta di peculiari anelli di gas e polvere con un centro essenzialmente vuoto o, in alcuni casi, contenente una sorta di nucleo decentrato.

Figura 21: La cartwheel galaxy, ESO 350-40, galassia ad anello, inizia a formare bracci a spirale (scie di stelle blu dirette verso l'interno). Immagine di NASA/ESA ripresa dall'Hubble Space Telescope.

La loro origine è facilmente intuibile ed è già state sperimentata con simulazioni N-body (Lynds & Toomre 1976). In questa simulazione una galassia a disco si scontra perpendicolarmente con una compagna abbastanza compatta, con una massa di $\frac{2}{3}$ della prima, che la trapassa nella regione centrale e poi continua sulla sua traiettoria. L'effetto prodotto da questa collisione nelle due galassie è paragonabile alla perturbazione creata da un sasso che cade nell'acqua: un'onda di densità si propaga dal centro verso l'esterno in forma di anello. In questi anelli ad alta densità il gas sotto pressione può provocare dei starburst. Per impedire che l'anello si distrugga in breve tempo è necessari che le loro velocità relative siano almeno uguali alla velocità di fuga per impedire che si fondino in un merger. Se si tratta di due galassie a spirale i cui dischi giacciono su piano paralleli, è chiaro che ognuna di loro svilupperà una struttura ad anello dopo il trapasso.

6.2 Formazione di galassie ellittiche

Quando due galassie a spirale con masse paragonabili collidono, perdono una gran parte di gas e polvere attraverso meccanismi che includono lo starburst nelle code e nel ponte che si formano durante il merger e gli effetti di nuclei galattici

attivi. La forza dell'interazione inoltre è tale da distruggere completamente i dischi, strutture molto fragili che molto facilmente si lasciano rompere dalla forza gravitazionale di una compagna. A merger completato le stelle si rimetteranno in equilibrio attorno al nuovo centro nella più semplice forma possibile, cioè a forma ellittica. Il risultato è perciò una galassia ellittica, quasi vuota di gas, e si pensa, che i merger tra galassie a spirale siano la causa principale della loro formazione. Infatti, ora le galassie ellittiche costituiscono la netta maggioranza dei grandi ammassi, di cui solo il 5% è formato da spirali, mentre già a un redshift di z=0.4 il ben 30% delle galassie negli ammassi sono a spirale dove sottostanno ad ulteriori merger per formare giganti ellittiche. Merger quindi spiegano, come mai le galassie a disco si trovano principalmente in zone poco dense, mentre sono piuttosto le galassie ellittiche a formare i grandi ammassi. Non sappiamo se tutte le galassie ellittiche si sono formate dai merger, però in zone dove i merger sono frequenti galassie a disco non resistono a lungo e scompaiono, mentre galassie ellittiche non cambiano di molto il loro aspetto se coinvolte in un merger.

A questo punto ci si aspetterebbe, che, poiché nell'evoluzione delle galassie i merger giocano un ruolo così importante, le galassie ellittiche formino ormai una gran parte del nostro universo. Oppure che, per lo meno, le ellittiche tendano ad aumentare di numero rispetto alle galassie a disco, destinate invece a sparire prima o poi completamente. Invece nell'universo attuale solo circa il 3% delle galassie sono ellittiche, contro il 72% di galassie a disco. Uno studio recente di (Delgado-Serrano et al. 2011) sulla base di dati forniti dalla Sloan Digital Sky Survey mostra che in passato, 6 miliardi di anni fa, le galassie ellittiche rappresentavano il 4% mentre quelle a disco erano molto meno, circa il 31%. Allora erano molto più comuni le ora rare galassie irregolari (52% contro il 10% di oggi), e si pensa, che, attraverso grandi merger tra irregolari ricche di gas, si siano formate galassie a spirale attraverso un processo chiamato *spiral rebuilding.*

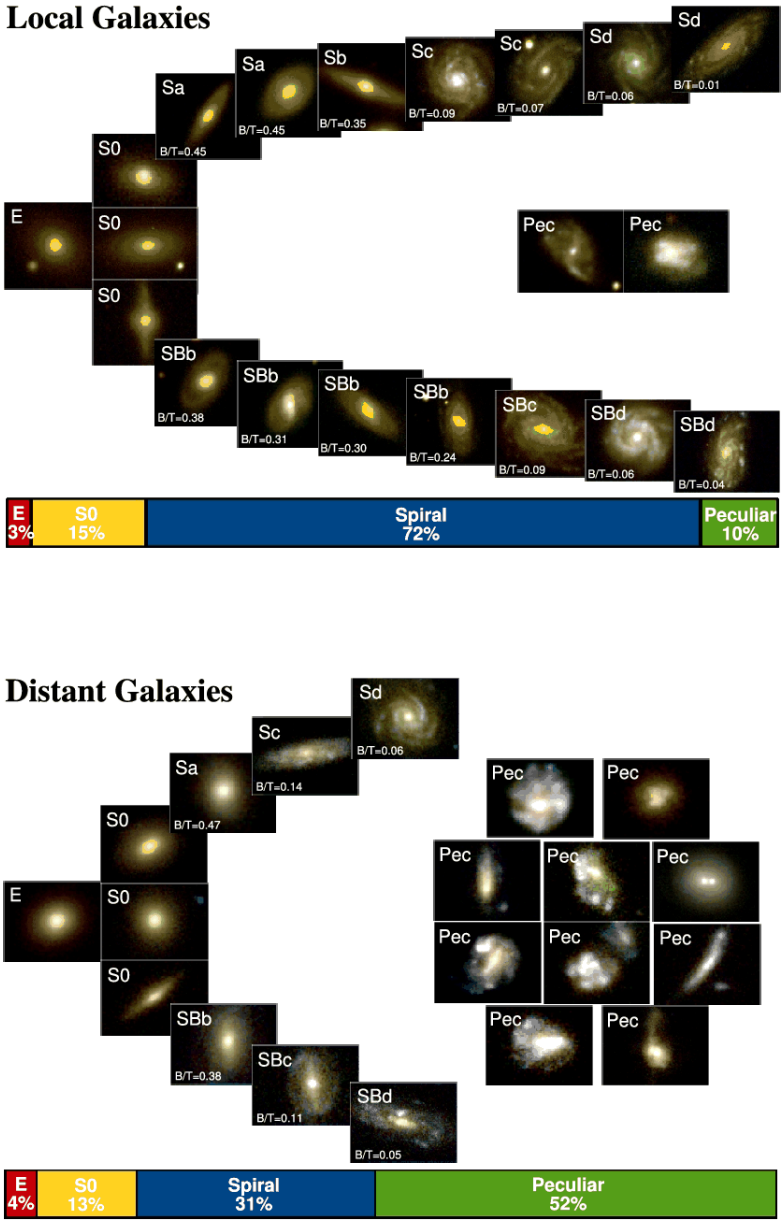

Figura 22: La sequenza di Hubble 6 miliardi di anni fa (in basso), paragonata alla sequenza per le galassie locali di oggi (in alto). Immagine di (Delgado-Serrano et al. 2011).

7 Altri scenari evolutivi

7.1 L'insufficenza dei merger nell'evoluzione galattica

È diventato chiaro negli ultimi decenni che merger da soli non spiegano la varietà di galassie presenti e passate. Se cerchiamo infatti di spiegare l'intera evoluzione delle galassie solo attraverso ci imbattiamo presto in situazioni inspiegabili, molto improbabili e non risolvibili in modo ragionevole senza ridimensionare l'importanza data al ruolo dei merger nell'evoluzione.

Uno di questi problemi è quello delle spirali perfette. Si tratta di galassie a disco senza bulge centrale, come per esempio la Via Lattea. Esse hanno sì una parte centrale più densa e luminosa, però si tratta piuttosto di un pseudobulge, una struttura che, al contrario del bulge, non si forma attraverso merger di galassie. Le spirali perfette dunque, avendo un psuedobulge e un disco molto fragile e intatto, non sono mai state soggette a grossi eventi di merger. Ciò pone un problema allo scenario bottom-up, dove i merger sono il processo di crescita principale delle galassie e assolutamente la regola nell'universo giovane. Si tratta quindi di trovare un modo in cui le spirali perfette possano crescere fino ad assumere le loro dimensioni attuali senza che un merger rischi di distruggerle per lo meno parzialmente. Il problema sarebbe essenzialmente risolto se i merger accadessero prima di quanto finora pensato. Se la struttura definitiva delle galassie si forma solo dopo che già molte stelle sono nate, queste saranno scaraventate fuori posto durante i merger che seguiranno, se invecele stelle si formano solo quando il gas si è già potuto organizzare in una struttura a disco i bulge non si formano. Ciò giustificherebbe anche la strana coincidenza che tutte queste galassie con pseudobulge si trovano prevalentemente in regioni vuote dell'universo mentre invece dovrebbero aggregarsi, come del resto le altre galassie, in filamenti attorno ai grandi vuoti. Infatti, se si sono formate già così presto, la grande regione vuota attorno a loro, il cui materiale hanno usato per la loro formazione con l'espansione dello spazio, diventa ancora più grande, così isolando le galassie e riducendo drasticamente la probabilità che esse incontrino compagne che potrebbero distruggere il loro disco.

Un'altra spiegazione non necessariamente alternativa può essere fornita dalla materia oscura. Se questa non è così fredda come lo prevede il modello ΛCDM e si muove invece leggermente più in fretta, ostacolerebbe la formazione di piccoli ammassi. Piuttosto dei grandi ammassi si formerebbero in modo naturale, senza necessitare di merger che fondono degli ammassi più piccoli. Una particella con queste caratteristiche è il neutrino sterile, candidato ben noto per la materia oscura. Materia oscura più calda spiega pure perché ancora non sono state scoperte tante galassie nane satelliti della Via Lattea quante previste dal modello tradizionale. Il fatto che esistono, seppure in numero ridotto, limita però la velocità delle particelle di materia oscura verso l'alto.

7.2 Evoluzione secolare

Un altro scenario di evoluzione di galassie senza merger è quello dell'evoluzione secolare. Questa teoria prevede che le galassie a spirale si trasformano col passare del tempo in modo naturale in galassie ellittiche, piuttosto che a causa di eventi brevi e violenti come lo sono i merger. Questa trasformazione può avvenire tramite processi interni alla galassia come espulsione di gas da parte di esplosioni di supernove, o la ridistribuzione interna di energia e momento angolare da parte di strutture asimmetriche all'asse come bracci a spirale e barre. Anche processi esterni alle galassie possono alimentare questo tipo di trasformazione, un esempio ne sono merger minori tra galassie con masse molto diverse o la resistenza fluidodinamica del gas intergalattico in grado di togliere alla galassia parte importante del suo gas.

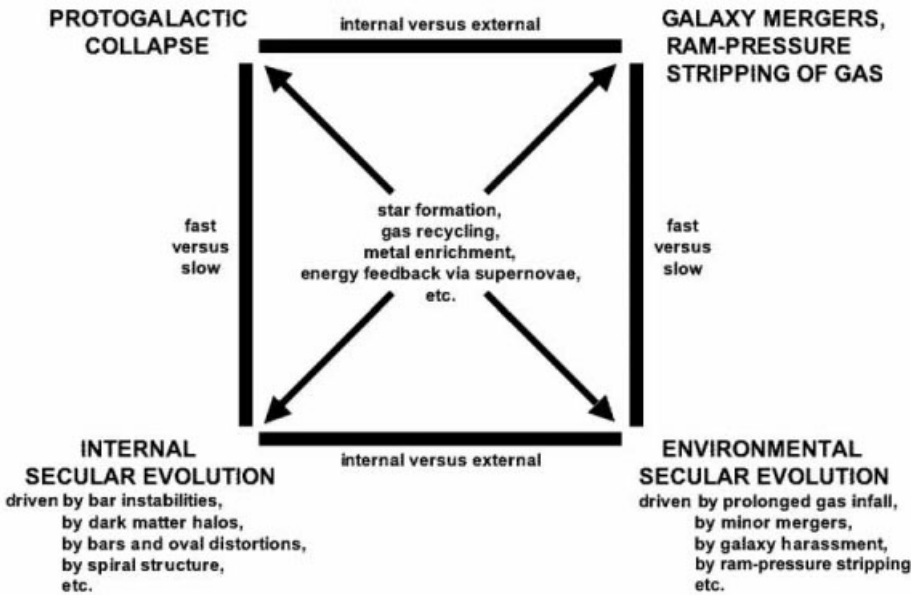

Figura 23: Immagine schematica dell'evoluzione delle galassie. Si distingue tra processi veloci (in alto) rispetto a quelli lenti e tra processi interni (a sinistra) rispetto a quelli causati dall'ambiente esterno. Credito: (Kormendy & Kennicutt 2004: KK04).

7.2.1 Galaxy harassment

Un meccanismo molto promettente per spiegare soprattutto l'evoluzione delle galassie in ammassi è il cosiddetto **galaxy harassment**, ovvero incontri ravvicinati (nell'ordine di 50 kpc di distanza) ad alta velocità di due galassie che non le permettono di fondersi. In ammassi le velocità relative delle galassie sono spesso troppo grandi per permettere veri e propri merger, mentre incontri ravvicinati avvengono piuttosto spesso considerando che la densità di galassie

in un ammasso è molto alta. Simulazioni al computer (Moore et al., 1995) hanno mostrato che l'intensità del danno causato a una galassia a disco in orbita all'interno di un ammasso dipende direttamente dalla massa delle altre galassie dell'ammasso. I primi incontri con altre galassie generano dei disturbi nelle barre del disco, strisce di materia possono essere strappate alla galassia e il gas al suo interno spesso forma delle strutture ad anello. Dopo ulteriori incontri la perdita di momento angolare e l'aumento di temperatura allungano la forma della galassia e causano la caduta del gas verso il centro. La galassia risultante assomiglia morfologicamente a una ellittica nana, a questo punto il galaxy harassment non crea più distorsioni importanti e non strappa altro gas al sistema. La galassia così creata è verosimili e paragonabile a ellittiche nane reali presenti in ammassi.

Come abbiamo visto questi processi sono in grado di formare strutture come pseudobulges all'interno di una galassia a disco. Si pensa che essi possano anche trasformare galassie nane a disco in galassie sferoidali che sono morfologicamente simili a galassie ellittiche ma che mostrano di avere seguito un processo evolutivo diverso (Kormendy & Fisher, 2008).

7.2.2 Pseudobulges

Bulge all'interno di galassie a disco sono strutture con proprietà molto simili a galassie ellittiche, in pratica si può dire che sono galassie ellittiche circondate da una struttura a disco. Esiste una stretta correlazione tra la massa del bulge di una galassia oppure la massa di una galassia ellittica e la massa del suo buco nero centrale. Ciò si spiega dal fatto che i bulge, come le ellittiche, nascono dai merger. Durante un merger gas cade nel nucleo di una galassia, dove è assorbito dal buco nero alimentando processi simili a un quasar. Chiaramente, più massicce sono le galassie del merger, più gas cadrà nel buco nero e più massiccio diventerà quest'ultimo.

Strutture centrali simili ad un bulge, che però non si sono formati durante un merger si chiamano pseudobulge. Essi hanno proprietà molto più simili a quelle di un disco, per esempio hanno una rotazione globale leggermente più importante del movimento caotico che domina bulge e galassie ellittiche, possono inoltre persino presentare una struttura a spirale. Pseudobulges si formano quando asimmetrie assiali, come per esempio le barre di una spirale, trasferiscono il momento angolare del disco verso l'esterno, causando la caduta verso il centro delle parti più interne. Il gas che cade nel centro alimenta starburst e accumula un'alta densità di materia in quella regione, che è appunto un pseudobulge. La differenza sostanziale tra un bulge e un pseudobulge è che in un pseudobulge il buco nero all'interno accresce costantemente del materiale, ma molto meno che in caso di un merger e solo dal disco, non da strutture esterne come avviene durante i merger. La loro crescita infatti ha una fonte locale. Questi due meccanismi che formano bulge e pseudobulge alimentano entrambi il buco nero centrale, però in modo diverso. Infatti non sembra esserci alcuna correlazione tra pseudobulge e buco nero (Kormendy et al. 2011).

8 Simulazioni N-body

Poiché gli avvenimenti su scala galattica richiedono un arco di tempo relativamente lungo per completarsi, è impossibile osservare direttamente dei cambiamenti della loro morfologia. Questi fenomeni includono per esempio eventi di merger, oppure la formazione di galassie, e per poterli studiare più in dettaglio, ma soprattutto anche per mettere alla prova scenari evolutivi diversi, gli astronomi ricorrono a simulazione a computer. Esse mettono in campo un numero N di particelle sotto determinate condizioni iniziali che poi vengono fatte interagire tra di loro secondo parametri a scelta che includono in ogni caso la forza di gravità ma anche fenomeni più complessi come feedback di galassie attive o starburst o temperatura della materia oscura. Si chiamano perciò simulazioni N-body.

La complessità del sistema che si vuole studiare, determina di particelle utilizzabili nella simulazione. La causa di ciò è semplicemente legata alle capacità limitate dei computer. Mettere in gioco qualche milione di particelle ognuna rappresentante una stella è fattibile, mentre sarebbe assolutamente impensabile simulare ogni atomo di una nube di gas. Le particelle delle simulazioni sono perciò spesso dei raggruppamenti di materiale che, a dipendenza della scala, possono essere anche molto grandi.

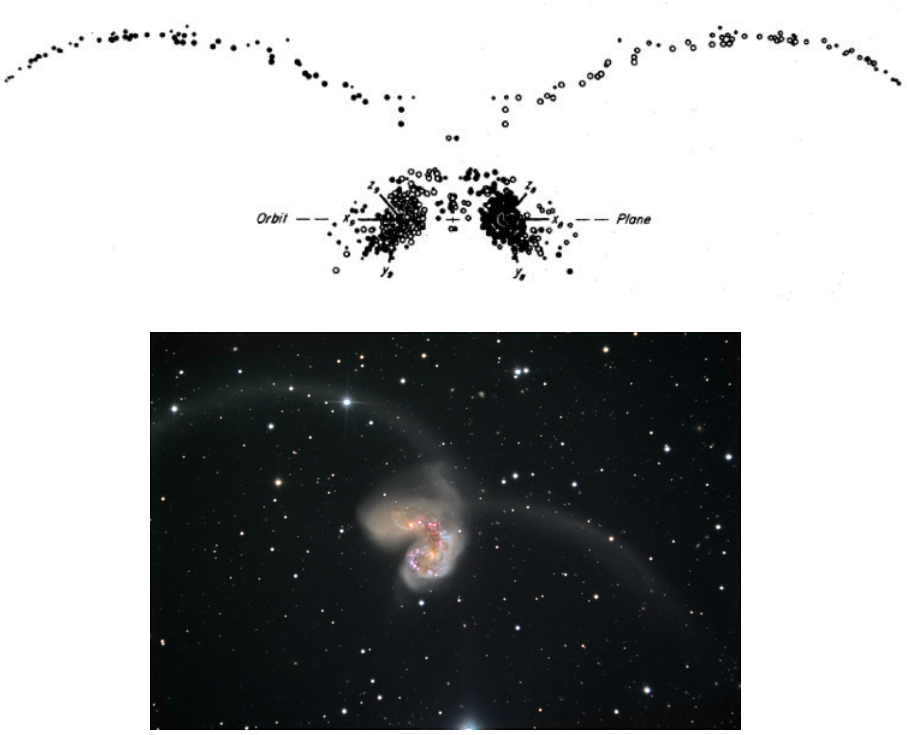

Figure 24: Le galassie interagenti delle antenne riprodotte efficacemente da simulazioni N-body in una simulazione di Toomre & Toomre (1972).

In passato è già stato possibile simulare la nascita di galassie nane, però con i primi tentativi di riprodurre anche grandi galassie a spirale è apparso un problema. Infatti il bulge di queste galassie era sempre troppo grande in rapporto al disco, per riprodurre galassie in cui la materia è prevalentemente concentra nel disco, come per esempio la Via Lattea.

Ora invece una simulazione N-body (Guedes et al., 2011) è riuscita a fornire risultati soddisfacenti. Il progetto è stato intrapreso al centro svizzero di calcolo scientifico (CSCS) a Manno ed è durato ben otto mesi. Denominata "Eris", la galassia simulata ha una massa di $7.9{\cdot}10^{11}$ masse solari, un rapporto bulge su disco di $\frac{B}{D} = 0.35$ ed è composta da un totale di 18.6 milioni di particelle di gas, materia scura e stelle. Il segreto del suo successo sta in parte sicuramente nella risoluzione di un livello mai raggiunto in precedenza. In totale la simulazione, infatti segue più di 60 milioni di particelle. Questo fatto permette di evitare in parte che la materia barionica all'interno della galassia perdi troppo momento angolare e quindi cadi al suo centro ingrandendo il bulge. Inoltre è stata inclusa l'iniezione di energia da parte di supernove per rimuovere materiale a basso momento angolare dal centro e per impedire al gas di raffreddarsi e condensare.

Il gruppo ritiene, che il successo della simulazione sia però basato maggiormente sulla scelta di un alto limite di densità del gas per innescare il processo di

formazione stellare, cioè con $n_{SF} = 5$ atomi al cm^3, invece dei canonici n_{SF} =0.1 atomi al cm^3. Ciò permette al gas interstellare di formare ammassi eterogenei in modo che la formazione stellare e il riscaldamento del gas da parte di supernove avvengano in gruppi. Di conseguenza più materia barionica viene espulsa ad alti redshift (quando la galassia è ancora giovane). Con ciò viene espulso anche gas con basso momento angolare, facendo diminuire anche la massa del bulge centrale. Un limite alto di densità del gas è già stato sperimentato con successo da (Governato et al., 2010) nella simulazione di galassie nane.

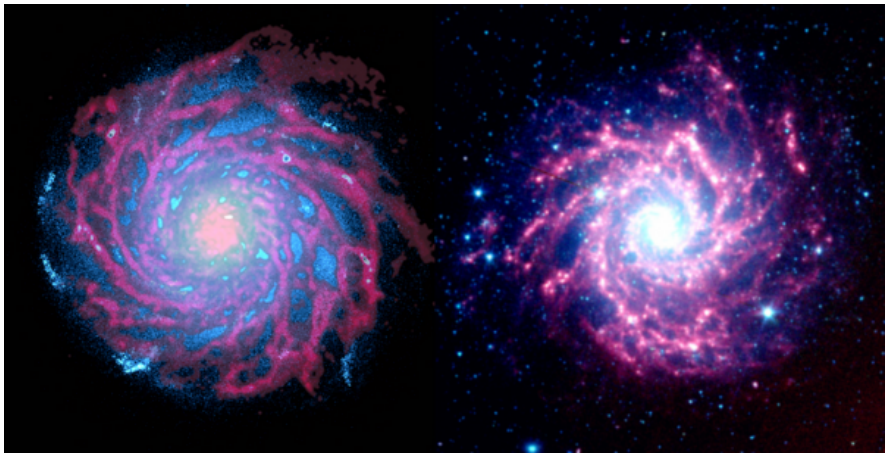

Figura 25: Eris (a sinistra) e la una ipotetica immagine della Via Lattea a confronto. La galassia simulata riproduce verosimilmente spirali di grandi dimensioni. (Immagine mostra luce UV soltanto). Credito: (Guedes et al., 2011), la simulazione è stata fatta dal NASA Advanced Supercomputer Division's Pleiades e dal SNSC (Swiss National Supercomputing Centre).

Simulazioni numeriche non sono solo strumento effettivo per mettere alla prova modelli già esistenti, ma può anche aiutare a scoprire nuovi indizi sul meccanismo dell'evoluzione galattica. Recentemente (Burkert et al., 2008) hanno cercato di riprodurre tramite simulazioni N-body 24 galassie ellittiche osservate dal progetto SAURON (Spectroscopi Areal Unit for Resarch on Optical Nebulae) che tra il 1999 e il 2003 ha raccolto dati di ben 73 galassie ellittiche, lenticolari e Sa con bulge. Hanno trovato che merger tra galassie che hanno un rapporto di massa vicino a 1 tendenzialmente producono galassie rotonde con una rotazione netta molto bassa e isofoti a forma di scatola, mentre se il rapporto cresce, le galassie risultanti saranno rotatori veloci con isofoti simili a dischi.

La maggior parte delle galassie sono state riproducibile, eccetto rossi rotatori lenti con bassa anisotropia, che a quanto pare non si formano né da merger binari tra galassie a spirale, in quanto troppo massicci, né da merger tra galassie ellittiche. Invece sembra che ci potrebbe essere almeno un altro processo

importante che ha determinato le caratteristiche di queste galassie, che non necessariamente coinvolga merger.

Inoltre, seppure non ancora giustificabile, sembra esistere una relazione di proporzionalità tra l'anisotropia δ di una galassia e la sua ellitticità ϵ (Burkert et al., 2008):

$$\delta = 0.67\epsilon \tag{17}$$

Se la formazione stellare è inclusa come parametro nelle simulazioni, le galassie si spostano verso questa retta, indipendentemente se prima erano al di sopra o al di sotto. Da ciò si può intuire l'importanza che la formazione stellare ha sulla forma finale di un merger. Sembra, che anche il processo di raffreddamento del gas sia cruciale per riprodurre rotatori veloci, mentre il feedback degli AGN e delle supernove non ha un peso abbastanza grande da doverlo includere nelle simulazioni.

9 Conclusioni

Alla fine di questo percorso il lettore dovrebbe avere un'idea più chiara della formazione e dell'evoluzione delle galassie.

Sappiamo ora che le galassie vengono classificate tradizionalmente in tre gruppi, ellittiche, a spirale e irregolare. Lo schema di classificazione principale è il modello di Hubble, ma questo non tiene conto della reale sequenza evolutiva delle galassie per cui altri modelli sono stati avanzati, tra i più noti quello di de Vaucouleurs e Sanders e il pettine di ATLAS.

La maggior parte della massa delle galassie è formata da una misteriosa materia oscura che pur interagendo gravitazionalmente non emette e non devia la luce ed è quindi impossibile da osservare direttamente. Una piccola parte di questa materia potrebbe essere formata da oggetti poco luminosi come buchi neri o nane brune, ma candidati più promettenti sono i cosiddetti WIMP, particelle come per esempio il neutrino sterile. Inoltre si pensa che la materia oscura è piuttosto fredda, anche se alcuni fenomeni sembrano necessitare anche di warm dark matter.

Abbiamo scoperto che l'universo si trova in espansione accelerata e che dunque tutte le galassie si allontanano le une dalle altre, in quanto lo spazio tra loro si espande. Ciò causa la luce emessa dalle galassie a essere spostata verso il rosso. Questo redshift permette agli astronomi di stimare la distanza di oggetti lontani. Inoltre è possibile vedere l'universo come era nel passato, in quanto la luce che è partita miliardi di anni fa, avendo una velocità limitata, arriva a noi solo adesso.

Le prime galassie si sono potute formare grazie a fluttuazioni quantiche nell'universo primordiale amplificate durante l'inflazione cosmica. Gradualmente le galassie si sono formate a partire da zone leggermente più dense, attirando materia circostante tramite la loro leggermente più grande forza di gravità. Il modello favorito è quello che prevede che le galassie si siano formate bottom-up

con l'azione di merger piuttosto che top-down tramite il collasso di una nube gigantesca primordiale. Da lì a poco si sono formate le prime stelle, di popolazione III, che alla fine della loro vita hanno sintetizzato i primi metalli.

In seguito le galassie si sono evolute e si evolvono ancora tramite delle interazioni gravitazionali che possono portare alla loro fusione. Questi eventi sono chiamati merger. Durante un merger le forze di marea distorcono le strutture delle galassie creando tidal signatures, ovvero segni di merger, come per esempio code e ponti mareali, strutture ad anello, kinematically decoupled cores e galassie nane in orbita attorno a quelle grandi. Inoltre galassie ellittiche possono formarsi dalla fusione di due galassie a spirale con masse paragonabili. Si pensa che galassie irregolari possano trasformarsi in galassie a spirale tramite il processo di spiral rebuilding.

Comunque i merger da soli non spiegano l'esistenza di molti fenomeni, come per esempio delle spirali perfette, senza bulge o segni di merger passati. Ci sono anche altri processi evolutivi, più lenti e meno violenti dei merger, come l'accrescimento costante di gas intergalattico, instabilità interne, la forza di attrito del medio intergalattico e galaxy harassment. Questi processi causano l'evoluzione secolare delle galassie e possono trasformare galassie a disco negli ammassi in sferoidali, o creare pseudobulge al centro di dischi come nella Via Lattea.

Infine le ipotesi e teorie sull'evoluzione delle galassie viene spesso verificata da simulazioni N-body, in grado di ricostruire la formazione di intere galassie oppure di merger. Di recente è stato possibile riprodurre la formazione di una galassia simile alla Via Lattea.

Con questo lavoro ho voluto non solo dare al lettore una impressione generale, e di accentuare alcuni aspetti in particolare, dell'evoluzione delle galassie, ma anche delle domande aperte che rimangono in questo campo. Essere al corrente della ricerca in questo campo è un compito assai impegnativo a causa dell'enorme attività e del passo rapido che la scienza oggigiorno aumenta di continuo. Ho cercato di mettere a punto la situazione attuale al fronte della ricerca e ho presentato in alcuni casi ipotesi sulle direzioni che essa potrebbe prendere in futuro. Un nuovo modello impiega molto tempo prima di diventare largamente accettato e riguardato come abbastanza sicuro e affidabile dalla comunità scientifica, prove che a prima vista possono sembrare convincenti necessitano di ulteriori verificazioni da parte di altre ricerche indipendenti o ripetizioni di esperimenti. In questo contesto diventa estremamente difficile, forse pericoloso, tirare delle somme, sarebbe come cercare di valutare un viaggio di molte settimane poche ore dopo la partenza.

Riferimenti bibliografici

[1] Binney, J., Tremaine, S., 1988, Princeton University Press, *Galactic dynamics*

[2] Corrado Lamberti, 2011, Springer, Milano, *Capire l'Universo*

[3] de Vaucouleurs, G. 1959, Handbuch der Physik, 53, 275, *Classification and morphology of external galaxies*

[4] de Zeeuw, P.T., 1994, Cambridge University Press, 231, Cambridge, *The formation and evolution of galaxies*

[5] Freedman, R. A., Kaufmann, W. J., 2007, W. H. Freeman and company, New York, *Universe*

[6] Schweizer, F., 1998, Springer, Berlin/Heidelberg, *Observational Evidence for Interactions and Mergers*

[7] http://adswww.harvard.edu/

[8] http://apod.nasa.gov/apod/ap111221.html

[9] http://astrobites.com/2011/04/15/understanding-the-molecular-outflow-in-ngc-1266/

[10] http://ifs.wikidot.com/what-is-ifs

[11] http://newscenter.berkeley.edu/2011/01/10/ngc1266_redanddead/

[12] http://physicsforme.wordpress.com/2011/06/13/slim-and-beautiful-galaxies-too-good-to-be-true/

[13] http://www-astro.physics.ox.ac.uk/atlas3d//project.html#1

[14] http://www.astronomynotes.com/index.html

[15] http://www.cfht.hawaii.edu/en/news/EllGal/

[16] http://www.ing.iac.es/PR/SH/SH2007/sauron.html

[17] http://www.mpia.de/Public/menu_q2.php?Aktuelles/PR/2010/PR100907/-PR_100907_en.html#images

[18] http://www.naoj.org/Pressrelease/2011/04/25/index.html

[19] http://www.spacetelescope.org/news/heic1107/

[20] http://www.spitzer.caltech.edu/news/1293-ssc2011-07-NASA-s-Spitzer-Finds-Distant-Galaxies-Grazed-on-Gas

[21] http://www.stsci.edu/~postman/CLASH/Home.html

[22] http://www.stukhtra.it/?p=6263

[23] www.wikipedia.org

[24] Alatalo, K., Blitz, L., Young, L. M., Davis, T. A., Bureau, M., Lopez, L. A., Cappellari, M., Scott, N., Shapiro, K. L., Crocker, A. F., Martin, S., Bois, M., Bournaud, F., Davies, R. L., de Zeeuw, P. T., Duc, P.A., Emsellem, E., Falcon-Barosso, J., Khochfar, S., Krajnovic, D., Kuntschner, H., Lablanche, P.Y., McDermid, R. M., Morganti, R., Naab, T., Oosterloo, T., Sarzi, M., Serra, P., Weijmans, A.M., 2011, ApJ, *Discovery of an AGN-Driven Molecular Outflow in the Local Early-Type Galaxy NGC 1266*

[25] Allington-Smith, J., Content, R., 1998, ASP, 110, 1216, *Sampling and Background Subtraction in Fiber-Lenslet Integral Field Spectrographs*

[26] Battaglia, G., Tolstoy, E., Helmi, A., Irwin, M. J., Letarte, B., Jablonka, P., Hill, V., Venn, K. A., Shetrone, M. D., Arimoto, N., Primas, F., Kaufer, A., Francois, P., Szeifert, T., Abel, T., Sadakane, K., 2006, A&A, 459, 423, *The DART imaging and CaT survey of the Fornax dwarf spheroidal galaxy*

[27] Bender, R., Doebereiner, S., Moellenhoff, C., 1988 Astronomy and Astrophysics Supplement Series, 3, 385, *Isophote shapes of elliptical galaxies. I - The data*

[28] Burkert, A., Naab, T., Johansson, P. H., Jesseit, R., 2008, ApJ, 685, 897, *SAURON's challenge for the major merger scenario of elliptical galaxy formation.*

[29] Cappellari, M., Emsellem, E., S., Krajnovic, McDermid, R. M., Scott, R. M., Verdoes Kleijn, G. A., Young, L. M., Alatalo, K., Bacon, R., Blitz, L., Bois, M., Bournaud, F., Bureau, M., Davies, R. L., Davis, T. A., de Zeeuw, P. T., Duc, P.A., Khochfar, S., Kuntschner, H., Lablanche, P.Y., Morganti, R., Naab, T., Oosterloo, T., Sarzi, M., Serra, P., Weijmans, A.R., 2010, MNRAS, 1-27, *The ATLAS^{3D} project - I. A volume-limited sample of 260 nearby early-type galaxies_ science goals and selection criteria.*

[30] Cappellari, M., Emsellem, E., Krajnovic, D., McDermid, R. M., Serra, P., Alatalo, K., Blitz, L., Bois, M., Bournaud, F., Bureau, M., Davies, R. L., Davis, T. A., de Zeeuw, P. T., Khochfar, S., Kuntschner, H., Lablanche, P.Y., Morganti, R., Naab, T., Oosterloo, T., Sarzi, M., Scott, N., Weijmans, A.M., Young, L. M., 2011, MNRAS, 416, 1680, *The Atlas3D project - VII. A new look at the morphology of nearby galaxies: the kinematic morphology-density relation*

[31] Delgado-Serrano, R., Hammer, F., Yang, Y. B., Puech, M., Flores, H., Rodrigues, M., 2011, RevMexAA, 40, 52, *The evolution of the observed Hubble sequence over the past 6Gyr.*

[32] Duc, P. A., Cuillandre, J.C., Serra, P., Michel-Dansac, L., Ferriere, E., Alatalo, K., Blitz, L., Bois, M., Bournaud, F., Bureau, M., Cappellari, M., Davies, R. L., Davis, T. A., de Zeeuw, P. T., Emsellem, E., Khochfar, S., Krajnovic, D., Kuntschner, H., Lablanche, P.Y., McDermid, R. M., Morganti, R., Naab, T., Oosterloo, T., Sarzi, M., Scott, N., Weijmans, A.M., Young, L. M., 2011, MNRAS, 000, 000, *The ATLAS^{3D} Project - IX. The merger origin of a fast and a slow rotating Early-Type Galaxy revealed with deep optical imaging: first results.*

[33] Emsellem, E., Cappellari, M., Krajnovic, D., van de Ven, G., Bacon, R., Bureau, M., Davies, R. L., de Zeeuw, P. T., Falcón-Barroso, J., Kuntschner, H., McDermid, R., Peletier, R. F., Sarzi, M., 2007, MNRAS, 379, 401, *The SAURON project – IX. A kinematic classification for early-type galaxies*

[34] Faber, S. M., Willmer, C. N. A., Wolf, C., Koo, D. C., Weiner, B. J., Newman, J. A., Im, M., Coil, A. L., Conroy, C., Cooper, M. C., Davis, M., Finkbeiner, D. P., Gerke, B. F., Gebhardt, K., Groth, E. J., Guhathakurta, P., Harker, J., Kaiser, N., Kassin, S., Kleinheinrich, M., Konidaris, N. P., Kron, R. G., Lin, L., Luppino, G., Madgwick, D. S., Meisenheimer, K., Noeske, K. G., Phillips, A. C., Sarajedini, V. L., Schiavon, R. P., Simard, L., Szalay, A. S.; Vogt, N. P., Yan, R., 2007, ApJ, 665, 265, *Galaxy Luminosity Functions to z˜1 from DEEP2 and COMBO-17: Implications for Red Galaxy Formation*

[35] Franx, M., Illingworth, G., Heckman, T., 1989b, ApJ, 344, 613, *Major and minor axis kinematics of 22 ellipticals*

[36] Fryer, C. L., Woosley, S. E., Heger, A., 2001, ApJ, 550, 372, *Pair-Instability Supernovae, Gravity Waves, and Gamma-Ray Transients*

[37] Graff, D., Freese, K., 1996, ApJ, 456, 49, *Analysis of a hubble space telescope search for red dwarfs: limits on baryonic matter in the galactic halo*

[38] Guedes, J., Callegari, S., Madau, P., Mayer, L., 2011, ApJ, *Forming realistic late-type spirals in a ΛCDM universe: the Eris simulation.*

[39] Guo, Y., Giavalisco, M., Cassata1, P., Ferguson, H. C., Williams, C. C., Dickinson, M., Koekemoer, A. M., Grogin3 N. A., Chary, R.R., Messias, H., Tundo, E., Lin, L., Lee, S.K., Salimbeni, S., Fontana, A., Grazian, A., Kocevski, D., Lee, K.S., Villanueva, E., Van der Wel. A., 2011, ApJ, *Rest-frame UV-Optically Selected Galaxies at 2.3<z<3.5: Searching for Dusty Star-forming and Passively-Evolving Galaxies*

[40] Kormendy, J., Fisher, D. B., 2008 in Formation and Evolution of Galaxy Disks, ed. J. G. Funes, S. J. & E. M. Corsini (San Francisco: ASP), 297, *Secular Evolution in Disk Galaxies: Pseudobulge Growth and the Formation of Spheroidal Galaxies*

[41] Kormendy, J., Bender, R., Cornell, M. E., 2011, Nature Letter, 000, 000, *Supermassive black holes do not correlate with galaxy disks or pseudobulges.*

[42] Lin, C.C., Shu, F. H., 1964, ApJ, 140, 646, *On the spiral structure of disk galaxies*

[43] Martínez-Delgado, D. Gabany, R. J., Crawford, K., Zibetti, S., Majewski, S. R., Rix, H.W., Fliri, J., Carballo-Bello, J. A., Bardalez-Gagliuffi, D. C., Peñarrubia, J., Chonis, T. S., Madore, B., Trujillo, I., Schirmer, M., McDavid, D. A., 2010, ApJ, 140, 962, *Stellard tidal streams in spiral galaxies of the local volume: a pilot survey with modest aperture telescopes.*

[44] Moore, B., Katz, N., Lake, G., Dressler, A., Oemler, A., 1995, Nature, 379, 613, *Galaxy Harassment and the Evolution of Clusters of Galaxies*

[45] Mueller, M. W., Arnett, W. D., 1976, ApJ, 210, 670, *Propagating star formation and irregular structure in spiral galaxies*

[46] Oh, S. H., Kim, W.T., Lee, H. M., Kim, J., 2008, ApJ, 683, 94, *Physical prperties of Tidal Features in Interacting Disk Galaxies*

[47] Postman, M., Coe, D., Benitez, N., Bradley, L., Broadhurst, T. Donahue, M., Ford, H., Graur, O., Graves, G., Jouvel, S., Koekemoer, A., Lemze, D., Medezinski, E., Molino, A., Moustakas, L., Ogaz, S., Riess, A., Rodney, S., Rosati, P., Umetsu, K., Zheng, W., Zitrin, A., Bartelmann, M., Bouwens, R., Czakon, N., Host, O., Infante, L., Jha, S., Jimenez-Teja, Y., Kelson, D., Lahav, O., Lazkoz, R., Maoz, D., McCully, C., Melchior, P., Meneghetti, M., Merten, J., Moustakas, J., Nonino, M., Patel, B., Regos, E., Seitz, S., Sayers, J., Golwala, S., Van der Wel, A., 2012, ApJ, *The cluster lensing and supernova survey with Hubble: an overview.*

[48] Prada, F., Klypin, A. A., Cuesta, A. J., Betancort-Rijo, J. E., Primack, J., 2011, MNRAS, *Halo concentrations in the standard LCDM cosmology*

[49] Primack, J. R., 1997, *Dark Matter and Structure Formation in the Universe*

[50] Riess, A. F., Macri, L., Casertano, S., Lampeitl, H., Ferguson, H. C., Filippenko, A. V., Jha, S. W., Li, W., Chornock, R., 2011, ApJ, 730, 119, *A 3% solution: determination of the Hubble constant with the* Hubble Space Telescope *and Wide Field Camera 3*

[51] Riotto, A., 2010, Lecture, *Particle cosmology*

[52] Rix, H.W., Lake, G., 1993, *Can the Dark Matter be 10^6 Solar Mass Objects?*

[53] Silk, J., Rees, M. J., 1998, A&A, 331, 1, *Quasars and Galaxy Formation*

[54] Sloan, G. C., Hayward, T. L., Allamandola, L. J., Bergman, J. D., DeVito, B., Hudgins, D. M., 1999, *Direct spectroscopic evidence for ionized PAHs in the interstellar medium*

[55] Smith, R. E., Markovic, K., 2011, PRD, *Testing the Warm Dark Matter paradigm with large-scale structures*

[56] Toomre, A., Toomre, J., 1972, ApJ, 178, 623, *Galactic Bridges and Tails*

[57] van Albada, T. S., Bahcall, J. N., Begeman, K., Sanscisi, R., 1985, ApJ, 295, 305, *Distribution of dark matter in the spiral galaxy NGC 3198*

[58] Walker, M. G., Peñarrubia, J., 2011, ApJ, *A method for measuring (slopes of) the mass profiles of dwarf spheroidal galaxies*

[59] Zwicky, F., 1933, Helvetica Physica Acta, VI, 110, *Die Rotverschiebung von extragalaktischen Nebeln*

Appendice: spettroscopia a campo integrale

Il metodo della long-slit spectroscopy consiste nell'osservazione a tutte le lunghezze d'onda del cielo attraverso una fessura molto sottile. In questo modo la luce del resto del cielo non satura l'immagine ed è possibile osservare zone, essendo piccolissime, anche molto luminose del cielo con un buon rapporto segnale/rumore. Se si estende la fessura oltre l'oggetto osservato, si può registrare lo spettro del cielo di fondo e sottrarlo allo spettro dell'oggetto migliorando ulteriormente la qualità dell'immagine.

La luce catturata viene rifratta da un prisma o da un reticolo di diffrazione per dividerla nelle sue componenti e analizzarle separatamente. In questo modo si ottengono dati sia spettrografici sia spaziali. Il metodo è spesso usato per analizzare curve di rotazione di galassie. A causa dell'effetto Doppler la luce proveniente da oggetti che si avvicinano all'osservatore appare a una diversa lunghezza d'onda che di quelli che si allontanano. La diversità delle lunghezze d'onda indotta dall'effetto Doppler permette di determinare l'ampiezza della curva di rotazione.

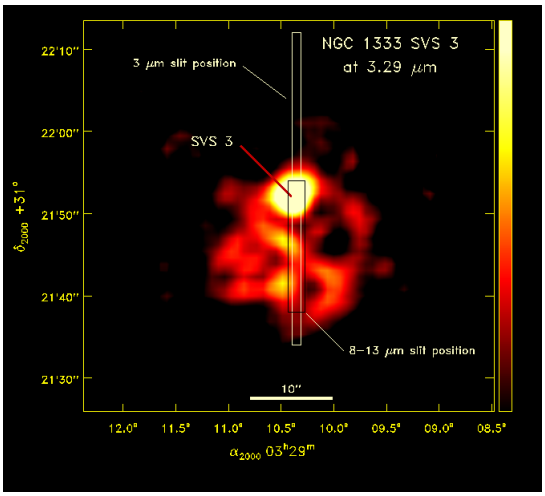

Figura 26: Immagine della nebulosa NGC 1333. Il rettangolo bianco indica la posizione della fessura. Il rettangolo nero è ciò che è riportato nella figura 27. Credito: (Sloan et al., 1999), immagine fatta con il 1.5 m telescopio sul Mt. Lemmon Observatory della NASA.

La spettroscopia a campo integrale è nata per risolvere i problemi principali della long-slit spectroscopy. La spettroscopia a campo integrale permette infatti di osservare oggetti molto estesi senza saturare l'immagine e per osservare superficie più distese, è perciò la tecnica ideale per osservare oggetti molto distesi sul cielo. Non è più necessari osservare attraverso una fessura sottile ma si possono ottenere dati su un piano invece che unidimensionale. Per acquisire spettri di ogni parte dell'oggetto con la long-slit spectroscopy sarebbe necessario muovere

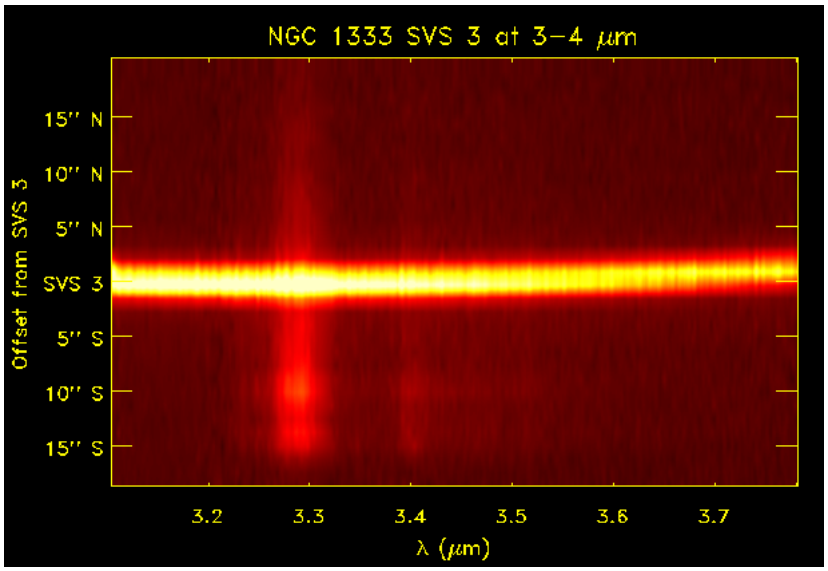

Figure 27: La striscia chiara indica il nucleo chiaro della figura sopra, dal grafico si vede che esso emette luce di tutte le lunghezze d'onda presenti sul grafico. Credito: (Sloan et al., 1999), immagine fatta con il 1.5 m telescopio sul Mt. Lemmon Observatory della NASA.

la fessura lungo tutto l'oggetto e prendere spettri separati, un procedimento poco efficiente che richiederebbe molte osservazioni distinte.

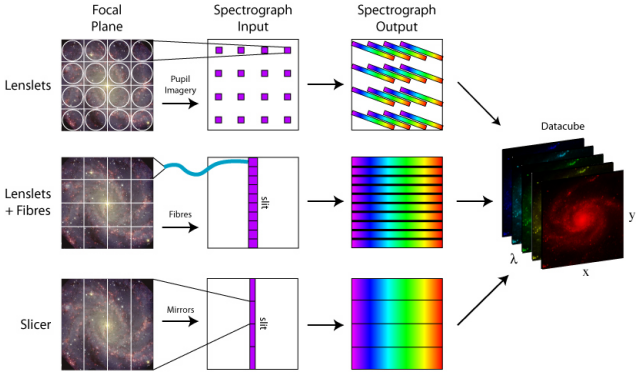

Figura 28: Tre tecniche di spettroscopia a campo integrale diversi, di cui una usa griglie, la seconda griglia con fibre ottiche, la terza con degli specchi. A destra figura un cubi di dati. Credito: M. Westmoquette, adattato da (Allington-Smith et al. 1998).

Ci sono molte tecniche diverse di spettroscopia a campo integrale attualmen-

te in uso, ma alcuni fattori li accomunano. Innanzitutto è essenziale separare, per esempio tramite una griglia, l'immagine che riceve la lente del telescopio in tanti dipartimenti, piccoli abbastanza da approssimare dei punti. Gli spettri di questi punti sono la somma di tutte gli spettri emessi dalla galassie lungo quella precisa linea di vista. Essi sono la somma degli spettri che emettono tutte le sorgenti di luce della galassia in quella precisa linea di vista. Sono rimessi in ordine uno vicino all'altro cosicché vengono a formare dei cubi di dati di cui due lati rappresentano il piano dell'immagine mentre l'asse della profondità misura l'intensità di luce assorbita ad ogni lunghezza d'onda.