

## Σχηματισμός, εξέλιξη και μακροζωία των αστρικών σμηνών μεγάλης μάζας.

Οι αστρικοί πληθυσμοί των νεαρών και παλαιών αστρικών σμηνών μεγάλης μάζας.

Τα παλαιότερα σφαιρωτά σμήνη περιέχουν μόνο παλαιά αστέρια μικρής μάζας και τα υπολείμματα των μεγαλύτερων αστεριών του παρελθόντος. Πρόσφατα η ανακάλυψη πολλαπλών αστρικών πληθυσμών στα σφαιρωτά σμήνη μας δείχνει ότι αυτά βίωσαν σημαντικές διαδικασίες χημικού εμπλουτισμού και δυναμικής εξέλιξης στην νεαρή τους ηλικία. Δεν έχουμε ξεκάθαρες ενδείξεις ότι τα σημερινά νεαρά σμήνη μεγάλης μάζας έχουν κοινή προέλευση με τα σφαιρωτά σμήνη.

### Τα σμήνη με πρωτοαστέρια μεγάλης μάζας

Ενώ οι ιδιότητες των αστρικών σμηνών όπως η IMF (initial mass function, αρχική συνιστώσα μάζας, η αναλογία μεγάλης μάζας/ μικρής μάζας αστέρια) φαίνονται να είναι καθολικές στο σύμπαν, παρατηρούμε ότι τα αστρικά σμήνη που δημιουργούνται σε ακραία μεγάλης μάζας νέφη μπορούν να έχουν διαφορετικές ιδιότητες. Αν τα αστέρια μικρής μάζας συσσωρεύουν την μάζα που θα έχουν στην κύρια ακολουθία με διασπορά που να είναι σύμφωνη με την IMF, τα μεγάλης μάζας αστέρια πρέπει να συσσωρεύουν αέριο απευθείας από το νέφος, μέσω σποραδικών ροών αερίου. Ακόμα, στα μεγάλης μάζας νέφη η αστρογέννηση δεν πρέπει να είναι σταθερή για διάστημα πάνω από 1 εκατομμύριο έτη, αλλά οι εξάρσεις της αστρογέννησης πρέπει να ωφελούν την δημιουργία αστεριών μεγάλης μάζας.

Ο ρόλος του γαλαξιακού περιβάλλοντος στον πληθυσμό νεαρών αστρικών σμηνών

Οι λαμπρότητες και μάζες των σμηνών αποτελούν σημαντικά εργαλεία στην κατανόηση τη επίδρασης από το γαλαξιακό περιβάλλον στον σχηματισμό YSC (young star clusters, νεαρών αστρικών σμηνών). Το πόσο μεγάλης μάζας σμήνη μπορεί να δημιουργηθούν σε έναν γαλαξία εξαρτάται από τις ιδιότητές του (πυκνότητα του αερίου, πίεση του αερίου, ρυθμός αστρογέννησης). Παρατηρούμε ότι οι ελλειπτικοί νάνοι γαλαξίες που βρίσκονται στα πολύ πυκνά περιβάλλοντα στο εσωτερικό των γαλαξιακών σμηνών περιέχουν περισσότερα σφαιρωτά σμήνη από τους ανώμαλους νάνους γαλαξίες του πεδίου. Φαίνεται οι πρώτοι να βίωσαν έντονη αστρογέννηση (starburst) πριν απογυμνωθούν από το αέριό τους. Σε αυτήν την φάση δημιουργήθηκε και μεγάλος αριθμός αστρικών σμηνών. Αντίθετα οι νάνοι του πεδίου δεν βίωσαν έντονη αστρογέννηση.

Η μεταβολή της αποτελεσματικότητας δημιουργίας σμηνών CFE (cluster formation efficiency) κατά την έκρηξη αστρογέννησης (starburst) μπορεί να αποδειχτεί κοσμικά σημαντική. Στον starburst γαλαξία ESO338 οι γαλαξιακής κλίμακας εκροές και ιονισμοί της ύλης συνδέονται άμεσα με τα νεαρά αστρικά σμήνη μεγάλης μάζας. Μια τιμή κοντά στο 50% της CFE, που σημαίνει μαζική παραγωγή αστερών μεγάλης μάζας, έχει μεγάλη επίδραση στην μεσοαστρική ύλη, όπως συμβαίνει στον παραπάνω γαλαξία.

Για την πλήρη περιγραφή των πληθυσμών νεαρών αστρικών σμηνών απαιτείται η γνώση των γενικών ιδιοτήτων δημιουργίας των, αλλά και της επίδρασης του γαλαξιακού περιβάλλοντος.

Ο σχηματισμός των νεαρών σμηνών μεγάλης μάζας (YMC, young massive clusters)

Σε γαλαξίες αστρογέννησης, όπως ο M83, παρατηρούμε πυκνά μοριακά νέφη μεγάλης μάζας, απαραίτητα για την δημιουργία αστρικών σμηνών μεγάλης μάζας. Δεν τα παρατηρούμε στον Γαλαξία μας ή στον M31, αλλά στον Γαλαξία μας παρατηρούμε μερικά νεαρά σμήνη μεγάλης μάζας. Έτσι πρέπει να σχηματίζονται πυκνά μοριακά νέφη μεγάλης μάζας και στον Γαλαξία μας. Οι παρατηρήσεις (υπολειμμάτων) μοριακών νεφών γύρω από YMC όπως τα NGC3603, Westerlund 2 δείχνουν ότι αυτά προέρχονται από συγκρούσεις γιγάντιων μοριακών νεφών (GMC, giant molecular clusters). Τα συνηθισμένα μοριακά νέφη του γαλαξιακού δίσκου σχηματίζουν ανοιχτά αστρικά σμήνη και όχι YMC. Τα μοριακά νέφη που μπορούν να σχηματίσουν αστρικά σμήνη μεγάλης μάζας είναι πολύ πιο πυκνά από αυτά του Γαλαξία μας. Η διασπορά ταχυτήτων σε ένα τέτοιο νέφος (20 km/s) ταιριάζει με αυτήν που παρατηρούμε στο Westerlund 2.

Η απεικόνιση αερίου και σκόνης του υπέρ νεφελώματος (super star cluster) στον NGC 5253 στα υπό- χιλιοστόμετρα

Ένα γιγάντιο μοριακό νέφος περικλείει το υπέρ νεφέλωμα στον NGC 5253. Μας παρέχει πληροφορίες για τον σχηματισμό και την διαδικασία ανάδρασης σε ένα τέτοιο νεφέλωμα. Το υπέρ- σμήνος που δημιουργείται έχει 1 εκατομμύριο ηλιακές μάζες και 1 δις ηλιακές λαμπρότητες. Το νέφος είναι ασυνήθιστα ζεστό (200K) που σημαίνει ότι θερμαίνεται από το σμήνος. Το νέφος έχει μάζα σκόνης 15000 ηλιακές. Παρουσιάζει μια αναλογία αερίου/σκόνης 1/50, τουλάχιστον 1 τάξη μεγέθους υψηλότερη σε σκόνη από ότι περιμέναμε για αυτόν τον γαλαξία μικρής μεταλλικότητας. Πρέπει να εμπλουτίστηκε από τον αστρικό άνεμο του σμήνος (περιέχει χιλιάδες αστέρια τύπου O).

Από την ανάλυση της αστρικής μάζας του σμήνος συμπεραίνουμε ότι η αποτελεσματικότητα αστρογέννησης κατέχει εκεί ρεκόρ αγγίζοντας το 60% (star formation efficiency, πόσο αέριο μετατρέπεται σε αστέρια).

Η κατάπαυση του αστρικού ανέμου θα συμβεί μόνο αν φτάσει σε μεταλλικότητα 1,5 φορές αυτή του Ηλίου, με αποτέλεσμα να ψυχθεί αρκετά. Αναμένονται ακόμα πολλά επεισόδια αστρογέννησης.

## Η ανάδραση από υπέρ σμήνη αστεριών στους γαλαξίες αστρογέννησης ESO338-IG04 και Haro 11

Τα υπέρ σμήνη αστεριών (αστρικά σμήνη μεγάλης μάζας) εκπέμπουν μεγάλες ποσότητες συνεχούς ακτινοβολίας (φωτονίων) Lyman με αποτέλεσμα να τροφοδοτούν με ροπή την μεσοαστρική ύλη. Όταν τα αστέρια μεγάλης μάζας δίνουν εκρήξεις σουπερνόβα η παραπάνω δραστηριότητα ενισχύεται με έκλυση μηχανικής ενέργειας. Η μελέτη της μεσοαστρικής ύλης γύρω από τέτοια σμήνη μας προσφέρει λεπτομέρειες για αυτή την ανάδραση (feedback). Τα δεδομένα από την ανάλυση της κινηματικής του ιονισμένου αερίου μας δείχνουν ότι η μηχανική ανάδραση και η ανάδραση ιονισμού των υπέρ σμηνών αστεριών (super star clusters) στους γαλαξίες μεταβάλλει την κατάσταση και την κινηματική της μεσοαστρικής ύλης. Δημιουργούνται πολύ ιονισμένες <φούσκες> ύλης γύρω από τα σμήνη, που καθιστούν τα κέντρα των γαλαξιών πολύ ιονισμένα. Αυτό μας δείχνει ότι οι περιοχές (HII) γύρω από τα ανεξάρτητα σμήνη είναι δεσμευμένες βαρυτικά σε αυτά, επιτρέποντας στα φωτόνια ιονισμού να αποδράσουν και να ιονίσουν περαιτέρω την μεσοαστρική ύλη.

Στον γαλαξία ESO338-IG04 ανακαλύψαμε ότι η έκρηξη αστρογέννησης άρχισε πριν 40 εκατομμύρια έτη, με αυξομειώσεις του ρυθμού αστρογέννησης. Στον Haro 11 η αστρογέννηση είναι συγκεντρωμένη σε 3 κόμβους, με τον καθένα να περιέχει δεκάδες παλαιότερα και νεότερα αστρικά υπέρ σμήνη. Και οι 2 γαλαξίες παρουσιάζουν μεγάλη αποτελεσματικότητα σχηματισμού αστρικών σμηνών.

Σε μεγάλη κλίμακα, τα δεδομένα μας δείχνουν ότι οι άλως και των 2 γαλαξιών έχουν μικρή πυκνότητα και είναι μερικώς ιονισμένες. Ο ESO338-IG04 παρουσιάζει ξεκάθαρα εκροές ύλης και 2 κώνους ιονισμένης ύλης. Τα σμήνη με ηλικία περίπου 30 εκατομμύρια έτη είναι αυτά που κυρίως μετάδωσαν μηχανική ενέργεια στην μεσοαστρική του ύλη ενώ ο ιονισμός οφείλεται σε σμήνη με ηλικία μικρότερη των 4 εκ. ετών. Στον Haro 11 οι <κόμβοι> αστρογέννησης περιβάλλονται από μεγάλης πυκνότητας και ιονισμού περιοχές (HII), που περιέχουν νεαρά σμήνη αστεριών.

Και οι 2 γαλαξίες μας δείχνουν ότι η μεσοαστρική ύλη διαταράσσεται σημαντικά από την ανάδραση μέσω των αστρικών υπέρ σμηνών. Εκτός από τις μικρές περιοχές (HII) γύρω από κάθε τέτοιο σμήνος, ο ιονισμός κάνει ολόκληρο τον γαλαξία να συμπεριφέρεται ως μια γιγάντια περιοχή (HII) που διαστέλλεται μέσα στις πιο εξωτερικές ουδέτερες περιοχές της μεσοαστρικής ύλης.

## Είναι διπλό το αστρικό σμήνος μεγάλης μάζας Westerlund 2? Μία επισκόπηση μεγάλης ανάλυσης του Hubble

Το Westerlund 2 (στον βραχίονα Καρίνας- Τοξότη και σε απόσταση 4,16 kpc) είναι ένα από τα μεγαλύτερης μάζας (>10.000 ηλιακές μάζες) νεαρά αστρικά σμήνη του Γαλαξία μας. Η εγγύτητά του μας προσφέρει την υψηλή χωρική ανάλυσή του. Βρήκαμε ότι περιέχει 2 συμπυκνώματα, το κυρίως σμήνος και ένα μικρότερου πληθυσμού

βόρειο συμπύκνωμα, κάτι σύνηθες για νεαρό σμήνος. Και τα δύο έχουν ηλικία 0,1- 0,2 εκατομμύρια έτη. Έτσι συμπεραίνουμε ότι έχουν σχέση το ένα με το άλλο. Το σμήνος αποτελεί την κεντρική ιονισμένη περιοχή του γιγάντιου μοριακού νέφους RCW 49, μάζας 100.000- 700.000 ηλιακές. Το σμήνος περιέχει πάνω από 80 αστέρια τύπου O.

Λόγω της θέσης του στον γαλαξιακό δίσκο ο αστρικός πληθυσμός του ανακατεύεται (παρατηρησιακά) με πολλά άσχετα με το σμήνος αντικείμενα στην γραμμή θέασης. Πετύχαμε να διαχωρίσουμε τον πληθυσμό του από τα άλλα αντικείμενα. Η χρωμική ανάλυση μας έδειξε ότι τα 2 συμπυκνώματα έχουν το ίδιο φαινόμενο μέγεθος, αλλά το κυρίως συμπύκνωμα είναι πιο πυκνό κατά παράγοντα 2.

Το Westerlund 2 είναι ίδιας ηλικίας ή ακόμα πιο νεαρό από τα άλλα νεαρά σμήνη όπως το NGC 3603 ή το R136 στο μεγάλο Μαγγελανικό νέφος. Είναι νεαρότερο από το Westerlund 1, το μεγαλύτερης μάζας νεαρό αστρικό σμήνος του Γαλαξία.

## Ιστορικά αστρογέννησης των κοντινών γαλαξιών

Το ιστορικό σχηματισμού αστεριών ενός γαλαξία (SFH, star formation history) είναι μια λεπτομερής περιγραφή του πως, πότε και που σχηματίζονται αστέρια σε έναν γαλαξία. Το ιστορικό αυτό προκύπτει από το διάγραμμα χρώματος- λαμπρότητας (CMD, color- magnitude diagram, παρόμοιο με το H/R) για τους γαλαξίες που πετυχαίνουμε ανάλυση μεμονωμένων αστεριών. Οι ισόχρονες στο διάγραμμα (τα ίχνη της εξέλιξης μεμονωμένων αστεριών) μας βοηθάνε στην θεωρητική κατασκευή τέτοιων διαγραμμάτων για μια ποικιλία συνθηκών δημιουργίας αστεριών, όπως της συνιστώσας αστρικής μάζας (IMF), την αναλογία των διπλών αστεριών, την σχέση ηλικίας- μεταλλικότητας, την απόσταση, την εξάλειψη του φωτός κ.α. Φυσικά χρησιμοποιούμε και τα δεδομένα των παρατηρήσεων. Με το τηλεσκόπιο Hubble πετυχαίνουμε ανάλυση των μεμονωμένων αστεριών που μας φανερώνει ως και το παλαιότερο σημείο αποκοπής από την κύρια ακολουθία, για το τοπικό γαλαξιακό σμήνος. Έτσι παίρνουμε ιστορικό αστρογέννησης για όλη την μέχρι τώρα διάρκεια ζωής των γαλαξιών. Η κύρια ακολουθία (MS) περιέχει αστέρια διαφορετικής ηλικίας με διασπορά στο χρώμα (ανάλογα την μάζα τους). Ο οριζόντιος κλάδος (HB) (γίγαντες από μικρής μάζας αστέρια) περιέχει μόνο παλαιά αστέρια χαμηλής μεταλλικότητας, άνω των 10 δις ετών. Δεν είναι εύκολο να αποδοθεί ως ιστορικό αστρογέννησης, μας δηλώνει μόνο την παρουσία του πληθυσμού αρχαίων αστεριών. Ο κλάδος των κόκκινων γιγάντων (RGB) περιέχει αστέρια ηλικίας πάνω από 1-2 δις ετών, αλλά δεν μπορεί να χρησιμεύσει για το ιστορικό αστρογέννησης λόγω εκφυλισμού της σχέσης ηλικίας- μεταλλικότητας (οι ερυθροί γίγαντες έχουν <μολυνθεί> με μεταλλικότητα από το εσωτερικό τους). Ο ασυμπυκνωτικός κλάδος (AGB) αποτελεί ένα μείγμα αστεριών μέσης ηλικίας.

## Ιστορικά αστρογέννησης της τοπικής ομάδας γαλαξιών

Η τοπική ομάδα (LG) περιέχει 50 γαλαξίες σε ακτίνα 1 Mpc. Κυριαρχείται βαρυντικά από μόλις 4 γαλαξίες, τον δικό μας, τον γαλαξία της Ανδρομέδας, τον M33 και τον ανώμαλο νάνο γαλαξία μεγάλο νέφος του Μαγγελάνου. Όλοι οι άλλοι γαλαξίες είναι νάνοι ,μικρότερης μάζας, με τον ορισμό νάνος γαλαξίας να ανταποκρίνεται σε γαλαξία με βολομετρική λαμπρότητα  $>-18$  mag.

.Μικρό και μεγάλο Μαγγελανικό νέφος. Μετά από μια αρχική έκρηξη αστρογέννησης και τα 2 νέφη παρουσίασαν μια ελάττωση πριν από 10 δις ως πριν από 3,5 δις έτη. Οι κορυφώσεις της αστρογέννησης του μεγάλου Μαγγελανικού στα 0,5 δις έτη και στα 2-3 δις έτη συμπίπτουν με αυτές του μικρού, κάτι που δείχνει ότι τα τελευταία δις έτη έχουν κοινό ιστορικό εξέλιξης. Αυτές οι κορυφώσεις ταιριάζουν με περί- Γαλαξιακά περάσματά τους. Το 50% των μαζών τους συναθροίστηκε πριν 5-8 δις έτη. Το ιστορικό αστρογέννησής τους ταιριάζει με αυτό της τοπικής μας ομάδας (να σημειώσουμε ότι η μεταλλικότητα στο μικρό Μαγγελανικό είναι πολύ χαμηλή και στο μεγάλο πιο υψηλή, αλλά χαμηλότερη από ότι στον Γαλαξία μας).

.Ο γαλαξίας της Ανδρομέδας. Η άλως των 11 kpc, το αστρικό ρεύμα του (stream) και ο δίσκος του μοιράζονται ένα εκτεταμένο ιστορικό αστρογέννησης. Το 60 % της αστρικής μάζας της άλως αποτελείται από παλαιά αστέρια (11-13 δις ετών) μικρής μεταλλικότητας και το 40% αστέρια μεσαίας ηλικίας (6-8 δις ετών) μεγάλης μεταλλικότητας, που συνδέονται περισσότερο με τον εξωτερικό δίσκο παρά με την άλω. Η άλως των 11 kpc και το ρεύμα έχουν όμοιο διάγραμμα χρώματος-λαμπρότητας, παρόλο που το ρεύμα είναι κατά 1 δις έτη νεότερο. Αυτό σημαίνει <μόλυνση> της άλως από τον προ γεννήτορα του ρεύματος, όταν αυτός συσσωρεύτηκε στον γαλαξία της Ανδρομέδας. Ο δίσκος είναι νεότερος (4-8 δις ετών) και πιο πλούσιος σε μέταλλα. Τα πεδία της άλως στα 21 και 35 kpc είναι κυρίως παλαιά, με ηλικίες 10-11 δις έτη και χαμηλές μεταλλικότητες. Η εκτεταμένη άλως αποτελεί σημάδι του ιεραρχικού χτισίματος του γαλαξία (συσσώρευση μικρότερων γαλαξιών).

.Ο M33. Έχουμε ανάλυση μόνο για δύο περιοχές του. Αυτή στα 9,1 kpc (από τον γαλαξιακό πυρήνα) είναι νεαρότερης ηλικίας (3 δις ετών) και μεγαλύτερης μεταλλικότητας από αυτή των 11,6 kpc (7 δις ετών). Αυτά τα ιστορικά μας δείχνουν ότι ο δίσκος του γαλαξία αναπτύχθηκε από μέσα προς τα έξω.

. Οι νάνοι της τοπικής ομάδας. Οι σφαιροειδείς δεν έχουν αέριο και πρόσφατη αστρογέννηση, οι ανάμεσα σε σφαιροειδείς και ανώμαλους έχουν αέριο χωρίς πρόσφατη αστρογέννηση και οι ανώμαλοι έχουν αέριο και αστρογέννηση. Όλοι τους σχημάτισαν αστέρια πριν από 13 δις έτη.

## Τα ιστορικά αστρογέννησης πέρα από την τοπική ομάδα γαλαξιών

Σε αποστάσεις μεγαλύτερες του 1 Mpc είναι δύσκολο να πετύχουμε ανάλυση μεμονωμένων αστεριών. Ενώ στην τοπική ομάδα έχουμε σπειροειδείς, δεν έχουμε

άλλους τύπους γαλαξιών. Ο κοντινότερος ελλειπτικός είναι ο A Κενταύρου στα 3,8 Μpc. Ο κοντινότερος γαλαξίας αστρογέννησης είναι ο NGC 1569 στα 3,4 Μpc.

.Ο A του Κενταύρου. Το πιο εσωτερικό του πεδίο που έχουμε αναλύσει είναι στα 37 kpc (από τον γαλαξιακό πυρήνα). Κυριαρχεί η ηλικία των 8 δις ετών και αυξημένη μεταλλικότητα. Το διάγραμμα χρώματος- λαμπρότητας δεν ανιχνεύει έκρηξη αστρογέννησης.

. Ο ανώμαλος νάνος NGC 1669. Παρουσιάζει ισχυρή αστρογέννηση και χαμηλή μεταλλικότητα. Το παλαιότερο επεισόδιο έκρηξης αστρογέννησης ήταν πριν 10 δις έτη. Μετά υπήρξε μια μεγάλη εποχή ελαττωμένης αστρογέννησης ως το νέο ξέσπασμα στα 0,3-0,7 δις έτη. Αυτό έχει να κάνει με την κίνησή του μέσα από την γαλαξιακή του ομάδα (IC 342). Η αλληλεπίδραση με τον γαλαξία UGCA 92 (της ομάδας του) είναι η αιτία της πρόσφατης έκρηξης αστρογέννησης πριν από 10 εκατομμύρια έτη.

.Ο πιο φτωχός σε μέταλλα BCD (Blue compact dwarf), μπλε συμπαγής νάνος, 1 Zw 18. Είναι ο πιο μακρινός γαλαξίας που πετυχαίνουμε ανάλυση μεμονωμένων αστεριών (20 Μpc). Έχει πολύ χαμηλή μεταλλικότητα (1/50 της ηλιακής), άρα συνθήκες κοντά σε αυτές των γαλαξιών στην αρχική τους ηλικία. Και αυτός δημιούργησε αστέρια πριν από 13 δις έτη.

.Ο κοντινότερος φτωχός σε μέταλλα BCD, DDO68. Απέχει 12,1 Μpc. Έχει νεαρά αστέρια στο κέντρο του και αστέρια μεγαλύτερης (>1 δις έτη) ηλικίας παντού. Στις περιοχές με το περισσότερο μοριακό υδρογόνο υπάρχουν υπό- πληθυσμοί, νεαρότεροι των 10 εκατομμυρίων ετών. Σεν μια τέτοια περιοχή ανιχνεύτηκε μια αστρική ροή, που σημαίνει διαδικασία συσσώρευσης. Διαπιστώθηκε μεγάλη δραστηριότητα αστρογέννησης για την εποχή από 10 εκατομμύρια χρόνια ως 1 δις έτη πριν. Μια ακόμα σε ισχύ έκρηξη αστρογέννησης άρχισε πριν από 1 εκατομμύρια έτη.

## Συμπεράσματα

Τα ιστορικά αστρογέννησης των κοντινών νάνων γαλαξιών έχουν μεγάλη διακύμανση, δηλώνοντας ότι η εξέλιξη των νάνων επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες. Στους γαλαξίες της τοπικής ομάδας με παρόμοια μορφολογία (οι 3 σπειροειδείς) έχουμε αποδείξεις του ιεραρχικού χτισίματός τους, ενώ στους γαλαξίες αστρογέννησης εκτός τοπικής ομάδας είδαμε ότι το ιστορικό αστρογέννησης επηρεάζεται πολύ από τις γαλαξιακές αλληλεπιδράσεις.

## Η μελέτη των αστρικών υπέρ- σμηνών (super star cluster) σε γαλαξίες αστρογέννησης με την επισκόπηση SUNBIRD

Τα υπέρ- σμήνη (SSC) αποτελούν τα νεαρότερα και μεγαλύτερης μάζας βαρυτικά δεμένα αστρικά σμήνη στο σύμπαν. Δημιουργούνται σε περιβάλλοντα με έντονη και βίαιη αστρογέννηση. Μελετήσαμε τις ιδιότητες αυτών των σμηνών σε 42 κοντινούς, λαμπρούς στο υπέρυθρο (λόγω σκόνης) γαλαξίες.

Αυτοί οι γαλαξίες (LIRG, luminous infrared galaxies) εκπέμπουν στο υπέρυθρο με ισχύ 100 δις- 1 τρις ηλιακές λαμπρότητες. Οι περισσότεροι είναι σε αλληλεπίδραση και παρουσιάζουν έντονη αστρογέννηση στις κεντρικές περιοχές τους, που αποτελούν ιδανικά περιβάλλοντα για την δημιουργία υπέρ- σμηνών. Αυτά τα σμήνη μας παρουσιάζουν την δημιουργία των αστεριών πολύ μεγάλης μάζας. Τα περισσότερα και μεγαλύτερα τέτοια σμήνη υπάρχουν σε γαλαξίες με έντονη αστρογέννηση. Δεν έχουμε κατανοήσει ακόμα τα αρχικά στάδια δημιουργίας αυτών των σμηνών και τον ρόλο του περιβάλλοντος στην διαμόρφωση της συνιστώσας αρχικής μάζας τους (CIMF).

Ένα πρώτο συμπέρασμα της επισκόπησης είναι ότι οι γαλαξίες αστρογέννησης, όπως είναι οι LIRG, περιέχουν υπέρ- σμήνη αστεριών που έχουν διαταραχθεί από το περιβάλλον τους. Όσο πιο λαμπρό είναι ένα τέτοιο σμήνος στο υπέρυθρο, τόσο πιο αυξημένος είναι ο ρυθμός αστρογέννησης σε αυτό (SFR). Αυτό σημαίνει ότι η λαμπρότητα στο υπέρυθρο κυριαρχείται από την αστρογέννηση. Το γαλαξιακό περιβάλλον ρυθμίζει την αποτελεσματικότητα δημιουργίας αστρικών σμηνών και υπέρ- σμηνών. Για τον καθορισμό της σχέσης λαμπρότητας στο κοντινό υπέρυθρο/ αστρογέννησης ενός γαλαξία πρέπει να γνωρίζουμε την επίδραση του περιβάλλοντος και την ερυθροποίηση (πόσο πιο κόκκινος φαίνεται από ότι είναι πραγματικά, λόγω της μεσογαλαξιακής ύλης).

Στα εκατοντάδες υπέρ- σμήνη της επισκόπησης είδαμε ότι πολλά έχουν ηλικίες μικρότερες από 30 εκατομμύρια έτη. Γενικά οι μάζες των σμηνών στους γαλαξίες υπό αλληλεπίδραση είναι από 10.000 ως 100 εκατομμύρια ηλιακές, με πιθανότερο μέγεθος μάζας στις 100.000 ηλιακές. Ένα πλούσιο σε γιγάντια μοριακά νέφη (GMC) περιβάλλον σημαίνει δημιουργία υπέρ- σμηνών. Τα περιβάλλοντα των γαλαξιών υπό αλληλεπίδραση μπορούν να επηρεάσουν την μακροχρόνια συντήρηση των υπέρ- σμηνών.

**30 Doradus. Το ιστορικό αστρογέννησης στο ορατό και στο κοντινό υπεριώδες του σμήνος αστρογέννησης NGC 2070, μέσω του Hubble Tarantula Treasury Project.**

Το 30 Doradus, στο μεγάλο νέφος του Μαγγελάνου, είναι η πιο ενεργή περιοχή αστρογέννησης της τοπικής γαλαξιακής ομάδας. Η κεντρική του περιοχή κυριαρχείται από το σμήνος αστρογέννησης NGC 2070, ένα πλήθος πυκνών αστρικών σμηνών. Το φως που εκπέμπουν κυριαρχείται από αστέρια μεγάλης μάζας τύπου O,B. Το κεντρικό και σημαντικότερο από αυτά τα σμήνη είναι το υπέρ- σμήνος R 136. Η εγγύτητα του σμήνος επιτρέπει στο τηλεσκόπιο Hubble να πετύχει ανάλυση 0,1 pc, δηλαδή μεμονωμένα αστέρια ως και μικρότερης μάζας από τον Ήλιο μας.

Μελετήσαμε το ιστορικό αστρογέννησης των τελευταίων 50 εκατομμυρίων ετών για τα 40 κεντρικά pc του 30 Doradus, που περιλαμβάνουν και το NGC 2070. Οι ισόχρονες στο διάγραμμα H/R μας επιτρέπουν να συμπεριλάβουμε όλες τις φάσεις

αστρικής εξέλιξης, από την προ κυρίας ακολουθίας φάση ως την μετά κυρίας ακολουθίας φάση, για αστέρια από 0,1 ως 350 ηλιακές μάζες.

Σε μια τέτοια μελέτη πρέπει να συμπεριλάβουμε τον βαθμό ερυθροποίησης, που μπορεί να διαφέρει ανάλογα την πυκνότητα της περιοχής και τον αστρικό άνεμο. Επίσης υπάρχει έντονη παρενόχληση από τυχαία αστέρια στην γραμμή θέασης (crowding).

Και στο υπεριώδες και στο ορατό είδαμε ότι η αστρογέννηση στην περιοχή πυροδοτήθηκε πριν από 20 εκατομμύρια έτη και επιτάχυνε πριν από 7 εκατομμύρια έτη, με μικρή κορύφωση στα 5-7 εκατομμύρια και μια μεγαλύτερη στα 1-4 εκατομμύρια έτη.

Σε αυτή την κορύφωση η αστρογέννηση μεταφέρθηκε από την περιφέρεια της περιοχής στο κέντρο της. Ο νεαρότερος πληθυσμός (<10 εκατομμύρια έτη) παρουσιάζει μικρότερη ερυθροποίηση από τον παλαιότερο (που περιέχει αστέρια μικρότερης μάζας).

## Το ιστορικό συνάθροισης του κεντρικού αστρικού σμήνους του Γαλαξία

Ένα πυκνό σμήνος αστεριών, το κεντρικό αστρικό σμήνος (nuclear star cluster) βρίσκεται μέσα στα 10 κεντρικά pc του Γαλαξία μας. Αποτελεί από μόνο του ένα διακριτό μέρος του Γαλαξία. Τα κεντρικά σμήνη είναι συνήθη στους γαλαξίες, και στο 75% των γειτονικών μας γαλαξιών τα έχουμε ανακαλύψει. Όμως δεν είναι πλήρως κατανοητό το πώς σχηματίζονται. Για το κεντρικό σμήνος του Γαλαξία μας, μπορούμε να έχουμε καλή χωρική ανάλυση του αστρικού πληθυσμού του και της κινηματικής του. Υπάρχουν δεκάδες εκατομμύρια αστέρια στα 10 κεντρικά pc του Γαλαξία μας. Τα περισσότερα από αυτά έχουν ηλικία μερικά δις έτη, είναι παλαιά αστέρια μεταγενέστερου (late) τύπου. Αλλά στο κεντρικό pc υπάρχουν περισσότερα από 100 καυτά αστέρια προγενέστερου (early) τύπου με ηλικίες μόλις μερικά εκατομμύρια έτη.

Γενικά τα κεντρικά αστρικά σμήνη των γαλαξιών καλύπτουν περιοχές από μερικά ως δεκάδες pc και έχουν μάζες από 100.000 ως 100 εκατομμύρια ηλιακές. Το δικό μας έχει μάζα 30 εκατομμύρια ηλιακές και διάμετρο 4,2 pc. Σε άλλους γαλαξίες αυτά τα σμήνη περιέχουν μια υπερμεγέθη μαύρη τρύπα (super massive black hole, SMBH). Αυτή του Γαλαξία μας έχει μάζα 4,3 εκατομμύρια ηλιακές. Μας ενδιαφέρει πως συσσωρεύτηκε η μάζα στο κέντρο του Γαλαξία μας ώστε να κατανοήσουμε πως αναπτύχθηκαν η κεντρική μαύρη τρύπα και το κεντρικό σμήνος. Υπάρχουν 2 σενάρια.

- 1) Η συσσώρευση αερίου από τον δίσκο. Τότε έχουμε αστρογέννηση μέσα στην κεντρική περιοχή
- 2) Τα αστέρια σχηματίστηκαν σε μεγάλης μάζας σμήνη (σφαιρωτά) έξω από το κέντρο του Γαλαξία και μετανάστευσαν σε αυτό μέσω δυναμικών τριβών.



Για να βρούμε την λύση διεξάγουμε 2 έρευνες, την μελέτη του αστρικού πληθυσμού (οι διαφορετικοί αστρικοί πληθυσμοί μας δείχνουν αν όλα τα αστέρια σχηματίστηκαν την ίδια χρονική περίοδο), και την μελέτη της κινηματικής των άστρων που μας δείχνει την προέλευσή τους.

Τα νεαρά αστέρια του κεντρικού σμήνους έχουν συγκέντρωση προς το Γαλαξιακό κέντρο, κάτι που σημαίνει ότι δημιουργήθηκαν εκεί. Αυτό αποτελεί απόδειξη του σεναρίου της δημιουργίας αστεριών στο κέντρο και όχι της μετανάστευσής τους προς τα εκεί. Ένα σμήνος με νεαρά αστέρια που εισέρχεται στην κεντρική περιοχή θα απολέσει πολλά από αυτά στην διαδρομή μέσω παλλιρικών διαταραχών. Θα αφήνε ένα ίχνος από νεαρά αστέρια, κάτι που δεν φαίνεται να υπάρχει.

Ο χάρτης ταχυτήτων του σμήνους μας δείχνει ότι αυτό περιστρέφεται με την φορά του Γαλαξία. Ο χάρτης διασποράς αστρικών ταχυτήτων δείχνει αύξηση της ταχύτητας προς το κέντρο. Επίσης μας παρουσιάζει μια πολύπλοκη εσωτερική δομή της κινηματικής. Έχουμε αποδείξεις της ύπαρξης μιας υπό-δομής που περιστρέφεται κάθετα στο γαλαξιακό επίπεδο. Αυτό αποτελεί ένδειξη ότι μπορεί η εισροή ενός σμήνους μεγάλης μάζας να συνέβαλλε στον σχηματισμό του κεντρικού σμήνους.

## Αστρικά σμήνη στα κέντρα των γαλαξιών (NSC, nuclear star clusters)

Το κέντρο ενός γαλαξία περιέχει 2 ειδών διακριτά, συμπαγή μέρη. Την κεντρική μαύρη τρύπα και τα σμήνη αστεριών (NSC). Τα σμήνη αυτά είναι τα πυκνότερα αστρικά συστήματα του σύμπαντος με μάζες 10 εκατομμύρια ηλιακές σε χώρο 5 pc. Αν και η παρουσία τους είναι τόσο συχνή, ο μηχανισμός σχηματισμού τους είναι ακόμα υπό έρευνα. Οι 2 προτεινόμενοι μηχανισμοί είναι 1) η συσσώρευση και συγχώνευση αστρικών σμηνών στην κεντρική γαλαξιακή περιοχή και η 2) συσσώρευση αερίου που έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία αστεριών στην κεντρική περιοχή. Φαίνεται να συμμετέχουν και οι 2 μηχανισμοί.

Τα σμήνη αυτά έχουν μεγάλη παρουσία στους γαλαξίες με παρόμοια ή μικρότερη μάζα από τον δικό μας. Στους γαλαξίες πολύ μεταγενέστερου τύπου (σπειροειδείς) το ποσοστό με παρουσία NSC είναι στο 75%. Στους σπειροειδείς με ράβδο το ποσοστό πέφτει στο 55%, επειδή η κεντρική γαλαξιακή περιοχή είναι πιο πολύπλοκη λόγω της παρουσίας σκόνης και της αστρογέννησης. Οι νάνοι ελλειπτικοί και οι τύπου S0 έχουν ανάλογο ποσοστό 66%, που φτάνει το 100% για γαλαξίες με απόλυτο μέγεθος στο  $-19$  mag ή 10 δις ηλιακές μάζες. Από την άλλη, οι μεγάλης μάζας ελλειπτικοί ( $<20,5$  mag) δεν περιέχουν NSC, κάτι που φαίνεται από την διασπορά λαμπρότητας των κέντρων τους. Αυτό πρέπει να οφείλεται στις υπερμεγέθεις κεντρικές μαύρες τρύπες. Αυτοί οι γαλαξίες αποτελούν αποτέλεσμα συγχωνεύσεων. Κατά την διαδικασία της συγχώνευσης οι 2 κεντρικές μαύρες τρύπες απομακρύνουν αστέρια από την κεντρική περιοχή λόγω βαρυτικής αλληλεπίδρασης 3 σωμάτων.

Σχετικά με τους 2 μηχανισμούς σχηματισμού των σμηνών, ο δεύτερος ενισχύεται λόγω παρατήρησης αστρογέννησης στις κεντρικές περιοχές των γαλαξιών και της αναποτελεσματικής δυναμικής τριβής που απαιτείται για την συσσώρευση σφαιρωτών σμηνών προς το γαλαξιακό κέντρο. Μελετήσαμε τις δομές, τους αστρικούς πληθυσμούς και τις κινηματικές των NSC ώστε να συμπεράνουμε πόσο συμμετέχουν οι 2 μηχανισμοί στην δημιουργία τους.

## Ιδιότητες δομής

Λόγω της μικρής έκτασής τους είναι απαραίτητη η χωρική ανάλυση του Hubble στις σχετικές παρατηρήσεις. Τα NSC παρουσιάζονται πιο συμπαγή στο μπλε και πιο εκτεταμένα στο κόκκινο. Αυτό εξηγείται με μεγάλη συγκέντρωση νεαρών αστεριών στο κέντρο. Αν συγκρίνουμε αυτά τα σμήνη με σφαιρωτά του Γαλαξία μας βλέπουμε ότι έχουν παρόμοιο μέγεθος αλλά είναι 4 mag λαμπρότερα και πολύ μεγαλύτερης μάζας. Άρα είναι πυκνότερα από τα σφαιρωτά. Η πυκνότητά τους δεν μοιάζει καθόλου με τις γαλαξιακές ράβδους (δεν μπορεί να αποτελούν τμήμα της ράβδου).

## Αστρικοί πληθυσμοί

Τα NSC κυριαρχούν στα γαλαξιακά κέντρα, φωτομετρικά και κινηματικά. Έχουν πολλαπλούς αστρικούς πληθυσμούς ανεξάρτητα αν βρίσκονται σε μεταγενέστερου ή προγενέστερου τύπου γαλαξία. Στο κεντρικό σμήνος του Γαλαξία μας τα νεαρά αστέρια δείχνουν μεγάλη συγκέντρωση προς το κέντρο, σε ακτίνα 0,5 pc γύρω από την κεντρική μαύρη τρύπα, ενώ τα παλαιότερα βρίσκονται σε ακτίνα ως 4,2 pc. Αυτό σημαίνει ότι τα αστέρια δημιουργήθηκαν εκεί (είναι πολύ νεαρά ώστε να μετανάστευσαν από πιο εξωτερικές περιοχές). Ακόμα, τα αστέρια στην κεντρική περιοχή του Γαλαξία παρουσιάζονται αυξημένα σε μεταλλικότητα, πολύ αυξημένα σε σχέση με τα σφαιρωτά σμήνη (δεν μπορεί να προέρχονται από αυτά).

## Η κινηματική

Οι τελευταίες έρευνες έδειξαν ότι τα κεντρικά σμήνη περιστρέφονται. Πετυχαίνουμε την ανάλυση της κινηματικής σε αστρική και αερίου ως και μερικά παρσέκ. Ακόμα, βλέπουμε ίχνη της κινηματικής της κεντρικής μαύρης τρύπας. Το NSC του Γαλαξία μας περιστρέφεται με ταχύτητα 60 km/s περισσότερη από άλλα NSC, και έχει μια μικρή διαταραχή της ευθυγράμμισης με τον γαλαξιακό άξονα.

## Συμπεράσματα

Αντίθετα με την κεντρική μαύρη τρύπα, το κεντρικό αστρικό σμήνος μας παρέχει μια ορατή απόδειξη της εισροής αστεριών και αερίου στο γαλαξιακό κέντρο. Τα σημαντικότερα συμπεράσματα της έρευνας είναι

.Τα NSC είναι πολύ κοινά. Αυτό σημαίνει ότι και τα 2 σενάρια σχηματισμού ισχύουν παράλληλα.

.Τα NSC έχουν την μεγαλύτερη πυκνότητα αστρικών συστημάτων στο σύμπαν. Αυτό αποτελεί επιχείρημα υπέρ του πρώτου σεναρίου (σχηματισμός των αστεριών μέσα στην κεντρική γαλαξιακή περιοχή), αφού η συγχώνευση 2 σφαιρωτών σμηνών δεν μπορεί να δώσει ένα πιο πυκνό αντικείμενο από ό,τι ήταν αυτά. Για να γίνει ένα σμήνος τόσο πυκνό απαιτείται αέριο και αστρογέννηση, που θα απομακρύνουν από το σμήνος ενέργεια και στροφορμή (ο σχηματισμός αστεριών απορροφάει στροφορμή από το σύστημα).

.Τα NSC έχουν πολύπλοκα ιστορικά αστρογέννησης (πολλαπλούς αστρικούς πληθυσμούς). Αυτό ενισχύει και τα 2 σενάρια (και το σενάριο συσσώρευσης και συγχώνευσης σφαιρωτών σμηνών).

.Τα NSC περιστρέφονται. Και αυτό ενισχύει και τα 2 σενάρια.

.Τα NSC έχουν τα νεαρά αστέρια στα κέντρα τους. Αυτή η ιδιότητα είναι ξεκάθαρα υπέρ του σεναρίου σχηματισμού των αστεριών μέσα στην κεντρική γαλαξιακή περιοχή.

Τελικά φαίνεται να κυριαρχεί το παραπάνω σενάριο, τουλάχιστον για το κεντρικό σμήνος του Γαλαξία μας.

## Αστρικά σμήνη μεγάλης μάζας σε νάνους γαλαξίες

Οι νάνοι γαλαξίες περιέχουν πολλά σφαιρωτά σμήνη. Τα σφαιρωτά είναι γενικά πολύ πιο φτωχά σε μέταλλα από τα αστέρια του πεδίου σε έναν γαλαξία. Σε μερικούς νάνους όπως οι Fornax, WLM, IKN τα σφαιρωτά περιέχουν το 25% των φτωχών σε μέταλλα αστεριών του γαλαξία, έναντι 1-2% στους μεγαλύτερους γαλαξίες. Δεδομένου των χημικών ανωμαλιών στα σφαιρωτά (αστρικοί πληθυσμοί με διαφορετική μεταλλικότητα στο ίδιο σφαιρωτό) αυτό αποδυναμώνει το σενάριο εμπλουτισμού των σφαιρωτών από εσωτερικές διεργασίες (πολλαπλά επεισόδια αστρογέννησης), που απαιτεί την απώλεια μεγάλου μέρους της αρχικής τους μάζας. Θα έπρεπε τα σφαιρωτά στους νάνους να έχουν εμπλουτίσει τις γαλαξιακές άλως με αστέρια φτωχά σε μέταλλα. Γενικότερα, το πλήθος των φτωχών σε μέταλλα αστεριών αυτών των γαλαξιών είναι σήμερα μικρότερο από ό,τι θα έπρεπε αν η συνιστώσα αρχικής αστρικής μάζας τους έχει εκθετική τάση προς τις μικρότερες αστρικές μάζες (όπως συμβαίνει στον Γαλαξία μας). Μάλλον η συνιστώσα αρχικής αστρικής μάζας στα σφαιρωτά είναι <βαριάς κορυφής> (top heavy, σχηματίζονται περισσότερα αστέρια μεγάλης μάζας), που σημαίνει την περιορισμένη ύπαρξη φτωχών σε μέταλλα (παλαιών, άρα και μικρής μάζας) αστεριών.

## Σφαιρωτά σμήνη και αστέρια της άλως σε διαφορετικά περιβάλλοντα

Είναι γνωστό ότι η αναλογία σφαιρωτών σμηνών κυμαίνεται από γαλαξία σε γαλαξία. Παρουσιάζεται αυξημένη σε μερικούς νάνους, κάτι που μπορεί να οφείλεται στο γεγονός ότι σε μεγαλύτερης μάζας γαλαξίες τα δυναμικά γεγονότα (τριβές, συγχωνεύσεις κ.α.) διαταράσσουν τον σχηματισμό και την συντήρηση των σφαιρωτών. Το ενδιαφέρον είναι ότι και η σκοτεινή ύλη παρουσιάζει παρόμοια τάση, κάτι που δείχνει ότι η αναλογία σφαιρωτών σμηνών συνδέεται με αυτήν.

Υπάρχουν και διακυμάνσεις της συχνότητας των σφαιρωτών στα μέρη ενός γαλαξία. Η αναλογία των σφαιρωτών στην γαλαξιακή άλω αυξάνεται σε γαλαξίες με χαμηλές μεταλλικότητες. Στον Γαλαξία μας η μάζα των σφαιρωτών αποτελεί το 1-2% της συνολικής μάζας της άλως, όπως και σε άλλους παρόμοιους γαλαξίες, ακόμα και στο χαμηλής μεταλλικότητας μεγάλο Μαγγελανικό νέφος. Στον νάνο σφαιροειδή του Fornax έχουμε βρει την μεγαλύτερη αναλογία μάζας σφαιρωτών/ γαλαξία, με 26%. Τα 5 σφαιρωτά που έχουμε ανακαλύψει εκεί έχουν συνολικά 700.000 ηλιακές μάζες. Εκτιμούμε ότι η αρχική μάζα των σφαιρωτών ήταν 1,4 εκατομμύρια ηλιακές, αν έχουν απολέσει την μισή τους μάζα λόγω αστρικής εξέλιξης. Μόνο το ένα από τα σφαιρωτά του είναι ελάχιστα πιο πλούσιο σε μέταλλα.

Και σε άλλους νάνους γαλαξίες έχουμε παρόμοια αποτελέσματα. Οι συγκεκριμένοι νάνοι μπορεί να έχασαν πολλά αστέρια μικρής μεταλλικότητας των αλεών μέσω βαρυτικών παρενοχλήσεων από μεγαλύτερους γαλαξίες, και ας μην φαίνεται σήμερα κάποιος από αυτούς να βρίσκεται υπό αλληλεπίδραση. Μάλιστα ο WLM βρίσκεται στις εξωτερικές περιοχές της τοπικής μας ομάδας.

Συνοψίζοντας, οι νάνοι γαλαξίες φαίνεται να περιέχουν μεγαλύτερη αναλογία σφαιρωτών σμηνών, που οφείλεται στην αυξημένη ικανότητα δημιουργίας τους λόγω περιβάλλοντος.

### Επίδραση της δυναμικής εξέλιξης των σμηνών

Η μεγάλη αναλογία των σφαιρωτών προς τα αστέρια του πεδίου έχει δυνητικά σημαντικές επιδράσεις στην μάζα που μπορεί να απολέσει ένα σφαιρωτό σμήνος στην διάρκεια της ζωής του. Αυτή μπορεί να συμβεί ή μέσω βαρυτικής χαλάρωσης 2 σωμάτων (2 body relaxation) ή λόγω αστρικής εξέλιξης.

### Οι πολλαπλοί πληθυσμοί και το πρόβλημα της διαθέσιμης μάζας.

Πολλά αστέρια στα σφαιρωτά σμήνη έχουν <ανώμαλες> αναλογίες ελαφριών χημικών στοιχείων. Μερικά στοιχεία ((He), (N), (Na)) παρουσιάζονται ενισχυμένα σχετικά με τα αστέρια του πεδίου, ενώ άλλα (C), (O) ελαττωμένα. Δεν γνωρίζουμε την αιτία, αλλά μια θεωρία βασίζεται στον <αυτό- εμπλουτισμό> στα σφαιρωτά, με αποτέλεσμα να έχουμε έναν αρχέγονο αστρικό πληθυσμό και έναν χημικά εμπλουτισμένο. Τα βαρύτερα στοιχεία (στοιχεία α και της ομάδας του σιδήρου) δεν

παρουσιάζουν μεγάλη διακύμανση στους 2 πληθυσμούς. Φαίνεται η αιτία δημιουργίας της διακύμανσης των χημικών αφθονιών των 2 πληθυσμών να είναι η καύση του υδρογόνου σε υψηλές (>20 εκατομμύρια βαθμοί) θερμοκρασίες. Υπάρχουν 2 υποψήφιες ομάδες αστεριών για αυτό, τα σχετικά μεγάλα αστέρια στον ασυμπτωτικό κλάδο με υψηλής θερμοκρασίας καύση στον φλοιό και τα αστέρια μεγάλης μάζας στην κύρια ακολουθία με γρήγορη περιστροφή ή σε διπλά συστήματα (οι 2 τελευταίες συνθήκες στα αστέρια μεγάλης μάζας εμπλουτίζουν τις αστρικές ατμόσφαιρες με υλικό από το εσωτερικό των αστεριών).

Τα εμπλουτισμένα αστέρια αποτελούν πάνω από τα μισά στα σφαιρωτά. Με μια τυπική συνιστώσα αρχικής μάζας θα έπρεπε τα μεγάλα αστέρια του ασυμπτωτικού κλάδου να μην ξεπερνάνε το 5%, ακόμα και με αποτελεσματικότητα αστρογέννησης 100% για χημικά εμπλουτισμένο αέριο. Ένα σφαιρωτό πρέπει να έχει απολέσει το 95% των αστεριών του αρχέγονου πληθυσμού ώστε να φτάσουμε στο παρατηρήσιμο 50% των εμπλουτισμένων αστεριών. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με το γεγονός ότι σε μερικούς νάνους γαλαξίες το 20%- 25% των φτωχών σε μέταλλα αστεριών ανήκουν σε σφαιρωτά σμήνη.

Αν δεχτούμε ότι ο εμπλουτισμένος πληθυσμός αποτελείται μόνο από μικρής μάζας (μακρόβια) αστέρια, βελτιώνεται η αναλογία κατά πολύ, αλλά οι παραδοχές ότι 1) το εμπλουτισμένο αέριο αξιοποιείται όλο (100%), 2) έχουμε απώλειες μόνο αρχέγονων και καθόλου εμπλουτισμένων αστεριών, 3) οι νάνοι γαλαξίες δεν δημιουργούν αστέρια με ανάλογες μεταλλικότητες εκτός σφαιρωτών σμηνών, δεν μοιάζουν ρεαλιστικές. Παρόμοιες δυσκολίες έχει και η θεωρία των περιστρεφόμενων ή διπλών αστεριών μεγάλης μάζας.

## Η διάλυση των σμηνών μικρής μάζας

Οι δυναμικές διαδικασίες όπως η βαρυτική χαλάρωση 2 σωμάτων (2 body relaxation) ή παλιρροϊκά κρουστικά κύματα μπορούν να αποφέρουν σημαντικές ελαττώσεις στις μάζες των σφαιρωτών από την εποχή της δημιουργίας τους ως σήμερα, ιδίως σε σμήνη με σχετικά μικρή μάζα (800.000 ηλιακές για τον Γαλαξία μας). Η αναλογία αρχικής/ σημερινής μάζας υπολογίζεται από 24 ως 13, ανάλογα την συνιστώσα αρχικής μάζας. Αυτή η αναλογία ενισχύεται κατά παράγοντα 2 από την αστρική εξέλιξη. Έτσι φτάνουμε στα σημερινά παρατηρήσιμα ποσοστά, αλλά αυτό σημαίνει ότι τα σφαιρωτά σμήνη πρέπει να έχουν απολέσει πολύ περισσότερα αστέρια από ότι παρατηρούμε στο πεδίο (εκτός σφαιρωτών). Ουσιαστικά το πρόβλημα παραμένει.

## <Παιδική θνησιμότητα> και αποτελεσματικότητα σχηματισμού αστρικών σμηνών

Με αυτόν τον όρο υποθέτουμε μια φάση διαταραχής του σμήνος αρκετά νωρίς στην εξέλιξή του, που είχε ως αποτέλεσμα την διάλυση μεγάλου μέρους του. Ο ρυθμός

δημιουργίας εμβαιτισμένων σε νεφελώματα ανοιχτών σμηνών ξεπερνάει κατά πολύ τον σημερινό αριθμό παλαιών ανοιχτών σμηνών. Μόνο ένα μικρό κλάσμα των συνολικών αστεριών δημιουργείται σε σμήνη που θα διατηρηθούν. Η αποτελεσματικότητα σχηματισμού συμπαγών σμηνών που θα διατηρηθούν σχετίζεται με τον ρυθμό σχηματισμού αστεριών. Είναι στο 1%- 10% σήμερα και ήταν μεγαλύτερη στο νεαρό σύμπαν, όταν οι γαλαξίες είχαν περισσότερο διαθέσιμο αέριο. Οι παρατηρήσεις των σφαιρωτών σμηνών στους νάνους γαλαξίες θέτουν περιθώρια στην παραπάνω αποτελεσματικότητα και/ ή την <παιδική θνησιμότητα> σε τέτοια περιβάλλοντα. Ένα πολύ μεγάλο μέρος της αρχικής αστρογέννησης εμφανίζεται στα λίγα αλλά μεγάλης μάζας σμήνη που υπάρχουν μέχρι σήμερα. Φαίνεται αυτή η διαφοροποίηση σε σχέση με τους μεγάλους γαλαξίες να συμβαίνει απότομα σε μεταλλικότητα  $(Fe)/(H) > -2$ .

### Νεαρά σμήνη μεγάλης μάζας στους νάνους γαλαξίες

Τα νεαρά σμήνη στο σημερινό σύμπαν γενικά περιέχουν αστέρια μικρής μάζας σε εκθετική αναλογία με τα μεγάλης μάζας. Το ίδιο ισχύει για τις μάζες των σμηνών. Εξαιρεση αποτελούν κάποιοι νάνοι γαλαξίες που κυριαρχούνται από μερικά σμήνη πολύ μεγάλης μάζας (περίπου με 1 εκατομμύριο ηλιακές μάζες και ηλικίες από 5 ως 16 εκατομμύρια έτη). Οι μεγάλες πιέσεις και πυκνότητες επέτρεψαν την δημιουργία αυτών των σμηνών.

### Συμπεράσματα

Στους νάνους γαλαξίες είναι σύνηθες να έχουμε μεγάλη αναλογία σφαιρωτών σμηνών. Βέβαια, ακόμα και ένα μεγάλης μάζας σφαιρωτό αποτελεί σημαντικό ποσοστό της συνολικής μάζας ενός νάνου. Ακόμα, υπάρχουν νάνοι γαλαξίες χωρίς σφαιρωτά σμήνη. Το μεγάλο ποσοστό σφαιρωτών σε συνδυασμό με την χαμηλή τους μεταλλικότητα σε σχέση με τα αστέρια του πεδίου μας δείχνει ότι δεν έχουν βιώσει σημαντικές διαταράξεις. Είναι δύσκολο να δικαιολογήσουμε το μεγάλο ποσοστό μάζας που πρέπει να έχει απολεσθεί από αυτά για να εξηγήσουμε την ύπαρξη πολλαπλών αστρικών πληθυσμών, με την θεωρία του αυτό- εμπλουτισμού. Ένα γενικότερο πρόβλημα αποτελεί ότι αν η σημερινή συνιστώσα μάζας των σφαιρωτών είναι αποτέλεσμα παρόμοιας δυναμικής εξέλιξης με αυτήν που παρατηρούμε στα νεαρά σμήνη, τότε θα έπρεπε να παρατηρούμε πολύ περισσότερα αστέρια πεδίου, εκτός αν τα μικρής μάζας σμήνη είναι μεγαλύτερης μεταλλικότητας από τα σφαιρωτά. Πρέπει να εκτιμήσουμε την εκδοχή ότι τα σφαιρωτά σχημάτισαν πιο πολλά αστέρια μεγάλης μάζας. Φαίνεται ότι ένα μεγάλο μέρος των πρώτων αστεριών σχηματίστηκαν στα σφαιρωτά σμήνη.

Οι ιδιότητες των αστρικών πληθυσμών των σφαιρωτών σμηνών με την μεγαλύτερη μάζα και των υπέρ- πυκνών νάνων γαλαξιών του σμήνος γαλαξιών Fornax

Πολλοί υπέρ- πυκνοί νάνοι γαλαξίες (UCD, ultra- compact dwarfs) και σφαιρωτά σμήνη μεγάλης μάζας βρίσκονται στους κοντινούς μας γαλαξίες. Λόγω μεγάλης απόστασης και επειδή είναι πολύ συμπαγή αντικείμενα (ακτίνας 100 πάρσεκ) δεν αναλύονται εύκολα, με αποτέλεσμα να μην γνωρίζουμε τις ιδιότητές τους. Προσπαθήσαμε να εκτιμήσουμε την συνιστώσα μάζας, την αστρική μάζα και την δυναμική κατάσταση των UCD στο Fornax. Βρήκαμε ότι η συνιστώσα μάζας είναι η συνηθισμένη για σφαιρωτά σμήνη. Το 40% των μεγάλης μάζας UCD προέρχονται από κεντρικά σμήνη αστεριών (μερικοί τέτοιοι νάνοι παρουσιάζουν εκτεταμένο δίσκο μικρής επιφανειακής λαμπρότητας και παλιρροιακές ουρές).

Τα περισσότερα σφαιρωτά στον Γαλαξία μας έχουν πολλαπλούς αστρικούς πληθυσμούς με διαφορές στις αφθονίες των ελαφριών στοιχείων. Μερικά παρουσιάζουν πληθυσμούς με διαφορές στην αφθονία των στοιχείων της ομάδας του σιδήρου, αλλά και ηλικιακές διαφορές. Αυτά είναι σμήνη της κεντρικής γαλαξιακής περιοχής και προέρχονται από γαλαξίες που αλληλεπίδρασαν με τον δικό μας.

Στο παρελθόν ήταν πολύ συχνή η βαρυτική διατάραξη μικρής μάζας γαλαξιών με κέντρο μεγάλης πυκνότητας. Στην Παρθένο και στο Fornax παρατηρούμε μεγάλο πλήθος UCD μεγάλης μάζας. Τους χαρακτηρίζουν οι αυξημένες αναλογίες μάζας/ μέγεθος και μάζα/ φωτός.

Τα πιο μεγάλης μάζας σφαιρωτά στο Fornax

Σε 83 κpc από τον κεντρικό γαλαξία NGC 1300 στο Fornax ανακαλύψαμε φωτομετρικά περίπου 6500 σφαιρωτά σμήνη και UCD, αριθμός που ανεβαίνει στα 11000 στα 300 κpc. Τα 950 από τα 6500 επιβεβαιώθηκαν και με τις γωνιακές τους ταχύτητες. Έτσι μπορούμε να εκτιμήσουμε μια συνιστώσα μάζας (από 300.000 ως 2 εκατομμύρια ηλιακές). Οι προσομοιώσεις μας δείχνουν ότι το πλήθος των πολύ μεγάλης μάζας UCD μπορεί να προέρχεται από κεντρικά σμήνη βαρυτικά <απογυμνωμένων> γαλαξιών. Στις προσομοιώσεις δικαιολογείται μόνο το 2,5% των παρατηρήσιμων UCD και σφαιρωτών σμηνών μικρότερης μάζας (<1 εκατομμύριο ηλιακές). Αυτά πρέπει να σχηματίστηκαν με μεγαλύτερη μάζα και να απώλεσαν μεγάλο μέρος της ή να είναι αποτέλεσμα συγχώνευσης μεγάλων αστρικών σμηνών. Υπάρχουν νεαρά σμήνη μεγάλης μάζας που έχουν το ίδιο μέγεθος με τα UCD. Έτσι η μάζα και το μέγεθος δεν αρκούν για την ανεύρεση UCD.

Εσωτερικές ιδιότητες των UCD

Τις μελετάμε μέσω χωρικής ανάλυσης της επιφανειακής λαμπρότητας και της κινηματικής τους, καθώς και των ιδιοτήτων των αστρικών πληθυσμών. Μια υπερμεγέθης μαύρη τρύπα ή ένα εκτεταμένο ιστορικό αστρογέννησης μπορούν να αποτελέσουν την αιτία απογύμνωσης ενός νάνου γαλαξία, με αποτέλεσμα να μείνει ένα UCD. Βρέθηκαν σημάδια δίσκων και <ουρών> σε μερικούς UCD, που δείχνουν διαδικασίες συγχώνευσης και βαρυτικής απογύμνωσης. Οι UCD έχουν ιδιότητες και σφαιρωτών σμηνών και κεντρικών γαλαξιακών σμηνών.

## Η προέλευση των συμπαγών αστρικών συστημάτων

Το πώς σχηματίστηκαν τα σφαιρωτά σμήνη αποτελεί ακόμα μυστήριο. Με την ανακάλυψη των υπέρ- συμπαγών νάνων γαλαξιών (UCD) καλύψαμε το κενό ανάμεσα στα σφαιρωτά και τους γαλαξίες. Ενώ εξετάζουμε τα σφαιρωτά του Γαλαξία μας μέσω των πολλαπλών αστρικών πληθυσμών τους, μια άλλη προσέγγιση είναι η μελέτη των εξωγαλαξιακών σφαιρωτών και των UCD.

### Η προέλευση των σφαιρωτών

Στον Γαλαξία μας υπάρχουν 2 πληθυσμοί σφαιρωτών, τα πολύ σφαιρικά φτωχά σε μέταλλα σφαιρωτά σμήνη της άλω που δεν περιστρέφονται (όπως δεν περιστρέφεται και η άλως) και τα πεπλατυσμένα με περιστροφή και πλούσια σε μέταλλα σφαιρωτά της κοιλιάς και του παχύ δίσκου. Αυτό μας δείχνει μια χαοτική συσσώρευση μέσω νάνων γαλαξιών που εισήρθαν στον Γαλαξία μας στο πρώιμο σύμπαν, που την ακολούθησε εντατική αστρογέννηση. Και σε άλλους γαλαξίες, ακόμα και γιγάντιους ελλειπτικούς, συναντάμε το ίδιο φαινόμενο (επιβεβαιώθηκε η ύπαρξη 2 πληθυσμών σφαιρωτών με διαφορετική μεταλλικότητα). Τα φτωχά σε μέταλλα σφαιρωτά δημιουργήθηκαν ή πολύ νωρίς σε γαλαξίες μεγάλης μάζας ή αργότερα σε φτωχούς σε μέταλλα νάνους γαλαξίες. Αν τα πλούσια σε μέταλλα σφαιρωτά αποτελούν ενδογενή πληθυσμό πρέπει να σχηματίστηκαν την εποχή  $z=2-4$  (όταν είχε εμπλουτιστεί ο δίσκος και η κοιλιά με μέταλλα). Αυτή ήταν και η εποχή της έντονης αστρογέννησης στο σύμπαν. Αν τα φτωχά σφαιρωτά προήλθαν από συσσώρευση γαλαξιών τότε δημιουργήθηκαν την εποχή  $z=4-5$  (όταν οι γαλαξίες ήταν φτωχοί σε μέταλλα). Αυτό σημαίνει ότι τα φτωχά σφαιρωτά σχηματίστηκαν μετά τον επαναιονισμό του σύμπαντος ( $z=6-20$ ), που σημαίνει ότι δεν συνέβαλλαν σε αυτόν. Μπορεί όμως να υπήρχε και αρχαιότερος πληθυσμός σφαιρωτών σμηνών που απλά δεν επιβίωσε ως σήμερα. Τα παραπάνω μας βοηθάνε να δούμε που και πως εμφανίστηκε η έκρηξη αστρογέννησης, που δημιούργησε την γαλαξιακή κοιλιά με τον πληθυσμό σφαιρωτών σμηνών. Φαίνεται να ήταν συγκεντρωμένη σε έναν εκτεταμένο, με πολλές διαταραχές και πλούσιο σε αέρια δίσκο, που περιείχε γιγάντια συμπυκνώματα νεφών και νεαρών αερίων, από τα οποία προήλθαν τα σφαιρωτά σμήνη. Μετά αυτοί οι δίσκοι έγιναν ασταθείς και μέρος τους κατέρρευσε δημιουργώντας την γαλαξιακή κοιλιά (τον 2<sup>ο</sup> πληθυσμό της). Σε αυτό το σενάριο ταιριάζουν οι ηλικίες, οι μεταλλικότητες και οι χωρικές και τροχιακές διασπορές των σφαιρωτών σμηνών.

### Τα UCD

Μοιάζουν με τα σφαιρωτά αλλά είναι μεγαλύτερα (10-40 pc αντί 2-4 pc) και λαμπρότερα (μέχρι 10 εκατομμύρια ηλιακές λαμπρότητες). Τα περισσότερα προέρχονται από συγχωνεύσεις υπέρ- σμηνών αστεριών (που μεμονωμένα θα δημιουργούσαν σφαιρωτά ή ανοιχτά σμήνη), και μερικά από παλιρροϊκές απογυμνώσεις νάνων γαλαξιών (δηλαδή είναι οι πυρήνες των νάνων). Το NGC 2419



αποτελεί το κοντινότερό μας. Ίσως αποτελούν μια ομάδα με τους συμπαγείς ελλειπτικούς νάνους. Ο σπειροειδής γαλαξίας NGC3628 που μοιάζει με Hamburger επιδεικνύει ένα αστρικό ρεύμα (stream) που φαίνεται να περιέχει ένα συμπύκνωμα, τον πυρήνα ενός νάνου γαλαξία. Αυτό το αντικείμενο έχει λαμπρότητα 1 εκατομμύρια ηλιακές και μέγεθος 10 pc, και μεταλλικότητα λίγο μικρότερη από την ηλιακή. Μάλλον θα εξελιχτεί σε ένα αντικείμενο σαν το  $\omega$  Κενταύρου. Έχουν βρεθεί και άλλα παρόμοια δείγματα.

**Η ανακάλυψη αστρικών σμηνών μεγάλης μάζας σε γαλαξίες του πρώιμου σύμπαντος με την χρήση βαρυτικού φακού.**

Στην εποχή  $z=1-3$ , την κορύφωση της κοσμικής αστρογέννησης, οι περισσότεροι γαλαξίες κυριαρχούνται από την περιστροφή του δίσκου τους. Οι συμπυκνώσεις που παρουσιάζονται σε αυτούς τους γαλαξίες προέρχονται από κατατμήσεις των δίσκων μέσω βαρυτικής αστάθειας. Οι βαρυτικοί φακοί μας επιτρέπουν την ανάλυσή τους. Έχουν μέγεθος γύρω στα 250 pc. Αυτά τα συμπυκνώματα είναι ενδογενή, αφού μόνο το 30% των παραπάνω γαλαξιών ήταν σε διαδικασία συγχώνευσης.

Αυτοί οι γαλαξίες παρουσιάζουν διαφορές σε σχέση με τους σημερινούς. Χαρακτηρίζονται από μεγάλες διασπορές ταχυτήτων, μικρή ταχύτητα περιστροφής σχετικά με αυτές τις διασπορές και μεγάλη αναλογία μοριακού αερίου, που σημαίνει και εντονότερη αστρογέννηση. Οι δίσκοι τους φαίνεται να έχουν πολλές διαταραχές (turbulent), μεγάλο πάχος, να είναι πλούσιοι σε αέρια και αστρογέννηση. Οι συμπυκνώσεις που αναφέραμε παραπάνω μπορεί να μεταναστεύσουν προς την γαλαξιακή κοιλιά ή προς τα έξω, τον παχύ δίσκο.

Η τυπική μάζα των συμπυκνώσεων είναι 10.000 ηλιακές. Μερικά μπορεί να φτάσουν το 1 δις ηλιακές μάζες, αλλά πρόκειται για συγχωνεύσεις συμπυκνωμάτων. Τα μεγαλύτερα συμπυκνώματα φιλοξενούνται στους μεγαλύτερης μάζας γαλαξίες (συγχωνεύσεις πολλών συμπυκνωμάτων).

## **NGC346, η γέννηση ενός μεγάλης μάζας αστρικού σμήνους.**

Πως σχηματίζονται τα σμήνη μερικών δεκάδων χιλιάδων ηλιακών μαζών; Το παραπάνω σμήνος στο μικρό Μαγγελανικό νέφος είναι ακόμα εμβλαπτισμένο στο νεφέλωμα N66. Τα νεαρά σμήνη μεγάλης μάζας περιέχουν μεγάλο πλήθος νεαρών αστεριών και έχουν πολύ μεγάλη αποτελεσματικότητα αστρογέννησης (κατανάλωσης του αερίου). Ο Γαλαξίας μας περιέχει μερικά τέτοια σμήνη, που συμπληρώνουν το κενό ανάμεσα στα νεαρά μικρής μάζας ανοιχτά σμήνη και στα γηραία μεγάλης μάζας σφαιρωτά. Όμως είναι δύσκολη η μελέτη τους λόγω του πλούσιου σε αέριο γαλαξιακού δίσκου. Τα νεαρά σμήνη μεγάλης μάζας είναι πολύ κοινά σε γαλαξίες αστρογέννησης

και γαλαξίες σε συγχώνευση, αλλά λόγω μεγάλης απόστασης δεν μας επιτρέπουν την ανάλυσή τους.

Στην παραπάνω περιοχή του μικρού Μαγγελανικού νέφους παρατηρούμε ότι η αστρογέννηση ακολουθεί μια ιεραρχική δομή των συμπυκνώσεων, που έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία ενός κυρίαρχου σμήνους μεγάλης μάζας που περιέχει την μισή αστρική μάζα (προ κυρίας ακολουθίας), και της διασποράς των υπόλοιπων αστεριών. Εξετάσαμε την σχέση ανάμεσα στον ρυθμό αστρογέννησης και την πυκνότητα του αερίου (από την πυκνότητα στήλης της σκόνης). Στα κεντρικά 15pc παρατηρούμε μεγαλύτερη αναλογία αστρικής προς αέριας μάζας από ότι πιο έξω, κάτι που δείχνει διακυμάνσεις του ρυθμού αστρογέννησης.

### Τα νεαρά αστέρια της περιοχής N66

Το παραπάνω σμήνος περιέχει μικρής μάζας προ κύριας ακολουθίας αστέρια και μεγάλης μάζας στην άνω κύρια ακολουθία αστέρια. Έχει ηλικία 5 εκατομμύρια έτη. Φαίνεται τα αστέρια να έχουν διαφορετική χωρική διασπορά από ότι το αέριο που τα δημιούργησε. Το ταραχώδες περιβάλλον και η πυκνή μεσοαστρική ύλη διαμορφώνουν το αστρικό σμήνος. Για να μελετήσουμε την μεσοαστρική ύλη (την πυκνότητα στήλης της) χρησιμοποιούμε τις παρατηρήσεις της σκόνης στις υπέρυθρες και στα υπό-χιλιοστόμετρα. Αυτή η μέθοδος δεν επηρεάζεται από τον βαθμό ιονισμού του αερίου, όπως συμβαίνει με μετρήσεις του (CO). Όπως αναφέραμε, είδαμε ότι στην κεντρική περιοχή του σμήνους παρατηρούμε μεγαλύτερη αναλογία αστρικής προς αέριας μάζας από ότι πιο έξω. Αυτό σημαίνει ότι εκεί υπάρχει μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα αστρογέννησης. Οι εξωτερικές περιοχές δεν κυριαρχούνται από το σμήνος αλλά από την διασπορά των αστεριών.

### Από τα μοριακά νέφη στα σμήνη μεγάλης μάζας

Τα μοριακά νέφη περνούν το 95% της ζωής τους (100 εκατομμύρια έτη) με χαμηλό ρυθμό αστρογέννησης μέχρι να διαταραχθούν και να δώσουν έντονη αστρογέννηση.

Μελετήσαμε την φασματική γραμμή του (HCO+) σε 303 συμπυκνώματα στον βραχίονα της Καρίνας στον Γαλαξία μας. Αποκαλύψαμε ένα πλήθος από τις ιδιότητές τους, όπως η διασπορά ταχυτήτων, τα μεγέθη των συμπυκνώσεων, οπτικά βάθη, πυκνότητες στήλης, μάζες κ.α. Μόνο το 5% των συμπυκνωμάτων παρουσιάζει έντονη αστρογέννηση και σχηματισμό αστρικών σμηνών. Υπό αυτές τις συνθήκες τα ψυχρά μοριακά νέφη μπορούν να φτάσουν ηλικίες των 100 εκατομμυρίων ετών, που σημαίνει ότι πρέπει να έχουν μεγάλο πληθυσμό στον Γαλαξία μας.

## Η αστρογέννηση σε περιοχές HII

Η περιοχή N6 (μία <φούσκα> αστρογέννησης που επεκτείνεται) έχει διάμετρο 11 pc. Την μελετάμε στο υπέρυθρο και μπορούμε να διακρίνουμε ένα κέλυφος γύρω της. Περιέχει 10 μοριακά συμπυκνώματα.

Η φούσκα G24.136 φέρει ένα κέλυφος και περιέχει πυκνό μοριακό αέριο, και 6 συμπυκνώματα αστρογέννησης.

Στο μοριακό σύμπλεγμα της Ροζέτας ανακαλύψαμε 40 πρώτο- αστρικούς πυρήνες, κοντά στις μοριακές εκροές από το κεντρικό διπλό αστέρι AFGL961. Φαίνεται ότι οι δυναμικές διαδικασίες του νεαρού διπλού αστεριού επέτρεψαν τον σχηματισμό περισσότερων αστεριών στην περιοχή.

**Αποδείξεις διατήρησης των μοριακών νεφών μεγάλης μάζας, ακόμα και μετά από την δημιουργία μεγάλων αστρικών σμηνών**

Μετρήσαμε τις φυσικές ιδιότητες (ακτίνα, διασπορά ταχύτητας, λαμπρότητα) σε 142 γιγάντια μοριακά νέφη και 303 περιοχές ατομικού ιονισμένου υδρογόνου (HII). Οι περιοχές μικρότερης μάζας διατηρούνται λόγω της εξωτερικής πίεσης ενώ οι περιοχές μεγαλύτερης μάζας λόγω της ίδιας βαρύτητας.

Η διαδικασία της ενίσχυσης της αστρογέννησης σε γαλαξίες υπό αλληλεπίδραση δεν είναι καλά κατανοητή. Η μελέτη των κινηματικών των περιοχών αστρογέννησης σε γαλαξίες που συγχωνεύονται είναι κρίσιμη για να καθορίσουμε αν όντως ενισχύεται η αστρογέννηση, πως δημιουργούνται οι περιοχές αστρογέννησης εκτός γαλαξιακών κέντρων, και τις ιδιότητες του αερίου σε αυτές τις περιοχές. Η αστρογέννηση συμβαίνει κυρίως μέσα στα μοριακά νέφη, και οι περιοχές (HII) ανιχνεύουν την αστρογέννηση. Ένα συμπέρασμα είναι ότι τα μοριακά νέφη μεγάλης μάζας δεν διαλύονται μετά την γέννηση μεγάλων αστρικών σμηνών. Παραμένουν βαρυτικά δεμένα με τις ευρύτερες περιοχές (HII).

## Μη θερμική εκπομπή από το Cyg OB2

Το Cyg OB2, ένα από τα κοντινότερα νεαρά αστρικά σμήνη μεγάλης ηλικίας, βρίσκεται στην καρδιά της περιοχής Cygnus X σε απόσταση 1,45 kpc. Περιέχει πλούσιο πληθυσμό αστεριών μεγάλης μάζας, 120 αστέρια τύπου O και 2600 αστέρια OB. Επίσης περιέχει μεγάλη πυκνότητα και ποικιλία αστεριών. Ως ένα από τα μεγαλύτερης μάζας αστρικά σμήνη του Γαλαξία μας συγκρίνεται με νεαρά σφαιρωτά και υπέρ- σμήνη που βρίσκουμε σε γαλαξίες αστρογέννησης. Εμφανίζεται πολύ σκιασμένο στο ορατό και έτσι αποτελεί αντικείμενο μελέτης στα ραδιοκύματα.

Η μη θερμική εκπομπή του μας δείχνει τον πληθυσμό των διπλών αστεριών του, κάτι σημαντικό για τον καθορισμό της μάζας του. Σε ένα διπλό σύστημα αστεριών τύπου O οι αστρικοί τους άνεμοι συγκρούονται, με αποτέλεσμα να επιταχύνονται ηλεκτρόνια σε σχετικιστικές ταχύτητες στην περιοχή της σύγκρουσης (CWR, colliding- wind region). Προκαλείται μη θερμική ακτινοβολία σύγχροτρον που ανιχνεύεται στα ραδιοκύματα και στις ακτίνες Χ. Το μέγεθος του πληθυσμού των διπλών αστεριών μας βοηθάει να κατανοήσουμε την εξέλιξη των αστρικών πληθυσμών, και τον σχηματισμό και εξέλιξη των αστρικών σμηνών. Ο πληθυσμός των διπλών αστεριών σε αυτό το σμήνος εκτιμάται στο 55% του συνολικού.

## Γαλαξιακά και εξωγαλαξιακά γιγάντια μοριακά νέφη και μεγάλης μάζας αστρικά σμήνη

Τα αστρικά σμήνη μεγάλης μάζας (MSC, massive star clusters) και ειδικά τα υπέρ σμήνη αστεριών και τα νεαρά MSC αποτελούν μοναδικά κοσμικά αντικείμενα. Τα μελετάμε μαζί με τα γιγάντια μοριακά νέφη (GMC, giant molecular clouds). Έχουμε ανακαλύψει μερικές δωδεκάδες GMC στον Γαλαξία μας και εκατοντάδες σε άλλους γαλαξίες. Αντίστοιχα, έχουμε ανακαλύψει 500 MSC στον Γαλαξία μας και στους κοντινούς γαλαξίες. Τα GMC συνδέονται στενά με περιοχές HI (ψυχρά νέφη αερίου-σκόνης) και είναι απαραίτητα για την δημιουργία των MSC. Όλες αυτές οι περιοχές μοιράζονται την κινηματική και την δυναμική του γαλαξία τους. Η έρευνα μας έδειξε ότι τα νεαρά MSC συνδέονται στενά με GMC, ενώ τα παλαιότερα έχουν χάσει αυτή την σύνδεση. Σε αυτά τα αστέρια O,B έχουν διαταράξει το αρχικό νεφέλωμα με τους ισχυρούς αστρικούς ανέμους τους.

## Η ύπαρξη αστρικού σμήνους στην περιοχή σχηματισμού αστεριού μεγάλης μάζας IRAS 20126+4104

Υπάρχουν 2 θεωρίες για τον σχηματισμό αστεριών μεγάλης μάζας. Η θεωρία του πυρήνα με ταραχή (turbulent core) που αποτελεί προέκταση της θεωρίας δημιουργίας των αστεριών μικρότερης μάζας και τα μοντέλα που περιέχουν ανταγωνιστική συσσώρευση ή αστρικές συγκρούσεις. Τα χαρακτηριστικά των σμηνών που περιέχουν αστέρια μεγάλης μάζας μπορούν να ρίξουν φως στην υπόθεση. Βρήκαμε το IRAS 20126+4104, πρώτο- αστέρι μεγάλης μάζας σε απόσταση 1,7 kpc, να είναι απομονωμένο και να μην σχετίζεται με κάποιο σμήνος. Άρα τα αστέρια μεγάλης μάζας μπορούν να δημιουργηθούν και έξω από αστρικά σμήνη μεγάλης μάζας. Αυτό το πρώτο- αστέρι τύπου B με λαμπρότητα 10.000 ηλιακές παρουσιάζει μια διπολική εκροή και σχηματίστηκε μέσω συσσώρευσης ύλης σε δίσκο. Από την άλλη, το παραπάνω πρώτο- αστέρι συνδέεται με 80 πηγές ακτίνων Χ που αποτελούν μικρότερης μάζας πρώτο- αστέρια.

## Westerlund 1 : Ο μονολιθικός σχηματισμός ενός αστρικού σμήνους.

Το Westerlund 1 αποτελεί το μεγαλύτερης μάζας νεαρό αστρικό σμήνος του Γαλαξία μας. Έχει μάζα 100.000 ηλιακές. Εμφανίζεται αρκετά απομονωμένο. Η άλως του δεν εκτείνεται παραπάνω από 5 pc από το κέντρο του.

Οι περιοχές αστρογέννησης (star-forming regions) στον Γαλαξία μας και σε άλλους γαλαξίες παρουσιάζουν ιεραρχική δομή, δηλαδή τα αστρικά σμήνη δημιουργούνται σε μεγαλύτερα συμπλέγματα ύλης μέσα στα γιγάντια μοριακά νέφη. Το σύμπλεγμα G305 του Γαλαξία μας περιέχει πρώτο- σμήνη εμβαπτισμένα σε μια φούσκα, που δημιουργήθηκε από τους αστρικούς ανέμους των νεαρών αστεριών μεγάλης μάζας. Ένας πληθυσμός απομονωμένων αστεριών μεγάλης μάζας είναι κατανεμημένος μέσα στο σύμπλεγμα, κάτι που μας δείχνει ότι η αστρογέννηση άρχισε εκεί πριν μερικά εκατομμύρια έτη και συνεχίζεται ακόμα.

Το Westerlund 1 διαφέρει από τα παραπάνω. Σε αυτό η αστρογέννηση διάρκεσε μόλις 0,4 εκατομμύρια έτη (τόση είναι η διασπορά ηλικίας των αστεριών μεγάλης μάζας που προκύπτει από την ταυτόχρονη παρουσία κόκκινων υπέρ- γιγάντων και αστεριών Wolf- Rayet).

Ο εντοπισμός των διπλών αστεριών και των παλλόμενων αστεριών του σμήνους μας δείχνει τα αστέρια με σταθερή γωνιακή ταχύτητα, άρα και την διασπορά των ταχυτήτων. Αυτή είναι μεγαλύτερη από 4,6 km/s που σημαίνει ότι το σμήνος είναι υπό-σταθερό (sub- virial, ουσιαστικά δεν είναι σε βαρυτική ισορροπία και συνεχίζει η κατάρρευσή του). Η ηλικία του και το μέγεθός του δείχνουν το αντίθετο, ότι είναι δυναμικά σε ηρεμία και σε ισορροπία. Δεν βρέθηκαν μικρότερα σμήνη- δορυφόροι του ή υπολείμματα ενός γιγάντιου μοριακού νέφους, ούτε και αστρογέννηση. Δεν υπάρχει αστρικός πληθυσμός χωρικά εκτεταμένης άλως (η άλως είναι σχετικά μικρής έκτασης).

Φαίνεται το Westerlund 1 να σχηματίστηκε από ένα μοναδικό και μεγάλης έντασης επεισόδιο αστρογέννησης σε μικρή χωρική έκταση. Τα ερωτήματα που δημιουργούνται είναι 1) Πως μπορεί να συσσωρευτεί τόση μάζα (ενός μοριακού νέφους) σε τόση μικρή χωρική έκταση? 2) Γιατί βρίσκουμε το σμήνος σε υπό- σταθερή κατάσταση? Ίσως το γεγονός ότι είναι sub- virial να σημαίνει ότι αποτελεί τον προ- γεννήτορα ενός σφαιρωτού σμήνους.

### Τα νεαρά αστρικά σμήνη μεγάλης μάζας στο κέντρο του Γαλαξία μας με μετρήσεις του (Nell) στο υπέρυθρο

Μελετήσαμε τις περιοχές NGC 6946, IC 342, Maffei II, NGC 7714 στο κέντρο του Γαλαξία, που φιλοξενούν νεαρά σμήνη μεγάλης μάζας χρησιμοποιώντας μετρήσεις από την Γη της γραμμής του (Nell) στο υπέρυθρο.

Τα μισά νεαρά σμήνη (YMC, young massive clusters) μεγάλης μάζας βρίσκονται κοντά στα γαλαξιακά κέντρα, σε όλους τους τύπους γαλαξιών. Τα γαλαξιακά κέντρα αποτελούν ιδανικά πεδία μελέτης ακραίων περιβαλλόντων για τον σχηματισμό των YMC επειδή δεν παρατηρούμε συμβατή αστρογέννηση σε αυτά. Η αποτελεσματικότητα σχηματισμού σμηνών εκφράζεται με την αναλογία των αστεριών που σχηματίζονται σε σμήνη, και αποτελεί μια σημαντική παράμετρο της αστρογέννησης. Αυτή η αποτελεσματικότητα δεν φαίνεται να επηρεάζεται από το περιβάλλον, ίσως να είναι καθολική. Τα YMC παρατηρούνται καλύτερα στο υπέρυθρο όπου δεν παρουσιάζουν εξάλειψη φωτός. Στις παραπάνω περιοχές ανακαλύψαμε 30 YMC με μάζες 10.000- 1 εκ. ηλιακές.

### Εξελιγμένα αστέρια μεγάλης μάζας στα μοριακά νέφη W33 και GMC G23,3-0,3

Τα αστέρια μεγάλης μάζας και τα αστρικά σμήνη σχηματίζονται συνεχώς στον γαλαξιακό μας δίσκο. Αυτά δημιουργούν <φούσκες> και περιοχές HII στα μοριακά νέφη, και εμπλουτίζουν τη ύλη με τους αστρικούς ανέμους και τις εκρήξεις σουπερνόβα.

Το μοριακό νέφος GMC G23,3-0,3 βρίσκεται σε απόσταση 4,6 kpc και είναι πολύ πλούσιο σε περιοχές HII και υπολείμματα σουπερνόβα. Ανακαλύψαμε δεκάδες αστέρια τύπου O, έναν λαμπρό μπλε μεταβλητό (LBV, luminous blue variable, μεταβλητός μεγάλης μάζας) και μερικούς κόκκινους υπεργίγαντες. Τα αστέρια O είναι μάζας από 25 ως 50 ηλιακές και ηλικίας μερικών εκατομμυρίων ετών. Οι κόκκινοι υπεργίγαντες προέρχονται από μια έκρηξη αστρογέννησης πριν από 20- 30 εκ. έτη. Αυτό το μοριακό νέφος είχε παρατεταμένο ιστορικό αστρογέννησης.

Το σύμπλεγμα W33 βρίσκεται στο γαλαξιακό επίπεδο, σε απόσταση 2,4 kpc. Φασματοσκοπικά ανακαλύψαμε μερικά εξελιγμένα αστέρια O και ένα αστέρι WR, αλλά όχι κόκκινους υπεργίγαντες. Στην ανατολική πλευρά του συμπλέγματος ανακαλύψαμε πολλά μοριακά νέφη που περιέχουν πρώτο- αστρικά σμήνη. Τα εξελιγμένα αστέρια/ σμήνη πυροδοτούν αστρογέννηση στο σύμπλεγμα. Το ιστορικό αστρογέννησης διαρκεί 3- 5 εκατομμύρια έτη και εξελίσσεται από δυτικά προς τα ανατολικά.

### O σχηματισμός των διδύμων περιοχών αστρογέννησης του Γαλαξία μας NGC 6357 και NGC 6334

Παρατηρούμε τον σχηματισμό αστεριών τύπου O μέσω υπερηχητικής σύγκρουσης νεφών. Οι NGC 6357 και NGC 6334 είναι περιοχές HII με αστέρια O, και εκτείνονται για 100 pc σε απόσταση 1700 pc από τον Ήλιο. Αυτές οι μεγάλες περιοχές HII είναι πλούσιες σε μοριακό αέριο, άρα ικανές για επεισόδια αστρογέννησης. Ανακαλύψαμε ότι μέσα σε αυτές τις περιοχές συγκρούονται 2 μοριακά νέφη με σχετική ταχύτητα

15km/s, και πυροδοτούν τον σχηματισμό αστεριών O. Το ένα νέφος παρουσιάζει ερυθρολίσθηση ενώ το άλλο μετατόπιση στο κυανό (κινούνται αντίθετα) και είναι ευθυγραμμισμένα μεταξύ τους. Το χρονοδιάγραμμα της σύγκρουσης είναι 0,5 εκ. έτη. Συμπεράναμε ότι οι συγκρούσεις νεφών είναι σημαντικές για τον σχηματισμό αστεριών μεγάλης μάζας (τύπου O).

## Η δημιουργία μιας φούσκας σκόνης ( N131)

Η παραπάνω φούσκα βρίσκεται σε ένα μοριακό νήμα (επίμηκες νέφος). Ο προγεννήτορας του N31 πρέπει να ήταν ένα νηματοειδές νεφέλωμα ανάμεσα σε 2 συμπυκνώματα. Φαίνεται ότι στη μέση του νήματος υπήρχε ένα σμήνος αστεριών μεγάλης μάζας που ιόνισε, θέρμανε και απομάκρυνε μέσω αστρικών ανέμων την περιβάλλον μεσοαστρική ύλη, συμπιέζοντας τα συμπυκνώματα ύλης που υπήρχαν στην περιοχή. Το αποτέλεσμα ήταν να δημιουργηθεί μια δακτυλιοειδής δομή, η φούσκα που παρατηρούμε σήμερα.

Η επίδραση της ανάδρασης από αστέρια μεγάλης μάζας στον σχηματισμό και στην διαταραχή των μεγάλων αστρικών σμηνών.

Τα αστέρια μεγάλης μάζας συνδέονται συνήθως με κάποιο σμήνος, αφού είναι νεαρά αστέρια (λόγω της μικρής διάρκειας ζωής τους). Αυτό είχε επίδραση στην μεσοαστρική ύλη, την δομή των γαλαξιών, τον επαναιονισμό, και την διασπορά των μετάλλων στο νεαρό σύμπαν (ανάδραση μέσω αστεριών μεγάλης μάζας). Τα αστρικά σμήνη μας προσφέρουν την δυνατότητα μελέτης της μεσοαστρικής ύλης σε όλη την εξέλιξη του σύμπαντος. Η μη δυνατότητα ανάλυσής τους (σε μακρινούς γαλαξίες) δεν μας αφήνει να συμπεράνουμε την φασματική ενεργειακή διασπορά (SED, spectral energy distribution) σε αυτά. Έτσι δεν μπορούμε να κατανοήσουμε τις διαδικασίες έναρξης και τερματισμού αστρογέννησης, καθώς και διαταραχής του σχετικού μοριακού νέφους.

Είναι ξεκάθαρο ότι η ανάδραση αποτελεί σημαντικό παράγοντα στην αστρογέννηση. Είναι όμως δύσκολο να ξεχωρίσουμε τους διαφορετικούς μηχανισμούς που παράγουν αστρογέννηση.

## Αστρογέννηση πληθυσμού 3- πληθυσμού 2

Δεν έχουμε παρατηρήσει ακόμα την πρώτη γενιά αστεριών του σύμπαντος, αλλά πρέπει να σχηματίστηκαν πολύ διαφορετικά από την επόμενη γενιά. Ενώ σήμερα τα αστέρια σχηματίζονται μέσω βαρυτικής κατάπτωσης των μοριακών νεφών σε γαλαξίες με άλως σκοτεινής ύλης, τα αστέρια πληθυσμού 3 σχηματίστηκαν πριν την παρουσία μοριακών νεφών και γαλαξιών. Αυτά σχηματίστηκαν σε μίνι- άλως σκοτεινής ύλης,

όπου η βαρυονική ύλη συμπυκνώθηκε. Λόγω απουσίας μοριακού υδρογόνου αυτές οι περιοχές δεν μπορούσαν να ψυχθούν όσο τα μοριακά νέφη και είχαν μεγαλύτερες μάζες Jeans (κρίσιμη μάζα για βαρυτική κατάρρευση). Αυτό σημαίνει ότι τα πρώτα αστέρια είχαν πολύ μεγάλη μάζα.

## Μηχανισμοί ανάδρασης στον συμπαντικό χρόνο

Ανάδραση μέσω συσσώρευσης. Όλα τα αστέρια προσφέρουν ανάδραση, αφού σχηματίζονται μέσω θερμικής συσσώρευσης ύλης και εκτινάσσουν πίδακες. Η θερμική ανάδραση συμβαίνει μέσω της θέρμανσης της ύλης που συσσωρεύεται στο πρωτοαστέρι και από την συρρίκνωση του πρωτοαστέρα. Η υπέρυθη ακτινοβολία που εκλύεται απορροφάται από την σκόνη και την ενώνει με το αέριο. Οι πίδακες αποθηκεύουν στροφορμή και συμπληρώνουν την συσσώρευση στην διαδικασία ανάδρασης του σμήνους. Αυτό μας υπενθυμίζει ότι οι μηχανισμοί ανάδρασης δεν δρουν ανεξάρτητα, αλλά αλληλοσυμπληρώνονται. Η επίδραση της ανάδρασης μέσω συσσώρευσης φτάνει σε όλο το σμήνος. Διαμορφώνει το περιβάλλον όπου σχηματίζονται αστέρια μεγάλης μάζας αυξάνοντας την αποτελεσματικότητα αστρογέννησης.

Περιοχές HII. Τα πρώτα αστέρια είχαν μεγαλύτερες επιφανειακές θερμοκρασίες (λόγω μηδενικής μεταλλικότητας) με αποτέλεσμα να αυξήσουν πολύ την θερμοκρασία των περιοχών HII (30.000 αντί 10.000 βαθμούς σήμερα). Έτσι ιόνισαν αποτελεσματικά το ήλιον. Αυτές οι μεγάλες θερμοκρασίες επέτρεψαν στα βαρυόνια να διαφύγουν από τις μίνι άλως σκοτεινής ύλης. Ακόμα, μεγάλο μέρος της ακτινοβολίας τους διέφυγε και ήταν σημαντική για τον επαναιονισμό του σύμπαντος. Οι προσομοιώσεις μας δείχνουν ότι μοριακά νέφη μάζας 10.000 ηλιακών μπορούν να καταστραφούν από περιοχές HII σε χρονοδιάγραμμα εκατομμύριων ετών. Τα νέφη με μεγαλύτερη μάζα αντέχουν περισσότερο.

Αστρικοί άνεμοι. Οι άνεμοι των αστεριών μεγάλης μάζας στην κύρια ακολουθία έχουν μικρό μερίδιο στην ανάδραση. Τα πρώτα τεράστια αστέρια πληθυσμού III δεν είχαν ισχυρούς αστρικούς ανέμους, αφού αυτοί εξαρτώνται από την μεταλλικότητα. Οι αστρικοί άνεμοι έχουν μόνο τοπική επίδραση.

Σουπερνόβα. Αποτελούν τον σημαντικότερο παράγοντα ανάδρασης. Τα αστέρια του πληθυσμού III βίωσαν εκρήξεις αστάθειας ζεύγους ( $pp$ , pair instability) απελευθερώνοντας  $10^{53}$  erg η κάθε μία. Ο φωτοϊονισμός της ύλης που προηγήθηκε των σουπερνόβα τις ενίσχυσε, επιτρέποντας να συμβούν αυτές σε αραιότερο περιβάλλον από το αρχικό. Έτσι οι σουπερνόβα (τα κρουστικά κύματα μετά τις εκρήξεις) μπόρεσαν να καταλάβουν μεγαλύτερη έκταση και να διασπείρουν μέταλλα σε πολύ μεγαλύτερη ακτίνα. Κάτι ανάλογο παρατηρούμε και σήμερα, με τις σουπερνόβα μέσα σε νέφη να έχουν περιορισμένη δράση σε σχέση με αυτές εκτός των νεφών.

## Συμπεράσματα



Η ανάδραση μέσω συσσώρευσης είναι πιο αποτελεσματική σήμερα από ότι στο πρώιμο σύμπαν. Ρυθμίζει την μεσοαστρική ύλη και την διάτμηση των νεφών. Επίσης στο πρώιμο σύμπαν δεν είχαμε την παρουσία αστρικών ανέμων. Ο φωτοϊονισμός είναι σημαντικός παράγοντας σε όλη την ιστορία του σύμπαντος. Ενώ στο πρώιμο σύμπαν οι μίνι άλως ήταν πιο ευάλωτες στον ιονισμό, τα σημερινά γιγάντια μοριακά νέφη δεν είναι. Οι σουπερνόβα φαίνεται να είναι σημαντικές σε όλες τις εποχές του σύμπαντος, με διαφορετικούς τρόπους. Βοηθούν στην ανακύκλωση των υλικών. Στην σημερινή εποχή διαταράσσουν τα νεφελώματα αποτελεσματικά σε πολλές περιπτώσεις, αλλά όχι πάντα.

Η αλληλεπίδραση της αστρογέννησης, εκροής αερίου και διαταραχής των νεφών δεν έχει κατανοηθεί καλά. Γενικά πολλές από τις διαδικασίες που επηρεάζουν την εξέλιξη των αστρικών σμηνών είναι όμοιες στο χρονικό της συμπαντικής εξέλιξης.

### Γαλαξιακές ροές (αερίου και άστρων από νάνους γαλαξίες) και σχηματισμός αστρικών σμηνών

Ο σχηματισμός των άστρων αποτελεί κομβική διαδικασία για την κατανόηση της εξέλιξης των γαλαξιών, των φυσικών συνθηκών τους και την διαδικασία κατανάλωσης του αερίου στην αστρογέννηση. Στις προσομοιώσεις φαίνεται ότι η αστρογέννηση ξεκίνησε σε ελαφριές συμπυκνώσεις με χρόνο κατάρρευσης σε 1 εκατομμύρια έτη. Τις τοπικές καταρρεύσεις ακολουθούν καταρρεύσεις μεγαλύτερων περιοχών (νεφών), που σχημάτισαν αστρικά σμήνη μεγαλύτερης μάζας. Οι γαλαξιακές ροές συμπιέσαν αυτά τα νέφη συμβάλλοντας στην αστρογέννηση μεγάλης κλίμακας. Η συγχώνευση νεφών παρουσιάζει διασπορά μερικών εκ. ετών στις αστρικές ηλικίες. Το αέριο που συμπυκνώθηκε αργότερα για αστρογέννηση ήταν μακριά από αυτές τις περιοχές. Ο σχηματισμός αστεριών πυροδοτείται από την βαρύτητα μόνο στις πυκνότερες περιοχές. Στις λιγότερο πυκνές περιοχές μόνο οι ροές ύλης μπορούν να παράγουν αστρογέννηση. Οι συμπυκνώσεις σχηματίζουν ομάδες που εξελίσσονται σε αστρικά σμήνη μεγάλης μάζας.

### Η ανάδραση από το σμήνος αστεριών μεγάλης μάζας (massive super star cluster) στην συγχώνευση γαλαξιών <κεραίες> (Antennae merger)

Γενικά η αστρογέννηση είναι μια αναποτελεσματική διαδικασία. Στα γιγάντια μοριακά νέφη του Γαλαξία μας μόνο το 20% του αερίου καταναλώνεται στην δημιουργία αστεριών. Ο μηχανισμός της αστρικής ανάδρασης αποτελεί πηγή ενέργειας για την διατάραξη των νεφών, που έχει ως αποτέλεσμα την αστρογέννηση. Η ενέργεια και η ορμή από τα νεαρά αστέρια διαλύει τα νέφη γύρω τους.

Η ανάδραση μέσω αστεριών μεγάλης μάζας είναι σημαντική για την γαλαξιακή εξέλιξη και το ιστορικό αστρογέννησης στους γαλαξίες. Στους γαλαξίες αστρογέννησης παρατηρούμε ότι η αστρική ακτινοβολία αποτελεί τον βασικό μηχανισμό των γαλαξιακών μοριακών εκροών που διαταράσσουν και διαλύουν μεγάλες ποσότητες μοριακού αερίου, επηρεάζοντας την αποτελεσματικότητα αστρογέννησης. Τα αστρικά υπέρ- σμήνη (super star clusters) είναι από τις πιο ακραίες περιοχές αστρογέννησης. Είναι συμπαγή (μεγέθους μόλις μερικά pc) και μεγάλης μάζας (>100.000 ηλιακές μάζες). Βρίσκονται κυρίως σε γαλαξίες υπό αλληλεπίδραση. Οι γαλαξίες <κεραίες> είναι 2 κοντινοί (22 Mpc) σπειροειδείς γαλαξίες συγχώνευσης, πλούσιοι σε αέριο και με πολλά αστρικά υπέρ- σμήνη. Στην περιοχή όπου αλληλεπιδρούν οι 2 δίσκοι παρατηρείται η κατάτμηση του μοριακού αερίου σε υπέρ- γιγάντια μοριακά συμπλέγματα (super giant molecular complexes), οι περιοχές δημιουργίας των αστρικών υπέρ- σμηνών. Τα υπέρ- γιγάντια μοριακά συμπλέγματα παρουσιάζουν συμπυκνώματα και μέρη με διαφορετικές ταχύτητες. Το αστρικό υπέρ- σμήνος B1 είναι το μεγαλύτερο της περιοχής με 10 εκατομμύρια ηλιακές μάζες.

## Συμπαντικές και περιβαλλοντικές επιδράσεις στα αστρικά σμήνη

Στο τοπικό σύμπαν μπορούμε να μελετήσουμε τον σχηματισμό νεαρών σφαιρωτών σμηνών. Είναι φανερό ότι το περιβάλλον καθορίζει σε ποιους γαλαξίες θα σχηματιστούν (γαλαξίες συγχώνευσης) και σε ποιους όχι, όπως στον δικό μας. Επίσης νεαρά σφαιρωτά σμήνη βρίσκονται και σε γαλαξίες αστρογέννησης και ραβδωτούς γαλαξίες. Ίσως να υπάρχουν και σε σπειροειδείς μικρής μάζας. Ο μεγάλος αριθμός σμηνών στους γαλαξίες συγχώνευσης έχει ως αποτέλεσμα να διασπαρθούν πιο αποτελεσματικά. Αυτό οδηγεί στον σχηματισμό ενός νέου πληθυσμού σφαιρωτών σμηνών ανάμεσα στο μεγάλο πλήθος σμηνών μικρότερης μάζας.

Οι συμπαντικές επιδράσεις είναι η συνιστώσα λαμπρότητας, η συνιστώσα μάζας και η διασπορά αστρικής ηλικίας, καθολικά μεγέθη των γαλαξιών. Αν οι κυρίαρχες επιδράσεις σε ένα γαλαξία έχουν τοπικό χαρακτήρα σημαίνει ότι είναι ενδογενείς του γαλαξία. Αυτό μπορεί να προέρχεται από απώλεια αερίου του γαλαξία, αστρική εξέλιξη, απώλεια αστεριών κ.λπ. (συμπτώματα αλληλεπίδρασης με άλλον γαλαξία). Αν οι κυρίαρχες επιδράσεις είναι περιβαλλοντικές σημαίνει ότι είναι εξωγενείς (θέση του γαλαξία στο σμήνος ή μορφολογία του γαλαξία).

## Ο σχηματισμός του υπέρ- σμήνος RCW38 από την σύγκρουση νεφελωμάτων

Το υπέρ- σμήνος RCW38 σε απόσταση 1,7 pc είναι το νεαρότερο στον Γαλαξία μας. Οι παρατηρήσεις των μορίων μας έδειξαν ότι συνδέεται με 2 μοριακά νέφη που έχουν διαφορά ταχυτήτων 12 km/s. Τα δύο νέφη συγκρούονται πυροδοτώντας τον

σηματισμό του σμήνος. Το μοριακό αέριο που είναι σε απόσταση 0,5 pc από τα αστέρια τύπου O ηλικίας 100.000 ετών, στο κέντρο του σμήνος, δεν έχει διαλυθεί σε ατομικό.

Τα σφαιρωτά σμήνη στην γαλαξιακή άλω έχουν συνολική μάζα 100.000 ηλιακές. Σχηματίστηκαν πριν 12 δις έτη, άρα δεν έχουμε πρόσβαση στις διαδικασίες δημιουργίας τους. Τα νεαρά υπέρ- σμήνη αστεριών έχουν 10.000 ηλιακές μάζες και μπορεί να μας δείξουν πως σχηματίζονται τα σφαιρωτά. Υπάρχουν 13 γνωστά υπέρ-σμήνη στον Γαλαξία μας. Το RCW38 είναι ένα πλούσιο και νεαρό υπέρ- σμήνος με 2000 αστέρια, από τα οποία τα 30 είναι τύπου O. Η ηλικία του είναι μόλις 500.000 έτη, άρα μπορεί να μας παρέχει πληροφορίες για τον σχηματισμό του. Και τα δύο νεαρά υπέρ-σμήνη Westerlund 2 και NGC 3603, ηλικίας 2-3 εκατομμυρίων ετών, σχηματίστηκαν από σύγκρουση νεφών. Έχουν ιονίσει σχεδόν τελείως το αέριο, μετατρέποντάς το σε ατομικό, σε βάθος μερικών pc, με αποτέλεσμα να μην είναι ορατές οι λεπτομέρειες της σύγκρουσης των νεφών. Μία τέτοια σύγκρουση δημιουργεί διαταραχές (turbulent) στην περιοχή όπου σχηματίζονται τα υπέρ- σμήνη, με αποτέλεσμα την δημιουργία αστεριών μεγάλης μάζας.

Τα δύο νέφη στο RCW38 συνδέονται μέσω μιας <γέφυρας>. Η περιοχή όπου βρίσκονται τα περισσότερα αστέρια O ταυτίζεται με την γέφυρα. Η φυσική σύνδεση των 2 νεφών με το σμήνος προκύπτει από τις παρατηρήσεις στο υπέρυθρο. Παρουσιάζουν παρόμοια διασπορά με την σκόνη που έχει θερμανθεί από το σμήνος. Η μικρή μάζα των νεφών (100.000 ηλιακές) σημαίνει ότι η διαφορά ταχύτητας των 12 km/s ανάμεσα στα δύο νέφη τα κάνει να μην έχουν βαρυτική σύνδεση. Αυτό σημαίνει ότι η σύγκρουση είναι πρόσφατη. Η υπερηχητική σύγκρουση 2 νεφών μοριακού αερίου σχηματίζει μια συμπιεσμένη περιοχή όπου δημιουργούνται πυκνοί και μεγάλης μάζας πυρήνες, περιοχές γέννησης αστεριών τύπου O. Το χρονοδιάγραμμα της σύγκρουσης είναι μόλις 100.000 έτη, βάσει των ταχυτήτων και των μεγεθών τους. Το αστέρι με την μεγαλύτερη μάζα στο σμήνος είναι το IRS2 (40 ηλιακές μάζες στην κ. ακολουθία). Τα υπόλοιπα αστέρια O έχουν περίπου 20 ηλιακές μάζες το καθένα. Η συσσώρευση μάζας για ένα αστέρι 40 ηλιακών μαζών γίνεται με ρυθμό 1/40.000 ηλιακές μάζες το έτος. Τα αστέρια μικρής μάζας του σμήνος πρέπει να δημιουργήθηκαν πριν την σύγκρουση, αφού ο σχηματισμός τους απαιτεί περισσότερο χρόνο (10 εκατομμύρια έτη). Σε αντίθεση με αυτά, τα αστέρια O ιονίζουν το νεφέλωμα αποτελεσματικά, μια διαδικασία που συνεχίζεται και σήμερα.

## Η δυναμική εξέλιξη των σφαιρωτών σμηνών

Τα σφαιρωτά υπάρχουν σε σχεδόν όλους τους γαλαξίες, και οι ιδιότητές τους μας δίνουν στοιχεία για την εξέλιξη του γαλαξία τους. Οι ηλικίες και οι μεταλλικότητες των σφαιρωτών μας πληροφορούν για το ιστορικό ενός γαλαξία και η χωρική διασπορά τους σε έναν γαλαξία καθορίστηκε από την εποχή του συμπαντικού επαναιονισμού (πρώιμη φάση των γαλαξιών). Η ομοιότητα των δομών των νεαρών σμηνών στην άλω

του Γαλαξία μας με αυτές σε σμήνη γαλαξιών- δορυφόρων όπως τα Μαγγελανικά νέφη μας βοηθούν να διακρίνουμε τα σφαιρωτά που σχηματίστηκαν στον Γαλαξία από αυτά που μπήκαν στην άλω μέσω συσσώρευσης (εξωγενείς σφαιρωτά).

Υπάρχει ένα κενό στην αναλογία μεγέθους/ μάζας σε λαμπρότητα μερικών εκατομμύριων ηλιακών. Τα αντικείμενα με μεγαλύτερη μάζα (σμήνη μεγάλης μάζας και υπέρ- πυκνοί νάνοι γαλαξίες) παρουσιάζουν θετική σχέση μεγέθους (ακτίνας) και λαμπρότητας/ μάζας. Αυτό συμβαίνει και σε γαλαξίες προγενέστερου τύπου (ελλειπτικοί) όπου η ακτίνα των λαμπρότερων σφαιρωτών είναι ανεξάρτητη από την σχέση λαμπρότητας/ μάζας. Παραμένει ανοιχτό θέμα το αν τα σφαιρωτά και οι υπέρ- πυκνοί νάνοι γαλαξίες (UCD, ultra compact dwarf galaxies) έχουν κοινό μηχανισμό σχηματισμού ή αν οι μορφολογικές διαφορές τους οφείλονται σε επίδραση από το περιβάλλον τους. Η αναλογία μάζας/ φωτός στα σφαιρωτά είναι η μισή από ότι στους UCD. Αυτό μπορεί να σημαίνει την ύπαρξη σκοτεινής ύλης στα UCD ή διακυμάνσεις την συνιστώσα αρχικής μάζας των αστεριών (περισσότερα αστέρια μεγάλης μάζας στα UCD). Αν τα σφαιρωτά σμήνη είχαν σχηματιστεί σε άλως σκοτεινής ύλης θα διαχωρίστηκαν από αυτές μέσω δυναμικής τριβής.

Με την ανακάλυψη νεαρών αστρικών σμηνών μεγάλης μάζας (παρόμοιας μάζας και μεγέθους με τα σφαιρωτά) σε γαλαξίες αστρογέννησης συμπεράναμε ότι και σήμερα δημιουργούνται σφαιρωτά σμήνη. Διαφέρουν όμως σε συνιστώσα μάζας (mass function) από τα σφαιρωτά του Γαλαξία μας. Μπορεί τα μικρότερης μάζας σφαιρωτά του Γαλαξία μας να διαλύθηκαν από τις παλιρροϊκές δυνάμεις του. Υπάρχουν μοντέλα που προβλέπουν την σταθερή απώλεια αστεριών των σφαιρωτών μέσω των γαλαξιακών παλιρροϊκών δυνάμεων. Ακόμα, χρησιμοποιούμε τις ισόχρονες (στο διάγραμμα H/R) των σφαιρωτών του Γαλαξία μας σε ηλικία 12 δις έτη. Η πυκνότητα των σφαιρωτών εμφανίζεται ως συνιστώσα της μάζας και της απόστασης από το γαλαξιακό κέντρο. Τα μισά σφαιρωτά εμφανίζονται ως απομονωμένα και τα υπόλοιπα ως υπό επίδραση παλιρροϊκών δυνάμεων. Φαίνεται τα σφαιρωτά σμήνη να ήταν αρχικά πυκνότερα από ότι είναι σήμερα.

Τα συμπεράσματα είναι ότι οι σημερινές ακτίνες των σφαιρωτών είναι ανεξάρτητες από τις αρχικές. Εξαρτώνται από τις παλιρροϊκές δυνάμεις του Γαλαξία. Έτσι δεν μπορούμε να συμπεράνουμε αν τα σφαιρωτά σχηματίστηκαν με την ίδια αναλογία μάζας/ ακτίνας με τα UCD. Τα μισά σφαιρωτά ακόμα γεμίζουν τον χώρο Roche (ακτίνα στην οποία το σφαιρωτό δεν παρουσιάζει πια βαρυτική συνοχή) και η ακτίνα τους δεν επηρεάζεται από τα παλιρροϊκές δυνάμεις του Γαλαξία. Η εξέλιξη των σφαιρωτών επηρεάζεται και από τις κοσμικές εξελίξεις ενός γαλαξία (συσσώρευση νάνων γαλαξιών κ.λπ.)

## Η σημασία των διπλών αστεριών σε νεαρά σμήνη μεγάλης μάζας

Τα περισσότερα αστέρια είναι σε διπλά συστήματα, και τα περισσότερα με μάζα μεγαλύτερη από την μισή του Ηλίου σχηματίζονται σε σμήνη. Τα διπλά αστέρια

αυξάνονται ανάλογα την αστρική μάζα, άρα μας πληροφορούν για τον δυναμικό διαχωρισμό της αστρικής μάζας του σμήνους. Τα αστέρια μεγαλύτερης μάζας θα μεταναστεύσουν στο κέντρο του σμήνους, ενώ τα μικρότερης μάζας που ήταν στο κέντρο μεταναστεύουν προς τα έξω. Αυτή η κινητικότητα μπορεί να διαταράξει μερικά διπλά συστήματα, κάτι σημαντικό για την βραχυχρόνια εξέλιξη του σμήνους.

Τα αστέρια <blue straggler> προέρχονται από συγχωνεύσεις διπλών αστεριών ή μεταφορά μεγάλης μάζας από τον συνοδό. Στα αστέρια μεγάλης μάζας του πεδίου το ποσοστό των διπλών είναι 70%, ενώ στα νεαρά ανοιχτά σμήνη όπως το 30 Doradus το ποσοστό είναι 50%. Οι προσομοιώσεις μας δείχνουν ότι ο δυναμικός διαχωρισμός της αστρικής μάζας (τουλάχιστον των αστεριών μεγάλης μάζας) συμβαίνει στον χρόνο διάβασης (crossing time, χρόνο που χρειάζονται να διασχίσουν τα αστέρια το σμήνος βάσει της ταχύτητάς τους) που είναι ίσος με τον χρόνο ελεύθερης πτώσης προς το κέντρο του σμήνους, που καθορίζεται από την μάζα του. Στο ηλικίας 15- 30 εκ. έτη NGC 1818 (5- 30 φορές ο χρόνος διάβασης) θα έπρεπε να έχει ολοκληρωθεί ο διαχωρισμός, με αύξηση των διπλών προς το κέντρο του σμήνους. Όμως φαίνεται να υπάρχει αύξηση των διπλών προς την εσωτερική περιοχή, στην μισή ακτίνα του σμήνους. Φαίνεται ότι στο κέντρο του σμήνους διαταράχτηκαν και διαχωρίστηκαν πολλά διπλά συστήματα που δεν είχαν ισχυρή βαρυτική συνοχή. Αυτό δεν συμβαίνει σε άλλα σμήνη και έχει να κάνει με την μεγάλη διασπορά ταχυτήτων στο κέντρο του NGC 1818. Η δυναμική των διπλών είναι σημαντική για τον σχηματισμό αστεριών τύπου <blue straggler>. Η ελάττωση των διπλών προς το κέντρο του σμήνους συμβαίνει μετά από έναν χρόνο διάβασης. Η μεγάλη διασπορά ταχυτήτων κέντρου- περιφέρειας αναγκάζει τα διπλά να κινούνται ταχύτερα στο κέντρο του σμήνους.

Αυτή η γωνιακή διασπορά των διπλών είναι σύμφωνη με την γωνιακή διασπορά των blue straggler σε πολλά σφαιρωτά σμήνη του Γαλαξία μας και σε σμήνη μεγάλης ηλικίας του μεγάλου Μαγγελανικού νέφους. Ο σχηματισμός τους στο κέντρο ενός σμήνους μπορεί να έχει διαφορετικό μηχανισμό από ότι στις πιο εξωτερικές περιοχές. Στο κέντρο πρέπει να σχηματίζονται με απευθείας συγκρούσεις, βάσει του χρονοδιαγράμματός τους και της αυξημένης πυκνότητας της κεντρικής περιοχής. Στις εξωτερικές περιοχές των σμηνών πρέπει να σχηματίζονται με λιγότερο βίαιες και πιο αργές διαδικασίες όπως η μεταφορά μάζας στο ένα αστέρι από το άλλο.

## Αρχικές συνθήκες σχηματισμού αστρικών σμηνών

Ανακαλύψαμε πληθώρα από αστρικά σμήνη στον Γαλαξία μας και σε άλλους γαλαξίες. Όμως το πώς αρχίζει η δημιουργία τους μέσα στα μοριακά νέφη δεν είναι ξεκάθαρο. Δεν μπορούμε να εξηγήσουμε γιατί τα αστρικά σμήνη ηλικίας >1 δις ετών έχουν τυπικό μέγεθος ενός pc, με ορισμένο κέντρο και σχεδόν σφαιρικό σχήμα, ενώ τα μοριακά νέφη είναι ακαθόριστα με τυπικό μέγεθος 10 pc, και σε αυτά σχηματίζονται αστέρια λόγω κατάτμησης των πυκνότερων δομών τους. Από την μικρή διασπορά ηλικιών των νεαρών σμηνών φαίνεται να σχηματίστηκαν τα αστέρια τους μαζικά σε

μικρό χρονοδιάγραμμα. Ένας μηχανισμός που μπορεί να υποστηρίξει κάτι τέτοιο είναι ο <μονολιθικός> σχηματισμός πρώτο- σμήνους.

Ως νεαρό αστρικό σμήνος μεγάλης μάζας (young massive cluster, YMC) ορίζουμε ένα σμήνος με ηλικία <100 εκατομμύρια έτη και μάζα >10.000 ηλιακές. Μια πιθανή οδός σχηματισμού αστρικού σμήνους είναι η εντατική αστρογέννηση σε συγκεκριμένη περιοχή ένωσης συμπυκνωμάτων του νεφελώματος. Εκεί μπορεί να παρατηρηθεί μεγάλη αποτελεσματικότητα σχηματισμού αστεριών (Star Formation Efficiency, η αποτελεσματικότητα κατανάλωσης του διαθέσιμου αερίου στην αστρογέννηση). Ενώ δεν μπορεί να αποκλειστεί ο σχηματισμός αστεριών έξω από αυτήν την περιοχή, τα περισσότερα πρέπει να δημιουργούνται σε αυτήν. Το σμήνος που θα σχηματιστεί είναι αρχικά πιο πυκνό (0,3 pc) από τα YMC που παρατηρούμε. Η απώλεια αστεριών λόγω γρήγορης εξέλιξης των μεγάλης μάζας σε διάστημα 5 εκ. έτη είναι ο βασικός παράγοντας της διαστολής του σμήνους. Τα αστέρια με την μεγαλύτερη μάζα παραμένουν στο κέντρο του σμήνους και με τους αστρικούς ανέμους το καθαρίζουν από τα υπολείμματα του νέφους. Η μάζα του κέντρου μειώνεται ακόμα περισσότερο μετά τις εκρήξεις σουπερνόβα. Η διαστολή μέσω της απώλειας αστρικής μάζας διαρκεί 50 εκατομμύρια έτη. Αργότερα η διαστολή συνεχίζεται με μηχανισμό την θέρμανση από τους δίσκους συσσώρευσης των μαύρων τρυπών στο κέντρο του σμήνους. Και τα πολλά διπλά συστήματα αστεριών μεγάλης μάζας στα YMC συμβάλλουν στην διαστολή τους μέσω βαρυτικών διαταραχών.

Ένας άλλος μηχανισμός δημιουργίας YMC είναι η συγχώνευση σμηνών μικρότερης μάζας. Προϋπόθεση είναι να έχουν απελευθερωθεί από το αέριο ώστε να είναι μικρός ο χρόνος συσσώρευσής τους. Θα πρέπει να συγχωνευτούν σε μικρή ηλικία (> 1 εκ. έτη). Αυτός ο μηχανισμός επιτρέπει στα YMC να αποκτήσουν ευκολότερα τις σημερινές τους διαστάσεις.

Οι συνθήκες στον Γαλαξία μας δεν επιτρέπουν τον σχηματισμό σμηνών ακόμα μεγαλύτερης μάζας, αντίθετα με τους γαλαξίες αστρογέννησης.

Η επίδραση των μαύρων τρυπών αστρικής μάζας στην εξέλιξη των αστρικών σμηνών μεγάλης μάζας

Τα σμήνη μεγάλης μάζας όπως τα σφαιρωτά περιέχουν μεγάλο αριθμό μαύρων τρυπών. Αυτές οι μαύρες τρύπες παραμένουν μέσα στα σφαιρωτά σχηματίζοντας μια δομή. Υπολογίζουμε ότι τα παλαιά σφαιρωτά περιέχουν εκατοντάδες ως χιλιάδες αστρικές μαύρες τρύπες. Οι περισσότερες έχουν απολέσει την βαρυτική σύνδεση με τον (πιθανό) συνοδό τους, άρα δεν μπορούμε να τις ανιχνεύσουμε μέσω ακτινοβολίας X από τον δίσκο προσαύξησης.

Το αν ισχύουν τα παραπάνω έχει να κάνει με την αρχική ώθηση μιας μαύρης τρύπας κατά την δημιουργία της, λόγω έκκεντρης έκρηξης σουπερνόβα. Αν η ταχύτητά της είναι μεγαλύτερη από την ταχύτητα διαφυγής του σφαιρωτού, που εξαρτάται από την μάζα του, τα αρχαία σφαιρωτά θα έχουν απολέσει τις μαύρες τρύπες τους. Πάντως έχουμε ανακαλύψει μαύρες τρύπες σε ποικιλία σφαιρωτών, κάτι που ενισχύει το σενάριο παραμονής τους στα σμήνη.

## Μαύρες τρύπες μεσαίου μεγέθους στα σφαιρωτά σμήνη

Οι μαύρες τρύπες μεσαίου μεγέθους (μάζας 100- 100.000 ηλιακές) δικαιολογούν την γρήγορη συσσώρευση μάζας των κεντρικών γαλαξιακών μαύρων τρυπών που παρατηρούμε και σε γαλαξίες με  $z = 7$  (σε ηλικία μικρότερη των 1 δις ετών). Προέρχονται από συγκρούσεις αστεριών μεγάλης μάζας (ιδίως πληθυσμού III) και συγχωνεύσεις μαύρων τρυπών αστρικής μάζας σε πυκνά περιβάλλοντα (όπως τα σφαιρωτά σμήνη). Δεν έχουμε ανακαλύψει ακόμα τέτοια αντικείμενα σε σφαιρωτά σμήνη. Η μεγάλη πυκνότητα των σφαιρωτών σε αστέρια δυσκολεύει τις μετρήσεις της κινηματικής αερίων και άστρων που θα μπορούσε να αποτελέσει έμμεσο τρόπο ανίχνευσης μιας τέτοιας μαύρης τρύπας. Το ίδιο συμβαίνει και με την ανίχνευση ακτινοβολίας  $X$  από δίσκο προσαύξησης, λόγω μικρής ποσότητας διαθέσιμου αερίου για συσσώρευση.

Στο σφαιρωτό σμήνος NGC 6266 φαίνεται να υπάρχει μια μαύρη τρύπα 3000 ηλιακών μαζών. Η αβεβαιότητα στην εκτίμηση βάσει της ροής ακτινών  $X$  από την μαύρη τρύπα οφείλεται στην αβεβαιότητα για την ποσότητα διαθέσιμου αερίου για προσαύξηση. Ανάλογα ίχνη μαύρων τρυπών μεσαίου μεγέθους υπάρχουν σε άλλα σφαιρωτά σμήνη.

## Προστατευμένα συμπυκνώματα σε αστρικά σμήνη

Στα σφαιρωτά σμήνη υπάρχουν πολλαπλοί αστρικοί πληθυσμοί, όπως εμπλουτισμένα αστέρια σε ήλιον και διακυμάνσεις της αναλογίας  $Na/O$ . Η πρώτη γενιά αστεριών ανακάτεψε το αρχικό αέριο με τα προϊόντα της πυρηνικής καύσης τους προετοιμάζοντας το έδαφος για την επόμενη αστρογέννηση, ιδίως μέσω των αστρικών ανέμων αστεριών με γρήγορη περιστροφή και αστεριών στον ασυμπτωτικό κλάδο. Δημιουργήθηκαν θερμικά ασταθή συμπυκνώματα με ασπίδα (μεγάλη πυκνότητα) για τις υπεριώδεις ακτινοβολίες των νεαρών αστεριών. Αυτά τα συμπυκνώματα σχηματίζονται σε σμήνη με πάνω από μια κρίσιμη μάζα, από τους καυτούς ανέμους μεγάλης μάζας αστεριών (αλληλεπιδρούν με την μεσοαστρική ύλη). Τα συμπυκνώματα συρρικνώνονται με αποτέλεσμα να μην μπορεί ο καυτός άνεμος των αστεριών να τα διώξει από το σμήνος. Η βαρύτητα τα σπρώχνει προς το κέντρο του σμήνους. Σε ένα σμήνος με μάζα 10 εκατομμύρια ηλιακές και ακτίνα 3 pc σχηματίζονται σε 3,5 εκατομμύρια έτη προστατευόμενα συμπυκνώματα μάζας 100.000 ηλιακών μαζών.

## Ο πληθυσμός των UCD (ultra compact dwarfs, υπέρ- πυκνοί νάνοι γαλαξίες)

Οι UCD είναι υπέρ- πυκνά σμήνη αστεριών σε πυκνές περιοχές των γαλαξιακών σμηνών, αλλά και μεμονωμένοι σε ανεξάρτητους γαλαξίες. Σχηματίζονται ή σε μεγάλες

γαλαξιακές συγχωνεύσεις αποτελώντας το ανώτατο άκρο μάζας σφαιρωτών σμηνών ή είναι απομεινάρια απογυμνωμένων νάνων γαλαξιών.

Στον γαλαξία NGC 1399 φαίνεται να σχηματίστηκαν τα σφαιρωτά σμήνη και οι UCD από ανεξάρτητα αστρικά σμήνη.

## Οι χημικές αφθονίες των πολλαπλών αστρικών πληθυσμών στα σφαιρωτά σμήνη

Οι διακυμάνσεις των ελαφριών χημικών στοιχείων όπως το ήλιον ισχύουν γενικά στα σφαιρωτά, αλλά σε διαφορετικό βαθμό. Ανακαλύψαμε αστρικούς πληθυσμούς διακριτής αφθονίας Fe, C+N+O, Na, Mg, Al, Si, K και στοιχείων αργής απορρόφησης νετρονίων (slow neutron capture) σε μερικά σφαιρωτά. Τα περισσότερα σφαιρωτά δεν επιδεικνύουν διακυμάνσεις αφθονίας όλων των στοιχείων. Η πιο συνηθισμένη διακύμανση χημικής αφθονίας των μεγάλης μάζας σφαιρωτών του Γαλαξία μας είναι των στοιχείων C-N και O-Na. Φαίνεται η διακύμανση να σχετίζεται με την μάζα του σμήνους, με τα μεγαλύτερης μάζας να έχουν μεγαλύτερες διακυμάνσεις. Για παράδειγμα, το M4 σφαιρωτό σμήνος περιέχει 2 πληθυσμούς αστεριών στον κλάδο των κόκκινων γιγάντων (RGB), έναν πλούσιο σε C-O και φτωχό σε N/Na και έναν φτωχό σε C-O και πλούσιο σε N/Na. Μερικά σφαιρωτά όπως το NGC 2808 έχουν εμπλουτισμένο σε ήλιον πληθυσμό δεύτερης γενιάς και μερικά αντίθετη αναλογία Mg- Al.

Το  $\omega$  του Κενταύρου παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις του σιδήρου και των στοιχείων αργής απορρόφησης νετρονίων, ένα φαινόμενο που αποδείχτηκε σπάνιο για σφαιρωτά του Γαλαξία μας. Αυτό το σφαιρωτό ανήκει στην κατηγορία των ανώμαλων, όπως τα M22, M2, M19, NGC 1851, NGC 5286, που παρουσιάζουν διακύμανση των στοιχείων αργής απορρόφησης νετρονίων και των CNO σε θετική αναλογία με το σίδηρο, αλλά αντίθετα με τα κανονικά σφαιρωτά, η αναλογία των ελαφριών στοιχείων είναι ανεξάρτητη. Ο κλάδος των γιγάντων των ανώμαλων σφαιρωτών έχει πολλές διακλαδώσεις αντίθετα με τον ενιαίο των κανονικών.

Τα ανώμαλα σφαιρωτά πρέπει να είχαν διαφορετική χημική εξέλιξη από τα κανονικά. Τα κανονικά έχουν 2 πληθυσμούς, με τον πρώτο να είναι εμπλουτισμένο σε οξυγόνο και με εξαντλημένο το Na (τυπικό για πληθυσμό της άλως). Τα αστέρια που εμπλούτισαν την μεσοαστρική ύλη από όπου προήλθε η δεύτερη γενιά ήταν αστέρια μεγάλης μάζας με γρήγορη περιστροφή και αστέρια του ασυμπτωτικού κλάδου. Στα ανώμαλα σφαιρωτά ο δεύτερος πληθυσμός εμπλουτίστηκε περισσότερο από μικρής μάζας αστέρια του ασυμπτωτικού κλάδου, αλλά και σουπερνόβα Ia (εμπλουτισμός σε σίδηρο). Ίσως τα ανώμαλα να αποτελούν πυρήνες νάνων γαλαξιών όπως πιστεύουμε για το  $\omega$  Κενταύρου.

## Τα σφαιρωτά μεγάλης μάζας του μικρού Μαγγελανικού νέφους

Στο μικρό Μαγγελανικό νέφος υπάρχουν πολλά σφαιρωτά μέσης ηλικίας (1-2 δις ετών). Αυτά παρουσιάζουν δύο σημεία αποκοπής (turn off) της κύριας ακολουθίας, κάτι



που προδίδει διαφορετικές γενιές αστεριών. Ο ένας πληθυσμός έχει όμοια αφθονία C, O, N, He με τα αστέρια της άλως ίδιας μεταλλικότητας ενώ ο άλλος εμφανίζεται εμπλουτισμένος σε ήλιον και άζωτο και με εξαντλημένο το οξυγόνο και τον άνθρακα. Φαίνεται τα σφαιρωτά μεγάλης μάζας να έχουν πολλαπλούς κλάδους ερυθρών γιγάντων. Η αστρογέννηση σε αυτά τα σμήνη πρέπει να είχε διάρκεια 100-500 εκατομμύρια έτη.

#### Τα νεαρά σφαιρωτά σμήνη NGC1844 και NGC1856

Το 150 εκ. ετών NGC 1844 στο μικρό νέφος του Μαγγελάνου είναι μοναδικό. Παρατηρούμε μια πλάτυνση της κύριας ακολουθίας των αστεριών του. Οι διαφορετικές ισόχρονες αντιστοιχούν σε αστέρια διαφορετικής αφθονίας C, N, O. Το NGC1856 έχει ηλικία 350 εκ. έτη. Έχει κυρία ακολουθία με διχοτόμηση, με τα μπλε αστέρια να αποτελούν το 1/3 του συνόλου. Η διχοτόμηση εμφανίζεται μόνο σε μεγάλες λαμπρότητες. Υπάρχουν 2 σενάρια, ή το σφαιρωτό είχε μια παρατεταμένη αστρογέννηση (150 εκ. έτη) ή έχει δύο διακριτούς πληθυσμούς διαφορετικής ηλικίας και μεταλλικότητας (δύο επεισόδια αστρογέννησης). Στην δεύτερη περίπτωση τα μπλε αστέρια είναι ενισχυμένα σε Fe/H και {C,N,O}/Fe και νεαρότερα από τα κόκκινα αστέρια στο διάγραμμα H/R.

#### Σχηματισμός σφαιρωτών σμηνών με πολλαπλούς πληθυσμούς

Υπάρχουν φασματοσκοπικές και φωτομετρικές αποδείξεις για την ύπαρξη πολλαπλών πληθυσμών σε σφαιρωτά σμήνη. Ενώ μερικά αστέρια τους έχουν όμοια μεταλλικότητα με τα αστέρια του πεδίου (της ευρύτερης περιοχής όπου βρίσκεται το σφαιρωτό) άλλα επιδεικνύουν μεταξύ τους μεγάλη διακύμανση σε αφθονία ελαφριών στοιχείων (από το Λίθιο ως το Αλουμίνιο), ενώ η αναλογίες του σιδήρου και των βαρύτερων στοιχείων παραμένουν σταθερές. Αυτό εξηγείται με <αυτό-εμπλουτισμό> του αερίου μέσα στο σμήνος κατά την νεαρή φάση του. Πιθανά τα πρώτα αστέρια με μεγάλη μάζα και γρήγορη περιστροφή να συνέβαλλαν σε αυτό. Η μεγάλη ταχύτητα περιστροφής επιτρέπει στα αστέρια να απελευθερώσουν υλικά από την καύση (H), εμπλουτίζοντας έτσι το μεσοαστρικό αέριο. Τότε σχηματίζονται αστέρια με χημικό προφίλ σαν αυτό που παρατηρούμε. Τα μεγάλης μάζας αστέρια επίσης καθαρίζουν την περιοχή τους από το αέριο με τους ισχυρούς ανέμους τους. Η δεύτερη γενιά αστεριών σχηματίζεται στο κέντρο του σμήνους. Η αναλογία αστεριών δεύτερης/ πρώτης γενιάς αυξάνεται (λόγω γρήγορης εξέλιξης των μεγάλης μάζας αστεριών πρώτης γενιάς) ως αυτήν που παρατηρούμε σήμερα.

Ο ένας αστρικός πληθυσμός έχει όμοια χημική σύσταση με τα αστέρια του πεδίου ίδιας μεταλλικότητας ενώ ο άλλος παρουσιάζει εμπλουτισμό σε παράγωγα στοιχεία καύσης υδρογόνου σε υψηλές θερμοκρασίες (σε προχωρημένη φάση της αστρικής εξέλιξης) με αύξηση του He και μη συνηθισμένες αναλογίες Li- Na, C- N, O- Na, Mg- Al, με τα βαρύτερα στοιχεία να είναι σταθερής αφθονίας.

Ως υποψήφιοι μηχανισμοί αυτού του χημικού εμπλουτισμού είναι τα αστέρια μεγάλης μάζας (στον οριζόντιο κλάδο, γρήγορης περιστροφής ή διπλά) και τα πολύ μεγάλης μάζας αστέρια (πάνω από 100 ηλιακές μάζες).

Συγκεκριμένα, αν ένα αστέρι 20- 25 ηλιακών μαζών έχει αρκετά μεγάλη ταχύτητα περιστροφής, αυτή σε συνδυασμό με την αστρική συναγωγή θα φέρει στην αστρική επιφάνεια στοιχεία που σχηματίζονται στο βάθος του αστεριού. Ο ισχυρός αστρικός άνεμος θα τα παρασύρει δημιουργώντας ένα κέλυφος γύρω από το αστέρι. Αυτή η ύλη θα αναμειχθεί με το μεσοαστρικό αέριο με αποτέλεσμα τα αστέρια που θα προκύψουν να έχουν εμπλουτισμένη χημική σύσταση. Αυτός ο μηχανισμός εμπλουτισμού είναι ικανός ώστε να εμπλουτιστεί μόνο το 10% των αστεριών ενός σφαιρωτού σμήνους, ενώ το παρατηρήσιμο ποσοστό εμπλουτισμένων αστεριών είναι στο 60% του συνόλου. Μια εκδοχή είναι αρχικά το σμήνος να περιείχε πολύ περισσότερα αστέρια και να απώλεσε μεγάλο ποσοστό από τα μικρής μάζας και κανονικής αναλογίας στοιχείων (όχι εμπλουτισμένα) αστέρια.

Πιο αποτελεσματικός μηχανισμός είναι η βίαιη απομάκρυνση του αερίου από το σμήνος μετά την αστρογέννηση. Τα μεγάλης μάζας αστέρια θα συσσωρευτούν στο κέντρο του σμήνους (κλασική διαδικασία που παρατηρούμε και στα ανοιχτά σμήνη), κάτι που σημαίνει ότι τα εμπλουτισμένα αστέρια σχηματίστηκαν επίσης εκεί. Στις εξωτερικές περιοχές κυριαρχούν τα αστέρια κανονικής αναλογίας στοιχείων. Αν η απομάκρυνση του αερίου είναι αρκετά γρήγορη (μικρότερη από τον χρόνο διάβασης του σμήνους, *crossing time*) το σμήνος θα επηρεαστεί αρκετά και θα απολέσει τα εξωτερικά του αστέρια προς την γαλαξιακή άλω. Αυτό εξαρτάται από τις φυσικές διεργασίες, ώστε να μπορούν να μεταφέρουν την απαραίτητη ενέργεια τόσο γρήγορα. Οι εκρήξεις σουπερνόβα δεν μπορούν να απομακρύνουν αποτελεσματικά το αέριο. Σχηματίζουν διαστελλόμενες φούσκες αερίου που διαλύονται πριν φτάσουν την ταχύτητα διαφυγής του σμήνους. Μάλλον η διατάραξη που φέρνουν ευνοεί την περαιτέρω αστρογέννηση.

Ένας τρόπος να καταλήξουμε στον μηχανισμό που δημιούργησε το μεγάλο ποσοστό εμπλουτισμένων αστεριών είναι να εξετάσουμε τις ιδιότητες των εμπλουτισμένων αστεριών μικρής μάζας. Υπάρχει το εναλλακτικό σενάριο εμπλουτισμένης συσσώρευσης που δεν απαιτεί 2 αστρικούς πληθυσμούς. Αφού το χρονοδιάγραμμα εξέλιξης των αστεριών μεγάλης μάζας είναι συντομότερο (μερικά εκατομμύρια έτη) από την φάση προ κυρίας ακολουθίας των αστεριών μικρής μάζας (10 εκ. έτη) ο δίσκος συσσώρευσης των πρώτο- αστέρων μικρής μάζας θα δεχτεί υλικό που διέφυγε από διπλά αστέρια μεγάλης μάζας. Έτσι χρειάζεται μόνο μια γενιά αστεριών (μικρής και μεγάλης μάζας) ώστε να εξηγηθεί ο χημικός εμπλουτισμός που οδηγεί στους 2 αστρικούς πληθυσμούς. Τα αστέρια μικρής μάζας αποκτάνε πυρήνα ακτινοβολίας μετά από μερικά εκατομμύρια έτη (ακόμα πριν την κύρια ακολουθία) με αποτέλεσμα να μην είναι πλέον αστέρια πλήρους συναγωγής. Αυτό σημαίνει ότι τα βαρύτερα στοιχεία που συσσωρεύονται στο αστέρι θα επικάθονται στον πυρήνα του. Αυτό θα φέρει θερμικές αστάθειες, θα ανακατευτούν και θα ομογενοποιηθεί το αστρικό εσωτερικό. Αυτή η διαδικασία έχει ως συνέπεια την ολική εξάλειψη του λιθίου (στοιχείο που καταστρέφεται σε σχετικά χαμηλή θερμοκρασία κατά την αστρική εξέλιξη) ενώ κανονικά θα <επιβίωνε> στα εξωτερικά αστρικά στρώματα. Όμως αυτό έρχεται σε αντίθεση με τις παρατηρήσεις που δείχνουν ότι τα εμπλουτισμένα αστέρια κυρίας ακολουθίας έχουν λίθιο.

Τα εμπλουτισμένα αστέρια ξεχωρίζουν και στον οριζόντιο κλάδο του διαγράμματος H/R. Τα εμπλουτισμένα αστέρια έχουν μεγαλύτερη αρχική αναλογία σε ήλιον με αποτέλεσμα να εξελίσσονται πιο γρήγορα (τα αστέρια εγκαταλείπουν την κύρια ακολουθία όταν γεμίσει ο πυρήνας τους ήλιον). Με την παραδοχή ότι η απώλεια μάζας στον κλάδο των γιγάντων είναι η ίδια για τους 2 πληθυσμούς, η θέση στον οριζόντιο κλάδο (σύντηξη ηλίου στον πυρήνα) θα απεικονίζει την μάζα και χημική σύσταση των αστεριών. Η παρουσία πολλών αστεριών σε μπλε (καυτό) παρακλάδι του οριζόντιου κλάδου στο σφαιρωτό  $\omega$  του Κενταύρου δικαιολογείται αν αυτά τα αστέρια είχαν καθυστερημένη φάση ταχείας καύσης ηλίου Helium flash (δηλαδή περισσότερη μάζα σε ήλιον).

Πρόσφατα ανακαλύψαμε εκτεταμένα ή πολλαπλά σημεία αποκοπής της κυρίας ακολουθίας σε σφαιρωτά στα Μαγγελανικά νέφη. Ως αιτίες προτάθηκαν η σημαντική διασπορά αστρικής ηλικίας (μερικών εκατοντάδων χιλιάδων ετών σε σφαιρωτά ηλικίας 1- 2 δις ετών) ή διασπορά ταχύτητας αστρικής περιστροφής. Το NGC1856 έχει 2 κύριους αστρικούς πληθυσμούς ηλικίας 350 εκ. ετών. Τα 2/3 των αστεριών περιστρέφονται γρήγορα ενώ το 1/3 (ο άλλος πληθυσμός) αργά. Τα αστέρια με γρήγορη περιστροφή είναι συνήθως τύπου B και A. Αντίθετα, ο συγχρονισμός των περιστροφών διπλών αστεριών αποτελεί συνηθισμένη αιτία επιβράδυνσης περιστροφής. Ένας μεγάλος αριθμός των αργά περιστρεφόμενων αστεριών πρέπει να βρίσκεται σε διπλά συστήματα χαλαρής σύνδεσης. Σε αυτά ο λοβός Roche (ο χώρος βαρυτικής αλληλεπίδρασης ανάμεσα στα 2 αστέρια) γεμίζει όταν το κυρίως άστρο αφήσει την κυρία ακολουθία. Τότε δεν μπορεί να αρχίσει την καύση ηλίου στον πυρήνα, που σημαίνει ότι τα κόκκινα εξελιγμένα αστέρια προέρχονται από τον πληθυσμό ταχέως περιστρεφόμενων αστεριών.

## Η συνεισφορά των σφαιρωτών σμηνών στις γαλαξιακές άλως

Τα σφαιρωτά σμήνη βρίσκονται σε όλους τους τύπους γαλαξιών με κυμαινόμενο πλήθος και συχνότητα. Ο Γαλαξίας μας περιέχει 160 γνωστά σφαιρωτά, με τα 2/3 να βρίσκονται στην άλω. Αυτός ο αριθμός αναμένεται να αυξηθεί με τις ανακαλύψεις περισσότερων σφαιρωτών τα επόμενα έτη, αλλά τα σφαιρωτά που θα ανακαλύψουμε θα είναι μάλλον μικρά, με αποτέλεσμα να μην επηρεάζουν πολύ την συνολική αναλογία μάζας. Γενικά τα σμήνη χάνουν μάζα και αστέρια κατά την εξέλιξή τους. Αυτό συμβαίνει με πολλούς τρόπους, αρχικά την βίαιη χαλάρωση (violent relaxation, η <χαλάρωση> ενός σμήνους από χαοτική σε ημι- σταθερή κατάσταση) και αργότερα τις αλληλεπιδράσεις 2 σωμάτων και παλιρροϊκές διαταραχές με τον δίσκο και την γαλαξιακή ράβδο σε μεγαλύτερα χρονοδιαγράμματα. Μπορεί τα σφαιρωτά μικρής μάζας να διαλύθηκαν ήδη στον Γαλαξία μας, με αποτέλεσμα να παρατηρούμε μόνο τα εξελιγμένα σφαιρωτά μεγάλης μάζας. Και αυτά έχασαν και συνεχίζουν να χάνουν αστέρια που μεταναστεύουν στην άλω. Το σφαιρωτό Pal 5 έχει μια διπλή παλιρροϊκή ουρά αστεριών. Έχουν βρεθεί αρκετές τέτοιες <ουρές> με ή χωρίς σύνδεση με κάποιο σμήνος. Αποτελούν άμεση απόδειξη ότι τα σμήνη συνεισφέρουν την αστρική μάζα της άλως.

Τα σφαιρωτά σμήνη και τα αστέρια πεδίου της άλως έχουν πολλές κοινές ιδιότητες. Έχουν παρόμοια διασπορά μεταλλικότητας με κορύφωση κοντά σε  $Fe/H = -1,5$ . Η σύσταση σε στοιχεία α είναι παρόμοια, κάτι που δεν ισχύει για άλλες αστρικές συναθροίσεις όπως οι δορυφόροι του Γαλαξία μας που παρουσιάζουν γενικά χαμηλότερη αναλογία  $\alpha/Fe$ . Υπάρχουν και διακριτές διαφορές ανάμεσα στα σφαιρωτά σμήνη και τα αστέρια πεδίου της άλως, όπως ο οριζόντιος κλάδος. Η απόλυτη λαμπρότητα και το χρώμα της μπλε περιοχής του κλάδου έχουν διαφορετικές διασπορές. Φαίνεται τα σφαιρωτά να περιέχουν και έναν δεύτερο αστρικό πληθυσμό πιο πλούσιο σε ήλιον και πιο καυτό. Αυτό φαίνεται και στις ασυνήθιστες και διαφορετικές ανά αστέρι αναλογίες ελαφριών στοιχείων (C, N, O, Mg, Al, Na) στα σφαιρωτά, κάτι που οφείλεται σε καύση του υδρογόνου σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες. Η μεγάλη αναλογία αυτών των αστεριών και η περιορισμένη δυνατότητα σχηματισμού τους οδηγεί στο συμπέρασμα ότι τα σφαιρωτά απώλεσαν το 90% των (κανονικής χημικής σύστασης) αστεριών τους, που σημαίνει ότι εμπλούτισαν σημαντικά την μάζα της άλως. Αυτά δεν ξεχωρίζουν από το πεδίο της άλω, αλλά σε αυτήν ανακαλύψαμε μερικά εμπλουτισμένα αστέρια (ασυνήθιστες αναλογίες C, N, Al, Mg, O) με προέλευση από σφαιρωτά σμήνη, κάτι που σημαίνει ότι πολύ περισσότερα αστέρια κανονικής χημικής σύστασης των σφαιρωτών έχουν εμπλουτίσει την Γαλαξιακή άλω (τουλάχιστον κατά 5% της συνολικής μάζας της).

## Οι αστρικοί πληθυσμοί των νεαρών σμηνών μεγάλης μάζας

Τα νεαρά σμήνη μεγάλης μάζας (100.000 - 10 εκατομμύρια ηλιακές μάζες) περιέχουν μεγάλο αριθμό αστεριών μεγάλης μάζας σε μικρό χώρο στο κέντρο τους. Τα αστέρια μεγάλης μάζας τροφοδοτούν τα νεαρά σμήνη μεγάλης μάζας με πολύ μάζα και ενέργεια με την μορφή των αστρικών ανέμων και των εκρήξεων σουπερνόβα. Αν ένα σμήνος μεγάλης μάζας είναι αρκετά πυκνό αυτές οι διεργασίες μπορούν να φέρουν αστάθεια στο μεσοαστρικό αέριο σχηματίζοντας συμπυκνώματα. Σε αυτά το αέριο ψύχεται και η πυκνότητα στήλης σύντομα αυξάνεται αρκετά ώστε να μπορεί να προστατεύσει την περιοχή από την ιονίζουσα αστρική ακτινοβολία. Τότε τα συμπυκνώματα μπορούν να καταρρεύσουν και να δώσουν νέα αστέρια. Αυτή η δεύτερη γενιά αστεριών θα είναι χημικά εμπλουτισμένη από προϊόντα αστρικής εξέλιξης της πρώτης γενιάς και θα παρουσιάζει συγκέντρωση προς το κέντρο του σμήνους (εκεί είχαν συγκεντρωθεί τα μεγάλης μάζας αστέρια). Αυτή η εκδοχή είναι σύμφωνη με την αναλογία εμπλουτισμένων αστεριών με αστέρια πρώτης γενιάς (70/30) που παρατηρούμε. Τα αστέρια πρώτης γενιάς διέφυγαν κατά μεγάλο ποσοστό από το σμήνος μέσω παλλιορικών δυνάμεων ενώ τα εμπλουτισμένα στο κέντρο του σμήνους παρέμειναν εκεί.

## Η προέλευση των αστρικών πληθυσμών στα σφαιρωτά- προβλήματα των σεναρίων 2 γενιών.

Μια ιδιότητα των σφαιρωτών είναι η ύπαρξη πολλαπλών αστρικών πληθυσμών με διαφορές στις αναλογίες των ελαφριών στοιχείων (C, N, O, Mg, Al, Na). Τα

περισσότερα σενάρια προβλέπουν τον σχηματισμό ενός δεύτερου αστρικού πληθυσμού, εμπλουτισμένο από τα κατάλοιπα του πρώτου με υποψήφιους μηχανισμούς εμπλουτισμού τα μεγάλης μάζας αστέρια και τους αστρικούς ανέμους τους λόγω γρήγορης περιστροφής ή αστρικής εξέλιξης. Ως δεύτερης γενιάς ονομάζουμε τα αστέρια που είναι εμπλουτισμένα σε (He, N, Al, Na) ενώ παρουσιάζουν εξάντληση των (C, O). Ως πρώτης γενιάς ονομάζουμε αυτά που έχουν τις ίδιες αναλογίες των ελαφριών στοιχείων με αστέρια του πεδίου. Αυτά τα σενάρια δεν εξηγούν αποτελεσματικά την σημερινή μεγάλη αναλογία εμπλουτισμένων-αστεριών πρώτης γενιάς (70/30). Τα περισσότερα σφαιρωτά παρουσιάζουν ομοιομορφία αναλογίας βαρύτερων στοιχείων, όπως του σιδήρου. Αυτό σημαίνει ότι οι σουπερνόβα δεν εμπλούτισαν αποτελεσματικά την δεύτερη γενιά αστεριών. Εναλλακτικά, υπάρχει το σενάριο εμπλουτισμένης συσσώρευσης στους πρωτοπλανητικούς δίσκους που δεν απαιτεί 2 αστρικούς πληθυσμούς.

Τα παρατηρησιακά δεδομένα δεν ενισχύουν τα σενάρια 2 αστρικών γενιών. Σε νεαρά αστρικά σμήνη μεγάλης ηλικίας στον Γαλαξία μας και σε άλλους γαλαξίες δεν βρέθηκαν αποδείξεις παρατεταμένης αστρογέννησης. Η νεαρή ηλικία των σμηνών όπου βρέθηκαν εμπλουτισμένα αστέρια δεν είναι σύμφωνη με το σενάριο εμπλουτισμού μέσω αστρικής εξέλιξης. Δεν βρέθηκε διαθέσιμο αέριο για αστρογέννηση. Γενικά δεν μπορεί να δικαιολογηθεί η από σφαιρωτό σε σφαιρωτό διακύμανση του χημικού εμπλουτισμού. Αντίθετα με τις παρατηρήσεις, τα μοντέλα προβλέπουν ισχυρή σύνδεση της αντίστροφης αναλογίας Na- O και της διασποράς του He στα σφαιρωτά σμήνη. Ακόμα, αποτελεί πρόβλημα η μεγάλη απώλεια μάζας (90%- 95%) που πρέπει να είχαν τα σφαιρωτά για να συμφωνούν τα μοντέλα εμπλουτισμού με την σημερινή μεγάλη αναλογία εμπλουτισμένων/αστεριών πρώτης γενιάς (70/30) ανεξάρτητα μάζας, απόστασης από το κέντρο του γαλαξία, ηλικίας και άλλων ιδιοτήτων των σφαιρωτών σμηνών. Δεν υπάρχει κανένας γνωστός μηχανισμός που να δικαιολογεί αυτήν την απώλεια μάζας.

Η έρευνα για διαφορετική περιστροφή των διάφορων αστρικών πληθυσμών, οι χωρικές διασπορές των αστεριών στα κέντρα των σμηνών και η αναλογία διπλών αστεριών, δηλαδή καθαρά κινηματικά κριτήρια, ίσως δώσουν περισσότερες απαντήσεις.

## Οι αλληλεπιδράσεις των διπλών και πολλαπλών αστεριών στα σφαιρωτά σμήνη

Στα σφαιρωτά υπάρχει μεγάλος πληθυσμός διπλών αστεριών. Οι αλληλεπιδράσεις τους μπορούν να δημιουργήσουν ιδιαίτερα αστέρια μέσω συγχώνευσης ή συσσώρευσης μάζας. Αυτά τα αστέρια είναι μεγαλύτερης μάζας από ότι τα κανονικά μονά αστέρια στην ίδια φάση εξέλιξης και περιστρέφονται πολύ γρήγορα. Το ανακάτεμα της αστρικής ύλης που προκαλείται από την γρήγορη αστρική περιστροφή μπορεί να αποτελέσει την αιτία χημικού εμπλουτισμού της αστρικής επιφάνειας. Έτσι αυτή η θεωρία προσφέρει την δημιουργία του πληθυσμού εμπλουτισμένων αστεριών χωρίς να είναι απαραίτητη η παρουσία δεύτερης γενιάς αστεριών.

Τα εμπλουτισμένα αστέρια στα σφαιρωτά σμήνη παρουσιάζουν μεγάλη διακύμανση σε N, Na, Al αλλά μικρή σε C, O, Mg που αποτελούν τυπικά στοιχεία των κύκλων σύντηξης υδρογόνου CNO, NeNa, MgAl. Στα σφαιρωτά σμήνη εκτός από τα διπλά αστέρια υπάρχουν και αντικείμενα που συνδέονται άμεσα με διπλά αστρικά συστήματα, όπως διπλοί αστέρες επαφής, blue stragglers και millisecond πάλασαρ. Τα αστέρια που προέρχονται από διπλά συστήματα έχουν μεγαλύτερες θερμοκρασίες στον πυρήνα με αποτέλεσμα να μπορούν να συντήξουν υδρογόνο με τους κύκλους CNO, NeNa. Η γρήγορη περιστροφή τους λόγω μετατροπής της γωνιακής ορμής από τα διπλά αστέρια σε στροφορμή φέρνει τα στοιχεία της καύσης υδρογόνου στην αστρική επιφάνεια. Έτσι αυτά τα αστέρια παρουσιάζουν διαφορετικές αφθονίες ελαφριών στοιχείων, θερμοκρασία και λαμπρότητα.

Σε αυτό το σενάριο τα αστέρια στα σφαιρωτά σχηματίζονται σε ένα επεισόδιο αστρογέννησης, και πολλά από αυτά σε διπλά συστήματα. Αυτό το μοντέλο είναι σύμφωνο με την εξάλειψη αερίου που παρατηρούμε στα σφαιρωτά. Έτσι διαμορφώνονται 2 πληθυσμοί από μια γενιά αστεριών, τα μονά αστέρια με ιδιότητες των αστεριών του πεδίου και τα εμπλουτισμένα αστέρια που προέκυψαν από διπλά συστήματα μέσω συγχώνευσης ή συσσώρευσης ύλης. Υπάρχουν 3 οδοί εξέλιξης των αστεριών από διπλά συστήματα. 1) Σε ένα διπλό σύστημα ξεχειλίζει ο λοβός Roche με συνέπεια την σταθερή και περιορισμένη μεταφορά μάζας και στροφορμής από το κύριο στο δευτερεύον αστέρι, με αποτέλεσμα αυτό να περιστρέφεται ταχύτατα. 2) Σε ένα διπλό σύστημα ξεχειλίζει ο λοβός Roche με συνέπεια την ασταθή μεταφορά μάζας όταν τα 2 αστέρια βρίσκονται ακόμα στην κύρια ακολουθία. Τότε τα αστέρια συγχωνεύονται σε ένα αστέρι ταχύτατης περιστροφής. 3) Τα δύο αστέρια εξελίσσονται σε διπλό αστέρι επαφής και συγχωνεύονται σε ένα αστέρι ταχύτατης περιστροφής.

## Η θεωρία εξέλιξης των μικρής μάζας αστεριών στα σμήνη μεγάλης μάζας

Το ήλιον είναι ένα από τα σημαντικότερα στοιχεία στην αστρική εξέλιξη. Κάθε μεταβολή στην αφθονία του έχει επίπτωση στην δομή και εξέλιξη του αστεριού. Η αύξηση του He σημαίνει ελάττωση της αδιαφάνειας. Αυτό συμβαίνει γιατί η αύξηση της αναλογίας του He σημαίνει ελάττωση του H, πηγής του  $-H$ , που είναι το κύριο ιόν που ενισχύει την αδιαφάνεια στα αστέρια. Έτσι τα μοντέλα αστεριών πλούσια σε He προβλέπουν υψηλότερες αστρικές θερμοκρασίες (ένα αστέρι εμπλουτισμένο σε He και ίδιας λαμπρότητας με τον Ήλιο μας θα είχε 1400 βαθμούς πιο μεγάλη επιφανειακή θερμοκρασία). Η αύξηση της αδιαφάνειας κάνει τα αστέρια πιο λαμπρά κατά την φάση καύσης υδρογόνου στον πυρήνα λόγω αποτελεσματικότερης καύσης του. Αυτό επηρεάζει το σημείο αποκοπής και τους κλάδους των γιγάντων αυτών των αστεριών (μετατοπισμένοι προς το μπλε). Οι αφθονίες σε ελαφριά στοιχεία επηρεάζουν επίσης την αδιαφάνεια και την αποτελεσματικότητα καύσης υδρογόνου.

## Οι επιπτώσεις της συσσώρευσης στους πρωτοπλανητικούς δίσκους στην εξέλιξη των σφαιρωτών σμηνών

Το σενάριο προγενέστερης συσσώρευσης στον πρωτοπλανητικό δίσκο παρουσιάζει τα διπλά αστέρια μεγάλης μάζας που βρίσκονται σε διπλά συστήματα στο κέντρο ενός σφαιρωτού να αποβάλλουν εμπλουτισμένη ύλη λόγω αλληλεπίδρασής τους. Τα μικρής μάζας προ κύριας ακολουθίας αστέρια της ίδιας γενιάς συσσωρεύουν αυτή την ύλη στους πρωτοπλανητικούς δίσκους τους. Για να δικαιολογηθούν οι πιο ακραίες διασπορές αφθονίας στοιχείων στα αστέρια των σφαιρωτών, κάποια μικρής μάζας αστέρια πρέπει να συσώρευσαν τόση εμπλουτισμένη ύλη που να διπλασίασε την μάζα τους κατά την διάρκεια ζωής του πρωτοπλανητικού δίσκου (1-10 εκατομμύρια έτη, ανάλογα την μάζα τους). Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης δείχνουν ότι η εμβέλεια του δίσκου είναι πολύ μικρή ώστε να συσσωρεύσει τόσο υλικό. Οι εξωτερικές περιοχές του δίσκου χάνουν μάζα και στροφορμή κατά την εξέλιξη του πρώτο-αστέρα. Το σενάριο προγενέστερης συσσώρευσης στον πρωτοπλανητικό δίσκο φαίνεται να μην είναι εφικτό.

## Σφαιρωτά σμήνη και σκοτεινή ύλη

Τα σφαιρωτά παρουσιάζουν πολύ μικρή αναλογία σκοτεινής ύλης, ή και καθόλου. Ακόμα και αν σχηματίστηκαν σε ανεξάρτητες άλω σκοτεινής ύλης πρέπει να αποδεσμεύτηκαν από αυτήν μέσω δυναμικών διεργασιών όπως κατάτμηση μάζας (βαρυτική κατάρρευση) ή παλιρροϊκές δυνάμεις. Σε μερικά σφαιρωτά ανεξάρτητα περιοχής ή ηλικίας (το 47 Tucana στον γαλαξιακό δίσκο/ράβδο, το παλαιό σφαιρωτό της άλως NGC1851 και το νεότερο σφαιρωτό της άλως M15) βρέθηκε αναλογία σκοτεινής ύλης/συνολικής 10%.

Οι παλιρροϊκές ουρές που συνδέονται με μερικά σφαιρωτά μας δείχνουν ότι αυτά δεν μπορεί να σχηματίστηκαν σε ανεξάρτητες μίνι-άλως σκοτεινής ύλης. Τα σφαιρωτά μάλλον δεν είχαν μεγάλη αναλογία σκοτεινής ύλης από την δημιουργία τους, και η σχετικά λίγη σκοτεινή ύλη τους πρέπει να αποσυνδέθηκε από αυτά με τις παραπάνω διεργασίες.

## Παρατηρώντας διάφορα σμήνη

Το παράξενο παλαιό και πολύ πλούσιο σε μέταλλα ανοιχτό σμήνος NGC6791

Το παραπάνω σμήνος έχει πολύ μεγάλη μάζα για ανοιχτό (4000 ηλιακές). Είναι ηλικίας 8,3 δις ετών, με διπλή μεταλλικότητα από τον Ήλιο μας. Η απόστασή του από το γαλαξιακό επίπεδο είναι 1 kpc, ενώ τα περισσότερα ανοιχτά σμήνη είναι κοντά στο επίπεδο. Παρουσιάζει μεγάλη εκκεντρότητα και σχήμα κουτιού. Η απόστασή του από το κέντρο του Γαλαξία κυμαίνεται από 3-10 kpc. Η περίοδός της περιφοράς του γύρω από το κέντρο του Γαλαξία είναι 130 εκ. έτη, άρα έχει περάσει από το γαλαξιακό επίπεδο πολλές φορές. Η μεγάλη μάζα και πυκνότητά του είναι ο λόγος

που δεν έχει διαλυθεί. Η εμπλουτισμένη χημική του σύσταση μας δείχνει ότι έχει σχηματιστεί κοντά στο γαλαξιακό κέντρο (ήδη χημικά εμπλουτισμένη περιοχή την εποχή που σχηματίστηκε το σμήνος). Μάλλον η ανάπτυξη της ράβδου το έφερε σε τόση έκκεντρη τροχιά.

### Το σφαιρωτό σμήνος της ράβδου NGC6273 (M19)

Η παρατήρηση των ερυθρών γιγάντων στο παραπάνω σφαιρωτό οδήγησε στην ανακάλυψη τουλάχιστον 2, πιθανών 3 πληθυσμών διαφορετικής αφθονίας σιδήρου (διασπορά μεταλλικότητας). Οι αφθονίες σόδιο/ αλουμίνιο είναι ανάλογες ενώ αυτές του μαγνησίου/ αλουμινίου αντιστρόφως ανάλογες. Επίσης υπάρχει ενίσχυση του λανθάνιου (στοιχείο αργής απορρόφησης νετρονίων (s), άρα από ύλη πολύ εξελιγμένου μικρής μάζας αστεριού). Το σφαιρωτό βρίσκεται σε απόσταση 1,7 kpc από το γαλαξιακό κέντρο και είναι από τα μεγαλύτερης μάζας και λαμπρότερα σφαιρωτά του Γαλαξία μας. Μοιάζει με το  $\omega$  του Κενταύρου λόγω μεταλλικότητας και έκκεντρης τροχιάς.

### Η παλιρροϊκή διαταραχή και απώλεια μάζας του παλαιού ανοιχτού σμήνους NGC6791

Το παραπάνω σμήνος είναι ένα από τα παλαιότερα του Γαλαξία μας (8 δις ετών) και πιθανών περιέχει περισσότερους αστρικούς πληθυσμούς. Μπορέσαμε να εκτιμήσουμε την απώλεια μάζας του μέσω αστρικής εξέλιξης και δυναμικής αλληλεπίδρασης. Η τωρινή μάζα του είναι 5000 ηλιακές. Υπάρχουν φανερά σημάδια παλιρροϊκών διαταραχών στην διασπορά των αστεριών του, έχει ανώμαλο σχήμα και παρουσιάζει παλιρροϊκές ουρές. Η πυκνότητα των αστεριών δείχνει ότι βίωσε πρόσφατα απώλεια μάζας (με την σημερινή πυκνότητα δεν θα έφτανε σε αυτή την ηλικία). Η αρχική του μάζα πρέπει να ήταν δεκαπλάσια.

### Οι μεταβλητοί στο $\omega$ του Κενταύρου

Το σφαιρωτό  $\omega$  του Κενταύρου είναι το μεγαλύτερης μάζας του Γαλαξία μας και πιστεύουμε ότι είναι ο πυρήνας ενός νάνου γαλαξία που συγχωνεύτηκε με τον δικό μας. Περιέχει πολλά μεταβλητά αστέρια, όπως RR Λύρας και Κηφείδες. Αυτοί οι μεταβλητοί έχουν αυστηρή σχέση λαμπρότητας/ περιόδου βοηθώντας μας στην εκτίμηση αποστάσεων.

### Οι SNIa στα σφαιρωτά σμήνη

Οι σουπερνόβα Ia συμβαίνουν όταν ένας λευκός νάνος άνθρακα- οξυγόνου συσσωρεύει μάζα από στενό συνοδό αστέρα. Όταν το ένα αστέρι είναι λευκός νάνος, μπορεί να συσσωρεύσει ύλη πλούσια σε H ή He από συνοδό αστέρα (αστέρι κύριας



ακολουθίας, ερυθρό γίγαντα ή αστέρι ηλίου). Ακόμα, το σύστημα μπορεί να αποτελείται από 2 λευκούς νάνους και αυτοί να συγχωνευτούν. Ο χρόνος καθυστέρησης των Ia έχει οριστεί ως ο χρόνος ανάμεσα στον σχηματισμό του αστεριού και της έκρηξής του. Αυτός εξαρτάται από την αστρική εξέλιξη και την ικανότητα μεταφοράς μάζας ανάμεσα στα αστέρια. Αν υποθέσουμε την ύπαρξη ενός μόνο επεισοδίου αστρογέννησης στα σφαιρωτά (με αστρική μάζα 1 εκατομμύριο ηλιακές), μπορούμε να υπολογίσουμε θεωρητικά (υποθέτοντας την αναλογία μεγάλης μάζας αστεριών σε διπλά συστήματα) τους χρόνους καθυστέρησης όλων των παραπάνω συνδυασμών διπλών αστεριών. Οι διπλοί με αστέρι ηλίου παρουσιάζουν μικρούς χρόνους, ενώ αυτοί με ερυθρό γίγαντα μεγάλους, και οι διπλοί με 2 λευκούς νάνους και μικρούς και μεγάλους χρόνους καθυστέρησης.

## Η συνιστώσα αρχικής μάζας (IMF) στα νεαρά ανοιχτά σμήνη του Γαλαξία

Η συνιστώσα αρχικής μάζας (αναλογία μικρής/μεγάλης μάζας αστεριών) αποτελεί βασική παράμετρος της μελέτης του σχηματισμού των αστεριών. Η εξέλιξη των αστεριών εξαρτάται κατά πολύ από αυτήν και λιγότερο από την χημική σύσταση. Η συνιστώσα αρχικής μάζας καθορίζεται από τις διαδικασίες αστρογέννησης. Η συνιστώσα αρχικής μάζας θεωρείται καθολική για όλο το σύμπαν, αλλά υπάρχουν θεωρητικές προβλέψεις και παρατηρήσεις όπου παρουσιάζει διακυμάνσεις. Τα ανοιχτά σμήνη αποτελούν ιδανικά πεδία μελέτης της επειδή περιέχουν έναν μόνο αστρικό πληθυσμό και μας απεικονίζουν τις τοπικές γαλαξιακές συνθήκες. Υπάρχει μια διακύμανση ανάλογα την πυκνότητα και την μάζα του σμήνους. Τα μεγάλα σμήνη περιέχουν μεγαλύτερη αναλογία αστεριών μεγάλης μάζας (που σημαίνει πυκνότερες περιοχές στα νεφελώματα που τα δημιούργησαν). Τα μεγάλα σμήνη δημιουργήθηκαν κοντά στο γαλαξιακό κέντρο ενώ τα μικρής μάζας στις πιο εξωτερικές περιοχές του Γαλαξία. Φαίνεται ότι η αστρογέννηση ελέγχεται από τις τοπικές συνθήκες όπου καταρρέει το νεφέλωμα.

