

Η προέλευση του Γαλαξία και της τοπικής ομάδας γαλαξιών

A) Η κοσμολογία κοντινού πεδίου

Για την κατανόηση της προέλευσης του Γαλαξία μας και της τοπικής ομάδας γαλαξιών χρησιμοποιούμε την κοσμολογία κοντινού πεδίου (near field cosmology) που εξετάζει τα <αρχαία> αστέρια της γαλαξιακής γειτονίας μας, και την κοσμολογία μακρινού πεδίου (far field cosmology) που εξετάζει το νεαρό σύμπαν όπως το παρατηρούμε σήμερα. Η πρώτη προσέγγιση μας παρουσιάζει την <κατασκευή> και εξέλιξη του Γαλαξία, κυρίως μέσω της μεταλλικότητας των παλαιών αστεριών στις διάφορες γαλαξιακές περιοχές, ενώ η δεύτερη ρίχνει φως στις αρχικές συνθήκες σχηματισμού των γαλαξιών όταν το σύμπαν ήταν σε πολύ νεαρή ηλικία.

Αρχαία αστέρια παρατηρούμε σε όλες τις γαλαξιακές περιοχές, τον λεπτό και τον παχύ δίσκο, την αστρική άλω, την κοιλιά, και σε γαλαξίες- δορυφόρους. Τα μισά αστέρια του Γαλαξία μας δημιουργήθηκαν νωρίτερα από $z=1$. Στην τοπική γαλαξιακή ομάδα παρατηρούμε ίχνη διεργασιών της εποχής $z=5$ και παλαιότερα. Τα πιο φτωχά σε μέταλλα αστέρια που ανακαλύπτουμε είναι της αμέσως επόμενης γενιάς μετά τα πρώτα τεράστια (άρα και βραχύβια) αστέρια. Έχει ιδιαίτερη σημασία πόσο γρήγορα δημιουργήθηκαν αστέρια μικρότερης μάζας, εμπλουτισμένα σε μέταλλα. Αυτά τα αστέρια είναι απαραίτητα για τις σουπερνόβα Ia, που εμπλούτισαν ακόμη περισσότερο την μεσοαστρική ύλη.

Παραμένουν αναπάντητα ερωτήματα όπως αν τα πρώτα αστέρια δημιουργήθηκαν σε σμήνη ή μεμονωμένα, αν δημιουργήθηκαν σε μίνι άλως της σκοτεινής ύλης ή όταν είχε ήδη καταρρεύσει η βαρυονική ύλη στους γαλαξίες (παίρνοντας την σημερινή μορφή τους), σε πιο βαθμό οι εκρήξεις σουπερνόβα II αυτών των άστρων εμπλούτισαν την μεσοαστρική ύλη, καθώς και σε πιο βαθμό <επαναίονισαν> το πρώιμο σύμπαν. Κατά τον επαναιονισμό το κοσμικό αέριο θερμάνθηκε τοπικά στους 10000K. Έτσι αυτά τα πρώτα βαρυονικά συστήματα πρέπει να ήταν εμβαπτισμένα σε σκοτεινή ύλη, ώστε να αποβάλλουν αποτελεσματικά θερμότητα, για να σημειωθεί περαιτέρω αστρογέννηση.

Σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη ενός γαλαξία έχει το ευρύτερο περιβάλλον του. Σε πυκνά γαλαξιακά σμήνη οι γαλαξίες κοντά στο κέντρο του σμήνους εξελίσσονται γρήγορα σε κόκκινους ελλειπτικούς που θεωρούνται <νεκροί>, χωρίς αστρογέννηση. Ακόμα, οι γαλαξίες παρουσιάζουν ανάδραση (feedback) μέσω συσσώρευσης ύλης από τον μεσογαλαξιακό χώρο. Υπάρχει και η ανάδραση μέσω των εκρήξεων σουπερνόβα, αλλά και μέσω της ύλης που παρασύρεται από τους ισχυρότατους ανέμους των AGN (ενεργοί γαλαξιακοί πυρήνες).

Η αναλογία βαρυονικής και σκοτεινής ύλης δείχνει την πρώτη να αποτελεί το 17% της συνολικής ύλης. Η τιμή αυτή κυμαίνεται ανάλογα το περιβάλλον (γαλαξίες ή μεσογαλαξιακή ύλη) και την ερυθρολίσηση z .

Μια επισκόπηση, η GAMA galaxy survey 350000 γαλαξιών σε $z < 0,1$ (τωρινό και κοντινό μας σύμπαν) μας έδειξε ότι το σύστημα Γαλαξία- Μαγγελανικά νέφη, αλλά και Γαλαξία- γαλαξία

της Ανδρομέδας είναι σπάνια. Βέβαια τα γαλαξιακά συστήματα εξελίσσονται και τα παρατηρούμε μόνο ως στιγμιότυπα στον χρόνο.

Η συσσώρευση αερίου στους γαλαξίες.

Πως συσσωρεύεται το αέριο στους γαλαξίες? Ως ψυχρό, θερμό ή καυτό, ή με την μορφή αστεριών? Η συσσώρευση των βαρυονίων προκαλείται από την σκοτεινή ύλη ή υπάρχει μια συνεχόμενη συσσώρευση, σαν βροχή από ύλη? Λόγω ότι η βαρυονική ύλη εμφανίζεται σε διάφορες φάσεις (πλάσμα, άτομα, μόρια, σκόνη, μέταλλα) πρέπει να έχουμε παρατηρήσεις από όλο το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα.

Η συσσώρευση πριν τον επαναιονισμό.

Την εποχή της επανασύνδεσης (recombination) η διασπορά της ύλης στο σύμπαν ήταν εκπληκτικά ομοιόμορφη, με πολύ μικρές συμπεκνώσεις της τάξης των 100001 μερών/100000 μέρη, όπως απεικονίζεται στην μικροκυματική ακτινοβολία υποβάθρου. Μόλις τα βαρυόνια αποδεσμεύτηκαν από τα φωτόνια, τα βαρυόνια μπόρεσαν να συσσωρευτούν σε αναπτυσσόμενες συμπεκνώσεις στην σκοτεινή ύλη. Το στοίχημα είναι αν μπορούμε να παρατηρήσουμε αυτές τις πρώτες συμπεκνώσεις, που σημειώθηκαν πολύ πριν την δημιουργία των πρώτων αστεριών (η λεγόμενη σκοτεινή εποχή, dark ages) στο φάσμα (HI) 21cm. Η αποβολή θερμότητας και η συμπύκνωση σε μίνι-άλως οδήγησε στην δημιουργία των πρώτων αστεριών. Η καταστολή της δημιουργίας γαλαξιών μικρής μάζας οφείλεται στην διακύμανση του χρονικού του επαναιονισμού. Τα σημερινά μέσα δεν μας επιτρέπουν την μελέτη των νάνων γαλαξιών στο πρώιμο σύμπαν, που θα μπορούσαν να μας παρουσιάσουν σημάδια από τον επαναιονισμό.

Συσσώρευση μετά τον επαναιονισμό.

Το υπόβαθρο ακτινοβολίας UV από τους ανέμους των πρώτων μεγάλων αστεριών μπορεί να περιόρισε την δημιουργία νέων αστεριών, επειδή θέρμανε πολύ το μεσοαστρικό αέριο. Είναι λογικό να υποβαθμίστηκαν αρκετοί νάνοι γαλαξίες κατά όλη την εποχή του επαναιονισμού, κάτι που φαίνεται από την έλλειψη νάνων στην τοπική μας ομάδα. Ίσως να υπάρχουν χιλιάδες μίνι-άλως σκοτεινής μάζας στη τοπική ομάδα. Δεν μας είναι τελείως γνωστή η τιμή της κρίσιμης μάζας κάτω από την οποία δεν μπορεί να σχηματιστεί γαλαξίας. Εξαρτάται από την θερμοκρασία του αερίου, ώστε να επιτυγχάνεται ισορροπία (virial theorem) στο σύστημα, για να μπορεί να συσσωρεύσει αέριο. Η συσσώρευση αερίου εξαρτάται από την μάζα Jeans (η πίεση του αερίου να μην μπορεί να αντισταθμίσει την βαρύτητα). Η αυξημένη θερμοκρασία του αερίου της άλως μειώνει ως και 50% την μάζα του αερίου που μπορεί να συσσωρευτεί .

Τα κρουστικά μέτωπα (shocks) συσσώρευσης.

Εάν ο Γαλαξίας μας κινείται μέσα στο περιβάλλον αέριο με ταχύτητα μεγαλύτερη από την τοπική ταχύτητα του ήχου (supersonically), θα δημιουργηθεί ένα κρουστικό μέτωπο, όπως η ηλιόπαιση μπροστά από τον Ήλιο. Το κρουστικό μέτωπο αποτελεί μια πολύ ξαφνική αλλαγή των ιδιοτήτων του μέσου. Συνήθως περιλαμβάνει αλματώδης αύξηση της πίεσης, της πυκνότητας και της θερμοκρασίας. Τα μοντέλα των κρουστικών μετώπων μας δείχνουν

ότι η τοποθεσία του μετώπου εξαρτάται από την σχέση ανάμεσα στον χρόνο ψύξης και τον δυναμικό χρόνο. Η θερμή- καυτή μεσογαλαξιακή ύλη είναι σε μορφή πλάσματος με θερμοκρασία 10 εκατομμυρίων βαθμών, που σημαίνει ότι ο χρόνος ψύξης είναι μεγαλύτερος από τον δυναμικό χρόνο. Έτσι αναμένουμε το κρουστικό μέτωπο να είναι κοντά στην ακτίνα εξισορρόπησης (virial radius). Το μέτωπο μπορεί να είναι τοξοειδές (bow, μπροστά από τον Γαλαξία) ή wake (πίσω από τον Γαλαξία). Το τοξοειδές μέτωπο εμφανίζεται όταν το μέσο έχει αρκετή πίεση ώστε να το υποστηρίξει, αλλιώς θα εμφανιστεί ένα κρουστικό μέτωπο wake.

Ο Γαλαξίας μας κινείται μέσα από την μεσογαλαξιακή ύλη με παρόμοια ταχύτητα με την τοπική του ήχου (transonic), και δεν εντοπίζεται συσσώρευση μέσω κρουστικού μετώπου. Όμως η ύλη που συσσωρεύεται στον Γαλαξία (και πέφτει συνεχώς σαν βροχή σε αυτόν) αυξάνει την πυκνότητα, που με την σειρά της επιτρέπει την δημιουργία κρουστικού τόξου. Και η αναπλήρωση αερίου λόγω απώλειας αερίου από την γαλαξιακή άλω (αέριο που ξανά συσσωρεύεται στον Γαλαξία) ενισχύει την ύπαρξη κρουστικού τόξου, αν η πίεση εμβολής από τις εξωτερικές ροές και η πίεση του αερίου αναπλήρωσης είναι παρόμοιες. Σε γαλαξιακά σμήνη έχουν παρατηρηθεί τέτοια κρουστικά μέτωπα.

Ψυχρές ροές.

Το καυτό αέριο που συσσωρεύεται έχει μια χρονική καθυστέρηση για την έναρξη της αστρογέννησης, αφού πρέπει να ψυχθεί πρώτα. Όμως κάποιο από το αέριο που συσσωρεύεται είναι ήδη σχετικά ψυχρό (10000K) γιατί οι συμπυκνώσεις που δημιουργούνται με την συσσώρευση μας δείχνουν μια αστάθεια στην ψύξη. Το αέριο μπορεί να ψυχθεί και να συσσωρευτεί στον Γαλαξία μέσω νηματοειδών ροών. Τα ψυχρά ρεύματα κυριαρχούσαν σε όλες τις άλως πριν από $z > 3$, ιδίως σε γαλαξίες με ίση ή μικρότερη μάζα από τον δικό μας σήμερα. Το <χτίσιμο> της καυτής άλως αρχικά βοηθάει τις ψυχρές ροές να επιβραδύνουν κατά την συσσώρευση, αλλά γενικά η άλως κυριαρχεί και μπορεί να διακόψει την συσσώρευση. Η θεωρία των ψυχρών ροών επίσης εξηγεί την ανάπτυξη της στροφορμής στους γαλαξιακούς δίσκους. Αν υπήρχε μόνο καυτή συσσώρευση, η σκοτεινή ύλη και το αέριο θα έχαναν όλη την στροφορμή τους μέσω παλιρροϊκών ροπών με την κατανομή της γύρω ύλης. Το αέριο από το κρουστικό μέτωπο επικάθεται σε έναν δίσκο που συσσωρεύεται απαλά προς το εσωτερικό διατηρώντας την στροφορμή του. Ο δίσκος του Γαλαξία μας με εκθετικό μήκος κλίμακας (exponential scale length) 5 kpc διατήρησε στροφορμή από αέριο που κατέρρευσε σε αυτόν.

Η ψυχρή ροή θυμίζει αυτοκίνητα που μπαίνουν στον αυτοκινητόδρομο, μετατρέποντας ένα μέρος της ταχύτητας εισροής σε γωνιακή ταχύτητα. Φαίνεται να υπάρχουν 2-3 ψυχρές ροές για έναν γαλαξία σαν τον δικό μας, με την μία να είναι ιδιαίτερα ενεργή κάθε φορά. Δεν έχουμε ακόμα καθαρές αποδείξεις της ύπαρξης ψυχρών ροών, αλλά συνδυάζονται με την εκτεταμένη εκπομπή Ly α γύρω από γαλαξίες μεγάλου z , και τις γραμμές απορρόφησης σε Κβάζαρ μεγάλου z .

Θερμές ροές.

Η προσομοίωση Λ CDM (ψυχρής σκοτεινής ύλης) αποτυγχάνει στην δημιουργία ρεαλιστικών δίσκων. Οι γαλαξιακοί δίσκοι είναι λεπτοί και σχετικά εύθραυστοι, και

διαταράσσονται ή θερμαίνονται εύκολα από εισερχόμενη ύλη. Τα 2/3 ενός τυπικού δείγματος γαλαξιών είναι καθαροί δίσκοι με μικρές κεντρικές κοιλίες, αντίθετα με τους παχιούς δίσκους και τις μεγάλες κοιλίες που προκύπτουν από την παραπάνω προσομοίωση. Η προσομοίωση περιλαμβάνει υπερβολική συσσώρευση συμπυκνώσεων σκοτεινής ύλης. Το συμπέρασμα είναι ότι το αέριο πρέπει να εισέρχεται σε έναν γαλαξία <αθόρυβα>. Μια θερμή ροή μπορεί να ακολουθεί την ψυχρή ροή, όταν αυτή διαταράσσεται περνώντας από την καυτή άλω. Αυτή η διαδικασία παρατηρείται στην διατάραξη του ρεύματος του Μαγγελάνου σε καταρράχτη (cascade) κρουστικού μετώπου κατά μήκος της ροής. Το θερμό αέριο πέφτει σαν βροχή στον Γαλαξία μέσα από την άλω. Ο ρυθμός της θερμής συσσώρευσης είναι τουλάχιστον ίδιος με την συσσώρευση ψυχρού (HI). Οι ροές ιονισμένου και ουδέτερου αερίου δεν αρκούν όμως για την αστρογέννηση που παρατηρούμε σήμερα.

Συσσώρευση μέσω μεγάλων και μικρών συγχωνεύσεων. Το αέριο παρασύρεται από την σκοτεινή ύλη ή εισέρχεται μόνο του?

Μεγάλες συγχωνεύσεις.

Η ύπαρξη ψυχρού αερίου εκτός γαλαξιών συνδυάζεται πάντα με αλληλεπιδράσεις ανάμεσα σε γαλαξίες, δεν υπάρχουν ενδείξεις για ανεξάρτητο (αρχέγονο) HI. Οι μεγάλες συγχωνεύσεις και συγκρούσεις βαρυονικής και σκοτεινής ύλης είναι σημαντικές για τις γαλαξιακές συσσωρεύσεις. Η ανάλυση των αστεριών του Γαλαξία μας δείχνει ότι δεν έχει βιώσει μεγάλη συγχώνευση τα τελευταία 10 δις έτη. Υπάρχουν αποδείξεις μικρότερων συγχωνεύσεων, όπως αυτή που συμβαίνει με τα νέφη του Μαγγελάνου.

Μικρές συγχωνεύσεις.

Οι νάνοι γαλαξίες θεωρούνται η βασική πηγή βαρυονίων των γαλαξιών. Υπάρχει ισχυρή σύνδεση ανάμεσα στην συνολική μάζα των δορυφόρων γαλαξιών και το χρώμα και τον ρυθμό αστρογέννησης στους κεντρικούς γαλαξίες ενός σμήνους. Η μάζα των βαρυονίων που παρατηρούμε στους δορυφόρους υπολείπεται κατά 2 τάξεις μεγέθους της απαραίτητης για τον ρυθμό αστρογέννησης στους κεντρικούς γαλαξίες. Άρα οι δορυφόροι πρέπει να έχουν μεγάλα αποθέματα θερμού αερίου. Αυτό απογυμνώνεται από τους νάνους εύκολα μέσω της πίεσης εμβολής και καταλήγει στην άλω του Γαλαξία μας.

Συσσώρευση νεφών μεγάλης ταχύτητας.

Επιβράδυνση νεφών αερίου στην καυτή άλω. Μπορεί η πτώση ανεξάρτητων νεφών (HI) να φτάσει στον Γαλαξιακό δίσκο ή <σπάει> και γίνεται μέρος του στέμματος? Αυτό μπορεί να φανεί από την ποσότητα θερμού/ καυτού αερίου στο στέμμα, αλλά το επειδή τελευταίο έχει θερμοκρασία 2 εκατομμύρια βαθμούς, κορυφώνει την εκπομπή του στο υπεριώδες, κάνοντας δύσκολη μια τέτοια μέτρηση. Στην Γαλαξιακή άλω παρατηρούμε πολλές ροές και νέφη (HI) μεγάλης ταχύτητας (HVC, high velocity (HI) clouds). Η επιβίωση αυτών οφείλεται στο γεγονός ότι με κάποιον τρόπο επιβραδύνθηκαν στην κίνησή τους μέσα στην άλω. Ίσως να έχουν σημαντικό ρόλο τα (αρκετά άγνωστα) μαγνητικά πεδία της άλως.

Κοσμολογία κοντινού πεδίου (near field cosmology).

Ένα από τα μεγάλα προβλήματα της αστροφυσικής είναι η κατανόηση του σχηματισμού και της εξέλιξης των γαλαξιών. Η μελέτη των αρχαίων αντικειμένων του Γαλαξία αποτελεί την κοσμολογία κοντινού πεδίου. Προσπαθούμε να συνδέσουμε τα συστατικά του Γαλαξία με τα στοιχεία του πρωταρχικού νέφους που τροφοδότησε την δημιουργία αστεριών. Το μονολιθικό μοντέλο προβλέπει το ιεραρχικό χτίσιμο του Γαλαξία από την βαρυτική κατάρρευση ψυχρής σκοτεινής ύλης (ΛCDM). Σήμερα πιστεύουμε ότι υπήρξε συσσώρευση πολλών μικρότερων συμπυκνωμάτων. Τα μοντέλα περιλαμβάνουν μεγέθη όπως η πίεση του αερίου, η παραγωγή <μετάλλων>, η ψύξη και θέρμανση μέσω ακτινοβολίας και η διαδικασία αστρογέννησης. Στην ΛCDM μας είναι καλά γνωστά η πυκνότητα, οι ιδιότητες και η χωρική διασπορά της σκοτεινής ύλης. Όμως δεν μπορούμε να πετύχουμε αξιόπιστες προσομοιώσεις για την παραγωγή ορατών γαλαξιών από την βαρυονική ύλη, με την πολύπλοκη επικράτηση της σκοτεινής ύλης.

Πολλά από τα αντικείμενα παρατήρησης στον Γαλαξία συνδέονται με πολύ παλαιά γεγονότα, μεγάλου z . Η ερυθρολίσθηση $z=6$ ταιριάζει με τα παλαιότερα αντικείμενα του Γαλαξία. Χρησιμοποιούμε τις αφθονίες σε στοιχεία και τις αστρικές δυναμικές. Είδαμε σε αστέρια ταχείας κίνησης ότι όσο μειώνεται η αφθονία σε μέταλλα, αυξάνονται οι τροχιακές ενέργειες και οι εκκεντρικότητες, ενώ μειώνεται η τροχιακή στροφορμή. Τα αστέρια χαμηλής μεταλλικότητας βρίσκονται σε μια άλω που δημιουργήθηκε κατά την ταχεία κατάρρευση ενός γενικά ομοιόμορφου πρωτογαλαξιακού νέφους, αμέσως μετά τον διαχωρισμό του από την κοσμική διαστολή.

Τα σφαιρωτά σμήνη του Γαλαξία μας έχουν μεγάλο εύρος μεταλλικότητας, ανεξάρτητα την απόστασή τους από το κέντρο του Γαλαξία. Αυτό εξηγείται με το χτίσιμο της άλω σε εκτεταμένη χρονική περίοδο, από ανεξάρτητες δομές με μάζες 100 εκατομμύρια ηλιακές. Τα αστέρια της άλω, όπως και τα σφαιρωτά σμήνη, παρουσιάζουν διακύμανση ηλικίας 2-3 δις έτη. Η ιδέα του σχηματισμού των γαλαξιών μέσω ιεραρχικής συσσωμάτωσης μικρότερων αντικειμένων στο νεαρό σύμπαν μας οδηγεί στην αναζήτηση θραυσμάτων αυτών των μικρότερων δομών, βάσει μεταλλικότητας και κινηματικής.

Την παραπάνω προσέγγιση μπορούμε να την εφαρμόσουμε και σε άλλα συστατικά μέρη του Γαλαξία. Η κατανόηση του σχηματισμού του δίσκου, που φιλοξενεί τα περισσότερα βαρυόνια, είναι πολύ σημαντική.

Ένα λειτουργικό μοντέλο του σχηματισμού του Γαλαξία

Μετά την μεγάλη έκρηξη η σκοτεινή ύλη άρχισε να οδηγεί τα βαρυόνια σε τοπικές συμπυκνώσεις. Τα πρώτα αστέρια δημιουργήθηκαν από τα πρώτα μοριακά νέφη. Το σύμπαν επαναιονίστηκε μεταξύ ηλικίας 200 εκ- 2 δις έτη. Πολλοί γαλαξίες εκείνης της εποχής παρουσιάζουν ισχυρές πηγές ιονισμού στις παρατηρήσεις μας. Σε $z=10$ οι συμπυκνώσεις σκοτεινής ύλης (με την βαρυονική που τους αντιστοιχεί) ξεκόπηκαν από την συμπαντική διαστολή, σχηματίζοντας γαλαξίες. Η ΛCDM προβλέπει ότι συναθροίστηκε πρώτα η σκοτεινή άλω του Γαλαξία, η οποία μπορεί να αυξάνεται ακόμα. Σε κάποιους γαλαξίες οι πρώτες συσσωρεύσεις αερίου δημιούργησαν την αστρική κεντρική κοιλιά, την κεντρική μαύρη τρύπα, τα πρώτα αστέρια της άλως και τα σφαιρωτά σμήνη. Στον Γαλαξία και σε όμοια συστήματα η (σχετικά μικρή) κεντρική περιοχή της κοιλιάς που παρατηρούμε

σήμερα (ο δεύτερος πληθυσμός της κοιλιάς) δημιουργήθηκε αργότερα από αστέρια του εσωτερικού δίσκου. Τα πρώτα στάδια εξέλιξης του Γαλαξία σημαδεύονται από βίαια γεγονότα δυναμικής και συσσώρευσης αερίου και οδήγησαν στις μεγάλες πυκνότητες των σφαιρωτών σμηνών και στην αναλογία της μάζας της μαύρης τρύπας με την αστρική διασπορά της κοιλιάς. Η εποχή στην οποία αναπτύχθηκαν μαζί η κεντρική μαύρη τρύπα και η κοιλιά ονομάζεται χρυσή εποχή (golden age), πριν από την εποχή $z=1$, με την αστρογέννηση και την δραστηριότητα συσσώρευσης να κορυφώνονται, και στον δίσκο.

Εκείνη την εποχή υπήρχε μια αυστηρή διαβάθμιση μεταλλικότητας από την κοιλιά στην άλω. Στην κοιλιά είχαμε ταχέα ενίσχυση της μεταλλικότητας, με αποτέλεσμα να έχει σε $z=1$ ήδη την τιμή $(Fe/H)=-1$. Έτσι μπορούμε να κατανοήσουμε γιατί η κοιλιά σήμερα έχει παλαιά και παράλληλα μεγάλης μεταλλικότητας αστέρια. Τα πρώτα αστέρια της άλω με $(Fe/H)=-5$ ως $-2,5$ δημιουργήθηκαν σε πολύ εκτεταμένη ένταση (μεγάλη χρονική περίοδο) και χρονολογούνται από την εποχή του πρωτογαλαξιακού νέφους. Τα πρώτα σφαιρωτά με $(Fe/H)=-2,5$ ως $-1,5$ δημιουργήθηκαν σε παρόμοια εκτεταμένη ένταση (extended volume) από βίαιες αλληλεπιδράσεις του αερίου. Πιστεύουμε ότι πολλά σφαιρωτά σμήνη και αστέρια της άλω είναι απομεινάρια δορυφόρων γαλαξιών που είχαν ανεξάρτητη χημική εξέλιξη πριν συσσωρευτούν στον Γαλαξία μας.

Η διασπορά στην αναλογία (Fe/H) και η σχετική διασπορά των στοιχείων αποτελούν βασικό διαγνωστικό εργαλείο της εξέλιξης κάθε συστατικού μέρους του Γαλαξία. Αν έχουμε σταθερή συνιστώσα αρχικής μάζας (IMF, initial mass function) οι αφθονίες των στοιχείων μας δίνουν μια εκτίμηση του πλήθους των SNII που εμπλούτισαν την μεσοαστρική ύλη, υπολογίζοντας ότι στην διάρκεια του χρόνου παράγεται μια αυξανόμενη ποσότητα Fe από τις SNIa. Σε συγκεκριμένο όγκο αερίου σε ένα κλειστό σύστημα, μερικές μόνο SNII απαιτούνται για την τιμή $(Fe/H)=-3$, 30 με εκατό για $(Fe/H)=-1,5$ και χίλιες για να φτάσουμε την μεταλλικότητα του Ηλίου. Να σημειώσουμε ότι η σχέση (Fe/H) δεν αποτελεί κοσμικό ρολόι. Αποτελεί δείκτη συχνότητας σουπερνόβα και των συνθηκών του αερίου.

Κατά τα τελευταία στάδια της χρυσής εποχής άρχισαν να επικάθονται για πρώτη φορά βαρυόνια στον γαλαξιακό δίσκο. Μυστήριο αποτελεί ότι 1) δεν υπάρχουν αστέρια με $(Fe/H)<-2,2$ στον δίσκο και 2) ξέχωρα από όλη την δραστηριότητα στην χρυσή εποχή, τουλάχιστον το 80% των βαρυονίων επικάθησε σταδιακά στον δίσκο σε διάστημα πολλών δις ετών.

Το 10% των βαρυονίων βρίσκονται στον παχύ δίσκο με $(Fe/H)=-2,2$ ως $-0,5$, ενώ στον λεπτό δίσκο έχουμε $(Fe/H)=-0,5$ ως $+0,3$. Τα σφαιρωτά και ο παχύς δίσκος παρουσιάζουν ίδια μεταλλικότητα, αλλά διαφορετική κατανομή μεταλλικότητας (εμπλουτισμό διαφορετικών στοιχείων). Παρουσιάζουν και ταύτιση ηλικίας στα 12 δις έτη. Ίσως ισχυροί αστρικοί άνεμοι από την αστρογέννηση στην κοιλιά να εμπλούτισαν το εσωτερικό του πρωτογαλαξιακού νέφους, εξηγώντας τον εμπλουτισμό $(Fe/H)=-2$ κατά την δημιουργία των σφαιρωτών και του παχύ δίσκου.

Ενώ τα μισά από τα βαρυόνια υπήρχαν στον Γαλαξία σε $z=1$, το 90% των βαρυονίων του δίσκου επικάθησε απαλά στον λεπτό δίσκο από εκείνη την εποχή και μετά. Ο ρυθμός αστρογέννησης (star formation rate) στον δίσκο παρέμεινε σταθερός ή σημείωσε ελαφριά

μείωση. Η μεγάλη μείωση του ρυθμού αστρογέννησης που παρατηρούμε στο βαθύ πεδίο μετά την εποχή $z=1$ δεν ισχύει για την τοπική μας ομάδα.

Χρονοδιαγράμματα και <απολιθώματα>

Τα παλαιότερα αστέρια του Γαλαξία έχουν παρόμοια ηλικία με τους πιο μακρινούς γαλαξίες που παρατηρούμε. Στους γαλαξίες η κοσμική ερυθρολίσηση μας δίνει την ηλικία στην οποία τους παρατηρούμε, ενώ στα αστέρια του Γαλαξία η ανώτερες ατμόσφαιρές τους μας παρουσιάζουν <απολιθώματα> των μετάλλων της εποχής δημιουργίας των αστεριών. Και τα δύο πεδία μας βοηθάνε στην κατανόηση της δημιουργίας του Γαλαξία, ενώ το κοντινό πεδίο μας παρέχει σημαντικά χρονοδιαγράμματα εξέλιξης ανεξάρτητων αστεριών και ομάδων αστεριών.

Το μακρινό πεδίο μας παρέχει την εικόνα των γαλαξιών στις αρχικές φάσεις εξέλιξής τους. Όμως αυτοί αναλύονται δύσκολα. Γνωρίζουμε ότι σε $z=5$ οι πυρήνες των γαλαξιών έχουν αστέρια με την μεταλλικότητα του Ηλίου, που σημαίνει ότι αυτές οι περιοχές είχαν ήδη βιώσει πολλαπλά επεισόδια αστρογέννησης.

Το δυναμικό χρονοδιάγραμμα μιας γωνιακής απόστασης 100 kpc είναι της τάξης μερικών δις ετών, που σημαίνει ότι η ανάμειξη ύλης είναι πολύ αργή. Έτσι αναμένουμε να ανιχνεύσουμε σε μεγάλη κλίμακα δυναμικά και χημικά ίχνη του παρελθόντος, αν και πέρασε πολύς καιρός από τις συγχωνεύσεις με τον Γαλαξία μας.

Η χρονολόγηση των αστεριών

Η χρονολόγηση των αστεριών είναι σημαντική για την μέτρηση του ιστορικού αστρογέννησης και την κατανόηση της εξέλιξης της δυναμικής και της μεταλλικότητας διαφορετικών αστρικών ομάδων. Για παράδειγμα, πως εξελίχθηκε ο ρυθμός αστρογέννησης, η κινηματική και η μεταλλικότητα στον λεπτό δίσκο κοντά στον Ήλιο τα τελευταία 10 δις έτη? Αποδείξεις που βασίζονται στις ηλικίες των χρωμοσφαιρών των αστεριών μας δείχνουν ότι ο ρυθμός αστρογέννησης στον λεπτό δίσκο στην ηλιακή γειτονιά παραμένει σταθερός τα τελευταία 10 δις έτη με επεισοδιακές αυξομειώσεις ως και κατά παράγοντα 2. Η μέτρηση της αστρικής ηλικίας περιέχει αρκετή αβεβαιότητα.

Η μέτρηση της ηλικίας ενός αστεριού μέσω της ραδιενεργούς διάσπασης ονομάζεται κοσμοχρονομετρία. Χρησιμοποιούμε ζεύγη στοιχείων όπως τα (Rb) και (Sr). Το ισότοπο (^{87}Rb) διασπάται σε (^{87}Sr) και αυτό σε (^{86}Sr), ένα σταθερό ισότοπο. Το (^{87}Rb) έχει χρόνο ημιζωής 47,5 δις έτη. Το πρόβλημα είναι ότι δεν γνωρίζουμε την αρχική ποσότητα του ισότοπου στο αστέρι. Υποθέτουμε μια σχετική αναλογία με άλλα μέταλλα, βάσει μοντέλων. Χρησιμοποιούνται και άλλα ισότοπα στοιχείων όπως το Ουράνιο και το Φθόριο και τα συγκρίνουμε με σταθερά στοιχεία ταχείας διαδικασίας σύντηξης σε SNII (r process).

Εφαρμόζονται και άλλοι μέθοδοι άμεσης μέτρησης της ηλικίας μεμονωμένων αστεριών. Μια σημαντική είναι η αστροσεισμολογία, που βασίζεται στην μέτρηση συχνότητας της αστρικής ταλάντωσης. Αυτή εξαρτάται από την διασπορά πυκνότητας στο αστρικό εσωτερικό, που μεταβάλλεται με την ηλικία του αστεριού. Για τον Ήλιο αυτή η μέθοδος μας έδωσε πολύ μεγάλη ακρίβεια, σε σύγκριση με την ηλικία που προκύπτει από την

χρονολόγηση των μετεωριτών. Αυτή η μέθοδος εφαρμόζεται στα αστέρια κύριας ακολουθίας. Μια άλλη μέθοδος είναι η φωτομετρική μέτρηση της περιστροφής του αστεριού, που επιβραδύνεται με την ηλικία (γυροχρονολόγηση). Άλλες μέθοδοι είναι το αμυδρότερο άκρο της λαμπρότητας των λευκών νάνων (9 δις έτη), το σημείο αποκοπής στο διάγραμμα H/R (κυρίως για τον κλάδο των υπογιγάντων) και η σχέση λαμπρότητας/ ηλικίας των μεταβλητών RR Lygae. Για τα σμήνη εφαρμόζουμε το σημείο αποκοπής και το διάγραμμα χρώματος/λαμπρότητας αν είναι γνωστή η αναλογία (Fe/H). Η ηλικία του γηραιότερου μέρους του λεπτού δίσκου είναι περίπου 9 δις έτη, κάτι που ταιριάζει στην εποχή $z=1$.

Ο στόχος της κοσμολογίας κοντινού πεδίου.

Ο μεγαλύτερος στόχος μας είναι η ταύτιση ανεξάρτητων αστεριών με στοιχεία από το πρωτογαλαξιακό νέφος. Μερικά αστέρια παρουσιάζουν κινήσεις που τα συνδέουν με το νέφος. Τα συστατικά μέρη του Γαλαξία εξελίχτηκαν διαφορετικά. Ο δίσκος, σε σχέση με την άλω, έχει διαφοροποιηθεί (διασκορπιστεί, dissipate) πολύ. Η κοιλιά διαφοροποιήθηκε μόνο μερικώς.

Οι δομές του Γαλαξία.

Ο Γαλαξίας μας είναι τύπου Sbc, σπειροειδής με μικρή μπάρα (ράβδο). Όμοιοι γαλαξίες είναι ο NGC 981 (τον βλέπουμε στην κόψη) και οι NGC 3124, NGC 3992, NGC 2336 (όλοι μας δείχνουν τις σπείρες τους). Υπάρχει διχογνωμία αν ο Γαλαξίας μας έχει 2 ή 4 βραχίονες και αν αυτοί είναι συμμετρικοί. Οι δομές του εμφανίστηκαν σε διαφορετικά στάδια της γαλαξιακής εξέλιξης. Έχει την κεντρική κοιλιά με την μπάρα, τον λεπτό δίσκο, τον παχύ δίσκο και την εκτεταμένη άλω. Γύρω του αναπτύσσεται το κουκούλι της σκοτεινής ύλης.

Η κοιλιά

Παρατηρούμε γαλαξίες με μεγάλη κοιλιά M104 (), αλλά και χωρίς ορατή κοιλιά (IC5249). Η κοιλιά του πρώτου γαλαξία είναι χημικά και δομικά πιο όμοια με την κοιλιά του δικού μας. Η επιφανειακή διασπορά λαμπρότητας του M104 ακολουθεί τον νόμο του $\frac{1}{4}$ από την ακτίνα (ανάλογη μείωση λαμπρότητας από το κέντρο προς τα έξω), και η αναλογίες (Fe/H) και (Mg/Fe) είναι όμοιες με αυτές του Γαλαξία μας. Αυτές οι ιδιότητες μας οδηγούν στο συμπέρασμα ότι η μεγάλη κοιλιά σχηματίζεται γρήγορα. Οι μικρές κοιλίες έχουν συνήθως σχήμα κουτιού με πιο εκθετική διασπορά επιφανειακής λαμπρότητας. Πιστεύουμε ότι προέρχονται από αστάθειες του αστρικού δίσκου.

Οι κοιλίες των σπειροειδών γαλαξιών φαίνεται να έχουν μεγάλη ηλικία, βάσει χρονολόγησης από αστέρια τύπου RR Lygae και του διαγράμματος χρώματος/ λαμπρότητας της κοιλιάς. Οι αφθονίες σε (Fe/H) = 0,25 των ερυθρών γιγάντων είναι πιο κοντά σε αυτές των παλαιότερων άστρων του δίσκου παρά σε αυτές των παλαιών και φτωχών σε μέταλλα αστεριών της άλως και των σφαιρωτών. Σύμφωνες είναι και οι μετρήσεις στα πλανητικά νέφη της κοιλιάς.

Η κοιλιά του Γαλαξία έχει λίγο το σχήμα του κουτιού. Αν τέτοιες κοιλίες προέρχονται πράγματι από αστάθειες του δίσκου, τότε χάθηκαν από τον δίσκο πολλές πληροφορίες για

την αρχική φάση εξέλιξης του Γαλαξία, στην διάρκεια σχηματισμού του δίσκου και της κοιλιάς. Ενώ οι περισσότεροι λαμπροί σπειροειδείς γαλαξίες παρουσιάζουν κοιλιά, πολλοί αμυδροί όχι. Ο σχηματισμός κοιλιάς δεν αποτελεί απαραίτητο στοιχείο της γαλαξιακής εξέλιξης των σπειροειδών γαλαξιών.

Οι γαλαξιακές κοιλίες έχουν μεγάλη ποικιλία, με ακραία την κοιλιά του M104, που πρέπει να προέρχεται από μεγάλες συγχωνεύσεις. Αυτού του είδους κοιλίες έχουν όμοιες ιδιότητες δομών, δυναμικής και πληθυσμού με τους ελλειπτικούς γαλαξίες. Στο άλλο άκρο είναι οι γαλαξίες μόνο με δίσκο που δεν παρουσιάζουν κοιλιά. Οι μικρότερες κοιλίες σαν του Γαλαξία μας συνδέονται με δομές ράβδου και δημιουργούνται από τον δίσκο μέσω της ανάπτυξης της ράβδου, του λυγίσματός (παραμόρφωση) της και των ασταθειών της.

Υπάρχουν και ψευδο-κοιλίες που αποτελούν συμπυκνώσεις και φαίνονται σαν κοιλίες, ενώ βρίσκονται στον δίσκο. Πρόκειται για κοσμικές διαδικασίες μεταφοράς στροφορμής και ανακατάταξης της διασποράς επιφανειακής πυκνότητας στον δίσκο.

Οι κοιλίες φαίνεται να προέρχονται από αστάθειες του δίσκου παρά από κατάρρευση ύλης. Αποτελεί μυστήριο πως τα τεράστια πρωτογαλαξιακά νέφη σκοτεινής ύλης μπορεί να δημιούργησαν δίσκους χωρίς να καταρρεύσει ύλη στην κοιλιά. Η κοιλιά του Γαλαξία προέρχεται από μεγάλη σύγκρουση ή από αστάθεια του δίσκου και της ράβδου? Η απάντηση βρίσκεται στην περιστροφή της κοιλιάς. Το πεδίο περιστροφής των κοιλιών-κουτιών σαν του Γαλαξία μας είναι χαρακτηριστικά κυλινδρικό (η ταχύτητα περιστροφής είναι χονδρικά σταθερή με το ύψος πάνω από το γαλαξιακό επίπεδο). Αυτό το παρατηρούμε σε προσομοιώσεις και στην Γαλαξιακή κοιλιά. Στον Γαλαξία μας μετρήθηκε η μορφολογία της περιστροφής της κοιλιάς από πολλά ανεξάρτητα αστέρια της.

Τα αστέρια της Γαλαξιακής κοιλιάς εμφανίζονται γερασμένα και εμπλουτισμένα σε στοιχεία α. Ο εμπλουτισμός σε στοιχεία α παραπέμπει σε γρήγορη χημική εξέλιξη, σε διάστημα μικρότερο από 1 δις έτη. Ο σχηματισμός και το λύγισμα της ράβδου χρειάζονται μερικά δις έτη για να διαμορφωθούν, μετά την επικάθηση του δίσκου. Το λύγισμα (buckling) της ράβδου σημαίνει ότι η κοιλιά είναι νεαρότερη από κάποια αστέρια που παρατηρούμε σήμερα σε αυτήν (δημιουργήθηκαν πριν τον σχηματισμό της κοιλιάς), και ότι αποτελούσε μέρος του εσωτερικού δίσκου. Ο εμπλουτισμός της κοιλιάς σε στοιχεία α προέρχεται από ταχέα αστρογέννηση και χημική εξέλιξη που συνέβη στον εσωτερικό δίσκο πριν εκδηλώσει αστάθεια.

Η προσομοίωση ΛDCM μας δείχνει ότι τα πρώτα αστέρια του Γαλαξία μας σχηματίστηκαν στις πιο πυκνές περιοχές της διασποράς μάζας σε $z=12$, πολύ νωρίτερα από την διαμόρφωση του Γαλαξία. Όταν σχηματίστηκε ο Γαλαξίας, τα πρώτα αστέρια συγκεντρώθηκαν προς το κέντρο του και κατοίκησαν την κοιλιά του. Δεν είναι τα πιο φτωχά σε μέταλλα αστέρια του Γαλαξία λόγω ταχείας χημικής εξέλιξης στην πυκνή αυτή περιοχή. Η εσωτερική, σχήματος κουτιού ράβδος φαίνεται να είναι εμβαπτισμένη σε μια πιο μακριά ράβδο, με τους 2 άξονές τους να μην είναι ευθυγραμμισμένοι (αυτό εξηγεί το σχήμα του κουτιού). Η <μεγάλη> ράβδος έχει διαστάσεις $8 \times 1,2 \times 0,2$ kpc και κλίση 45 μοίρες στην γραμμή θέασής μας προς το Γαλαξιακό κέντρο. Ένα επιχείρημα ενάντια στην ύπαρξη της μεγάλης ράβδου είναι η μέχρι τώρα απουσία κινηματικής υπογραφής της στην γειτονιά του Ηλίου.

Ο δίσκος

Σε μερικούς edge-on γαλαξίες όπως οι NGC 4762, IC 5249 ο εκθετικός λεπτός δίσκος με κάθετο ύψος 300 pc αποτελεί το πιο εμφανές μέρος τους. Πιστεύουμε ότι ο λεπτός δίσκος αποτελεί το τελικό προϊόν της απαλής διάλυσης της αρχέγονης συγκέντρωσης βαρυονίων και περιέχει σχεδόν όλη την βαρυονική στροφορμή. Η ηλικία του γηραιότερου πληθυσμού του Γαλαξιακού δίσκου εκτιμάται στα 10- 12 δις έτη από ραδιοχρονολόγηση, την ψύξη των λευκών νάνων και ισόχρονες για ανεξάρτητα αστέρια και αστρικά σμήνη.

Οι δίσκοι αποτελούν το σημαντικότερο αστρικό τμήμα των σπειροειδών γαλαξιών. Η κατανόηση της δημιουργίας τους αποτελεί τον σημαντικότερο στόχο για την κατανόηση του σχηματισμού των γαλαξιών. Πολλοί σπειροειδείς γαλαξίες παρουσιάζουν έναν δευτερεύον αμυδρό δίσκο με μεγάλο πάχος (1 kpc), γνωστό ως παχύ δίσκο. Η λαμπρότητά του σχετικά με τον λεπτό δίσκο κυμαίνεται, με τον παχύ δίσκο του Γαλαξία μας να έχει μεγάλο πάχος (1 kpc), τριπλάσιο από αυτό του λεπτού δίσκου, και 10% από την λαμπρότητα του λεπτού. Ο αστρικός πληθυσμός του παχύ δίσκου είναι γηραιότερος των 12 δις ετών και σημαντικά φτωχότερος σε μέταλλα από τα αστέρια του λεπτού δίσκου. Πιστεύουμε ότι προέρχεται από την θέρμανση του αρχικού αστρικού δίσκου μέσω συσσώρευσης ή μικρών συγχωνεύσεων.

Ο παχύς δίσκος αποτελεί σημαντικό γαλαξιακό συστατικό για την μελέτη ιχνών από τον σχηματισμό του Γαλαξία επειδή παρουσιάζεται σαν αρχαίο στιγμιότυπο του αρχικού, θερμασμένου δίσκου. Όπως ισχύει για την κοιλιά, ο παχύς δίσκος δεν είναι απαραίτητο συστατικό της γαλαξιακής εξέλιξης.

Η αστρική άλως

Η Γαλαξιακή άλως αποτελεί ένα τεράστιο πεδίο μελέτης της εποχής που κατέρρευσε η σκοτεινή ύλη σε δομές και δημιουργήθηκαν οι πρωτογαλαξίες. Η άλως περιλαμβάνει αστέρια (έχουμε ανακαλύψει εκεί τα αρχαιότερα αστέρια του Γαλαξία), σφαιρωτά σμήνη, σφαιροειδείς νάνους γαλαξίες, αστρικά ρεύματα (από διαλυμένους νάνους γαλαξίες) και δορυφόρους νάνους γαλαξίες. Η άλως δεν ορίζεται εύκολα, μιας και αποτελείται από διακριτά υποσύνολα με διαφορετικές κινηματικές. Περιέχει μόλις το 1% της συνολικής αστρικής Γαλαξιακής μάζας και έχει ελάχιστη λαμπρότητα. Συνήθως οι άλως των άλλων γαλαξιών δεν ξεχωρίζουν από το διάχυτο φως.

Η μικρής μεταλλικότητας άλω είναι σημαντική για την μελέτη της δημιουργίας του Γαλαξία επειδή έχει μεγάλη ηλικία και περιλαμβάνει μερικά από τα πρώτα Γαλαξιακά αντικείμενα. Ο σχηματισμός της πρέπει να διάρκεσε μερικά δις έτη. Υπολογίζουμε μια ηλικία κοντά στα 12 δις έτη. Αντίθετα με την κοιλιά και τον δίσκο, παρουσιάζει σχεδόν μηδενική στροφορμή. Υποστηρίζεται σχεδόν αποκλειστικά από την διασπορά ταχυτήτων.

Η Γαλαξιακή άλως σχηματίστηκε, τουλάχιστον εν μέρει, από την συσσώρευση φτωχών σε μέταλλα νάνων γαλαξιών που είχαν ανεξάρτητη χημική εξέλιξη ο καθένας τους, πριν συγχωνευτούν με τον Γαλαξία μας. Αν και ακόμα παρατηρούμε τέτοιες συγχωνεύσεις (χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η παλιρροϊκή διαταραχή του νάνου του Τοξότη) οι περισσότερες συγχωνεύσεις πρέπει να σημειώθηκαν πριν από πολύ καιρό. Οι

συσσωρεύσεις θα θέρμαιναν τον λεπτό δίσκο, άρα η παρουσία κυρίαρχου λεπτού δίσκου στον Γαλαξία σημαίνει ότι το χτίσιμο της άλως πρέπει να συνέβη την εποχή του σχηματισμού του παχύ δίσκου, περίπου πριν 12 δις έτη.

Από όλα τα συστατικά μέρη του Γαλαξία η άλως προσφέρεται περισσότερο για την μελέτη του σχηματισμού της. Μπορούμε να ανιχνεύσουμε ομάδες αστεριών της με κοινή προέλευση (από τον ίδιο νάνο γαλαξία). Η άλως περιέχει μόνο τα υπολείμματα μικρών αστρικών δομών που συσσωρεύτηκαν στον Γαλαξία. Οι πληροφορίες που παίρνουμε αφορούν περισσότερο την χημική εξέλιξη των νάνων γαλαξιών παρά την εξέλιξη του Γαλαξία. Από την άλλη, η προσομοίωση Λ CDM προβλέπει την ύπαρξη πολύ περισσότερων νάνων από αυτούς που παρατηρούμε. Έχει ενδιαφέρον να μπορέσουμε να καθορίσουμε τον αριθμό των νάνων που συσσωρεύτηκαν στον Γαλαξία μας.

Δεν πρέπει να ξεχνάμε ότι η άλως περιέχει μόνο ένα ελάχιστο ποσοστό από την βαρυονική ύλη του Γαλαξία και η δυναμική της διαφέρει από αυτήν του υπόλοιπου Γαλαξία. Περιέχει πληθυσμούς με διαφορετική χημική αφθονία και με διαφορετικές ιδιότητες περιστροφής, και αντίθετης φοράς. Η άλως του Γαλαξία δεν είναι αντιπροσωπευτική, στον γαλαξία της Ανδρομέδας η άλως είναι πιο πλούσια σε μέταλλα, αλλά περιέχει και αστέρια πολύ χαμηλής μεταλλικότητας.

Η σκοτεινή άλως

Η σκοτεινή άλως ανιχνεύεται μόνο μέσω του βαρυτικού της πεδίου. Περιέχει τουλάχιστον το 90% της μάζας του Γαλαξία. Η πυκνότητά της αυξάνεται αρχικά και μετά μειώνεται απότομα μετά από κάποιο όριο. Στην περιοχή του Ηλίου έχει πυκνότητα 0,008 ηλιακές μάζες/pc³, ενώ η βαρυονική έχει 0,01 ηλ. μάζες/pc³.

Πιστεύουμε ότι η Γαλαξιακή σκοτεινή άλως έχει σφαιρικό σχήμα και είναι τριαξονική. Οι νάνοι γαλαξίες που συγχωνεύονται στους μεγαλύτερους και δεν διαλύονται βαρυτικά μέχρι να φτάσουν στον δίσκο αποθέτουν σε αυτόν αστέρια και σκοτεινή ύλη. Αυτή η σκοτεινή ύλη δεν ανιχνεύεται, αλλά είναι σημαντική για την αναλογία της με την βαρυονική στο εσωτερικό των γαλαξιών.

Η αστρική μάζα του Γαλαξία εκτιμάται στο 3% της συνολικής. Η σκοτεινή ύλη έχει κυρίαρχο ρόλο στον σχηματισμό των γαλαξιών. Η σκοτεινή άλως συνεχίζει να επηρεάζει την εξέλιξη του γαλαξιακού δίσκου.

Οι υπογραφές (ίχνη) του σχηματισμού του Γαλαξία

Υπογραφές μηδενικής τάξης (zero order). Πληροφορίες από την εποχή εξισορρόπησης (virialization) της σκοτεινής ύλης.

Κατά την φάση εξισορρόπησης (πίεσης και βαρύτητας) της ύλης των πρώτο- γαλαξιών χάθηκε πολύ πληροφορία από την δημιουργία τους. Η εποχή αυτή κυριαρχείται από γαλαξιακές συγχωνεύσεις. Η συνολική βαρυονική και σκοτεινή μάζα διατηρήθηκε, όπως και η στροφορμή. Διατηρήθηκε και η πυκνότητα του περιβάλλοντος, αφού ο Γαλαξίας

εξελίχτηκε μέσω συγχωνεύσεων και απέμεινε ένα περιβάλλον (εκτός του Γαλαξία) μικρής πυκνότητας.

Υπογραφές από το περιβάλλον

Η τοπική πυκνότητα σε γαλαξίες (και ειδικά το πλήθος των μικρών δορυφόρων γαλαξιών εκείνης της εποχής) επηρέασε τις επιπτώσεις μεταγενέστερων αλληλεπιδράσεων. Υπάρχουν αποδείξεις παλαιότερων και σημερινών συσσωρεύσεων μικρών γαλαξιών στον Γαλαξία και στον γαλαξία της Ανδρομέδας. Ο λεπτός δίσκος των σπειροειδών γαλαξιών επικάθεται χάρη στην εξισορρόπηση της σκοτεινής ύλης. Η σημερινή μορφολογία του λεπτού δίσκου εξαρτάται από το πλήθος των νάνων που συσσωρεύτηκαν. Οι γαλαξίες με πολύ λεπτό δίσκο βίωσαν λίγες συγχωνεύσεις νάνων. Ο σχηματισμός του παχύ δίσκου σχετίζεται με ένα διακριτό γεγονός (συγχώνευση ή μαζική εισροή ύλης) που εμφανίστηκε αμέσως μετά το ξεκίνημα της επικάθησης του δίσκου, όταν είχε σχηματιστεί το 10% των αστεριών του δίσκου. Σε περιβάλλοντα χαμηλής πυκνότητας, άρα και χωρίς τέτοια γεγονότα, δεν παρουσιάζεται σχηματισμός παχύ δίσκου. Από την εποχή σχηματισμού του παχύ δίσκου, ο γαλαξιακός δίσκος παραμένει σχετικά ανεπηρέαστος από συγχωνεύσεις. Αυτό είναι σύμφωνο με τα παρατηρησιακά δεδομένα που μας δείχνουν ότι μόλις το 10% των φτωχών σε μέταλλα αστεριών της άλως προέρχονται από σύγχρονες συσσωρεύσεις δορυφόρων.

Η ύπαρξη και η δομή της άλως του Γαλαξία εξαρτώνται από την συσσώρευση μικρών δορυφόρων. Αυτή πρέπει να συνέβη αφού επικάθησε λίγο-πολύ ο δίσκος από αέριο. Έτσι βλέπουμε ξανά ότι το περιβάλλον του πρωτογαλαξία άφησε την υπογραφή του με την ύπαρξη της άλως και τις υπό-δομές της.

Υπογραφές από συμπαντικές ποσότητες.

Κατά τον σχηματισμό ενός γαλαξία χάνεται βαρυονική ύλη από το σύστημα, μέσω πίεσης εμβολής (ram pressure) και γαλαξιακών ανέμων. Τα περισσότερα από τα απομεινάντα βαρυόνια απαρτίζουν σήμερα το λαμπρό μέρος του Γαλαξία. Η συνολική στροφορμή της σκοτεινής άλως επηρεάζει το σχήμα του Γαλαξία και κατ'επέκταση την δομή του δίσκου. Για παράδειγμα, οι παραμορφώσεις –στρεβλώσεις (warps) μπορεί να οφείλονται σε μη ευθυγράμμιση της στροφορμής της σκοτεινής ύλης με αυτή της βαρυονικής. Η σκοτεινή ύλη μπορεί να έχει τριαξονική δομή. Οι ελλειπτικοί και οι σπειροειδείς γαλαξίες έχουν την ίδια σχέση στροφορμής/μάζας. Οι ελλειπτικοί φαίνεται να έχουν μικρότερη κατά μια τάξη μεγέθους σχέση από τους σπειροειδείς, αλλά σε αυτούς η στροφορμή παρουσιάζεται πιο έντονη στις εξωτερικές περιοχές τους, δείχνοντάς μας ότι αυτή απλά επαναπροσδιορίστηκε στην μετάβαση από σπειροειδή σε ελλειπτικό.

Ο εντυπωσιακός νόμος Tully- Fisher αφορά μια σχέση ανάμεσα στο πλάτος της φασματικής γραμμής (HI), που μας δίνει την ταχύτητα της περιστροφής του γαλαξία, και της λαμπρότητας στο οπτικό του γαλαξιακού δίσκου (άρα και της μάζας του). Αυτό το μέγεθος καθορίστηκε στους γαλαξίες μετά την εξισορρόπηση (virialization) της άλως, έτσι η σχέση αυτή αποτελεί ένα αρχικό ίχνος- υπογραφή του σχηματισμού κάθε γαλαξία.

Υπογραφές από την εσωτερική διασπορά της στροφορμής.

Η εσωτερική διασπορά της στροφορμής των βαρυονίων καθορίζει κατά μεγάλο βαθμό το σχήμα της επιφανειακής λαμπρότητας του δίσκου που περιστρέφεται μέσα στην σκοτεινή άλω. Έτσι η αρχική διασπορά στροφορμής και μάζας στους αρχέγονους σπειροειδείς γαλαξίες καθορίζει την διασπορά πυκνότητας που παρατηρούμε σήμερα σε αυτούς. Υπάρχουν όμως πολλές διαδικασίες που μπορεί να επαναπροσδιορίσουν την εσωτερική στροφορμή χωρίς να επηρεάσουν την σχέση στροφορμής/ μάζας, όπως η ανάπτυξη ράβδου, οι σπείρες και το εσωτερικό ιξώδες.

Η μέγιστη τιμή της στροφορμής των βαρυονίων μπορεί να σχετίζεται με την περικοπή (truncation) του οπτικού δίσκου που παρατηρούμε. Οι περικομμένοι δίσκοι μπορεί να αποτελούν σημαντικές υπογραφές των ιδιοτήτων της στροφορμής του πρωτογαλαξιακού νέφους, αλλά μπορεί να σχετίζονται με την κρίσιμη πυκνότητα της αστρογέννησης ή την δυναμική εξέλιξη ενός γαλαξία. Ομοίως, σε γαλαξίες με πολύ εκτεταμένο (HI), τα όρια της διασποράς του μπορούν να μας δώσουν μέτρηση της μέγιστης στροφορμής στο πρωτογαλαξιακό νέφος. Από την άλλη, μπορεί το εξωτερικό (HI) να συσσωρεύτηκε για τον σχηματισμό των αστεριών του δίσκου, ή το όριο του (HI) απλά να αντιπροσωπεύει την μετάβαση σε ιονισμένο δίσκο.

Αυτό δείχνει την σημασία να κατανοήσουμε τι συμβαίνει στον εξωτερικό δίσκο. Αυτός μας προσφέρει μια σημαντική διάγνωση για τις ιδιότητες του πρωτογαλαξία. Υπάρχουν πολλές αβεβαιότητες για την σημασία α) της διακύμανσης των ορίων του λαμπρού γαλαξιακού μέρους και της διασποράς (HI), β) της κλιμάκωση της ηλικίας που προκύπτει από το ολοκληρωμένο φως του δίσκου, αλλά όχι από τα ανοιχτά σμήνη του γαλαξιακού δίσκου και γ) ότι ο εξωτερικός δίσκος είναι μεν νεαρότερος από τα άλλα μέρη του Γαλαξία αλλά δεν έχει δημιουργηθεί πρόσφατα, κάτι που σημαίνει ότι δεν υπάρχει απόδειξη ότι ο δίσκος συνεχίζει να μεγαλώνει. Είναι πιθανόν το όριο του δίσκου να σχετίζεται με την στροφορμή των βαρυονίων στο πρωτογαλαξιακό νέφος ή με την διαδικασία σχηματισμού του δίσκου.

Υπογραφές από την ιεραρχία που προβλέπει η Λ CDM

Αυτή η προσομοίωση προβλέπει μεγάλη κλίμακα υπό- δομών στους σπειροειδείς γαλαξίες, σε αντίθεση με τις παρατηρήσεις. Οι αρχικές προσομοιώσεις προέβλεπαν ότι οι μικρές συγχωνεύσεις ισοπεδώνουν τις υπό- δομές. Η μη ανίχνευση αυτών των δομών οφείλεται στην χαμηλή ανάλυση μάζας και χώρου. Πρόσφατες προσομοιώσεις προβλέπουν 500 τουλάχιστον μικρής μάζας δορυφόρους σε 300 kpc ακτίνα από την περιοχή επιρροής του Γαλαξία. Αυτό το πλήθος είναι κατά μία μονάδα μεγέθους μεγαλύτερο από ότι παρατηρούμε στην τοπική μας ομάδα. Παρατηρούμε 40 μικρής μάζας γαλαξίες και υπολογίζουμε σε άλλους 20 που δεν φαίνονται λόγω μικρού Γαλαξιακού ύψους (κρύβονται πίσω από το κέντρο του Γαλαξία). Αυτοί οι νάνοι μπορεί να είναι πολύ αμυδροί επειδή έχουν απολέσει μεγάλο μέρος της βαρυονικής ύλης τους από ανέμους των σουπερνόβα. Αυτή η ιδέα υποστηρίζεται από το γεγονός ότι οι άλως των γαλαξιακών ομάδων στις ακτίνες X (καυτή μεσογαλαξιακή ύλη) παρουσιάζονται ενισχυμένες σε μεταλλικότητα. Ακόμα, οι περισσότεροι νάνοι γαλαξίες μπορεί, λόγω φωτιοιονισμένου υποβάθρου, να μην κατάφεραν να συσσωρεύσουν αρκετή βαρυονική ύλη ώστε να έχουν ουσιαστική αστρογέννηση. Αυτό ισχύει για μικρής μάζας γαλαξίες με γωνιακή ταχύτητα ως 30 km/s, και οι υπόλοιποι, δηλαδή αυτοί που παρατηρούμε χάρη στην βαρυονική μάζα τους, να

ξεπέρασαν αυτήν την ταχύτητα ή να συσώρευσαν αρκετό ουδέτερο υδρογόνο πριν τον επαναιονισμό.

Προτάθηκε οι HVC (high velocity clouds), πληθυσμός νέφους μεγάλης ταχύτητας αερίου (HI) να συνδέεται με σκοτεινές μίνι άλως σε κλίμακα Mpc στην τοπική ομάδα. Αυτές οι μίνι άλως μπορεί να αντιπροσωπεύουν τους χαμένους νάνους και τα αρχικά δομικά στοιχεία της τοπικής ομάδας. Οι περισσότερες HVC βρίσκονται όμως μέσα σε 50 kpc και όχι σε απόσταση Mpc, πολύ κοντά ώστε να συνδέονται με μίνι άλως.

Υπογραφές πρώτης γραμμής (first order). Πληροφορίες από την εποχή της κύριας βαρυονικής αποσύνθεσης.

Η δομή του Γαλαξιακού δίσκου

Η κατανόηση της εξέλιξης των δίσκων εξαρτάται από το πώς εξελίχθηκε η διασπορά της εσωτερικής στροφορμής κατά την αποσύνθεση του δίσκου και της ανάπτυξης και λύσης δομών όπως οι μπάρες και οι σπείρες. Και το ιζώδες μπορεί να επηρέασε της στροφορμή. Η συνολική δομή ενός δίσκου καθορίζεται από την κεντρική επιφανειακή λαμπρότητα και το γωνιακό μήκος του. Αν η στροφορμή παραμένει γενικά σταθερή, τότε οι καθολικοί παράμετροι του δίσκου (το κλιμακωτό μήκος, η κεντρική επιφανειακή λαμπρότητα και η σχέση T-F (Tully- Fisher)) αποτελούν απομεινάρια της κύριας εποχής βαρυονικής αποσύνθεσης.

Τα χωρικά όρια των δίσκων μπορεί να περιέχουν πληροφορίες για σημαντικές φυσικές διεργασίες. Όμως πρόσφατα είδαμε ότι δεν υπόκεινται όλοι οι γαλαξιακοί δίσκοι περικοπή (truncation) που υποτίθεται μας πληροφορεί για τις ιδιότητες του πρωτογαλαξιακού νέφους, αλλά μερικοί δεν δείχνουν τέτοια διακοπή του δίσκου, όπως ο NGC300. Φαίνεται βασικό ρόλο στην περικοπή του δίσκου να έχει το κατώφλι αστρογέννησης.

Μπορούν να μας παρουσιάσουν αρχέγονες πληροφορίες οι δίσκοι?

Θα υποθέσουμε κάθετες και γωνιακές αρχέγονες κλίσεις στους δίσκους, βασικά της αφθονίας στοιχείων και της ηλικίας. Αναμένουμε πολλές από τις πληροφορίες να έχουν υποβαθμιστεί μέσω της δυναμικής εξέλιξης και της γωνιακής μείξης του δίσκου.

Στους σπειροειδείς χρησιμοποιούμε διάφορους μηχανισμούς εκτίμησης κλίσεων. Α) η γωνιακή διακύμανση της απόδοσης μέσω της παραγωγής μεταλλικότητας από τα αστέρια ή της συνιστώσας αρχικής μάζας. Β) Μια γωνιακή διακύμανση του χρονοδιαγράμματος της αστρογέννησης. Γ) Μια γωνιακή διακύμανση του χρονοδιαγράμματος της εισροής αερίου στον δίσκο.

Τα περισσότερα αστέρια δημιουργούνται σε μεγάλα σμήνη με εκατοντάδες ή χιλιάδες μέλη. Μερικά σμήνη παραμένουν ενωμένα για δις έτη, ενώ τα περισσότερα διαλύονται αμέσως μετά την αρχική αστρογέννηση. Όταν διαλυθεί ένα σμήνος, κάθε αστέρι δέχεται μια τυχαία ώθηση μέσω της κοινής κίνησης του σμήνος. Έτσι τα αστέρια σκεδάζονται σε παροδικούς γαλαξιακούς βραχίονες και άλλες αστρικές συναθροίσεις.

Αυτές οι διαταραχές επιτρέπουν σε ένα αστέρι να μεταναστεύσει στον Γαλαξία. Διανύει μια τυχαία διαδρομή. Το αστέρι κινείται από την μία κυκλική περιφορά σε μια άλλη, προς τα μέσα ή προς τα έξω, με απόσταση 2kpc. Υπόκειται σε σημαντικές μεταβολές της στροφορμής του. Η κάθετη διασπορά γωνιακής του ταχύτητας αυξάνεται με τον χρόνο. Παρατηρούμε αυτή την σχέση της διασποράς κάθετης ταχύτητας μέχρι την ηλικία των 3 δις ετών, τα παλαιότερα αστέρια του δίσκου δείχνουν διασπορά ταχύτητας ανεξάρτητη από την ηλικία τους. Έτσι η κάθετη δομή εξαρτάται από τον πληθυσμό ηλικίας μέχρι 3 δις έτη.

Όσο αυξάνεται το εύρος της τυχαίας κίνησης τα αστέρια γίνονται λιγότερο ευάλωτα στο να επηρεαστούν από κύματα συμπυκνώσεων των σπειρών. Υπάρχουν ανοιχτά σμήνη που ξεπερνούν σε ηλικία τα 10 δις έτη και περιέχουν σημαντικές πληροφορίες. Και τα παλαιά και τα νέα σμήνη βρίσκονται στον λεπτό δίσκο.

Ένα 4% των αστεριών του δίσκου είναι πολύ πλούσια σε μέταλλα σε σχέση με τις Υάδες (αντιπροσωπευτικό νεαρό σμήνος). Τα αστέρια μέσης ηλικίας των Υάδων φαίνεται να σχηματίστηκαν μερικά kpc εσωτερικά του Ηλίου από εμπλουτισμένο αέριο. Τα παλαιότερα φαίνεται να προέρχονται από το Γαλαξιακό κέντρο, οι ιδιόμορφες κινηματικές τους και η μετανάστευση προς τα έξω μπορεί να σχετίζονται με την κεντρική μπάρα.

Συνοπτικά, δεν αναμένουμε πολλές πληροφορίες από τον δίσκο. Αυτό προκύπτει και από παρατηρήσεις του αερίου και των αστεριών του. Η κάθετη δομή του δίσκου μας οδηγεί σε ένα διαφορετικό απολίθωμα, τον παχύ δίσκο.

Η θέρμανση του δίσκου μέσω συσσώρευσης. Ο παχύς δίσκος

Η θέρμανση από διακριτά γεγονότα συσσώρευσης επιβάλλει επίσης την ανάπτυξη κάθετων δομών στον δίσκο. Αυτά τα γεγονότα μπορούν να ανυψώσουν γωνιακά (να φουσκώσουν) την δομή του εσωτερικού δίσκου και την κοιλιά. Φαίνεται ότι έτσι δημιουργείται ο παχύς δίσκος. Από φωτομετρικές χρονολογήσεις προκύπτει ηλικία του παχύ δίσκου όμοια με αυτήν των σφαιρωτών. Το σφαιρωτό 47 Τουκάνα συνδέεται με τον παχύ δίσκο.

Ένας δορυφόρος γαλαξίας μικρής μάζας μπορεί να θέρμανε ουσιαστικά τον δίσκο κατά την συσσώρευσή του. Η ενέργεια τροχιάς του δορυφόρου μετατράπηκε σε θερμική ενέργεια στον δίσκο. Οι προσομοιώσεις συσσώρευσης δορυφόρων (όπως περιλαμβάνεται στην ΛDCM) είναι σημαντικές για την κατανόηση της επιβίωσης του λεπτού δίσκου και της προέλευσης του παχύ. Οι δορυφόροι πρέπει να είναι αρκετά πυκνοί ώστε να μην υποστούν παλιρροϊκές διαταραχές και να φτάσουν μέχρι τον δίσκο. Ακόμα και οι σφαιροειδείς νάνοι, που φαίνονται να είναι αραιοί, είναι στην πράξη πυκνά αντικείμενα που κυριαρχούνται από σκοτεινή ύλη.

Η ύπαρξη παχύ δίσκου στον Γαλαξία αποτελεί τυχαίο γεγονός, αφού δεν πρόκειται για γενικό φαινόμενο. Φαίνεται να υπήρχε μια απότομη αύξηση του πάχους της αστρικής κατανομής στον δίσκο πριν από 10 δις έτη. Η σχέση ηλικίας/ διασπορά ταχύτητας περιέχει 3 σύνολα. Αστέρια νεαρότερα από 3 δις έτη με γωνιακή ταχύτητα 10 km/s, αστέρια ηλικίας ανάμεσα σε 3 και 10 δις έτη με 20 km/s και αστέρια με ηλικία πάνω από 10 δις έτη με γωνιακή ταχύτητα 40 km/s. Το πρώτο σύνολο προέρχεται από διαδικασίες θέρμανσης του δίσκου μέσω των βραχιόνων του Γαλαξία. Το τελευταίο σύνολο είναι ο παχύς δίσκος και

προήλθε από αρχέγονο γεγονός συσσώρευσης. Αυτό το γεγονός συνδέεται με την παρατήρηση ότι το ω Κενταύρου αποτελεί τον απογυμνωμένο πυρήνα ενός ελλειπτικού νάνου. Η συσσώρευσή του μπορεί να σήμανε την αρχή της δημιουργίας του παχύ δίσκου.

Συνοψίζοντας, φαίνεται ο παχύς δίσκος να μας παρέχει ένα στιγμιότυπο των συνθηκών του Γαλαξιακού δίσκου μόλις μετά την εποχή του διαμελισμού. Τα αστέρια του παχύ δίσκου περνάνε σχετικά λίγο διάστημα κοντά στο Γαλαξιακό επίπεδο, όπου η θέρμανση και σκέδαση από τα γιγάντια μοριακά νέφη είναι ενισχυμένες. Έτσι η γωνιακή ανάμειξη μέσα στον παχύ δίσκο δεν μπορεί να εξαλείψει όλα τα απομεινάρια της αρχέγονης χημικής σύστασης των αρχαίων αστεριών του παχύ δίσκου.

Υπάρχει αναλογία ηλικίας/ μεταλλικότητας?

Κάποια γαλαξιακά <απολιθώματα> φαίνεται να μας παρέχουν πληροφορίες από την εποχή του διαχωρισμού (dissipation) των βαρυονίων. Η εσωτερική αστρική κοιλιά αποτελεί το καλύτερο παράδειγμα. Χαρακτηρίζεται από παλαιά, πλούσια σε μέταλλα αστέρια που δείχνουν να αποτελούν την εξαίρεση της κλασικής εικόνας αύξησης της μεταλλικότητας με τον χρόνο. Όμως τα δυναμικά χρονοδιαγράμματα (αστρογέννησης) στην εσωτερική κοιλιά είναι πολύ μικρά σε σχέση με τον δίσκο, με αποτέλεσμα την ταχεία αύξηση της μεταλλικότητας. Πλούσιους σε μέταλλα γαλαξιακούς πυρήνες παρατηρούμε και σε μεγάλο z , άρα η μεταλλικότητα στους πυρήνες αυξήθηκε από τα πολύ πρώιμα στάδια γαλαξιακής εξέλιξης. Η δυναμική πολυπλοκότητα της Γαλαξιακής κοιλιάς δεν μας επιτρέπει να καθορίσουμε την ακολουθία των γεγονότων που την διαμόρφωσαν. Η ύπαρξη αναλογίας ηλικίας/ μεταλλικότητας στα αστέρια αποτελεί πολύ σημαντικό θέμα, με πολλές διαφωνίες. Για παράδειγμα, η μεταλλικότητα για αστέρια κατηγορίας F παραμένει σταθερή μετά από την ηλικία των 4 δις ετών. Δεν υπάρχει τέτοια σχέση για τα παλαιά αστέρια του πεδίου, ούτε για τα ανοιχτά σμήνη. Γηραιά και μεγάλης μεταλλικότητας αστέρια υπάρχουν στον Γαλαξία στην άλω, τον δίσκο και την κοιλιά. Φαίνεται αυτή η σχέση να εφαρμόζεται μόνο στα νεαρά αστέρια.

Επιδράσεις από το περιβάλλον και την εσωτερική εξέλιξη

Οι επιδράσεις από το περιβάλλον εμφανίζονται σε όλα τα στάδια της ιεραρχικής εξέλιξης και σε όλα τα στάδια <υπογραφών>, κάνοντας την κατηγοριοποίηση των υπογραφών της εξέλιξης αρκετά τεχνητή. Αυτό φαίνεται και στην ΛDCM. Έτσι υπάρχει το ερώτημα αν κυριαρχούν οι εσωτερικές ή οι εξωτερικές διεργασίες στην εξέλιξη ενός γαλαξία.

Το γνωστό πρόβλημα νάνων G μας δείχνει ότι οι εξωτερικές επιδράσεις είναι σημαντικές Ένα μοντέλο απομονωμένης περιοχής (κλειστό κουτί, closed box model) προβλέπει να υπάρχουν περισσότερα φτωχά σε μέταλλα αστέρια από ότι παρατηρούμε στην γειτονία του Ηλίου. Αυτό το πρόβλημα ξεπερνιέται εύκολα με την εισροή αερίου, και ειδικά στην συνεχόμενη ροή συσσώρευσης αερίου από νάνους γαλαξίες. Το περιβάλλον καθορίζει την εξέλιξη. Οι γαλαξίες προγενέστερου τύπου (early type) όπως οι ελλειπτικοί, βρίσκονται κατά μεγάλο βαθμό σε σμήνη, και μάλιστα στις κεντρικές περιοχές, αντίθετα με τους μεταγενέστερου τύπου (late type) όπως οι σπειροειδείς. Οι γαλαξίες προγενέστερου τύπου παρουσιάζουν μεγάλη διασπορά ηλικίας και μικρή διασπορά μεταλλικότητας σε

περιβάλλοντα μικρής πυκνότητας, ενώ σε περιβάλλοντα μεγάλης πυκνότητας, όπως το σμήνος Fornax, ισχύει ακριβώς το αντίθετο. Η διαφορά εξέλιξης ανάμεσα σε γαλαξίες του πεδίου και των σμηνών είναι σημαντική.

Μια άλλη σημαντική επίδραση του περιβάλλοντος είναι ο αυξημένος πληθυσμός γαλαξιών S0 στα σμήνη, με μεγάλη αύξηση μετά από $z=0,4$. Αυτό σημαίνει ταχύτερη μετάβαση σε γαλαξίες προγενέστερου τύπου. Οι γαλαξίες S0 του σμήνους της Μεγάλης Άρκτου παρουσιάζουν διαβαθμίσεις ηλικίας αντίθετες με αυτές των σπειροειδών του πεδίου, με την έννοια ότι οι πυρήνες είναι νεαροί και πλούσιοι σε μέταλλα. Αυτά τα δύο συμπεράσματα αφορούν γαλαξιακή εξέλιξη νεότερης εποχής.

Οι εσωτερικές διεργασίες είναι επίσης σημαντικές. Αυτό αντικατοπτρίζεται στην σχέση χρώματος/ λαμπρότητας στους προγενέστερου και μεταγενέστερου τύπου γαλαξίες. Η σχέση αυτή δεν επηρεάζεται από την επίδραση της σκόνης και δείχνει συστηματικές διακυμάνσεις της ηλικίας και/ ή της μεταλλικότητας με την λαμπρότητα. Στους ελλειπτικούς η σχέση αυτή παρουσιάζει την εξάρτηση της μεταλλικότητας από την μάζα. Η σχέση εξηγείται φυσικά από τα μοντέλα ανέμων των σουπερνόβα, με τους μεγαλύτερης μάζας γαλαξίες να βιώνουν περισσότερες σουπερνόβα με αποτέλεσμα να αυξάνεται η μεταλλικότητά τους και να γίνονται πιο κόκκινοι. Η σχέση αυτή εκτιμήθηκε και για την εποχή του διαμελισμού των βαρυονίων, και αποτελεί πρώτης τάξεως υπογραφή της εξέλιξης των γαλαξιών.

Σε ένα δείγμα 100 γαλαξιών με μεγάλο εύρος μάζας βρέθηκε ότι οι γαλαξίες μικρής μάζας παρουσιάζουν μεγαλύτερο εύρος ηλικίας. Αυτό μας δείχνει ότι οι μικρής μάζας γαλαξίες έχουν μεγαλύτερη ποικιλία ιστορικών αστρογέννησης, κάτι που είναι αντίθετο με τις προβλέψεις της Λ CDM, που λένε ότι οι γαλαξίες μικρότερης μάζας είναι και οι γηραιότεροι. Υπάρχει μια κοσμική διασπορά των ιστορικών αστρογέννησης. Αυτή παρουσιάζει διαφορετικά στάδια εξέλιξης μέσα στο ιεραρχικό μοντέλο.

Οι σπειροειδείς συνήθως μας παρουσιάζουν διαβαθμίσεις χρώματος που μας παρουσιάζουν τα στάδια της μεταλλικότητας και της ηλικίας. Οι αμυδροί σπειροειδείς γαλαξίες έχουν μικρότερες ηλικίες και μεταλλικότητες σε σχέση με τους λαμπρούς. Σε δείγμα 120 μικρής κλίσης σπειροειδείς είδαμε ότι η τοπική επιφανειακή πυκνότητα αποτελεί την σημαντικότερη παράμετρο μορφοποίησης του ιστορικού της αστρογέννησης και της χημικής εξέλιξης. Όμως είδαμε επίσης ότι οι πλούσιοι σε μέταλλα γαλαξίες εμφανίζονται σε όλο το φάσμα επιφανειακών πυκνοτήτων. Αυτό το συμπέρασμα είναι σε συμφωνία με την διασπορά των πλούσιων σε μέταλλα ανοιχτών σμηνών, που τους βρίσκουμε παντού στον Γαλαξιακό δίσκο.

Ίχνη-υπογραφές δεύτερης τάξης. Μεγάλες διεργασίες που σχετίζονται με ουσιαστική εξέλιξη.

Εδώ μας ενδιαφέρουν τα <απολιθώματα> από διεργασίες που σημειώθηκαν στον Γαλαξία μας από την εποχή που επικάθησε η βαρυονική μάζα στον δίσκο. Τα πιο σημαντικά ίχνη αποτυπώνονται στο ιστορικό αστρογέννησης του δίσκου, με πεδία δράσης τα ανοιχτά σμήνη. Υπάρχει ένας πληθυσμός <ανώμαλων> αστεριών στον Γαλαξία, όπως αστέρια που

περιφέρονται αντίθετα, φτωχά σε μέταλλα αστέρια της άλω με μέση ηλικία και πλούσια σε μέταλλα αστέρια τύπου A της άλως. Δεν γνωρίζουμε ακριβώς τον ρόλο των σφαιρωτών σμηνών, αλλά τουλάχιστον μερικά αποτελούν πυρήνες πρώην νάνων γαλαξιών.

Το ιστορικό αστρογέννησης (star formation history)

Το ιστορικό σχηματισμού αστεριών (αστρογέννησης) συνδέεται με την συσσώρευση αερίου σε διάστημα δις ετών. Το αέριο συσσωρεύτηκε μαζί με την σκοτεινή ύλη? Ήταν ψυχρό ή θερμό? Πως καταλήγει από την άλω στον δίσκο? Τα νέφη του Μαγγελάνου αποτελούν άμεση απόδειξη συσσώρευσης αστεριών, αερίου σε διαφορετικές καταστάσεις, και σκοτεινής ύλης για τα επόμενα δις έτη. Οι γαλαξίες της τοπικής ομάδας παρουσιάζουν μεγάλη ποικιλία ιστορικών αστρογέννησης, αλλά το μέσο ιστορικό τους συμφωνεί με το κυρίως ιστορικό του σύμπαντος.

Για το ιστορικό σχηματισμού αστεριών στους δίσκους θεωρούμε την γειτονιά του Ηλίου ως ένα κλειστό κουτί, και ότι αντιπροσωπεύει όλους τους δίσκους. Το ιστορικό ορίζεται ως αστρική ηλικία, μεταλλικότητα των αστεριών και του αερίου, και σε μικρότερο βαθμό την αναλογία του αερίου στην ύλη. Για τον υπολογισμό ηλικίας χρησιμοποιούμε φασματοσκοπικές μεθόδους από τα πλάτη συγκεκριμένων γραμμών.

Οι δομές μικρής επιφανειακής λαμπρότητας στους γαλαξίες

Η δυναμική αλληλεπίδραση ανάμεσα στους γαλαξίες έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση μιας σειράς γαλαξιακών δομών. Παρατηρούμε την ύπαρξη πολλαπλών γαλαξιακών πυρήνων, πυρήνων που περιστρέφονται με αντίθετη φορά, και αέριο σε πολικές τροχιές. Σε επίπεδα μικρής λαμπρότητας τα εξωτερικά περιγράμματα των δίσκων εμφανίζουν ασυμμετρίες, όπως οι βραχίονες των γαλαξιών. Οι αστρικές ροές (stellar streamers) έχουν ειδικό ενδιαφέρον γιατί θέτουν όρια στα μοντέλα μας, ιδίως στην κινηματική μέσω της ανακάλυψης πλανητικών νεφελωμάτων (τα χρησιμοποιούμε για την μέτρηση αποστάσεων). Μας είναι γνωστές πάνω από 12 τέτοιες ροές, που δείχνουν ότι υπάρχει πολύ μεγαλύτερος πληθυσμός με μικρή επιφανειακή λαμπρότητα. Οι ροές αυτές μπορούν να διατηρηθούν για μερικά δις έτη και είναι ορατές (στην διακριτική ικανότητα των τηλεσκοπίων μας) για μόλις 400 εκ. έτη. Μερικές ομάδες γαλαξιών, όπως η ομάδα του Λέοντα, παρουσιάζουν δομές (HI) μεγάλης κλίμακας που μπορούν να φαίνονται για δις έτη. Σε άλλους γαλαξίες παρατηρούμε αστρικές <θηλιές> και εκτεταμένες δομές γύρω και κοντά τους, που θα είναι ορατές για μικρό σχετικά χρονικό διάστημα.

Ο Γαλαξίας μας έχει πολλούς δορυφόρους γύρω του που σχετίζονται με 1-2 μεγάλες ροές στον νυχτερινό ουρανό. Η βασικότερη είναι η ροή (HI) Magellanic stream από τα νέφη του Μαγγελάνου. Όλοι αυτοί οι νάνοι θα συσσωρευτούν κάποτε από τον Γαλαξία μας κυρίως λόγω αλληλεπίδρασης με την Γαλαξιακή άλω.

Τα αστρικά σμήνη ως δείγμα του περιβάλλοντος

Βασικό χαρακτηριστικό του σχηματισμού αστεριών είναι η δημιουργία σμηνών. Η συνιστώσα αρχικής μάζας των σμηνών (initial cluster mass function), όσο μπορεί αυτή να εκτιμηθεί, μας παρέχει πληροφορίες για τις φυσικές συνθήκες δημιουργίας τους. Βασικά

αυτό το μέγεθος περιγράφει την δημιουργία όλων των σμηνών, από σφαιρωτά και ανοιχτά ως χαλαρές συσσωρεύσεις αστεριών. Ένα ερώτημα είναι πόσα αστέρια δημιουργούνται σε σμήνη και πόσα όχι. Σε γαλαξίες με μικρό ρυθμό αστρογέννησης παρατηρούμε μόνο το 10% να δημιουργούνται σε σμήνη, αλλά αυτό το ποσοστό αυξάνεται δραματικά στους γαλαξίες αστρογέννησης (starburst). Αλλά αυτό το ερώτημα έχει μικρότερη σημασία από το πόση αναλογία των αστεριών δημιουργείται σε μικρής διάρκειας ζωής σμήνη. Όσο το νέφος που καταρρέει έχει ομοιογένεια πριν τον σχηματισμό των πρώτων αστεριών, διατηρώντας έτσι ένα συγκεκριμένο χημικό αποτύπωμα, η διάρκεια ζωής του σμήνους δεν είναι σημαντική. Είναι πιθανό τα περισσότερα αστέρια σε όλα τα περιβάλλοντα να δημιουργούνται σε βραχύβια σμήνη που δεν διακρίνονται στο υπόβαθρο.

Η συνιστώσα αρχικής μάζας σμήνους έχει θεμελιώδη σημασία στην χημική επισήμανση και στην αποκάλυψη του ιστορικού αστρογέννησης. Αυτό είναι ευκολότερο να το κάνουμε σε μερικά μεγάλα σμήνη παρά σε πολλά μικρά, υποθέτοντας ότι προέρχονται όλα από νέφη με ομοιογένεια. Η επιτυχία της χημικής επισήμανσης εξαρτάται από το πώς σχηματίστηκαν τα συστατικά μέρη του Γαλαξία.

Τα ανοιχτά σμήνη

Στην κοσμολογία κοντινού πεδίου υποθέτουμε ότι ο παχύς δίσκος και τα παλαιά ανοιχτά σμήνη του λεπτού δίσκου είναι σημαντικά αντικείμενα για την μελέτη μας. Ο λεπτός δίσκος έχει και παλαιά και νεαρά ανοιχτά σμήνη. Τα παλαιά ξεπερνούν σε ηλικία τα 10 δις έτη. Μας παρέχουν καλή εκτίμηση της ηλικίας και αποτελούν σημαντικά απολιθώματα. Η επιβίωσή τους για τόσο χρόνο αποτελεί εξαίρεση. Τα σμήνη που επιβιώνουν για δις έτη προέρχονται από νεφέλωμα με πολύ αποτελεσματική δημιουργία αστεριών (έχουν πυκνό αστρικό πληθυσμό). Οι πληθυσμοί των παλαιών σμηνών (σε σχέση με τις Υάδες) παρουσιάζουν διασπορά 375 pc, ενώ οι νεαροί 55 pc. Τα παλαιά και τα νέα σμήνη παρουσιάζουν την ίδια ακτινική τάση της μεταλλικότητας. Δεν φαίνεται να υπάρχει σχέση ηλικίας- μεταλλικότητας στα ανοιχτά σμήνη. Αυτές οι παρατηρήσεις μας δείχνουν ότι ο παχύς δίσκος αποτελεί ένα παγωμένο στιγμιότυπο του λεπτού αμέσως μετά τον σχηματισμό του δίσκου.

Τα σφαιρωτά σμήνη

Ο Γαλαξίας μας έχει περίπου 150 σφαιρωτά. Αποτελούν μόλις το 2% της μάζας και του φωτός της αστρικής άλως. Τα παλαιότερα είναι ηλικίας 13 δις ετών. Οι ηλικίες των παλαιότερων σφαιρωτών της εσωτερικής και εξωτερικής άλως, τα νέφη του Μαγγελάνου και οι κοντινοί σφαιροειδείς γαλαξίες Fornax και Sgr dwarf παρουσιάζουν μεγάλη ανομοιογένεια. Τα σφαιρωτά είναι μεγαλύτερης ηλικίας από τα παλαιότερα αστέρια του δίσκου (λευκούς νάνους και ερυθρούς γίγαντες). Αυτά τα σμήνη είναι συνήθως πιο φτωχά σε μέταλλα από το υπόβαθρο, σε όλους τους γαλαξίες και ανεξάρτητα την τοποθεσία τους, με εξαιρέσεις. Υπάρχουν 2 διακριτοί πληθυσμοί σφαιρωτών στον Γαλαξία μας. Ο πληθυσμός της άλως με μικρή μεταλλικότητα και αργή περιστροφή και ο πληθυσμός του δίσκου, πιο πλούσιος σε μέταλλα και με γρήγορη περιστροφή. Πλέον γνωρίζουμε πως σε κάθε σφαιρωτό σμήνος υπάρχουν περισσότεροι από έναν αστρικό πληθυσμό. Σε γαλαξίες που αλληλεπιδρούν υπάρχει πληθυσμός νεαρών σφαιρωτών σμηνών (NGC 1275, NGC

7252). Έτσι δημιουργήθηκε η υποψία ότι τα σφαιρωτά σχηματίζονται στις γαλαξιακές συγχωνεύσεις. Η μεγάλη πυκνότητα των σφαιρωτών πρέπει να αντικατοπτρίζει τις συνθήκες δημιουργίας τους. Υπάρχει και ένα μοντέλο που προβλέπει ότι δημιουργούνται σε κατάτμηση τεράστιων και πολύ πυκνών μοριακών νεφών.

Τα σφαιρωτά σμήνη υπήρξαν αντικείμενα βαρυτικών διαταραχών μετά την δημιουργία τους. Αν το πλήθος τους ήταν αρχικά πιο μεγάλο, τα μέλη των σμηνών που διαλύθηκαν αποτέθηκαν στην άλω. Τα αστέρια της άλω και τα σφαιρωτά σμήνη του Γαλαξία έχουν συγκρίσιμες βασικές μεταλλικότητες, με την μεταλλικότητα των αστεριών της άλω να εκτείνεται σε χαμηλότερα επίπεδα. Η ταύτιση μεταλλικότητας των σφαιρωτών με τον παχύ δίσκο είναι εκπληκτική.

Τα σφαιρωτά μπορεί να αποτελούν τους πυρήνες νάνων ελλειπτικών γαλαξιών που απογυμνώθηκαν. Αρχικά πρέπει να περιείχαν πολύ αέριο, όπως παρατηρούμε από το ω του Κενταύρου. Η αντίθετη κατεύθυνση περιφορά τους μας δείχνει ότι προέρχονται από εξωγαλαξιακά αντικείμενα μεγαλύτερης μάζας. Η μικρή μεταλλικότητά τους οφείλεται στην χαμηλή αστρογέννηση. Ιδίως τα σφαιρωτά της άλω δεν βρίσκονται σε περιβάλλον που θα μπορούσαν να εμπλουτιστούν χημικά.

Οι νάνοι γαλαξίες

Ο σχηματισμός και η μακροχρόνια εξέλιξη των νάνων έχουν μεγάλο ενδιαφέρον. Υπάρχουν σημαντικοί πληθυσμοί γύρω από τον Γαλαξία μας και τον γαλαξία της Ανδρομέδας. Σημαντικό ρόλο έχει η σκοτεινή ύλη τους. Οι νάνοι αποτελούν το καλύτερο πεδίο μελέτης των πρωτόγονων αστεριών για την κοσμολογία κοντινού πεδίου. Ένα σημαντικό μέρος του πληθυσμού των νάνων της τοπικής ομάδας πρέπει να έχει συσσωρευτεί στην άλω του Γαλαξία και αυτή της Ανδρομέδας. Αυτό αποδεικνύεται με το ότι η Γαλαξιακή άλως έχει διακριτές χημικές ομοιότητες με τον σημερινό πληθυσμό των νάνων. Οι παλιρροιακές ροές στον Τοξότη και στην Καρίνα αποτελούν δείγματα νάνων που διαταράσσονται κατά την συσσώρευση. Όλοι οι νάνοι στην ακτίνα δράσης του Γαλαξία και της Ανδρομέδας παρουσιάζουν σημάδια εξάλειψης του αερίου τους.

Όλοι οι νάνοι της τοπικής ομάδας περιέχουν αρχαία αστέρια μικρής μεταλλικότητας. Ο ρυθμός αστρογέννησης στους νάνους είναι πολύ μικρός, κάτι που σημαίνει ότι βίωσαν μόνο μερικά επεισόδια σχηματισμού αστεριών. Οι νάνοι παρουσιάζουν αποδείξεις σχηματισμού σμηνών σε αυτούς. Η μεταλλικότητά τους μοιάζει με αυτή της άλως. Το σχετικά ήρεμο περιβάλλον τους ίσως μας δώσει την δυνατότητα να διακρίνουμε διαμελισμένα σμήνη χαμηλότερης μεταλλικότητας από ότι μπορούσαμε μέχρι σήμερα. Τα σμήνη τους αποτελούν πεδία έρευνας της δημιουργίας και αρχικής εξέλιξης των νάνων, καθώς και των γεγονότων που οδήγησαν στον σχηματισμό της Γαλαξιακής άλως.

Οι δομές στον μεσοαστρικό χώρο

Από την κοινή κίνηση των ομάδων αστεριών προσπαθούμε να εντοπίσουμε τα ανοιχτά σμήνη και τα απομεινάρια τους στον Γαλαξιακό δίσκο. Τα νεαρά ανοιχτά σμήνη που εντοπίσαμε με αυτόν τον τρόπο (καμιά δεκαριά) συνδέονται με την ζώνη του Gould. Πρόσφατα ανακαλύψαμε κάποιες ομάδες ίδιας κίνησης (moving groups) να σχετίζονται με

την αστρική άλω, και σε κάποιες περιπτώσεις να αποτελούν απολιθώματα από τα επεισόδια συσσώρευσης του μακρινού παρελθόντος.

Το πιο χαρακτηριστικό επεισόδιο συσσώρευσης που παρατηρούμε σήμερα είναι ο πολύ διαταραγμένος νάνος γαλαξίας του Τοξότη. Παρατηρούμε φασματοσκοπικά ένα επίμηκες αστρικό ρεύμα να κινείται από την μακρινή πλευρά του Γαλαξία μέσα στο πλάνο παρατήρησης. Ο νάνος αυτός είναι ένας μικρής μάζας σφαιροειδής σε απόσταση 25 kpc από τον Ήλιο που διαταράσσεται από το παλιρροϊκό πεδίο του Γαλαξία. Περιλαμβάνει ένα μείγμα αστρικών πληθυσμών, μια εκτεταμένη άλω και τουλάχιστον 4 σφαιρωτά σμήνη. Τέτοιου είδους αστρικά ρεύματα είναι συνηθισμένα όταν ένας μεγάλος γαλαξίας συσσωρεύει έναν νάνο. Ακόμα παρατηρούμε στον Γαλαξία μας τα θραύσματα από νάνους παλαιότερων συσσωρεύσεων, αφού παραμένουν σε συνοχή στην άλω για μερικές περιφορές γύρω από τον Γαλαξία. Όταν όμως ένας δορυφόρος εισέρχεται στον δίσκο χάνει την στροφορμή του και διαμελίζεται πολύ σύντομα. Βάσει του μοντέλου ΛDCM πρέπει να υπάρχουν χιλιάδες σχετικές ροές που σχηματίζουν την εξωτερική άλω και εκατοντάδες, εν μέρει απορροφημένες, στην εσωτερική άλω.

Η εικόνα του παρελθόντος μέσω της χημικής εξακρίβωσης

Οι περισσότεροι γαλαξίες με $z < 2$ κυριαρχούνται από δίσκους. Οι γαλαξίες στην εποχή της έντονης αστρογέννησης ($z = 1-3$) εμφανίζονται με πολλές συμπυκνώσεις και ταραχώδης κινηματική. Πρέπει να απέμειναν αστέρια στους γαλαξίες από τα πρώτα συμπυκνώματα. Αυτά τα συμπυκνώματα διαλύθηκαν και σχημάτισαν τους παχιούς δίσκους, κατέληξαν στις γαλαξιακές κοιλίες ή μετανάστευσαν μέσα στους γαλαξίες σχηματίζοντας ράβδους ή σπείρες? Η επισκόπηση HERMES ανακαλύπτει τα αρχαία σμήνη με την παροχή λεπτομερών χημικών πληροφοριών για μεγάλο αριθμό ανεξάρτητων αστεριών. Η αναζήτηση απολιθωμάτων επικεντρώνεται στη άλω, αλλά υπάρχουν σημαντικές πληροφορίες στον παχύ δίσκο που όπως αναφέραμε αποτελεί παγωμένο στιγμιότυπο της εποχής αμέσως μετά τον βαρυονικό διαχωρισμό (baryon dissipation).

Ο βραχυπρόθεσμος στόχος της επισκόπησης είναι ο καθορισμός του μεγέθους και της δομής της περίπλοκης χημικής αφθονίας όλων των συστατικών μερών του Γαλαξία. Τα αστρικά ρεύματα στην άλω μπορούν να καθοριστούν με αυτόν τον τρόπο. Υποθέτουμε ότι τα αστέρια δημιουργούνται σε ένα κλειστό κουτί μέσω προοδευτικού εμπλουτισμού του αερίου, με αποτέλεσμα την διασπορά των αστεριών σε ένα στενό ίχνος στον χημικά πολύπλοκο χώρο.

Ο μακροπρόθεσμος στόχος είναι η ανακάλυψη μοναδικών χημικών <υπογραφών> στον παχύ δίσκο με προέλευση διαφορετικά επεισόδια σχηματισμού αστεριών για σμήνη που διαμελίστηκαν πριν πολύ καιρό. Αν τα σμήνη αρχικά σχηματίστηκαν έξω από τον Γαλαξία σε ένα σύστημα που κατέρρευσε στον Γαλαξία, οι αστρικές αφθονίες θα ακολουθούν ένα χημικό ίχνος.

Η κοσμολογία, κοντινού και μακρινού πεδίου, πρέπει να εξηγήσει το πώς το σύμπαν έφτασε στην σημερινή του κατάσταση. Η φάση του κοσμικού διαχωρισμού βαρυονίων-σκοτεινής ύλης μάλλον έσβησε πολλές πληροφορίες, αλλά ίσως μερικές να διατηρούνται ακόμα.

Ακολουθώντας τα γεγονότα του διαχωρισμού προτείνουμε ως σημαντικά στοιχεία τα ανοιχτά σμήνη κάθε φάσης της Γαλαξιακής εξέλιξης. Επειδή τα περισσότερα αστέρια σχηματίστηκαν σε πυκνά σμήνη, ο σχηματισμός και η εξέλιξη των γαλαξιών πρέπει να περιλαμβάνει εκατομμύρια ανεξάρτητα σμήνη στο ιστορικό κάθε γαλαξία. Θέλουμε να εκτιμήσουμε την εξέλιξη της συνιστώσας αρχικής μάζας των σμηνών, την χημική τους σύσταση και τον ρυθμό σχηματισμού και επιβίωσης ως σήμερα, όλα σε συνάρτηση με τον χρόνο.

Πόσα σμήνη?

Εκτιμούμε ότι το τελευταίο 1 δις έτη δημιουργήθηκαν 10000 σμήνη με μάζα 30000 ηλιακές, στο επίπεδο του Γαλαξία όπου βρίσκεται ο Ήλιος (solar torus, ένας δίσκος πάχους 2 κpc με κέντρο τον Ήλιο), αν η αστρογέννηση στην Γαλαξία μας ήταν όλο αυτό το χρονικό διάστημα κοντά στην σημερινή τιμή (3 ηλιακές μάζες/έτος). Σχεδόν όλα αυτά τα σμήνη έχουν διαλυθεί και τα αστέρια τους αποτελούν το αστρικό πεδίο. Μόνο το 4-7% των σμηνών επιβιώνει μετά από 100 εκ. έτη.

Η χημεία των σμηνών

Το σημερινό δείγμα ανοιχτών σμηνών μπορεί να μην είναι αντιπροσωπευτικό, μιας και αυτά είναι συνήθως βραχύβια. Τα σμήνη που απέμειναν από παλαιότερες εποχές προέρχονται από νέφη με σημαντικά μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα αστρογέννησης από το τυπικό 10- 30% (ποσοστά κατανάλωσης της μάζας του νεφελώματος σε δημιουργία αστεριών).

Η ανάμειξη βαριών μετάλλων στα πρωταστρικά νέφη κυριαρχείται από διάφορες χρονικές κλίμακες. Η κυρίαρχη τάση χημική μείξης στα μοριακά νέφη είναι η ταραχώδης διάχυση (turbulent diffusion). Οι ταραχώδεις κινήσεις στα μοριακά νέφη σχετίζονται με το μέγεθός τους. Ο σχηματισμός των αστεριών μπορεί να συμβεί σε πολλές χρονικές περιόδους μετά την δημιουργία ενός νεφελώματος. Έτσι δεν διαχωρίζονται τα χρονοδιαγράμματα της χημικής ομοιογένειας και της αστρογέννησης. Η χημική ομοιογένεια δεν χρειάζεται να είναι πλήρης, τυχόν μικρές χημικές ανομοιογένειες εξαφανίζονται κατά την δημιουργία αστεριών. Τέτοιες χημικές ανομοιογένειες και διαφορές στην αφθονία των στοιχείων παράγονται και από τις εκρήξεις σουπερνόβα μέσα στο νέφος. Ακόμα και αν η ύλη από την σουπερνόβα αναμειχτεί με 10000 ηλιακές μάζες, η αύξηση της αφθονίας του σιδήρου θα είναι μετρήσιμη. Η ομοιογένεια ενός σμήνους μπορεί να κρατήσει μόλις 1-2 εκ. έτη, πριν εκραγούν τα μεγάλα αστέρια ως σουπερνόβα.

Οι βασικοί στόχοι της χημικής σήμανσης (chemical tagging)

Τα φάσματα υψηλής ανάλυσης είναι αρκετά πολύπλοκα. Οι φασματικές γραμμές φέρουν σημαντικές πληροφορίες για την αφθονία των στοιχείων στις αστρικές ατμόσφαιρες. Πολλά από τα στοιχεία που ανακαλύπτουμε δεν δημιουργούνται σε αστέρια κανονικής εξέλιξης, αντανακλώντας τις ιδιαίτερες συνθήκες του νέφους όταν αυτά σχηματίστηκαν. Η χημική σήμανση των αστεριών σε ομάδες κοινής ηλικίας μας βοηθάει να αναγνωρίσουμε τα ανεξάρτητα πλέον μέρη ενός σμήνους που είναι διαλυμένο από καιρό. Για κάτι τέτοιο πρέπει να ισχύουν τα παρακάτω.

.Τα περισσότερα αστέρια να δημιουργούνται σε πλούσια νέφη με εκατοντάδες ως χιλιάδες αστέρια, κάτι που επιβεβαιώνεται σε παρατηρήσεις σε πολλά μήκη κύματος, με τα περισσότερα αστέρια να έχουν γεννηθεί σε πυκνά αστρικά σμήνη.

.Τα περισσότερα πυκνά σμήνη να έχουν χημική ομοιογένεια σε βασικά στοιχεία. Τα ανοιχτά σμήνη θεωρούνται ομοιογενή. Η μεγάλη μάζα του σμήνους βοηθάει στην εξάλειψη της ανομοιογένειας από τις σουπερνόβα.

.Πιστεύουμε ότι τα στοιχεία γρήγορης απορρόφησης νετρονίων (r process elements) όπως τα (Sm), (Eu), (Gd), (Tb), (Dy), (Ho) δεν σχηματίζονται κατά την ήρεμη αστρική εξέλιξη, αλλά στις εκρήξεις σουπερνόβα. Τα στοιχεία αργής απορρόφησης (s process) όπως τα (Sr), (Zr), (Ba), (Ce), (La), (Pb) σχηματίζονται κατά την φάση του ασυμπτωτικού κλάδου (καύση ηλίου στον αστρικό πυρήνα και υδρογόνου σε φλοιό) σε μεσαίας και μικρής μάζας αστέρια.

Η μάζα, η μεταλλικότητα και άλλα χαρακτηριστικά ενός νέφους καθορίζουν τις σχετικές αναλογίες των στοιχείων. Λίγες μόνο εκρήξεις σουπερνόβα αρκούν για να εμπλουτίσουν την ύλη.

Υποψήφια αστέρια για χημική σήμανση .

Η χημική σήμανση δεν μπορεί να γίνει σε όλα τα αστέρια. Σε καυτά αστέρια και νεαρά σμήνη η ικανότητα μέτρησης χημικών αφθονιών είναι περιορισμένη λόγω της γρήγορης αστρικής περιστροφής και της έλλειψης ιχνών από πολλά ιόντα στο ορατό φάσμα. Τα πολύ ψυχρά αστέρια εκπέμπουν πολύ λίγο φως στο οπτικό ή στο κοντινό υπέρυθρο. Οι πραγματικοί υποψήφιοι για την χημική σήμανση είναι τα αστέρια τύπων FGK, δηλαδή οι υπογίγαντες και οι νάνοι αυτών των φασματικών τύπων. Αποτελούν το 10% όλων των αστεριών.

Θεωρούμε ότι τα νέφη σχηματίζονται με μοναδικές χημικές αναλογίες, που εμπλουτίζονται μέσω εκρήξεων σουπερνόβα. Αν ο σχηματισμός αστεριών είναι πολύ αποτελεσματικός, το σμήνος επιβιώνει για δις έτη, αλλά χάνει το αέριό του. Όσο πηγαίνουμε πίσω στον χρόνο μέχρι τον σχηματισμό του δίσκου, προσεγγίζουμε την χημική κατάσταση που δημιουργήθηκε από τα αστέρια πληθυσμού III. Αυτά μάλλον είχαν μια συνιστώσα αρχικής μάζας βαριάς κορυφής (top heavy), δηλαδή σχηματίζονταν περισσότερα μεγάλα αστέρια από σήμερα. Τα ελάχιστα από τα παλαιά αστέρια με $(Fe/H) = -5$ που ανακαλύπτουμε σήμερα μας δείχνουν ότι η πρώτη γενιά αστεριών πρέπει να εμπλούτισε γρήγορα τα νέφη.

Για τα αστέρια στον λεπτό δίσκο και στην κοιλιά, γνωρίζουμε ότι οι κινηματικές τους έχουν επηρεαστεί από την γαλαξιακή ράβδο και τις σπείρες, με αποτέλεσμα να μην αναγνωρίζουμε τους τόπους δημιουργίας τους από τις κινηματικές τους.

B) Η χημική εξέλιξη του Γαλαξία και των δορυφόρων του

Ο σχηματισμός του Γαλαξία μας

Παρατηρησιακά δεδομένα

Όπως αναφέραμε, ο Γαλαξίας έχει 4 βασικούς αστρικούς πληθυσμούς. Τα χαμηλής μεταλλικότητας και εκκεντρικών τροχιών αστέρια της άλω, τον πληθυσμό της κοιλιάς με μεγάλο εύρος μεταλλικότητας (και αστέρια με υψηλή μεταλλικότητα) και τυχαίες κινήσεις, τον λεπτό δίσκο με αστέρια υψηλής μεταλλικότητας και κυκλικές τροχιές και τέλος τον πληθυσμό στον παχύ δίσκο με μεταλλικότητες και κινηματικές ανάμεσα σε αυτές της άλω και του λεπτού δίσκου.

Οι κινηματικές και χημικές ιδιότητες των διάφορων αστρικών πληθυσμών του Γαλαξία μπορούν να ερμηνευτούν από τον μηχανισμό σχηματισμού του. Σαν μοντέλο σχηματισμού του Γαλαξία κυριαρχεί το μονολιθικό, που έχει ως βάση την κατάρρευση βαρυονικής ύλης. Το μοντέλο αυτό εμπλουτίζεται σήμερα με την παραδοχή της συσσώρευσης μικρότερων δομών (όπως νάνοι γαλαξίες) στην Γαλαξιακή άλω. Ως προφανείς υποψήφιοι παρουσιάζονται οι σφαιροειδείς και οι ανώμαλοι νάνοι. Όμως, όπως θα αναλύσουμε παρακάτω, η χημική αφθονία αυτών των νάνων δεν συμφωνεί με αυτή του Γαλαξία. Η άλω χωρίζεται σε 2 δομές. Στην εσωτερική άλω οι τροχιές των αστεριών είναι πολύ εκκεντρικές και η μεταλλικότητα κορυφώνεται σε $(\text{Fe}/\text{H}) = -1,6$ dex ενώ στην εξωτερική οι τροχιές έχουν μεγάλο εύρος εκκεντρικότητας και μεταλλικότητα που κορυφώνεται σε $(\text{Fe}/\text{H}) = -2,2$ dex. Το μεγαλύτερο μέρος της άλω πρέπει να σχηματίστηκε από συσσωρεύσεις νάνων.

Θεωρητικά μοντέλα

Το μοντέλο των 2 εισροών (2 infall model)

Προβλέπει 2 κύριες εποχές συσσώρευσης αερίου. Μία στην οποία σχηματίστηκαν η άλω και ο παχύς δίσκος και μια δεύτερη, πιο μεγάλης διάρκειας, που σχημάτισε τον λεπτό δίσκο. Κατά τη δημιουργία της άλω σχηματίστηκε σε σύντομο χρόνο (0,1- 0,5 δις έτη) η γαλαξιακή κοιλιά. Σε αυτήν την φάση συσσωρεύτηκε ο παχύς δίσκος, ή τουλάχιστον το μεγαλύτερο μέρος του. Στην αρχική φάση σχηματισμού της άλω και της κοιλιάς κυριαρχούσαν οι εκρήξεις σουπερνόβα αστρικής κατάρρευσης, εμπλουτίζοντας την ύλη σε στοιχεία α όπως τα (O), (Mg). Οι σουπερνόβα Ia έγιναν υπολογίσιμες μετά από 1 δις έτη, εμπλουτίζοντας την ύλη σε στοιχεία της ομάδας του σιδήρου. Η αναλογία των στοιχείων α σημείωσε άνοδο με την εμφάνιση των SNII, μέχρι να σημειωθούν αρκετές SNIa. Έτσι γνωρίζουμε ότι τα αστέρια με μεγάλη αναλογία στοιχείων α έναντι της ομάδας του σιδήρου είναι πολύ αρχαία. Σε αυτό είχε σημαντικό ρόλο η μεταβολή της συνιστώσας αρχικής μάζας (IMF), που σήμαινε την δημιουργία περισσότερων μικρής και λιγότερων μεγάλης μάζας αστεριών, άρα αύξηση των SNIa και ελάττωση των SNII.

Η διασπορά μεταλλικότητας στους νάνους G.

Η διασπορά αυτή είναι πολύ σημαντική για την χημική εξέλιξη στην περιοχή του Ηλίου. Αποτελεί το απολίθωμα του ιστορικού αστρογέννησης και της IMF στον λεπτό δίσκο. Αρχικά τα μοντέλα χημικής εξέλιξης δεν μπορούσαν να προβλέψουν την διασπορά μεταλλικότητας των νάνων G. Έπρεπε να χαλαρώσουμε την παραδοχή του κλειστού κουτιού (δηλαδή ότι δεν υπάρχουν εξωτερικές επιρροές). Η υπόθεση της σταδιακής συσσώρευσης αερίου στην περιοχή του Ηλίου έλυσε το πρόβλημα. Το μοντέλο των 2 επεισοδίων εισροής ύλης αντιπροσωπεύει πολύ καλά την διασπορά των νάνων G, αλλά και των νάνων K, με

χρονοδιάγραμμα σχηματισμού του λεπτού δίσκου στα 8 δις έτη. Υπάρχει αναλογία της διασποράς μεταλλικότητας με την ηλικία. Τα νεαρότερα αστέρια παρουσιάζουν μικρότερη διασπορά. Αυτό μας πληροφορεί ότι τα αστέρια της γειτονιάς του Ηλίου δεν μπορεί να έχουν δημιουργηθεί όλα εκεί, αλλά μερικά προέρχονται από εσωτερικές (τα πιο πλούσια σε μέταλλα) και εξωτερικές (τα πιο φτωχά) περιοχές.

Η εξέλιξη του άνθρακα και του αζώτου

Αυτά τα 2 στοιχεία είναι ιδιαίτερα σημαντικά, ιδίως το (14N). Ξεχωρίζουμε τα στοιχεία σε πρωτεύοντα και δευτερεύοντα. Τα πρωτεύοντα σχηματίζονται άμεσα από τα (H), (He) ενώ τα δευτερεύοντα από μέταλλα που υπήρχαν στο αστέρι κατά την δημιουργία του. Η αφθονία των δευτερευόντων εξελίσσεται με το τετράγωνο αυτής των πρωτευόντων, και η εξέλιξη της αφθονίας των πρωτευόντων δεν επηρεάζεται από την μεταλλικότητα. Σε αυτό το απλό μοντέλο (Simple model) πρέπει να συνυπολογιστούν τα αστρικά χρονοδιαγράμματα που είναι πολύ σημαντικά για την παραγωγή του (14N), που συμβαίνει κυρίως στα αστέρια μικρής και μεσαίας μάζας, ως πρωτεύον αλλά και ως δευτερεύον στοιχείο. Το ίδιο συμβαίνει για το (12C). Η αναλογία του αζώτου που προέρχεται από μεγάλης μάζας αστέρια του Γαλαξία αντιπροσωπεύει μια ακολουθία Γαλαξιακής εξέλιξης.

Στοιχεία ταχείας και αργής απορρόφησης (s and r process)

Σε χαμηλές μεταλλικότητες βρήκαμε μεγάλη διασπορά αυτών των στοιχείων σε σχέση με το σίδηρο, αντίθετα με τα στοιχεία α. Το μοντέλο των 2 εισροών ύλης προβλέπει τις αφθονίες που παρατηρούμε, αλλά όχι την μεγάλη αυτή διασπορά. Κάποια στοιχεία, όπως το (Ba) σχηματίζονται και με τις 2 διαδικασίες. Η μεγάλη ανομοιογένεια της άλως (προέλευση από πολλά επεισόδια συσσώρευσης) εξηγεί αυτήν την διασπορά.

Ο Γαλαξιακός δίσκος

Οι διαβάθμιση της αφθονίας των στοιχείων.

Από τις μετρήσεις των χημικών αφθονιών στον δίσκο συμπεραίνουμε ότι η αναλογία των μετάλλων μειώνεται από τις εσωτερικές προς τις εξωτερικές περιοχές (αρνητική διαβάθμιση). Για τις μετρήσεις χρησιμοποιούμε τα πλανητικά νεφελώματα, τις περιοχές (HII), τα ανοιχτά σμήνη και τα αστέρια (κυρίως O, B, Κηφείδες). Υπάρχουν 2 είδη καθορισμού αφθονιών στις περιοχές (HII). Η μια βασίζεται στις γραμμές επανασύνδεσης που παρουσιάζουν μικρότερη εξάρτηση από την θερμοκρασία του νεφελώματος (He, H, C, N, O) και η άλλη στις ερεθισμένες από συγκρούσεις γραμμές (C, N, O, Ne, Si, S, Cl, Ar, Fe, Ni). Αυτή η δεύτερη μέθοδος κυριαρχούσε ως τώρα. Ο άμεσος καθορισμός της διαβάθμισης της χημικής αφθονίας από τα νεφελώματα (HII) στον Γαλαξία, από γραμμές στο οπτικό, είναι δύσκολος λόγω της μεγάλης εξάλειψης του φωτός. Έτσι για αποστάσεις μεγαλύτερες από 3 Kpc χρησιμοποιούμε τα ραδιοκύματα και το υπέρυθρο.

Οι αφθονίες των (He, C, N) στα πλανητικά νεφελώματα μας παρέχουν πληροφορίες μόνο για τις συντήξεις που συμβαίνουν μέσα στο αστέρι. Οι αφθονίες των (O, S, Ne) αντίθετα παραμένουν ανεπηρέαστες από τις θερμοπυρηνικές συντήξεις του αστεριού. Στα ανοιχτά σμήνη χρησιμοποιούμε την αφθονία του σιδήρου.

Τα μοντέλα μας συμφωνούν με το σενάριο δημιουργίας του δίσκου από μέσα προς τα έξω. Σε μερικά μοντέλα η ανάπτυξη αυτή δεν είναι σταθερή, λόγω της ελάττωσης της αστρογέννησης μετά από την μερική εξάλειψη του διαθέσιμου αερίου στον δίσκο. Ο ρυθμός αστρογέννησης (SFR) εξαρτάται και από το χρονοδιάγραμμα της εισροής αερίου στον δίσκο. Το μοντέλο που περιλαμβάνει ως παραδοχές το χτίσιμο από μέσα προς τα έξω του λεπτού δίσκου, ένα ελάχιστο όριο στην πυκνότητα του αερίου ώστε να είναι εφικτός ο σχηματισμός αστεριών, και την γωνιακή ροή αερίου με μεταβαλλόμενη ταχύτητα ως συνιστώσα της απόστασης από το κέντρο του Γαλαξία, είναι σύμφωνο με τις παρατηρήσεις μας από τους Κηφείδες, που με τη σειρά τους συμφωνούν με τις παρατηρήσεις σε πλανητικά νεφελώματα και νεφελώματα (HII).

Η Γαλαξιακή κοιλιά

Ο σχηματισμός της κοιλιάς

Οι κοιλίες των σπειροειδών γαλαξιών διαχωρίζονται σε πραγματικές στους γαλαξίες τύπου SO-Sb και ψευτοκοιλίες (pseudobulges) σε γαλαξίες μεταγενέστερου τύπου. Γενικά οι ιδιότητες των γαλαξιακών κοιλιών μοιάζουν πολύ με αυτές των ελλειπτικών γαλαξιών. Παρακάτω θα αναφερόμαστε μόνο σε πραγματικές κοιλίες, και ιδίως αυτή του Γαλαξία μας. Οι τελευταίες μελέτες επιβεβαιώνουν την ύπαρξη μπάρας (ράβδου), που περιπλέκει το σενάριο δημιουργίας της Γαλαξιακής κοιλιάς. Τα σενάρια αυτά είναι

. Η συσσώρευση πλούσιων σε αστέρια δορυφόρων γαλαξιών. Η συσσώρευση τέτοιων συστημάτων που τελικά κατέληξαν στην κοιλιά.

. Η επί τόπου (in situ) δημιουργία των αστεριών. Η κοιλιά σχηματίστηκε μέσω συσσώρευσης αερίου από το Γαλαξιακό κέντρο και εξελίχθηκε με αργή ή ταχέα αστρογέννηση. Το αέριο μπορεί να ήταν πρωταρχικό ή εμπλουτισμένο και να προήλθε από την άλω, τον παχύ ή τον λεπτό δίσκο.

. Κοσμική (secular) εξέλιξη. Η κοιλιά σχηματίστηκε ως αποτέλεσμα κοσμικής εξέλιξης μέσω της ράβδου, άρα πρόκειται για ψευτοκοιλιά.

. Ανάμεικτο σενάριο. Η κοιλιά περιέχει 2 αστρικούς πληθυσμούς, έναν που δημιουργήθηκε νωρίς από αέριο που κατέρρευσε γρήγορα, και έναν που σχηματίστηκε αργότερα από την μπάρα.

Το ιστορικό χημικής εξέλιξης της κοιλιάς

Μια απόδειξη της γρήγορης εξέλιξης της Γαλαξιακής κοιλιάς είναι η μεγάλη, μεγαλύτερη από ότι στον Ήλιο, αναλογία μερικών στοιχείων α (O, Si, Mg, Ti) αλλά και του σιδήρου. Αρχικά τα μοντέλα προέβλεπαν ότι μεσοαστρική ύλη εκεί πρέπει να εμπλουτίστηκε γρήγορα από εκρήξεις SNII. Η εξέλιξη ήταν πιο γρήγορη από ότι στον δίσκο και στην άλω. Η εκρηκτική αστρογέννηση (star bursting) και η παροχή ενέργειας από τις σουπερνόβα έφερε πολλές διαταραχές στην κοιλιά. Τώρα κλείνουμε περισσότερο προς ένα μοντέλο που περιέχει ένα διπλό επεισόδιο εισροής ύλης στην κοιλιά, μια αρχική γρήγορη (σε 100 εκ. έτη) κατάρρευση πρωταρχικού αερίου που την ακολούθησε απώλεια ύλης (εκροή) μέσω των ανέμων των σουπερνόβα και ένα δεύτερο μεγαλύτερης διάρκειας (2 δις έτη) επεισόδιο

εισορής ύλης που είχε εμπλουτιστεί από την ύλη εκροής μέσω των σουπερνόβα. Η εκροή αυτή είναι απαραίτητη ώστε να πετύχουμε την πρόβλεψη των αφθονιών που παρατηρούμε στα πλανητικά νεφελώματα. Αυτά βέβαια παρουσιάζουν το μειονέκτημα ότι μπορεί να έχει επηρεαστεί η χημική τους σύνθεση από εσωτερικές αστρικές διεργασίες και να μην αντιπροσωπεύουν το περιβάλλον τους. Ο παλιός (10-11 δις ετών) πληθυσμός της κοιλιάς είναι πλούσιος σε μέταλλα. Η κινηματική των αστεριών και η μεταλλικότητα δείχνουν ότι προέρχεται από τον εσωτερικό δίσκο με έναν μηχανισμό γωνιακής μετανάστευσης, ίσως λόγω της Γαλαξιακής ράβδου.

Τα δεδομένα των κοιλιών σε άλλους γαλαξίες

Οι γαλαξίες βιώνουν διαφορετικά ιστορικά αστρογέννησης. Στους σφαιροειδείς (γαλαξιακές κοιλίες και ελλειπτικούς) αυτή είναι πολύ γρήγορη, ενδιάμεσης ταχύτητας στους σπειροειδείς και αργή στους ανώμαλους. Η εντατική αστρογέννηση <ανεβάζει> γρήγορα, και μόνο από την επίδραση των σουπερνόβα II, την μεταλλικότητα στα επίπεδα του Ηλίου. Μετά οι SNIa (καθυστερούν λόγω ότι προέρχονται από συσσώρευση ύλης σε λευκούς νάνους) αυξάνουν την αφθονία του σιδήρου. Στους ανώμαλους ισχύει το αντίθετο. Η αστρογέννηση είναι πολύ αργή και οι SNIa σημειώνονται σε περιβάλλον μικρής μεταλλικότητας. Έτσι μόνο με την γνώση των σχετικών αφθονιών μπορούμε να γνωρίζουμε την κατηγορία ενός γαλαξία.

Το συμπέρασμα από τα διάφορα μοντέλα είναι ότι η Γαλαξιακή κοιλιά είναι πολύ παλαιά και πρέπει να δημιουργήθηκε πολύ γρήγορα με έντονη αστρογέννηση. Τα τελευταία χρόνια παρατηρούμε την ύπαρξη 2 βασικών αστρικών πληθυσμών, ένας τυπικός για την κοιλιά και ένας με κινηματική της ράβδου (μπάρας), τυπικός ψευτοκοιλιάς. Ο πρώτος σχηματίστηκε πολύ γρήγορα και είναι φτωχότερος σε μέταλλα (MP, metal-poor), ενώ ο δεύτερος (MR, metal-rich) πιο αργά από εμπλουτισμένο αέριο που προήλθε από την άλω ή τον δίσκο.

Τα συμπεράσματα για τον Γαλαξία μας

.Η εσωτερική άλως σχηματίστηκε σε χρονοδιάγραμμα ως 1-3 δις έτη και η εξωτερική σε μεγαλύτερο μέσω συσσώρευσης δορυφόρων γαλαξιών και αερίου.

.Ο δίσκος και ο δακτύλιος του Ηλίου (περιοχή 2 Kpc γύρω από τον Ήλιο) σχηματίστηκε σε χρονοδιάγραμμα τουλάχιστον 7 δις ετών.

.Όλος ο δίσκος σχηματίστηκε από μέσα προς τα έξω με χρονοδιαγράμματα 2 δις έτη για τον εσωτερικό και 10 δις έτη για τον εξωτερικό δίσκο.

.Η διαβάθμιση των αφθονιών εμφανίζεται αναμενόμενα μέσω της παραδοχής του από μέσα προς τα έξω χτισίματος του δίσκου. Η αναγκαιότητα της ελάχιστης πυκνότητας του αερίου για την αστρογέννηση βοηθάει να γίνει πιο απότομη η διαβάθμιση μεταλλικότητας στον δίσκο.

. Η κοιλιά έχει μεγάλη ηλικία και σχηματίστηκε πολύ γρήγορα, με χρονοδιάγραμμα μέχρι 0,5 δις έτη.

Η συνιστώσα αρχικής μάζας (IMF) πρέπει να είναι διαφορετική (πιο επίπεδη) στην κοιλιά από ότι στον δίσκο, ώστε να δικαιολογηθεί η μεγαλύτερη αναλογία στοιχείων α (που χρειάζονται SNII)/σιδήρου (που χρειάζεται SNIa) από ότι στον δίσκο.

Το μοντέλο χρονικής καθυστέρησης (time- delay model) και η ακολουθία Hubble.

Θα εξετάσουμε πως τα διαφορετικά ιστορικά αστρογέννησης επηρεάζουν την εξέλιξη γαλαξιών διαφορετικών μορφολογικών τύπων και ειδικά πως η μεταβολή της αστρογέννησης αλλάζει τις χημικές αφθονίες.

Σχηματισμός αστεριών και ακολουθία Hubble.

Η παραπάνω ακολουθία μπορεί να ερμηνευτεί με όρους διαφορετικών ιστορικών αστρογέννησης. Οι ελλειπτικοί και οι γαλαξιακές κοιλίες πρέπει να βίωσαν εντατικά και με απότομη ελάττωση ιστορικά αστρογέννησης, ενώ οι γαλαξίες μεταγενέστερου τύπου βιώνουν λιγότερο έντονα, σχεδόν σταθερά (σπείρες) ιστορικά αστρογέννησης με αυξητικές τάσεις. Σημαντικό ρόλο έχουν 2 μεγέθη, ο χρόνος κατάρρευσης του αερίου στον γαλαξία (t_c) και ο χρόνος (ρυθμός) που αυτό καταναλώνεται στην αστρογέννηση (t_s). Η αλληλεπίδραση αυτών των 2 μεγεθών έχει καθοριστικό ρόλο στον σχηματισμό διαφορετικών μορφολογικών γαλαξιακών τύπων. Αν $t_s < t_c$, τα περισσότερα αστέρια σχηματίζονται πριν την ολοκλήρωση της κατάρρευσης του αερίου, με αποτέλεσμα αυτό να μην προλάβει να αποβάλλει ενέργεια, κάτι απαραίτητο για την δημιουργία δίσκου. Τότε ο γαλαξίας θα γίνει σφαιροειδής, ενώ αν $t_s > t_c$, το αέριο θα αποβάλλει ενέργεια και θα σχηματίσει δίσκο. Πρόκειται βέβαια για μια απλουστευμένη εικόνα σχηματισμού γαλαξιών, αλλά είναι πιστή βάση της μελέτης των αστρικών πληθυσμών.

Το τυπικό χρονοδιάγραμμα εμπλουτισμού μέσω των SNIa

Οι γαλαξίες διαφορετικών μορφολογιών έχουν άλλους ρυθμούς SNIa, με τους ελλειπτικούς να φτάνουν στο μέγιστο αυτών των σουπερνόβα νωρίς και οι γαλαξίες μεταγενέστερου τύπου αρκετά αργά στην εξέλιξή τους. Αυτό έχει επίπτωση στον χημικό εμπλουτισμό. Εξαρτάται από το ιστορικό σχηματισμού αστεριών κάθε γαλαξία. Το ιστορικό μαζί με τις προσδόκιμες ηλικίες των αστεριών (που ορίζονται από την συνιστώσα αρχικής μάζας) καθορίζουν την χρονική καθυστέρηση των σουπερνόβα Ia. Στους ελλειπτικούς και στις κοιλίες το χρονοδιάγραμμα είναι 0,3- 0,5 δις έτη από την αρχή της αστρογέννησης, ενώ στην γειτονιά του Ηλίου η πρώτη κορυφή συνέβη στο 1 δις έτη, ακολούθησε ελαφριά κάμψη και στα 3 δις έτη είχαμε δεύτερη κορύφωση των Ia (λόγω των 2 επεισοδίων εισροής αερίου). Στους ανώμαλους γαλαξίες το μέγιστο συνέβη στα 4 δις έτη, και μετά ο ρυθμός παραμένει σταθερός.

Σφαιροειδείς νάνοι γαλαξίες στην τοπική ομάδα (dSph)

Η διαφορά της σχέσης $\{(α/Fe) \text{ έναντι } (Fe/H)\}$ που ισχύει για την γειτονία του Ηλίου με αυτήν στους νάνους σφαιροειδείς αντιπροσωπεύει το μοντέλο της χρονικής καθυστέρησης. Οι σφαιροειδείς νάνοι σχηματίζονται ως εξής, βάσει των μοντέλων ψυχρής σκοτεινής ύλης. Τα συστήματα αυτά μάζας 10 εκατομμύρια ηλιακές είναι τα πρώτα που σχηματίζουν αστέρια. Η θέρμανση και απώλεια του αερίου (γαλαξιακός άνεμος), αλλά και ο επαναιονισμός

υποβάθμισαν την αστρογέννηση σύντομα. Όλοι οι σφαιροειδείς δορυφόροι του Γαλαξία περιέχουν παλαιά αστέρια που δεν διακρίνονται εύκολα από τα αστέρια των σφαιρωτών, και αυτές οι παρατηρήσεις ανεβάζουν την διάρκεια αστρογέννησης σε 2 δις έτη τουλάχιστον. Από τις χημικές αναλογίες που αναφέραμε παραπάνω προκύπτει ότι είχαν ένα αργό και παρατεταμένο ιστορικό αστρογέννησης. Θεωρούνται ως οι γαλαξίες με την λιγότερη σκοτεινή ύλη. Έχουν ρηχή διασπορά σκοτεινής ύλης (πιο ομοιόμορφη αναλογία της προς το εσωτερικό τους).

Παρατηρούμε τα αστέρια σε αυτούς τους νάνους γαλαξίες να έχουν διαφορετική διασπορά μεταλλικότητας από τα αστέρια στην άλω του Γαλαξία μας. Η παραγωγή στοιχείων α από αστέρια μεγάλης μάζας μειώθηκε σύντομα, μαζί με τον ρυθμό σχηματισμού άστρων, αλλά η παραγωγή Fe συνεχίστηκε λόγω των μικρότερων αστεριών που οδηγήθηκαν σε SNIa (μοντέλο χρονικής καθυστέρησης). Αυτό επιβεβαιώνεται και από τα στοιχεία αργής και γρήγορης απορρόφησης νετρονίων.

Συμπεράσματα από τους σφαιροειδείς νάνους

.Από την σύγκριση των αναλογιών (α/Fe) προκύπτει ότι ο Γαλαξίας μας βίωσε διαφορετικό ιστορικό αστρογέννησης.

.Η αναλογία αυτή είναι πάντα μικρότερη στους σφαιροειδείς από ότι στον Γαλαξία, για ίδιο (Fe/H). Αυτό αποτελεί συνέπεια του μοντέλου χρονικής καθυστέρησης που προβλέπεται για γαλαξίες με χαμηλότερο ρυθμό αστρογέννησης.

.Η χαμηλή αστρογέννηση έχει ως αιτία τους ισχυρούς γαλαξιακούς ανέμους ή την απώλεια αερίου γενικώς.

.Η αναλογία s (στοιχεία ταχείας απορρόφησης νετρονίων)/Fe είναι μεγαλύτερη από ότι στον Γαλαξία μας, για ίδιο (Fe/H). Άλλη μια συνέπεια της χρονικής καθυστέρησης.

.Οι σφαιροειδείς της τοπικής ομάδας περιέχουν πολύ παλαιά αστέρια αλλά οι περίοδοι αστρογέννησης ήταν αρκετά εκτεταμένες, πολύ μετά τον επαναιονισμό. Αφθονίες όπως του στοιχείου s (Ba) δεν μπορούν να δικαιολογηθούν με διακοπή της αστρογέννησης κατά την εποχή του επαναιονισμού.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι δεν μπορεί να αποτέλεσαν οι σφαιροειδείς νάνοι τους θεμέλιους λίθους του Γαλαξία μας, αντίθετα από τις προβλέψεις του μοντέλου CDM. Μάλλον η άλως του Γαλαξία μας σχηματίστηκε από προγενέστερη συσσώρευση ανώμαλων νάνων γαλαξιών που σχημάτισαν αστέρια για μικρό χρονικό διάστημα πριν καταστραφούν. Όσο αφορά τους σφαιροειδείς που συσσώρευσε ο Γαλαξίας μας, οι γαλαξιακοί άνεμοι επηρέασαν τις χημικές αφθονίες των αστεριών τους και η συσσώρευσή τους έγινε στην διάρκεια του χρόνου μέχρι και σήμερα.

Υπάρχουν και οι πολύ αμυδροί γαλαξίες στην τοπική μας ομάδα (ultra faint dwarfs), πολύ παλαιοί και φτωχοί σε μέταλλα, με μικρές μάζες (ο νάνος του Ηρακλή έχει 40000- 70000 ηλιακές μάζες). Οι αφθονίες των στοιχείων στα αστέρια τους μας δείχνουν μικρής δυναμικότητας αστρογέννηση.

Άλλοι σπειροειδείς γαλαξίες

Τα συμπεράσματα από τους σπειροειδείς της τοπικής ομάδας είναι

.Υπάρχει μια αναλογία του ρυθμού σχηματισμού αστεριών και της επιφανειακής πυκνότητας του αερίου.

.Αναγνωρίζουμε διαβαθμίσεις αφθονίας στους δίσκους των τοπικών γαλαξιών, όπως στον δίσκο του δικού μας (εσωτερικός- εξωτερικός δίσκος). Οι διαβαθμίσεις είναι πιο ομαλές σε γαλαξίες με ράβδο. Η ράβδος πρέπει να προκαλεί γωνιακές ροές που εξομοιώνουν τις διαβαθμίσεις, αν έχουν αρκετή ταχύτητα.

.Ανάμεσα στους γαλαξίες του πεδίου και σε αυτούς σε σμήνη βρήκαμε διαφορές στην διασπορά του αερίου στους δίσκους τους. Οι γαλαξίες σε σμήνη έχουν βιώσει απώλεια μέσω πίεσης εμβολής (ram pressure).

.Οι διαβαθμίσεις χρώματος μπορούν, όπως οι διαβαθμίσεις μεταλλικότητας, να μας δώσουν πληροφορίες για τους αστρικούς πληθυσμούς στους δίσκους, βάσει του μοντέλου του από μέσα προς τα έξω χτισίματος των γαλαξιών.

.Οι μεγαλύτερης μάζας δίσκοι είναι πιο κόκκινοι, πιο πλούσιοι σε μέταλλα και πιο φτωχοί σε αέρια. Είναι και παλαιότεροι.

Χημικά μοντέλα των σπειροειδών.

Η διασπορά αερίου και οι χημικές αφθονίες του M101 μας δείχνουν μικρότερο χρονοδιάγραμμα σχηματισμού δίσκου(σηματίστηκε πιο γρήγορα) από ότι στον Γαλαξία μας, και η διαφορά των χρονοδιαγραμμάτων εσωτερικών με εξωτερικών περιοχών του M101 είναι μικρότερη από ότι στον Γαλαξία μας. Οι σπειροειδείς με πιο ομαλές διαβαθμίσεις αφθονίας στοιχείων σχημάτισαν δίσκους πιο γρήγορα (ταχύτερη επικάθηση του αερίου στον δίσκο). Προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα

.Οι δίσκοι των σπειροειδών γαλαξιών σχηματίστηκαν από μέσα προς τα έξω και οι μεγαλύτερης μάζας σχηματίστηκαν γρηγορότερα.

.Αυτό σημαίνει ταχύτερη συσσώρευση αερίου και ταχύτερο ρυθμό αστρογέννησης.

.Έτσι οι μεγαλύτερης μάζας σπειροειδείς είναι και οι παλαιότεροι.

