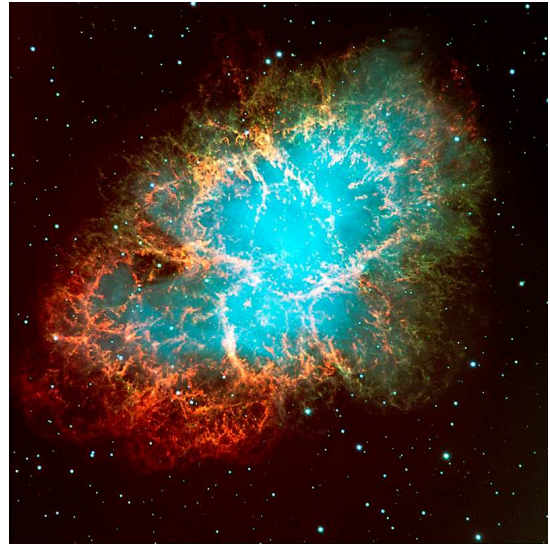

La formazione delle galassie e l'emergere della complessità

Pierluigi Monaco

Dipartimento di Astronomia,
Università di Trieste

E-mail: monaco@oats.inaf.it



ABSTRACT: La formazione delle galassie rappresenta il primo passaggio della semplicità dell'Universo primordiale, dove piccole perturbazioni della materia crescono sotto l'azione della loro gravità, alla complessità degli ecosistemi, a partire dai dischi galattici. Questa chiave di lettura viene usata per descrivere lo stato dell'arte della formazione ed evoluzione delle galassie.

Questo articolo è apparso anche su *L'Astronomia*

PAROLE CHIAVE: Astronomia e astrofisica, pianeti, stelle e galassie, sistemi complessi.

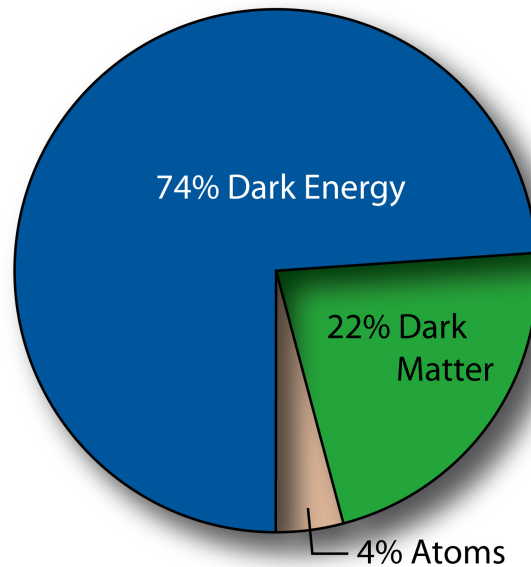


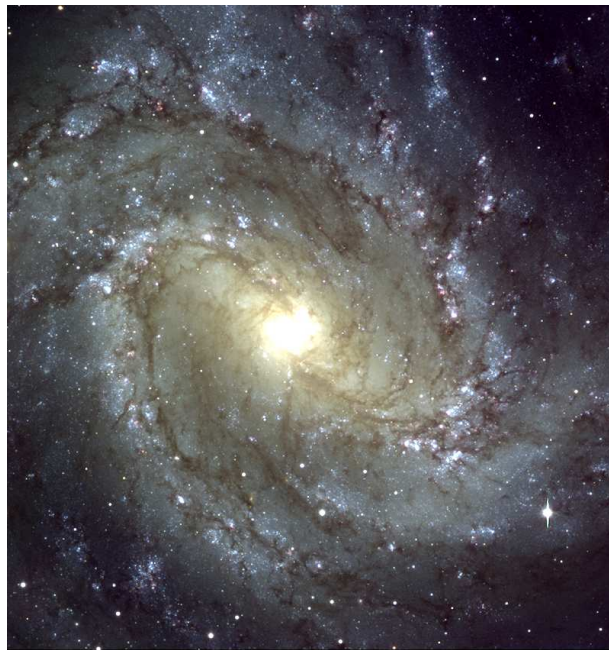
Figura 1. Contributi alla densità totale di massa-energia dell'Universo secondo il modello cosmologico di Big Bang caldo con materia oscura fredda ed energia oscura (vedi anche Spergel et al. 2006).

Dopo anni di campagne di misura ad alta precisione (vedi la scheda 1) la cosmologia ha prodotto un modello standard che descrive sia la geometria globale dello spazio-tempo che le sue perturbazioni. Queste scoperte hanno inciso profondamente sul modo di intendere il problema della formazione delle galassie. Infatti, se qualche decennio fa le galassie erano il mezzo principale per lo studio della cosmologia, e la comprensione della loro formazione era quindi indispensabile per decifrare l'informazione cosmologica, le osservazioni descritte nella scheda 1 forniscono le necessarie conferme al modello in modo sostanzialmente indipendente dalle proprietà delle galassie.

La questione si può riformulare in un bilancio di massa-energia (figura 1): secondo il modello di Big Bang caldo con materia oscura fredda ed energia oscura, l'universo è composto al 4% da materia normale (chiamata nel gergo cosmologico barionica), cioè atomi, al 22% da materia oscura e al 74% da una forma ignota di energia oscura. Mentre la cosmologia concentra la sua attenzione sul 96% ignoto, utilizzando il 4% come tracciante, con la formazione delle galassie si cerca di capire come e perché una piccola parte di quel 4% si trasforma in stelle. In questo modo gli interessi dei due campi di ricerca si differenziano: la cosmologia va alla ricerca delle proprietà fondamentali del nostro Universo, l'astrofisica delle galassie invece si tuffa nella complessità di un problema che non ammette facili semplificazioni.

1. I dischi galattici come ecosistemi

La formazione delle galassie segna infatti l'emergere delle prime forme di complessità. Basta osservare una comune galassia a spirale come M83 (figura 2) per rendersene conto. Nel disco in rotazione attorno al bulbo centrale della galassia troviamo stelle di vario tipo, con una gamma molto ampia di età e composizione chimica. Il disco viene continuamente spazzato dai bracci a spirale, onde di densità che, comprimendo il gas, innescano la formazione delle stelle. In corrispondenza dei bracci a spirale troviamo infatti stelle molto giovani e luminose, facilmente distinguibili nella figura. Queste stelle dal caratteristico colore blu sono molto massicce e hanno vita molto breve, appena una decina di milioni di anni, per cui sono visibili solo durante il passaggio di quel braccio



Spiral Galaxy Messier 83 (VLT ANTU + FORS1)

ESO PR Photo 41.99 (29 November 1999)

© European Southern Observatory



Figura 2. Immagine ottica della galassia a spirale M83 osservata con il telescopio europeo VLT.

a spirale che ne ha stimolato la formazione. Sono inoltre contornate da regioni HII, simili a M42 nella nebulosa di Orione, visibili nella figura come aloni di luce rossastra; questa è emessa dall'idrogeno ionizzato dalla fortissima radiazione ultra-violetta (UV) delle stelle. Al di fuori dei bracci a spirale, e soprattutto nel bulbo centrale, troviamo stelle più piccole e più vecchie, di colore giallastro come il sole. Troviamo inoltre grandi quantità di gas diffuso (non visibili in una semplice immagine ottica), in varie componenti o fasi, che vanno dalla freddissima fase molecolare (10 K, cioè 10 gradi sopra lo zero assoluto), concentrata nei bracci a spirale e da cui nascono le stelle, alla fase fredda (100 K) visibile nel radio alla lunghezza d'onda di 21 cm, alla fase tiepida (10.000 K), di cui le regioni HII sono un esempio, alla fase calda (1 milione di K), creata dallo scoppio di supernove. Troviamo anche molta polvere, che assume una grande rilevanza: dal punto di vista osservativo, questa oscura la luce UV e blu delle stelle giovani e la riemette (per radiazione termica) nell'infrarosso medio e lontano; il suo effetto di oscuramento è visibile nella figura 2 come strisce nere che accompagnano i bracci a spirale. Contemporaneamente, dai grani di polvere accumulati nei dischi protoplanetari nascono, per successive aggregazioni, gli asteroidi e le comete, e da questi i pianeti rocciosi. Da questi grani provengono quindi le molecole organiche responsabili della vita.

Questa complessità si mantiene attraverso un ciclo di eventi che solo adesso stiamo incominciando a capire. Le nubi di gas interstellare, che sono estremamente rarefatte (si parla al massimo di poche particelle per centimetro cubo), si raffreddano e si condensano progressivamente emettendo fotoni; quando la temperatura diventa abbastanza bassa, grazie all'azione catalitica dei grani di polvere l'idrogeno si combina in molecole, e si raffredda ulteriormente fino a circa 10 K. Questo raffreddamento crea le condizioni ideali per la formazione di stelle: il gas comincia a concentrarsi sempre di più, e le sue increspature crescono per collasso gravitazionale fino a formare nuclei di alta densità. Quando il gas diventa così denso da essere opaco alla sua stessa radiazione, il nucleo proto-stellare comincia a riscaldarsi e a diventare molto luminoso, tanto da sublimare la polvere che lo

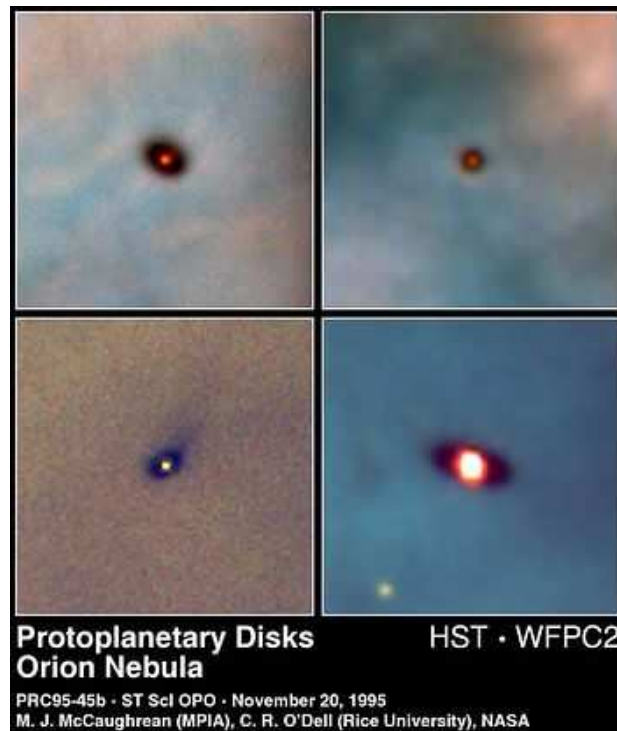


Figura 3. Stelle appena nate, colte nell'atto di sublimare la coltre di polvere che le circonda. Sono ben visibili i loro dischi protoplanetari.

circonda. Quando il nucleo ha finito di accrescere massa, e la sua temperatura interna è diventata tale da innescare reazioni nucleari, è nata la stella; ne vediamo alcuni esempi nella figura 3, in cui stelle appena nate stanno emergendo dall'involuppo di polvere, che nelle parti esterne si dispone in rotazione su un disco protoplanetario.

Le stelle molto grandi, di massa più di otto volte quella del sole, con la loro abbondante energia cominciano a riscaldare il mezzo interstellare attorno a loro. L'energia che più disturba la nube molecolare che le ha generate è quella emessa come luce UV (gli aloni rossi nella figura 2), capace di distruggere le molecole di idrogeno e di ionizzarne gli atomi, nonché di sublimare la polvere interstellare. Contemporaneamente, forti venti stellari creano onde d'urto nel gas; a questi si aggiungono, alla fine della vita della stella, le esplosioni di supernova. Le supernove hanno una doppia importanza: le onde d'urto generate dalla loro esplosione (come la nebulosa del granchio mostrata in figura 4), che trasportano ben 10^{44} Joule (corrispondenti a più di 10^{27} delle più potenti bombe H!), spazzano il mezzo interstellare riscaldandolo a temperature di milioni di K ed accelerandolo a velocità di migliaia di km/s. Allo stesso tempo, gli elementi pesanti generati dalla stella, come carbonio, ossigeno, silicio e magnesio, contaminano il gas e si rendono disponibili per la generazione successiva di stelle e pianeti.

Riassumendo e semplificando al massimo il processo, il raffreddamento del gas porta alla formazione di stelle le quali, grazie alla luce UV, ai venti stellari e alla esplosione di supernove, riscaldano il gas residuo da cui si sono formate. Grazie a questo processo di feedback (reazione di ritorno) la formazione stellare riesce quindi da una parte ad auto-limitarsi, dall'altra a creare e mantenere le varie fasi del mezzo interstellare. Siamo in presenza di un sistema nel quale i flussi di energia e materia, grazie ad un processo di auto-regolazione, si

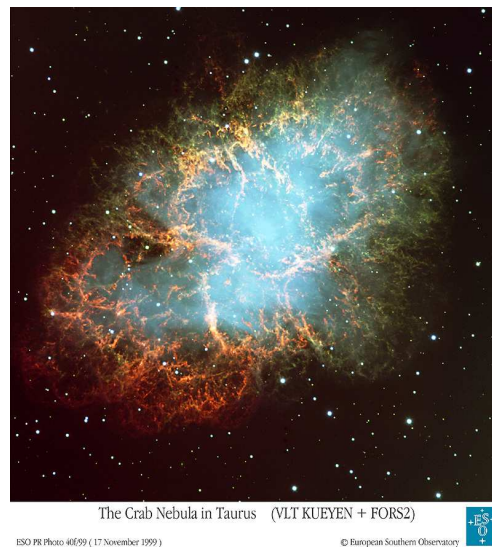


Figura 4. Nebulosa del granchio, fotografata dal telescopio europeo VLT. La rete di filamenti corrisponde all'onda d'urto generata dall'esplosione della supernova osservata dagli astronomi cinesi nel 1054.

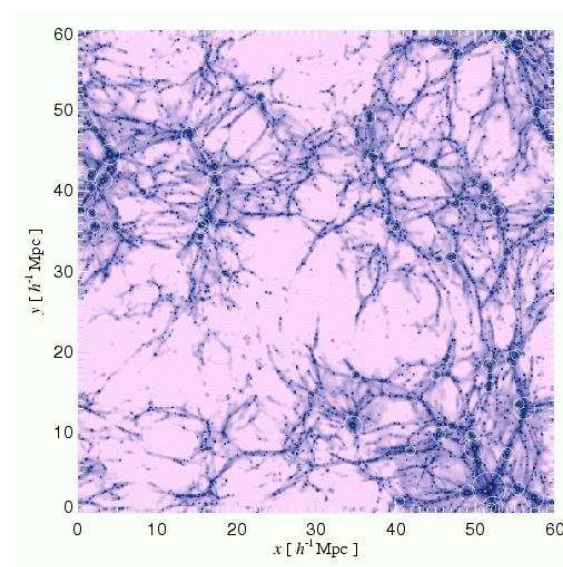


Figura 5. Simulazione numerica della formazione di strutture di materia (oscura e barionica); i cerchi bianchi indicano la posizione degli aloni. Cortesia di M. Viel.

mantengono in uno stato apparentemente stabile ma di non equilibrio. Ma questa è la definizione di un ecosistema; come suggerito dall'astrofisico Burton, un disco galattico è un esempio di semplice ecosistema.

2. Gli aloni di materia oscura

Guardando adesso cosa succede a scale più grandi, la formazione delle galassie è guidata dalla crescita di piccole increspature della materia, visibili nel fondo cosmico come fluttuazioni di temperatura, sotto l'azione della forza di gravità. La figura 5 mostra una simulazione numerica dell'evoluzione di queste piccole perturbazioni, che porta alla formazione dei cosiddetti aloni di materia oscura, concentrazioni abbastanza dense da distaccarsi dall'espansione di Hubble e rimanere gravitazionalmente legate. In questi aloni la materia barionica riesce a raggiungere densità sufficienti ad innescare la catena di eventi che porta alla formazione delle galassie. In altre parole, la crescita e il successivo collasso di piccole perturbazioni cosmologiche fornisce le

condizioni iniziali per la formazione delle galassie. Si potrebbe quindi, in linea di principio, sperare di invertire il processo, così da ricavare informazioni cosmologiche a partire dalle galassie. Ma lo stato di equilibrio di un ecosistema non dipende dalle sue condizioni iniziali quanto piuttosto dalle relazioni non-lineari tra le sue parti; in genere, un ecosistema perde memoria delle condizioni iniziali. Nel caso degli ecosistemi-galassia questa perdita di memoria è parziale: la cosmologia lascia tracce visibili sulla struttura delle galassie.

La differenza fondamentale tra la materia oscura e il gas è l'impossibilità della prima di perdere l'energia cinetica acquisita nel momento in cui cade in un alone di materia oscura, a velocità che possono andare dalle decine alle centinaia di chilometri al secondo. Per questo motivo gli aloni di materia oscura rimangono stabili: la forza di gravità è bilanciata dal moto delle particelle. I barioni hanno un'evoluzione ben diversa: il gas diffuso nell'Universo al di fuori delle galassie, a densità dell'ordine di una particella per metro cubo, è mantenuto dall'onnipresente fondo di radiazione UV a temperature dell'ordine dei 1.000-10.000 K. L'entrata negli aloni di materia oscura avviene quindi a velocità ultrasonica: il gas in entrata, urtando quello già presente, viene immediatamente riscaldato da onde d'urto a temperature che possono andare dalle centinaia di migliaia alle centinaia di milioni di K. Ma, analogamente a quanto succede nel mezzo interstellare, un gas caldo e molto poco denso (10^{-3} particelle per centimetro cubo), perde energia emettendo radiazione. Questo raffreddamento porta il gas a cadere verso la parte centrale dell'alone di materia oscura, formando quindi una galassia. La morfologia di questa galassia dipende in modo critico da quanto ruota il gas.

Come una ballerina riesce a piroettare sempre più veloce tirando verso sé le braccia, così il gas in caduta verso il centro della galassia aumenta la sua velocità di rotazione a causa della conservazione del momento angolare (in termini molto semplici, il prodotto della velocità di rotazione, della massa e della dimensione dell'oggetto che ruota). In verità, a ruotare non è solo il gas ma tutto l'alone di materia oscura. L'origine di questo momento angolare è oggi relativamente chiara: gli aloni di materia oscura durante la loro formazione ricevono una torsione da parte delle forze mareali esercitate dalla distribuzione di materia che hanno attorno; queste imprimono agli aloni una rotazione che corrisponde circa al 5% di quella che li appiattirebbe come i dischi galattici. Se il suo momento angolare si conserva, il gas collassa verso il centro fino a disporsi in un disco in rotazione, di dimensioni di circa 1/20 di quelle dell'alone. Se invece il momento angolare non si conserva, quello che si forma non è un disco galattico ma una struttura sferoidale, cioè un bulbo di galassia a spirale o una galassia ellittica.

La presenza di increspature cosmologiche della materia di tutte le dimensioni, che contemporaneamente crescono e collassano formando aloni di materia oscura, rende lo scenario ben più complicato. Infatti, in un Universo dominato da materia oscura fredda la formazione degli aloni avviene in modo gerarchico, o bottom-up (da sotto a su): prima si formano aloni piccoli, poi gli stessi si aggregano per formare aloni sempre più grandi. Un alone galattico quindi non si forma in un colpo solo ma attraverso l'aggregazione di aloni più piccoli. Si può tracciare una specie di albero dei predecessori di ogni alone, detto albero delle fusioni (figura 6). In ogni alone predecessore può formarsi una galassia, e quando un alone si fonde con un altro più grande la galassia in esso contenuta diventa un satellite di quella dell'alone più grande, come le nubi di Magellano con la Via Lattea. Successivamente, un fenomeno dissipativo chiamato attrito dinamico fa perdere velocità alla galassia satellite, portandola ad avvicinarsi alla galassia principale fino a farle fondere insieme.

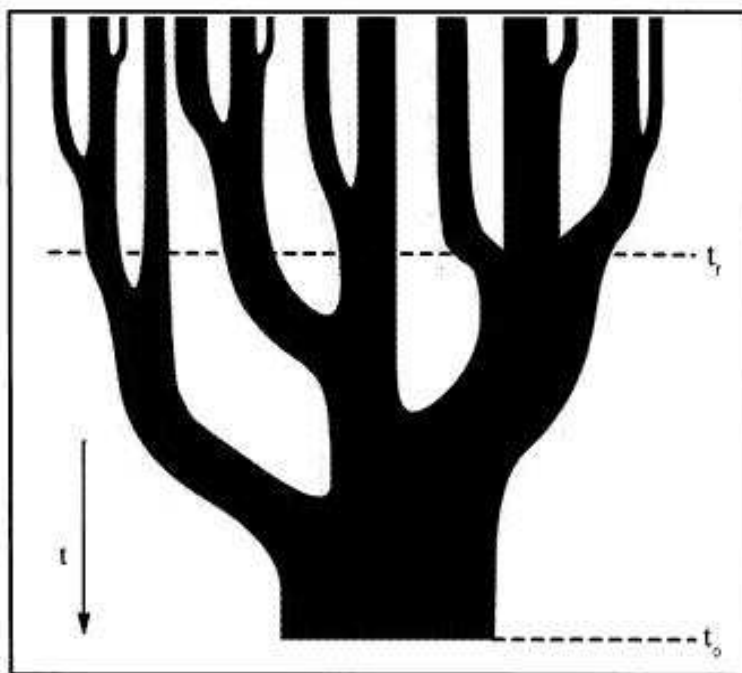


Figura 6. Albero delle fusioni di un alone di materia oscura. Lo spessore del tronco indica la massa dell'alone, ogni biforcazione rappresenta una fusione, la cui altezza indica il tempo a cui la fusione è avvenuta (Lacey & Cole 1993).



Figura 7. Coppia di galassie vicine osservata da Hubble Space Telescope durante una fusione.

3. Fusioni di galassie

Le fusioni di galassie sono una realtà nota da tempo, che interessa circa l'1% delle galassie locali; la figura 7 ne dà un esempio. Osservando a distanze sempre più grandi, e quindi indietro nel tempo, il numero di galassie osservate nell'atto di fondersi aumenta notevolmente. La formazione stellare in questi sistemi è molto diversa da quella nei dischi. Densità e pressione del gas sono molto più alte, così come il tasso di formazione stellare: se la Via Lattea forma in media circa cinque masse solari di nuove stelle all'anno, il prodotto di una fusione di galassie ne può formare diverse centinaia. Questi alti tassi di formazione stellare, concentrati in un volume relativamente piccolo, portano all'esplosione di molte supernove e alla generazione dei cosiddetti venti galattici (figura 8) capaci di espellere quantità rilevanti di materia ad una velocità di centinaia di km/s. Per le galassie

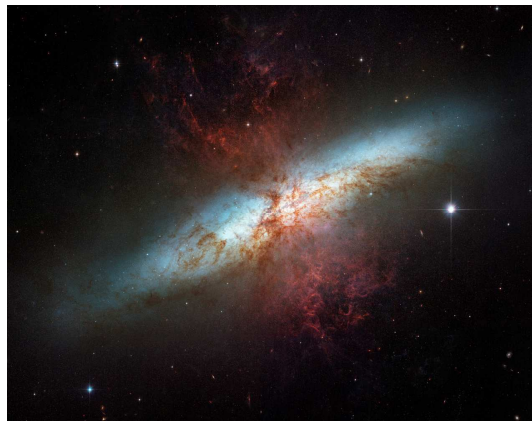


Figura 8. Galassia M82 osservata da Hubble Space Telescope. Il sistema di filamenti rossastri a doppio cono, centrato sulla galassia, è il segnale di un vento galattico generato dall'esplosione di moltissime supernove. La luce rossastra è l'emissione di una fase del gas a temperatura di circa 10.000 K.

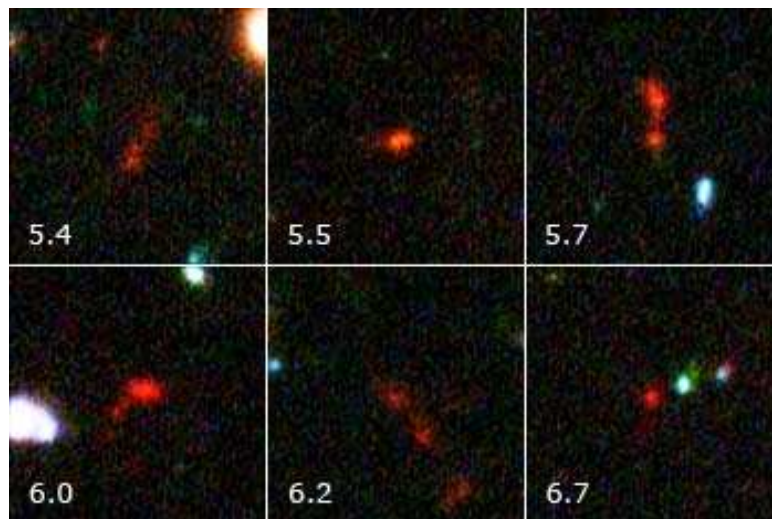


Figura 9. Immagini di galassie quando l'universo era vecchio meno di un miliardo di anni. Il numero indicato in ogni pannello è il redshift della galassia.

ospitate in aloni di materia oscura di dimensioni modeste, l'energia cinetica del gas può essere sufficiente a espellerlo al di fuori dell'alone, contaminando così di nuovi elementi chimici la materia degli spazi intergalattici. Questo fa capire come la formazione stellare dipenda in modo drastico dalle proprietà dell'ambiente in cui ha luogo: se i dischi sono degli ecosistemi, le fiammate di formazione stellare sono eventi catastrofici che avvengono su tempi scala così brevi da consumare nel giro di poche centinaia di milioni di anni tutto il gas e lasciarne la galassia sostanzialmente priva.

Le fusioni sono un meccanismo fondamentale per fare perdere momento angolare al gas: se due galassie a disco si fondono, il prodotto della fusione avrà la morfologia tipica di una galassia ellittica. Inoltre, l'assenza di mezzo interstellare è in linea con le note proprietà delle galassie ellittiche. Infatti fin dai primi anni '70 fu proposto che le galassie ellittiche fossero prodotte da fusioni di galassie a spirale. Come abbiamo visto, nell'ambito della cosmologia bottom-up le fusioni sono un prodotto naturale della formazione degli aloni di materia oscura, e questo ha dato grande importanza al meccanismo delle fusioni.

Come spesso succede per le galassie, la realtà si è rivelata ben più complessa. Infatti, gli esperti di popolazioni stellari hanno ben presto raffreddato l'entusiasmo: galassie ellittiche e spirali sono profondamente

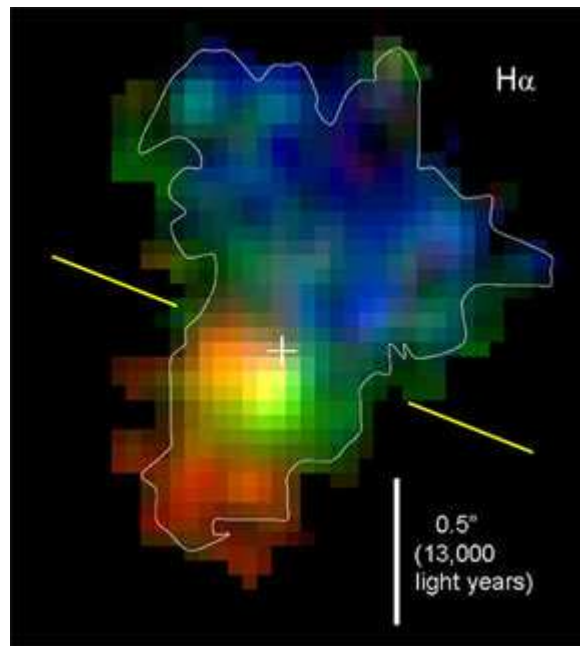


Figura 10. Campo di velocità di una galassia in formazione stellare a redshift 2 (osservate quindi più di 10 miliardi di anni fa), ottenuta con lo strumento SINFONI del VLT (Genzel et al. 2006).

diverse, e le abbondanze relative degli elementi contenuti nelle loro stelle indicano che le spirali si formano lentamente, su tempi scala di miliardi di anni, mentre le grandi ellittiche molto più velocemente. In altre parole, se prendiamo la Via Lattea e la vicina galassia di Andromeda e le facciamo fondere insieme, otteniamo una galassia con popolazioni stellari incompatibili con quelle di un'ellittica della stessa massa. Il vincolo è molto forte per le galassie più massicce, mentre si fa piuttosto debole per le galassie più piccole.

4. Galassie giovani

La soluzione di questa discrepanza richiede di prestare grande attenzione da una parte alle complicate condizioni iniziali per la formazione degli aloni di materia oscura, dall'altra parte al comportamento complesso dei barioni in questi aloni. Così facendo si scopre che le galassie più massicce si formano molto indietro nel tempo, quando l'Universo aveva pochi miliardi di anni. Le galassie erano molto diverse a quel tempo, e non seguivano la classificazione di Hubble (ellittiche-spirali-irregolari) che vale nella nostra era cosmologica. La figura 9 mostra alcune galassie osservate circa un miliardo di anni dopo il Big Bang. Il (falso) colore rosso è dovuto al fatto che la radiazione di queste galassie è drasticamente spostata verso il rosso dall'espansione dell'universo. La morfologia è irregolare, la densità di gas è molto elevata, la formazione stellare è tipica delle galassie con fiammate di formazione stellare, le fusioni sono frequenti. Nulla di analogo alle galassie a spirale quindi.

Anche andando a tempi un po' più vicini a noi (a redshift 2, poco più di dieci miliardi di anni fa, quando l'Universo ne aveva circa 3,5), troviamo degli esempi sorprendenti. Utilizzando la Integral Field Unit dello strumento SINFONI del VLT (uno strumento capace di prendere uno spettro per ogni pixel di un'immagine ad alta risoluzione) è stato osservato il campo di velocità della galassia in figura 10. Malgrado l'alto tasso di formazione stellare suggerisse che la galassia fosse il prodotto di una fusione, il campo di velocità è quello caratteristico di un disco in rotazione. Ma in questo caso la densità del gas è molto elevata e lo spessore del disco (stimato a partire dalla larghezza delle sue righe di emissione) è considerevole. Questo disco spesso e denso

forma stelle su tempi scala di poche centinaia di milioni di anni; niente a che fare con i tranquilli ecosistemi che osserviamo nelle galassie a spirale della nostra epoca cosmologica.

La formazione delle grandi galassie ellittiche per fusione può quindi essere riconciliata, almeno per grandi linee, con le condizioni iniziali date dal modello cosmologico a patto che questa formazione avvenga molto presto, prima che si formino i dischi che osserviamo oggi. Questo apre un altro problema: perché queste galassie, contenute in aloni in continua evoluzione, smettono di formare stelle presto e rimangono sostanzialmente inattive per dieci miliardi di anni? Questa domanda è un aspetto di un comportamento generale delle galassie, spesso chiamata *downsizing* o formazione anti-gerarchica: se la formazione degli aloni di materia oscura procede nel senso di creare aloni sempre più grandi, per cui l'alone più grande è anche più giovane, per le galassie osserviamo che quelle più grandi smettono presto di fare stelle, mentre quelle più piccole continuano fino ad adesso. In altre parole, la galassia più grande è anche più vecchia. Cosa riesce ad interrompere ed invertire l'evoluzione gerarchica degli aloni di materia oscura, determinando una formazione anti-gerarchica delle galassie?

La risposta si può riassumere in una parola, *feedback*: la formazione stellare genera energia, e questa energia riesce ad auto-regolare non solo la formazione stellare stessa, ma anche tutto il processo di formazione galattica. Questo avviene attraverso un ciclo di processi che parte dal raffreddamento del gas negli aloni di materia oscura, attraversa la formazione stellare nelle galassie e ritorna al gas di alone (o al mezzo intergalattico) attraverso i venti galattici. In altre parole, la dinamica complessa influenza tutta la galassia, facendole perdere memoria delle condizioni iniziali del collasso bottom-up.

5. Non solo stelle

È tuttavia opinione corrente che il feedback da formazione stellare non sia sufficiente a sterilizzare le grandi galassie ellittiche, in modo da preservare intatte le loro popolazioni stellari per dieci miliardi di anni. Questo ha portato i teorici a includere nel gioco un altro protagonista. Si sa che ogni galassia contiene un buco nero supermassiccio al suo centro, di massa che può andare dai milioni ai miliardi di masse solari. La caduta di materia su questi buchi neri provoca emissione di grandi quantità di energia, visibile per esempio come luce di quasar. Nel caso delle grandi galassie ellittiche, non appena il gas dell'alone che ospita la galassia inizia a raffreddarsi, una piccola parte cade nel buco nero centrale, dando origine a giganteschi getti di plasma caldissimo e magnetizzato. Questi getti ri-riscaldano il gas, impedendogli così di cadere nella galassia e fare stelle. Questo processo è illustrato nella figura 11, che raffigura l'ammasso di galassie presente nella costellazione di Perseo. Tutto l'ammasso è ospitato in un grande alone di materia oscura; l'immagine nei raggi X mostra il gas caldo che pervade l'alone, che ha iniziato a raffreddarsi. Se questo gas fosse lasciato libero di raffreddarsi, si condenserebbe nella grande galassia ellittica che sta al centro dell'ammasso, formando stelle e quindi ringiovanendola. Contemporaneamente, l'immagine radio mostra il plasma magnetizzato (che emette luce di sincrotrone) emesso dal buco nero che sta al centro della grande ellittica centrale. I buchi visibili nell'immagine X sono bolle di gas riscaldato, e la corrispondenza tra queste bolle e l'emissione radio del plasma testimonia in modo chiaro come il riscaldamento sia dovuto al buco nero. Plausibilmente, questo riscaldamento è in grado di spegnere il processo di raffreddamento in corso.

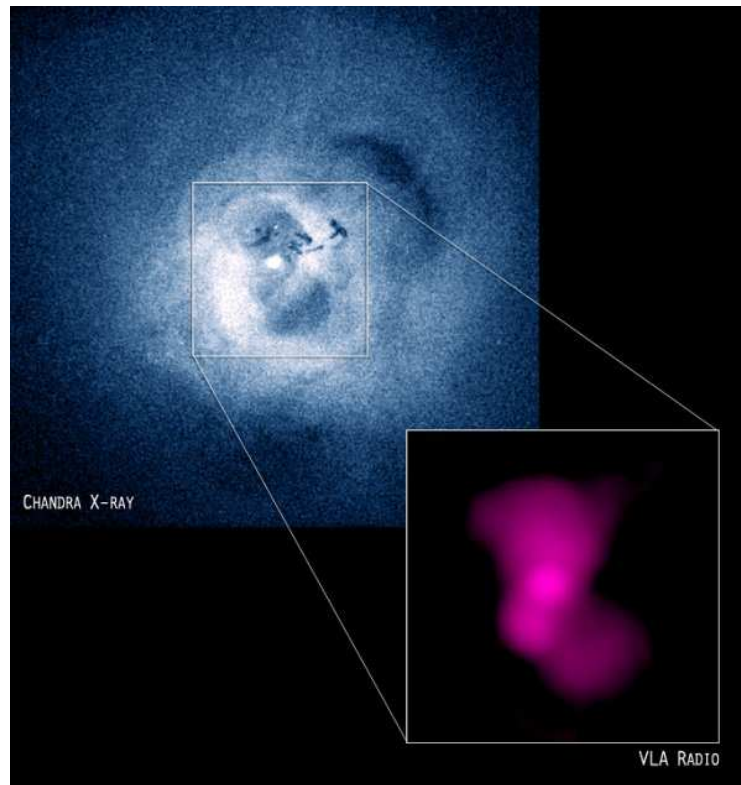


Figura 11. Immagine X e radio dell'ammasso di Perseo. L'immagine X mostra il gas caldo che pervade l'alone di materia oscura che contiene l'ammasso di galassie; la sua luminosità indica che il gas ha iniziato a raffreddarsi. I buchi nella parte interna dell'ammasso sono bolle di gas riscaldato. L'immagine radio mostra la luce di sincrotrone emessa dal plasma magnetizzato dei getti provenienti dal grande buco nero centrale. La corrispondenza tra bolle calde e plasma magnetizzato indica in modo chiaro che i getti stanno riscaldando il gas.

Se da una parte il quadro generale comincia ad essere chiaro, quando si va ai dettagli la situazione è ancora estremamente confusa. La formazione delle galassie viene seguita da due classi di modelli, le grandi simulazioni numeriche oppure i modelli cosiddetti semi-analitici, in cui ogni processo viene trattato con modelli semplificati e veloci da calcolare. Le prime hanno l'ovvio vantaggio di fare molte meno approssimazioni, ma la loro risoluzione spaziale e in massa è ancora povera, tanto che i processi di feedback non sono assolutamente risolti ma piuttosto modellati dentro le singole particelle che campionano il gas. Il feedback viene così incluso tramite dei modelli efficaci a cui si chiede di tenere conto di ciò che non viene simulato; queste simulazioni perdono così il loro status di esperimenti numerici. I modelli semi-analitici fanno molte più assunzioni, ma possono produrre intere popolazioni di galassie in poche ore di calcolo. In entrambi i casi il problema che si incontra è l'elevato numero dei parametri liberi che gli scienziati sono costretti ad inserire per modellare processi che non sono ben compresi. Come abbiamo già accennato, il problema non ammette facili semplificazioni, e questa gastrofisica della formazione delle galassie fa pensare più alla climatologia (i maliziosi dicono metereologia) che alla fisica fondamentale.

È quindi chiaro che, se da una parte abbiamo di fronte affascinanti esempi di (eco)sistemi astrofisici complessi, dall'altra parte è molto difficile estrarne informazioni fondamentali. Illustriamo questo aspetto con un ultimo esempio, considerando ancora una volta le grandi galassie ellittiche. Una delle questioni più paradossali della loro evoluzione è la stabilità della loro massa negli ultimi 8 miliardi di anni: anche ipotizzando che il feedback (da stelle o da buchi neri) riesca ad evitare la formazione di qualsiasi stella, quello che non si riesce ad

impedire è che la loro massa cresca per fusioni successive con altre galassie ellittiche. Queste infatti sono tipicamente ospitate in ammassi di galassie, strutture che osserviamo fondersi continuamente tra di loro, e stimiamo che ad ogni fusione di ammassi corrisponda, entro meno di un miliardo di anni, una fusione di grandi ellittiche. Questo ci porta a concludere, con pochi margini di dubbio, che le grandi ellittiche devono raddoppiare la loro massa negli ultimi otto miliardi di anni, cosa che però non succede. Siamo di fronte ad una crisi del modello cosmologico? Non è detto. Il nostro gruppo ha recentemente proposto che in queste particolari condizioni le stelle semplicemente si disperdano nell'ammasso durante le fusioni. È infatti noto che negli ammassi di galassie esiste una componente di luce diffusa, difficilissima da osservare, la cui massa potrebbe ammontare a quella di diverse galassie. Le simulazioni numeriche suggeriscono che questa componente si accumuli preferenzialmente negli ultimi 8-10 miliardi di anni. È quindi possibile che questo processo di spargimento delle stelle cospiri a rendere minimo l'aumento di massa delle grandi galassie ellittiche.

L'insegnamento che se ne può trarre è che niente è semplice quando si parla di galassie, e che, mentre si cominciano a comprendere i meccanismi fondamentali della loro formazione, i dettagli sono ancora molto incerti e le opinioni molto varie, tanto da rendere estremamente difficile estrarre informazioni cosmologiche sulle loro condizioni iniziali. Gli ecosistemi galattici sono stati osservati con tutti i telescopi disponibili, in tutte le bande raggiungibili, e l'enorme massa delle conoscenze acquisite in questi ultimi anni è in fase di analisi e metabolizzazione da parte della comunità astronomica. Contemporaneamente, un grande lavoro è in corso per affinare i modelli e renderli più predittivi, malgrado l'ampiezza dello spazio dei parametri necessari a descrivere i processi astrofisici. Questi progressi porteranno infine a sciogliere i nodi fondamentali della formazione delle galassie; questo è un passaggio fondamentale non tanto per capire le leggi e le caratteristiche dell'Universo osservato, ma per tracciare quella storia che dalle piccole increspature, generate durante i primissimi istanti dell'Universo e osservate 360.000 anni dopo nel fondo cosmico nelle microonde, porta all'emergere della complessità in strutture sempre più piccole e più dense, passando dai più grandi ecosistemi esistenti, le galassie, fino ad arrivare ai pianeti rocciosi e quella che chiamiamo vita.

Riferimenti Bibliografici

- [1] M. Burton, *The Galactic ecosystem*, in proceedings of IAU Symp. 213, *Bioastronomy 2003-life among the stars*, 2004. Eds. R. Norris & F. Stootman, 123-127, Astronomical Society of the Pacific.
- [2] R. Genzel et al., *The rapid formation of a large rotating disk galaxy three billion years after the Big Bang*, *Nature* **442** (2006) 786.
- [3] C. Lacey and S. Cole, *Merger rates in hierarchical models of galaxy formation*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **262** (1993) 627.
- [4] P. Monaco, G. Murante, S. Borgani and F. Fontanot, *Diffuse stellar component in galaxy clusters and the evolution of the most massive galaxies at $z < 1$* , *The Astrophysical Journal Letters* **652** (2006) L89.
- [5] D.N. Spergel et al., *Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Three Year Results: Implications for Cosmology*, astro-ph/0603449.

Scheda 1: il modello cosmologico Il modello cosmologico che meglio riproduce le evidenze osservative su grande scala è il modello di Big Bang caldo con materia oscura fredda ed energia oscura. In questo modello (figura 1) il 4% della massa-energia dell'Universo è costituito da materia cosiddetta barionica, ovvero atomi (i barioni sono le particelle più pesanti, come i protoni e i neutroni; gli elettroni sono trascurabili in termini di massa), mentre il 22% è nella forma di una ignota particella che non ha interazioni elettromagnetiche né nucleari forti, chiamata materia oscura. Il restante 74% è formato da un qualcosa che non capiamo, chiamata energia oscura e descritta da un termine effettivo di costante cosmologica. Questa fu introdotta per la prima volta da Einstein nel tentativo di costruire un universo statico, ed ha l'effetto di accelerare l'espansione dell'Universo. La costante cosmologica fu recuperata nel 1998, quando il primo diagramma di Hubble (cioè la luminosità apparente in funzione del redshift) delle supernove lontane diede la prima evidenza chiara che l'espansione dell'Universo è in accelerazione da circa 8 miliardi di anni. Il modello cosmologico riesce a riprodurre la geometria globale piatta del nostro Universo, nota grazie allo studio delle mappe di temperatura del fondo cosmico nelle microonde (misurate con grande precisione dal pallone italo-statunitense Boomerang e, più di recente, dal satellite Wilkinson Microwave Anisotropy Probe), e la sua espansione accelerata. Il modello riesce anche a riprodurre le proprietà statistiche della struttura a grande scala dell'Universo, ricostruite grazie ad osservazioni di galassie, ammassi di galassie, sfruttando l'effetto di lente gravitazionale oppure in assorbimento nella luce dei quasar. In queste osservazioni le galassie sono usate al massimo come traccianti della distribuzione di materia, per cui i risultati sono sostanzialmente indipendenti dai dettagli della loro formazione.