

Η δημιουργία αστρικών σμηνών

Υπάρχουν πολλά αναπάντητα ερωτήματα σχετικά με την δημιουργία αστρικών σμηνών από τις συμπυκνώσεις των μοριακών νεφελωμάτων.

Εμβαπτισμένα (embedded) σμήνη

Έτσι ονομάζουμε τα αστρικά σμήνη που ακόμα περικλείονται από το αέριο στο οποίο δημιουργήθηκαν. Συνήθως δεν ανιχνεύονται στο ορατό φως, λόγω της ισχυρής αδιαφάνειας που δημιουργείται από την σκόνη μέσα στο αέριο. Ανιχνεύονται όμως στο κοντινό υπέρυθρο, μια περιοχή στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα όπου ακτινοβολούν τα νεαρά αστέρια των σμηνών. Δεν πρέπει να μας μπερδεύουν αντικείμενα που βρίσκονται πίσω από το νεφέλωμα και είναι επίσης αόρατα, λόγω αδιαφάνειας. Τα εμβαπτισμένα αστέρια είναι κατά κανόνα νεαρά. Τα αστέρια διασκορπίζουν το γύρω τους αέριο μέσω της συσσώρευσης σε αυτά και της ανάδρασης. Τα αστέρια, ιδίως τα πολύ μεγάλης μάζας, ιονίζουν το αέριο με αποτέλεσμα αυτό να θερμανθεί και να διασταλεί. Τα σμήνη γίνονται παρατηρήσιμα στο ορατό φως σε 2-3, το πολύ 5 εκατομμύρια χρόνια από την γέννησή τους. Η σύντομη αυτή φάση αδιαφάνειας εξαρτάται πολύ από την μάζα του σμήνους. Τα σμήνη μεγάλης μάζας περιέχουν πολλά αστέρια τύπου O (τεράστιας μάζας) που ιονίζουν γρήγορα το κοντινό τους αέριο, με αποτέλεσμα αυτά τα σμήνη να <καθαρίσουν> γρήγορα από το αέριο γύρω τους.

Ο όρος εμβαπτισμένο σμήνος χρησιμοποιείται και για να δείξουμε την βαρυτική υπεροχή του αερίου σε ένα σμήνος, κάτι που δεν ισχύει πάντα. Για παράδειγμα, τα σμήνη Trumpler 14, Westerlund 2, NGC3603 έχουν ηλικία μικρότερη των 5 εκατομμυρίων ετών. Όλα έχουν κατάλοιπα αερίου κοντά τους (μερική αδιαφάνεια), αλλά δεν κυριαρχούνται βαρυτικά από το περιβάλλον αέριο.

Ο όρος σμήνος αναφέρεται σε αστέρια που ξεχωρίζουν από τα αστέρια του πεδίου. Πολλές φορές αποτελεί πρόκληση να ξεχωρίσουμε τα αστέρια που έχουν φυσική σύνδεση από τα υπόλοιπα. Τα νεαρά αστέρια (αστέρια σε σμήνη) επιδεικνύουν διαφορετικές ιδιότητες από τα παλαιότερα. Αυτά τα YSO (young stellar objects) ανιχνεύονται μέσω της ιδιαίτερης εκπομπής στις υπέρυθρες και στις ακτίνες X (έντονη επιφανειακή δραστηριότητα των νεαρών αστεριών). Το νεφέλωμα όπου είναι εμβαπτισμένο ένα σμήνος συνήθως εμποδίζει την ακτινοβολία αστεριών πίσω από αυτό να φτάσει σε εμάς, άρα μας διευκολύνει να ξεχωρίσουμε τα αστέρια του σμήνους.

Οι ομάδες με μικρή πυκνότητα αστεριών διαχωρίζονται από τα σμήνη ως συναθροίσεις (associations) O ή B, ανάλογα τι φασματικού τύπου αστέρια περιέχουν, και συναθροίσεις T αν περιέχουν μόνο αστέρια μικρής μάζας (τύπου T- Tauri για μερικά εκατομμύρια έτη). Ανάμεσα στις 2 κατηγορίες είναι οι συναθροίσεις R που συνδέονται με λαμπρά νεφελώματα αντανάκλασης. Έτσι σμήνος μπορούμε να

θεωρήσουμε τα αστέρια που σχηματίστηκαν σε ένα συγκεκριμένο επεισόδιο αστρογέννησης σε περιορισμένο χώρο (ακτίνας περίπου 1 pc).

Κριτήρια για χαρακτηρισμό αστρικού συστήματος ως σμήνος.

Τα μορφολογικά κριτήρια είναι λίγο ασαφή και περιλαμβάνουν έναν ελάχιστο αριθμό αστεριών σε μικρό σχετικά χώρο (ώστε να ξεχωρίζουν από το αστρικό υπόβαθρο). Αυτό έχει να κάνει με το εύρος της πυκνότητας και του μεγέθους των σμηνών. Στην αναζήτηση αστρικών σμηνών χρησιμοποιούνται συγκεκριμένοι αλγόριθμοι.

Τα χωρίζουμε σε σμήνη με κεντρική συγκέντρωση, τα οποία παρουσιάζουν μια κορύφωση επιφανειακής πυκνότητας που αποκλιμακώνεται ομαλά με την απόσταση από το κέντρο, και ιεραρχικά (hierarchical), που παρουσιάζουν πολλές μικρότερες δομές, άρα πολλές κορυφώσεις πυκνότητας. Οι 2 κατηγορίες μορφολογίας προέρχονται από διαφορετικές συνθήκες στα μοριακά νεφέλωμα. Τα σμήνη της πρώτης κατηγορίας είναι συνήθως απομονωμένα. Η περιοχή με την μεγαλύτερη αστρική πυκνότητα ορίζεται ως κέντρο, και η αστρική πυκνότητα ελαττώνεται με την ακτίνα από αυτό, όπως συμβαίνει στα σφαιρωτά σμήνη. Η ελάττωση μπορεί να μην είναι ομαλή αλλά να περιέχει κορυφώσεις πυκνότητας τύπου φράκταλ.

Σχετικά με τα δυναμικά κριτήρια, η ικανότητα επιβίωσης στις παλιρροϊκές δυνάμεις του ευρύτερου περιβάλλοντος (για ένα τυπικό διάστημα 100 εκατομμυρίων ετών) χαρακτηρίζει μια συνάθροιση αστεριών ως σμήνος. Ένα πλήθος >35 αστέρια που έχει πυκνότητα >1 ηλιακή μάζα/pc² ορίζεται ως σμήνος, και αν είναι πλήρως ή μερικώς εμβαπτισμένο σε μεσοαστρικό αέριο και σκόνη, εμβαπτισμένο σμήνος (embedded cluster). Σε ένα σμήνος τα αστέρια έχουν φυσική σύνδεση. Αυτό μας παρέχει πληροφορίες για το αρχικό μοριακό νεφέλωμα, όπως ο χρόνος επιβίωσής του. Ο διαχωρισμός συνάθροισης- σμήνους έχει να κάνει με την ηλικία σε συνάρτηση τον δυναμικό χρόνο (dynamic time). Αυτός ορίζεται ως το χρονικό διάστημα που χρειάζεται ένα αστέρι να διασχίσει το αστρικό σύστημα (δεν πρέπει να το μπερδεύουμε με τον χρόνο ηρεμίας (relaxation time), το χρονικό διάστημα που απαιτείται ώστε να έρθει ένα αστρικό σύστημα σε δυναμική ισορροπία, χρόνος πολύ μεγαλύτερος από τον δυναμικό χρόνο). Ένα σύστημα ηλικίας μερικών δυναμικών χρόνων έχει επιβιώσει για αρκετό χρονικό διάστημα από τις παλιρροϊκές δυνάμεις του περιβάλλοντος ώστε να χαρακτηριστεί σμήνος.

Ο χαρακτηρισμός σμήνος εξαρτάται από ιδιότητες όπως η απόσταση, η ηλικία και το μέγεθος του συστήματος (και η μάζα του), ιδιότητες που πολλές φορές μετράμε με μεγάλη αβεβαιότητα. Για παράδειγμα, η απόσταση του Westerlund 2 εκτιμάται σε 2,8 ως 8 kpc (ελπίζουμε το GAIA να μας δώσει πιο ακριβείς μετρήσεις). Το ίδιο ισχύει για την ηλικία, που βασίζεται στα μοντέλα αστρικής εξέλιξης, τα οποία μπορεί να μην ισχύουν ακριβώς στο πυκνό αστρικό περιβάλλον ενός σμήνους. Υπάρχουν και διαφοροποιήσεις στην εξάλειψη του φωτός (extinction) ανά περιοχές ενός σμήνους λόγω παρουσίας συμπυκνωμάτων μεσοαστρικής ύλης. Ακόμα και η εκτίμηση της μάζας ενός σμήνους εξαρτάται από την ικανότητα να διακρίνουμε όλα τα μέλη και όλη την ύλη που περιλαμβάνει. Η εκτίμηση της μάζας πετυχαίνεται με την παραδοχή απόστασης και ηλικίας του σμήνους, μεγέθη που όπως αναφέραμε περιέχουν αβεβαιότητες. Η παρατήρηση σε διάφορα μήκη κύματος περιορίζει το

παραπάνω πρόβλημα. Ακόμα, η ακτίνα (δυναμικής ισορροπίας, virial) ενός σμήνους εκτιμάται βάσει της ακτίνας του ήμισυ της εκπομπής φωτός (half- light radius, η απόσταση από το κέντρο ενός συστήματος από την οποία προέρχεται η μισή ποσότητα της ακτινοβολίας του συστήματος), με την παραδοχή συγκεκριμένου προφίλ αστρικής πυκνότητας (πόσο μειώνεται η αστρική πυκνότητα από μέσα προς τα έξω).

Το συμπέρασμα από τα παραπάνω είναι ότι δεν είμαστε σε θέση να διαχωρίσουμε στατιστικά τα σμήνη από τις συναθροίσεις. Έτσι το πιο απλό είναι να θεωρούμε ως σμήνος την συνάθροιση αστεριών με φυσική σύνδεση.

Συμπλέγματα σμηνών

Οι περιοχές αστρογέννησης παρουσιάζουν δομές. Πολλές κοντινές μεταξύ τους περιοχές περιέχουν σμήνη, και παρατηρούμε ότι είναι οργανωμένες με ιεραρχικό τρόπο. Αυτό το συναντάμε σε συμπλέγματα (complexes) μικρής μάζας (Serpens, Perseus, Lupus, Chameleon1,2), στις ενδιάμεσες μάζες (Orion, the Rosette Complex, Vela, the W3, W4, W5 complex, RCW 106) και μεγάλης μάζας (Carina complex, Cygnus X, NGC 6334, W51, W49A). Τα τελευταία συμπλέγματα περιέχουν σμήνη που το καθένα έχει μεγαλύτερη μάζα από ολόκληρα συμπλέγματα μικρής μάζας! Οι επισκοπήσεις του ουρανού μας δείχνουν ότι περισσότερα από τα μισά σμήνη βρίσκονται σε συμπλέγματα. Να σημειώσουμε εδώ ότι κάθε σύμπλεγμα προέρχεται από ένα μόνο νεφέλωμα. Τα συμπλέγματα του Γαλαξία μας έχουν διαστάσεις από μερικά ως μερικές δεκάδες parsec. Τα σμήνη δεν παρουσιάζουν μεγάλη διασπορά μεγέθους (έχουν μέγεθος κοντά στο 1 pc). Στα συμπλέγματα μεγάλων διαστάσεων οι δομές είναι πολύ εμφανείς.

Η διασπορά των νεαρών άστρων σε ένα σύμπλεγμα σμηνών είναι απόρροια της διασποράς των συμπυκνώσεων του αρχικού νεφελώματος. Αυτό συμβαίνει επειδή το δυναμικό χρονοδιάγραμμα των νεφών είναι μεγαλύτερο από την ηλικία των συμπλεγμάτων, διαφορετικά τα συμπλέγματα θα είχαν μεγαλύτερη ομοιογένεια.

Μεμονωμένα σμήνη

Αυτά αποτελούν την εξαίρεση. Στον Γαλαξία μας υπάρχουν μερικά σχετικά απομονωμένα σμήνη, όπως τα Westerlund 2, NGC 3603, NGC 6611, RCW 38. Αυτά τα σμήνη επιδεικνύουν κεντρική συγκέντρωση με ίχνη δομών, και έχουν μέγεθος κοντά στο 1 pc, όπως τα σμήνη μέσα σε συμπλέγματα. Τα νεφέλωμα που τα δημιούργησαν δεν δείχνουν να περιέχουν άλλα σμήνη. Τα παραπάνω σμήνη είναι μεγάλης μάζας, αλλά αυτό δεν σημαίνει ότι τα μεμονωμένα σμήνη πρέπει να είναι μεγάλης μάζας ή ότι όλα τα μικρής μάζας σμήνη βρίσκονται σε συμπλέγματα.

Νεαρά αστέρια εκτός σμηνών

Η αναλογία τους σχετικά με τα νεαρά αστέρια (YSO, young stellar objects) στα σμήνη κυμαίνεται. Στις περιοχές Orion A, B η διασπορά μεμονωμένων YSO είναι στο 25% ενώ στις περιοχές Ophiucus 11%- 32%, Lupus, Rosette 15%, Monoceros R2 44%, ενώ στις περιοχές μεγάλης μάζας W3, W4, W5 ξεπερνάει το 50%, ένα συμπέρασμα που όμως έχει μεγάλη αβεβαιότητα. Η απομόνωση αυτών των αστεριών συνήθως

οφείλεται στις ιδιότητες του αρχικού νεφελώματος. Μπορεί να απομακρύνθηκαν από γειτονικά σμήνη ή να αποτελούν μέλη παλαιότερων, διαλυμένων πια σμηνών της ίδιας περιοχής. Υπάρχει ένα πλήθος μεμονωμένων αστεριών στις εξωτερικές περιοχές των σμηνών, όπου οι αστρικοί άνεμοι των γειτονικών αστεριών μεγάλης μάζας δημιούργησαν δομές στα νεφελώματα. Έτσι εντοπίζουμε αυτά τα μεμονωμένα αστέρια στις άκρες των φουσκών (bubbles) και σε μαξιλάρια (pillars).

Εύρος ηλικιών

Τα εμβαπτισμένα σμήνη και οι περιοχές αστρογέννησης είναι πολύπλοκα συστήματα. Τα μοριακά νέφη σχηματίζουν πολλές γενιές αστεριών που διαφέρουν κατά μερικά εκατομμύρια έτη. Να σημειώσουμε ότι η εκτίμηση ηλικίας των σμηνών περιέχει αβεβαιότητα. Ένας καλός οδηγός εκτίμησης ηλικίας είναι η διάλυση του περιαστρικού νεφελώματος. Αν σε ένα σμήνος πολλά αστέρια παρουσιάζουν ακόμα αυτό το υλικό, σημαίνει ότι το σμήνος είναι πολύ νεαρό, πιο νέο από άλλα σμήνη χωρίς περιαστρικά νέφη. Η εκπομπή των περιαστρικών νεφών προς την φασματική διασπορά ενέργειας (SED, spectral energy distribution) μας δίνει μια καλή εκτίμηση της ηλικίας. Η διάλυση του περιαστρικού νεφελώματος ενισχύεται και από γειτονικά αστέρια μεγάλης μάζας, που με τον ισχυρό τους αστρικό άνεμο μπορούν να επιταχύνουν την διαδικασία, οδηγώντας μας σε λάθος εκτιμήσεις (να συμπεραίνουμε μικρότερες από τις πραγματικές ηλικίες).

Τα χρονοδιαγράμματα σχηματισμού σμηνών διαφέρουν αν αυτά σχηματίζονται μονολιθικά από ένα μεγάλο συμπύκνωμα αερίου ή ιεραρχικά από ενώσεις μικρότερων δομών. Η κάθε περίπτωση απαιτεί διαφορετικές αρχικές συνθήκες του νεφελώματος. Έχει σημασία αν διαφορετικές περιοχές του νεφελώματος καταρρέουν σε διαφορετικούς χρόνους και αν η αιτία της αστρογέννησης είναι ενδογενής του νεφελώματος ή κάποια εξωτερική αιτία. Ο πληθυσμός αστεριών που δεν ανήκουν σε σμήνη συνδέεται με την δραστηριότητα αστρογέννησης του νεφελώματος, με αποτέλεσμα οι ηλικίες των μεμονωμένων αστεριών να μας παρέχουν πολύτιμες πληροφορίες.

Η μελέτη της διασποράς ηλικιών έχει μεγαλύτερη βαρύτητα για τα νεαρά αστέρια, για 2 λόγους. Πρώτον, η σχέση της ηλικίας με το πλήθος των αστεριών που ακόμη έχουν περιαστρικό υλικό εκτιμάται πιο εύκολα την σύντομη φάση πρωταστέρα 0/1 (διάρκειας 0,5 εκατομμυρίων ετών) παρά στις φάσεις 2 και 3, που διαρκούν μερικά εκατομμύρια έτη. Δεύτερον, με την πάροδο του χρόνου οι δυναμικές διαδικασίες σβήνουν πολλά ίχνη από τις αρχικές ιδιότητες.

Εύρος ηλικιών των συμπλεγμάτων αστρικών σμηνών.

Δεν είναι βέβαιο αν τα διαφορετικά μέρη ενός νεφελώματος αλληλεπιδρούν. Ανάλογα την αιτία κατάρρευσης μπορεί η αλληλεπίδραση να είναι μόνο τοπική ή να εξαπλωθεί σε όλο το νεφέλωμα. Παρατηρούμε ότι τα σμήνη που προέρχονται από το ίδιο νεφέλωμα παρουσιάζουν συχνά διαφορετικές ηλικίες, κατά εκατομμύρια έτη (όπως στο νεφέλωμα Carina). Αυτό ισχύει γενικά, για σμήνη μικρής αλλά και μεγάλης μάζας. Το εύρος κυμαίνεται από δεκάδες εκατομμύρια έτη, αλλά συνήθως είναι

κοντά στο 1 εκατομμύριο έτη. Αυτό σημαίνει ότι συνήθως τα μοριακά νέφη καταρρέουν με μικρά διαλύματα, και όχι μονομιάς.

Φαίνεται το πρώτο επεισόδιο αστρογέννησης να πυροδοτεί τα επόμενα, ιδίως αν περιέχει αστέρια μεγάλης μάζας. Αυτή η ανάδραση (feedback) μπορεί να έχει καταστροφικά για την αστρογέννηση αποτελέσματα στην γειτονιά ενός αστεριού μεγάλης μάζας, αλλά συμπυκνώνει το αέριο σε κάποια απόσταση ή επιταχύνει την κατάρρευση ήδη πυκνών περιοχών. Ο ιονισμός του αερίου μέσω ανάδρασης είναι ιδιαίτερα σημαντικός. Όμως ο παραπάνω μηχανισμός δεν επαρκεί για τα απαντωτά επεισόδια αστρογέννησης που παρατηρούμε στα νεφελώματα, έτσι κυρίαρχο ρόλο πρέπει να έχουν εξωτερικοί παράγοντες. Η διάσχιση μιας σπείρας του γαλαξία από το νεφέλωμα (παλιρροϊκές διαταραχές), εκρήξεις σουπερνόβα ή σύγκρουση με άλλα νέφη μπορούν να αποτελέσουν τους μηχανισμούς της ακανόνιστης διακύμανσης επεισοδίων αστρογέννησης που παρατηρούμε στα νεφελώματα.

Η αστρογέννηση φαίνεται να εκδηλώθηκε ταυτόχρονα σε όλο το σύμπλεγμα Rosette, μέσω ενός εξωτερικού γεγονότος. Στο νεφέλωμα Cat Paw (NGC 6334) παρατηρούμε μικρή διακύμανση ηλικιών των σμηνών, και η δομή του παραπέμπει σε εσωτερική αιτία έναρξης αστρογέννησης.

Τα απομονωμένα σμήνη μεγάλης μάζας μπορεί να αποκόπηκαν γρήγορα από τα νεφελώματά τους. Δεν παρατηρούμε τέτοια σμήνη με ηλικία μικρότερη από 1-2 εκατομμύρια έτη. Στα περισσότερα νεφελώματα που συνδέονται με απομονωμένα σμήνη συνεχίζεται η αστρογέννηση.

Είναι ξεκάθαρο ότι τα μοριακά νεφελώματα καταρρέουν σε επεισόδια και όχι μονομιάς. Η διασπορά ηλικιών των σμηνών κυμαίνεται ανάλογα τις τοπικές συνθήκες.

Εύρος ηλικιών σε ανεξάρτητα σμήνη

Έτσι ονομάζουμε τα σμήνη που δημιουργήθηκαν σε ένα μοναδικό επεισόδιο αστρογέννησης, ανεξάρτητα αν το ίδιο νεφέλωμα δημιούργησε ή δημιουργήσει και άλλα σμήνη. Το σμήνος στο νεφέλωμα του Ωρίωνα είναι ένα χαρακτηριστικό δείγμα ανεξάρτητου σμήνους σε μοριακό νεφέλωμα που περιέχει και άλλα σμήνη.

Το εύρος ηλικιών στα ανεξάρτητα σμήνη είναι πολύ μικρό ή ανύπαρκτο, στα όρια του σφάλματος μέτρησης ηλικιών, που προκύπτει κυρίως από αστέρια της περιοχής που δεν ανήκουν στο σμήνος αλλά έχουν δημιουργηθεί ανεξάρτητα και μπερδεύουν τις μετρήσεις μας. Στο σμήνος του Ωρίωνα φαίνεται να υπάρχει ηλικιακή κατανομή από μέσα προς τα έξω, αν και τα μεγαλύτερης ηλικίας αστέρια στην άλω του σμήνους μπορεί να μην συνδέονται με αυτό. Τα αστέρια (πάντα προ κυρίας ακολουθίας) στην φάση εξέλιξης 0/1 έχουν πολύ περισσότερο αέριο γύρω τους από τα αστέρια στις φάσεις 2, 3. Βρίσκονται στις περιοχές όπου δημιουργήθηκαν (πυκνές περιοχές των νεφελωμάτων), αφού αυτή η φάση αστρικής εξέλιξης είναι πολύ σύντομη ώστε να προλάβουν να μεταναστεύσουν. Τα αστέρια στις φάσεις 2, 3 έχουν μεγαλύτερη χωρική διασπορά. Ο πληθυσμός των νεαρών αστεριών στα μοριακά νέφη, που όμως δεν ανήκουν σε σμήνη, αποτελείται κυρίως από τέτοια αστέρια.

Τα σμήνη μεγάλης μάζας περιέχουν τεράστιο αριθμό αστεριών. Αυτό σημαίνει ότι σχηματίστηκαν από πολύ μεγάλης μάζας συμπυκνώματα ή συγχωνεύσεις μικρότερων σμηνών. Μερικά από αυτά, κοντά στο κέντρο του Γαλαξία μας, δεν δείχνουν σημαντικά εύρη ηλικιών. Το NGC 3603 πρέπει να δημιουργήθηκε μονολιθικά, χωρίς συγχώνευση σμηνών. Προκαλεί ενδιαφέρον ότι η κατάρρευση του μοριακού νέφους διάρκεσε τόσο μεγάλο χρονικό διάστημα, ώστε να μπορέσει να σχηματιστεί το απαραίτητο συμπύκνωμα για την δημιουργία ενός σμήνους τόσο μεγάλης μάζας.

Τα ανεξάρτητα σμήνη δημιουργούνται σε μικρά χρονοδιαγράμματα, συγκρίσιμα με τον δυναμικό τους χρόνο (< 1 εκατομμύριο έτη).

Εύρη ηλικιών ανεξάρτητων (που δεν ανήκουν σε σμήνη) αστεριών

Τα ανεξάρτητα αστέρια βρίσκονται κοντά σε συμπλέγματα σμηνών και μεμονωμένα σμήνη. Η διασπορά ηλικιών σε αυτά είναι πολύ μεγάλη. Τα νεαρότερα ανεξάρτητα αστέρια βρίσκονται συχνά στις άκρες των σμηνών, σε περιοχές των νεφελωμάτων οι οποίες ερεθίζονται από σμήνη με λίγο παλαιότερα αστέρια. Αυτή η κατανομή τους αποτελεί απόδειξη αστρογέννησης που προκαλείται από την επίδραση παλαιότερων αστεριών ή σμηνών στο νεφέλωμα. Τα περισσότερα ανεξάρτητα αστέρια είναι φάσης 2, μια φάση με μεγάλη διασπορά ηλικίας, ανάλογα την αστρική μάζα. Ιδίως τα γηραιότερα αστέρια φάσης 2 έχουν διασπαρθεί έξω από τα νεφελώματα.

Στον Γαλαξία μας, τα Orion A, Carina Complex, NGC 3603 και το NGC 6611 στο νεφέλωμα του Αετού περιέχουν <παλαιά> ανεξάρτητα αστέρια μέσα στα νεφελώματα. Στις 2 πρώτες περιοχές τα παλαιά αυτά αστέρια συνδέονται με σμήνη, τα NGC 1980 και Trumpler 15 αντίστοιχα, που περιέχουν αστέρια μεγάλης μάζας.

Διασπορά της αστρικής μάζας

Η διασπορά μάζας στα νεαρά σμήνη είναι σύμφωνη με την συνιστώσα αρχικής αστρικής μάζας (IMF, initial mass function). Αυτή εκφράζει την αναλογία των αστεριών σχετικά με την μάζα τους (πόσα αστέρια κάθε μάζας σχηματίζονται). Δεν γνωρίζουμε πότε παίρνει την τελική της μορφή η IMF, αν δημιουργούνται πρώτα τα μεγάλης μάζας ή τα μικρής μάζας αστέρια στα σμήνη. Έτσι δεν γνωρίζουμε αν η IMF είναι διαφορετική για τα νεαρά από ότι για τα παλαιά σμήνη που έχουν ολοκληρώσει την διαδικασία αστρογέννησης.

Φαίνεται η IMF να είναι καθολική στα σύμπαν. Υπάρχουν σμήνη (ιδίως τα αραιά και μικρής μάζας) που είναι πολύ εκτεταμένα μέσα στα νεφελώματα και άλλα (πυκνά και μεγαλύτερης μάζας) που καταλαμβάνουν πολύ μικρή περιοχή. Αποτελεί μυστήριο πως η IMF παραμένει σταθερή σε τόσο διαφορετικά περιβάλλοντα. Αν τα διάφορα σμήνη σε ένα νεφέλωμα σχηματίζονται ανεξάρτητα μεταξύ τους, τότε δεν μπορεί να εξηγηθεί ο καθολικός χαρακτήρας της IMF. Αντίθετα, μας οδηγεί στο λογικό συμπέρασμα ότι η αστρογέννηση πρέπει να συμβαίνει σε όλο το νεφέλωμα και όχι μόνο τοπικά.

Εμβαπτισμένα σμήνη και αστρογέννηση

Οι παρατηρήσεις μας δείχνουν ότι η αστρογέννηση συμβαίνει σε μικρό χρονικό διάστημα και δεν αποτελεί συνεχής διαδικασία στα μοριακά νεφελώματα. Σε διάστημα μερικών εκατομμυρίων ετών κάθε νεφέλωμα σχηματίζει πολλαπλά αστρικά σμήνη. Τα διάφορα σμήνη σε ένα νεφέλωμα έχουν περίπου ίδια ηλικία, αλλά γύρω τους και ανάμεσά τους υπάρχουν αστέρια με μεγάλη διαφορά ηλικίας. Η δομή και η διασπορά ηλικίας των αστεριών σε ένα μοριακό νέφος μας βοηθάει στην κατανόηση του χρονοδιαγράμματος της αστρογέννησης σε αυτό. Τα ανεξάρτητα σμήνη σε ένα νεφέλωμα επιδεικνύουν μεγάλο εύρος μάζας και πυκνότητας, αλλά δεν παρουσιάζουν σημαντικό εύρος ηλικιών. Πολλά είναι νεαρότερα από 1 εκατομμύριο έτη, κάτι που σημαίνει ότι τα αστέρια σχηματίζουν σμήνη γρήγορα. Το σύνηθες μέγεθός τους είναι 1 pc, άρα προέρχονται από πυκνές περιοχές των νεφελωμάτων. Η άλλη εκδοχή είναι να προέρχονται από συγχωνεύσεις μικρότερων σμηνών, που σημαίνει ότι έχουν μεγαλύτερα χρονοδιαγράμματα, αφού τα ίχνη της συγχώνευσης δεν είναι πλέον ορατά. Οι παρατηρήσεις σκοτεινών πυκνών περιοχών των νεφελωμάτων στο υπέρυθρο μας δείχνουν ότι αυτά έχουν ήδη συμμετρία ως προς την πυκνότητα και ότι έχει ξεκινήσει η αστρογέννηση σε αυτά. Η μικρή μόνο χρονική διάρκεια στην οποία έχουν σχηματιστεί τα συμπυκνώματα αλλά δεν παρουσιάζουν αστρογέννηση, και οι μικρές διαφορές ηλικίας των σμηνών στο ίδιο νεφέλωμα μας δείχνουν ότι η κατάτμηση ή θρυμματισμός (fragmentation) του νεφελώματος σε πυκνές περιοχές συμβαίνει πριν και όχι κατά την αστρογέννηση. Αυτό ενισχύει τον καθολικό σχηματισμό σμηνών σε ένα νεφέλωμα.

Η κατάτμηση πετυχαίνεται μέσω εσωτερικών διεργασιών (τοπική επικράτηση της βαρύτητας) ή μέσω συγκρούσεων νεφελωμάτων, συγκρούσεων πυκνών νημάτων στο ίδιο νεφέλωμα ή κοντινών εκρήξεων σουπερνόβα. Τα μεγάλης μάζας σμήνη NGC 3603 και Westerlund 2 βρίσκονται σε πεδία επαφής νεφελωμάτων μεγάλης μάζας που πλησιάζουν μεταξύ τους με 20 km/s. Αυτός ο μηχανισμός σχηματισμού σμηνών παρατηρείται συχνά, ιδίως για ανεξάρτητα αστρικά σμήνη μεγάλης μάζας.

Τα νήματα (filaments) αποτελούν χαρακτηριστικά όλων των μοριακών νεφελωμάτων και σε όλα βρίσκουμε περιοχές αστρογέννησης. Σε αυτόν τον μηχανισμό σχηματισμού αστεριών δεν απαιτείται η ύπαρξη προγενέστερου συμπυκνώματος στο νεφέλωμα, και η αστρογέννηση μπορεί να εξελιχτεί πολύ γρήγορα. Αυτή η διεργασία δημιουργεί πολύ εκτεταμένες αστρικές άλως στα σμήνη. Τα αστέρια σε αυτές τις άλως μπορεί να απομακρυνθούν από τα σμήνη όταν αυτά συγχωνευτούν με άλλα, δημιουργώντας τον πληθυσμό μεμονωμένων αστεριών που παρατηρούμε στα νεφελώματα. Αυτή η διαδικασία κάνει τα νεαρά αυτά αστέρια της άλως να χάσουν τους περιαστρικούς δίσκους τους και να φαίνονται γηραιότερα από ότι πραγματικά είναι. Αυτό μπορεί να εξηγήσει την μεγάλη διασπορά ηλικιών που παρατηρούμε σε αυτά και το ότι φαίνονται γηραιότερα από τα αστέρια των σμηνών.

Προσομοιώσεις σχηματισμού αστρικών σμηνών

Θα επισημάνουμε κάποια συμπεράσματα από τις σχετικές προσομοιώσεις.

Για τον σχηματισμό αστρικών σμηνών χρειάζονται η βαρυτική συνοχή, οι αναταράξεις (turbulence), τα μαγνητικά πεδία και η ακτινοβολία. Η συσσώρευση αερίου φέρνει τις αναταράξεις, μέσω της ενέργειας που μεταφέρει. Δημιουργείται μια δυναμική ισορροπία (virial equilibrium). Η ακτίνα της αέριας μάζας που καταρρέει συνδέεται στενά με την ακτίνα του σμήνους που θα σχηματιστεί.

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων μας δείχνουν ότι πρέπει να υπάρχουν περισσότεροι καφέ νάνοι από αυτούς που παρατηρούμε, δηλαδή ότι τα σμήνη έχουν περισσότερα μέλη από όσα παρατηρούμε. Αυτό σημαίνει μεγαλύτερη κατάτμηση.

Η ανάδραση μέσω ακτινοβολίας από τα αστέρια (radiative feedback) έχει σημαντικό ρόλο στον περιορισμό της κατάτμησης του αρχικού νέφους. Μέσω της ανάδρασης το αέριο θερμαίνεται με αποτέλεσμα να περιορίζεται η κατάτμηση.

Τα μαγνητικά πεδία εμποδίζουν την κατάτμηση των νεφελωμάτων και την συσσώρευση ύλης από τα νεαρά αστέρια. Αν η αναλογία μάζας/ ροής αερίου είναι μικρότερη από κάποιο όρο δεν μπορεί να υπάρξει κατάτμηση. Οι διαταραχές (turbulences) μειώνουν την δράση του μαγνητικού πεδίου, ενισχύοντας την συσσώρευση ύλης από τα νεαρά άστρα (δίσκους συσσώρευσης). Τα μαγνητικά πεδία μειώνουν τον ρυθμό σχηματισμού αστεριών (star formation rate, η ποσότητα ύλης που θα καταρρεύσει σε αστέρια/ χρόνο).

Προσομοιώσεις μαγνητικού πεδίου- ανάδρασης από ακτινοβολία

Οι προσομοιώσεις μας δείχνουν ότι τα μαγνητικά πεδία και η ανάδραση από την ακτινοβολία έχουν συμπληρωματική δράση. Τα μαγνητικά πεδία συντηρούν την διάχυση (μη συγκέντρωση) σε μεγάλη κλίμακα στο αέριο, ενώ η ανάδραση μέσω της ακτινοβολίας θερμαίνει τα συμπυκνώματα ύλης εμποδίζοντας την κατάτμησή τους. Ο συνδυασμός των 2 δυνάμεων είναι σημαντικός για την εμπόδιση της περαιτέρω κατάτμησης των συμπυκνωμάτων. Τα μαγνητικά πεδία επιβραδύνουν αποτελεσματικά την ύλη μειώνοντας την στροφορμή στην κεντρική περιοχή του νεφελώματος, όπου μπορούσε να συμβεί κατάτμηση. Έτσι η συσσώρευση ύλης έχει μαγνητικό παρά υδροδυναμικό επίκεντρο με την συμβολή της διαταραχής (turbulence). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να είναι αυξημένη η λαμπρότητα που προκαλεί η συσσώρευση, επειδή η μάζα της κεντρικής περιοχής και ο ρυθμός συσσώρευσης σε αυτήν είναι αυξημένα. Η ακτίνα παύσης της συσσώρευσης (το μέγεθος της περιοχής συσσώρευσης) είναι μικρότερη λόγω λιγότερης στροφορμής. Η θερμοκρασία στην παραπάνω περίπτωση κυριαρχίας του μαγνητικού πεδίου είναι πολύ αυξημένη σχετικά με την υπόθεση ύπαρξης υδροδυναμικής κυριαρχίας, κάνοντας την κεντρική περιοχή πιο ανθεκτική στην κατάτμηση.

Ιονισμός

Τα αστέρια μεγάλης μάζας εκπέμπουν μεγάλη ποσότητα ιονίζουσας ακτινοβολίας που επηρεάζει το κοντινό τους αέριο. Η ακτινοβολία αυτή είναι μια κύρια πηγή ανάδρασης. Δρα σε κλίμακες σμηνών και μοριακών νεφών και περιορίζει αισθητά την αστρογέννηση. Με τον ιονισμό του αερίου α) μειώνεται το διαθέσιμο αέριο (δηλαδή το ψυχρό μοριακό) για αστρογέννηση και β) το ιονισμένο αέριο ξεπερνάει τις 7000K και η πίεσή του κυριαρχεί κάνοντάς το να διαστέλλεται, σαρώνοντας την

πυκνή μεσοαστρική ύλη και προσθέτοντας αρκετή ορμή. Ο αριθμός των αστεριών μεγάλης μάζας σε σχέση με την μάζα του νεφελώματος καθορίζει τον βαθμό της επίδρασης του ιονισμού στην συνολική αστρογέννηση του νεφελώματος.

Ο ιονισμός μπορεί να συμπιέσει τοπικά περιοχές ενός νεφελώματος και να ενισχύσει την αστρογέννηση. Αυτή η θετική ανάδραση είναι όμως μικρής κλίμακας και αμφισβητήσιμη.

Η επίδραση από τους πρωτοαστρικούς πίδακες

Αυτοί οι πίδακες επηρεάζουν το κοντινό τους αέριο κυρίως μέσω της στροφορμής που μεταφέρουν σε αυτό. Αυξάνουν τις διαταραχές στο αέριο. Η επίδραση των πιδάκων έχει πολύ τοπικό χαρακτήρα. Υπολογίζεται ότι μειώνουν στο μισό την κατάτμηση στην ακτίνα δράσης τους.

Συμπεράσματα των προσομοιώσεων

Η ανάδραση μέσω ακτινοβολίας, τα μαγνητικά πεδία, ο ιονισμός και οι πρωτοαστρικοί πίδακες είναι σημαντικοί για τον σχηματισμό των αστρικών σμηνών. Η επίδραση που έχουν οι παραπάνω παράγοντες στα βασικά μεγέθη σχηματισμού σμηνών, δηλαδή στην αποτελεσματικότητα αστρογέννησης (πόσο από το διαθέσιμο αέριο αξιοποιείται στον σχηματισμό αστεριών), τον ρυθμό αστρογέννησης (πόσα αστέρια γεννιούνται ανά μονάδα του χρόνου) και την συνιστώσα αρχικής μάζας (αναλογία μεγάλης μάζας/ μικρής μάζας αστέρια) δεν είναι σαφής.

Δεν γνωρίζουμε αν ο ιονισμός επηρεάζει την αποτελεσματικότητα αστρογέννησης στα πολύ πυκνά και μεγάλης μάζας νέφη, όπου η βαρυτική κατάρρευση και η ταχύτητα διαφυγής είναι μεγάλες. Ο ρυθμός αστρογέννησης επηρεάζεται από τις διαταραχές και το μαγνητικό πεδίο. Η συνιστώσα αρχικής μάζας (IMF) επηρεάζεται από την ανάδραση μέσω ακτινοβολίας, τις εκροές (πίδακες) και τα μαγνητικά πεδία, που φαίνεται να ευνοούν τον σχηματισμό μεγάλης μάζας αστεριών, κάτι ασύμφωνο με τις τιμές της IMF που παρατηρούμε.

Νεαρά αστρικά σμήνη μεγάλης μάζας κοντά στο κέντρο του Γαλαξία μας

Κοντά στο κέντρο του Γαλαξία μας υπάρχουν 3 από τα αστρικά σμήνη με την μεγαλύτερη μάζα. Το Arches Cluster, το Quintuplet cluster και το Young Nuclear Star Cluster. Βρίσκονται στην κεντρική μοριακή ζώνη (central Molecular Zone, CMZ), μια περιοχή πυκνού μοριακού αερίου 100 εκατομμυρίων ηλιακών μαζών που εκτείνεται σε ακτίνα 100- 200 pc από την κεντρική μαύρη τρύπα του Γαλαξία μας. Το αέριο της CMZ που καταναλώνεται στην δημιουργία αστρικών σμηνών έχει υψηλότερη θερμοκρασία, πυκνότητα, πίεση από την διαταραχή (turbulent pressure) και ισχυρότερο μαγνητικό πεδίο, από ότι στα μοριακά νέφη του Γαλαξιακού δίσκου. Αυτά τα 3 σμήνη, με 20000 ηλιακές μάζες περίπου το καθένα, είναι κυρίαρχα στην αστρογέννηση που συμβαίνει στην CMZ. Οι παραπάνω ιδιότητες της CMZ μπορεί να

σημαίνουν διαφορετικές διαδικασίες αστρογέννησης εκεί από ότι στον γαλαξιακό δίσκο.

Ηλικίες των σμηνών και αστρικός πληθυσμός

Η παρουσία καυτών αστεριών μεγάλης μάζας (OB αστέρια κυρίας ακολουθίας, OB γίγαντες και υπεργίγαντες και αστέρια Wolf- Rayet) και στα 3 σμήνη μας δείχνουν ότι αυτά είναι μικρότερης ηλικίας από 10 εκατομμύρια έτη. Οι ηλικίες τους είναι μεν συγκρίσιμες, αλλά γνωρίζουμε ότι διαφέρουν αρκετά ώστε να έχουν σχηματιστεί σε ξεχωριστά γεγονότα αστρογέννησης. Η αναλογίες των υπό- κατηγοριών των αστεριών μεγάλης μάζας OB και Wolf- Rayet (εμπλουτισμένα σε άζωτο αστέρια WR/ εμπλουτισμένα σε άνθρακα αστέρια WR, και αναλογία OB/ WR) μας δείχνουν τις ηλικιακές διαφορές των σμηνών, όπως κάνει και η θέση του σημείου αποκοπής στο διάγραμμα H/R. Να σημειώσουμε ότι η χρονολόγηση μέσω αστεριών μεγάλης μάζας περιέχει αβεβαιότητα, λόγω αβεβαιότητας των ατμοσφαιρικών τους μοντέλων και μοντέλων αστρικής εξέλιξης, και ιδίως λόγω επίδρασης συνοδών αστεριών (μπορεί πολλά αστέρια μεγάλης μάζας να είναι διπλά που δεν αναλύονται στις παρατηρήσεις μας, στα οποία σημειώνεται μεταφορά ύλης μεταξύ τους, με αποτέλεσμα να μην ισχύουν τα αστρικά μας μοντέλα για αυτά). Το περιεχόμενο σε αστέρια και η ηλικία ενός σμήνους είναι σημαντικά για τον καθορισμό της IMF (συνιστώσα αστρικής μάζας). Αυτή μας δείχνει τις διαδικασίες αστρογέννησης και σχηματισμού αστρικών σμηνών.

To Arches

Αυτό το σμήνος περιέχει 160 αστέρια τύπου O. Περιλαμβάνονται τουλάχιστον 2 υπεργίγαντες O1f και 13 WR τύπου WN7-9h (έχουν επιβεβαιωθεί φασματοσκοπικά) σε μια περιοχή 0,80 pc. Τα πλούσια σε άζωτο WN αστέρια έχουν 2 εκατομμύρια ηλιακές λαμπρότητες το καθένα, με μάζες 60- 120 ηλιακές. Καίνε ακόμα υδρογόνο στον πυρήνα και έχουν ηλικία 2-3 εκατομμύρια έτη. Αν και οι υπεργίγαντες τύπου O έχουν εκτιμώμενη ηλικία 4 εκατομμύρια έτη, πρέπει όλα αυτά τα παραπάνω αστέρια να σχηματίστηκαν χρονικά κοντά, μιας και το αέριο σε τόσο μικρό χώρο πρέπει να εξαντλήθηκε γρήγορα (μικρό χρονοδιάγραμμα αστρογέννησης). Έτσι η ηλικία του σμήνους μπορεί να εκτιμηθεί στα 2,5 εκατομμύρια έτη. Η επίδραση των διπλών αστεριών που προαναφέραμε ανεβάζει αυτήν την εκτίμηση στα 3,5 εκατομμύρια έτη.

Το περιεχόμενο σε αστέρια μικρής και ενδιάμεσης μάζας του Arches και γενικά στα παραπάνω σμήνη δεν εκτιμάται εύκολα λόγω μεγάλης και ποικίλης εξάλειψης του φωτός (πολλές πυκνές σε σκόνη και αέριο περιοχές του νεφελώματος μας τα κρύβουν), αστρικού συνωστισμού (το ένα αστέρι κρύβει το άλλο) και σύγχυσης με τα αστέρια του πεδίου. Οι ιδίες κινήσεις των αστεριών μας βοηθάνε να τα ξεχωρίσουμε από αυτά του πεδίου. Οι υπερβάσεις στο υπέρυθρο (infrared excess, δηλαδή η μεγαλύτερης έντασης εκπομπή στο υπέρυθρο από ότι προβλέπουν τα αστρικά μοντέλα), μας παραπέμπει σε περιαστρικούς δίσκους νεαρής ηλικίας αστεριών.

To Quintuplet

Όπως και το Arches, έχει μεγάλο πληθυσμό σε αστέρια WR, συνολικά 21, αλλά μεγαλύτερη διασπορά υπό- ομάδων, με αστέρια WN6, WN9-10h, WC8-9. Έχουμε ανακαλύψει 60 αστέρια τύπου O και έναν υπεργίγαντα στην κεντρική περιοχή του σμήνους. Η ηλικία του σμήνους εκτιμάται στα 4 – 5 εκατομμύρια έτη. Μία ακόμη απόδειξη ότι το Quintuplet είναι μεγαλύτερης ηλικίας από το Arches είναι ότι έχει μεγαλύτερη διασπορά. Ο πυρήνας του έχει ακτίνα 0,65 pc ενώ αυτός του Arches μόλις 0,14 pc. Αν και η αρχική ακτίνα των πυρήνων μας είναι άγνωστη, η διασπορά τους και γενικότερα ο διαμελισμός των 2 σμηνών πρέπει να είναι παρόμοιος, μιας και οφείλεται στις παλιρροϊκές δυνάμεις κοντά στο κέντρο του Γαλαξία. Η εκτίμηση της ηλικίας επηρεάζεται και από την μεταλλικότητα (διαφορετική αστρική εξέλιξη). Αυτή, στην κεντρική περιοχή του Γαλαξία, είναι λίγο πιο αυξημένη από ότι στον ήλιο μας, ιδίως για τα στοιχεία α.

Το YNC

Το Young Nuclear Cluster βρίσκεται στο κεντρικό pc του Γαλαξία και περιέχει πάνω από 100 αστέρια μεγάλης μάζας, περιλαμβανομένων 23 WR. Τα λαμπρότερα αστέρια OB είναι τύπου O7, που παραπέμπουν σε ηλικίες 3-8 εκατομμύρια έτη. Το YNC έχει αναμειχθεί με παλαιότερο σμήνος μεγαλύτερης μάζας που επίσης βρίσκεται στην περιοχή γύρω από την κεντρική μαύρη τρύπα του Γαλαξία, και έτσι είναι δύσκολο στην μελέτη του. Η ηλικία του YNC εκτιμάται στα 6- 10 εκατομμύρια έτη.

Δομές και δυναμική

Ένα μοναδικό χαρακτηριστικό των νεαρών αστρικών σμηνών κοντά στο κέντρο του Γαλαξία είναι τα ισχυρά παλιρροϊκά πεδία και το πυκνό σε ύλη περιβάλλον τους. Οι παλιρροϊκές δυνάμεις οφείλονται στην κεντρική μαύρη τρύπα, στο παλιό αστρικό σμήνος της περιοχής και στο εσωτερικό της γαλαξιακής ράβδου και του δίσκου. Όλες αυτές οι περιοχές έχουν αυξημένη πυκνότητα σε αστέρια. Οι παλιρροϊκές δυνάμεις επηρεάζουν την αποτελεσματικότητα αστρογέννησης (πόσο από το διαθέσιμο υλικό θα σχηματίσει τελικά αστέρια), την αρχική δυναμική εξέλιξη των σμηνών και τελικά την διαδικασία του διαμελισμού τους.

Το Arches και το Quintuplet

Τα γνωστά μέλη του Arches είναι 450 και του Quintuplet 1440. Η μεγάλη πυκνότητα σε αστέρια του πεδίου που ανήκουν στην ράβδο και στον δίσκο δυσκολεύουν την ταυτοποίηση των αστεριών με τα παραπάνω σμήνη τους. Οι ίδιες κινήσεις των αστεριών μας παρουσιάζουν την κίνηση της κεντρικής περιοχής των σμηνών. Σε συνδυασμό με μετρήσεις γωνιακής ταχύτητας μας δίνουν την γαλαξιακή τροχιά των 2 σμηνών.

Το σμήνος Arches είναι ένα από τα πυκνότερα του Γαλαξία μας (200.000 ηλιακές μάζες/κυβικό pc). Δεν φαίνεται να έχει απότομα όρια στις εξωτερικές περιοχές του. Ένας μεγάλος αστρικός πληθυσμός του βρίσκεται σε απόσταση τουλάχιστον 2,8 pc από το κέντρο του. Αυτό σημαίνει ότι ακόμα δεν έχει επηρεαστεί πολύ από τις παλιρροϊκές δυνάμεις της περιοχής, άρα δεν πέρασε το περίκεντρο της τροχιάς του

γύρω από την κεντρική μαύρη τρύπα του Γαλαξία τα τελευταία 0,2 ως 1 εκατομμύρια έτη (δηλαδή την κοντινότερη απόστασή του από αυτήν). Η πυκνότητα του Quintuplet στο κέντρο του είναι κατά 4 φορές μικρότερη από την αντίστοιχη του Arches.

Το YNC

Το YNC έχει πολύ πιο επίπεδο προφίλ πυκνότητας από τα άλλα 2 σμήνη και απότομη ελάττωση πυκνότητας αστεριών μετά από ακτίνα 0,4 pc. Επίσης έχει διακριτές περιοχές (δομές) με διαφορετικές κινηματικές. Περιέχει έναν λεπτό δίσκο με το 15% των αστεριών του, έναν πληθυσμό εκτός δίσκου με το 65% των αστεριών του και μία ομάδα αστεριών S (αστέρια που έχουν ή είχαν συνοδό αστέρι) με πολύ έκκεντρες τροχιές που περιλαμβάνει το 20% των αστεριών του. Οι περίοδοι των τροχιών των αστεριών του YNC είναι πολύ μικρές. Οι δομές αυτές και το απότομο εξωτερικό όριο του σμήνους δείχνουν ότι σχηματίστηκε εκεί και δεν μετανάστευσε στην περιοχή λόγω έλξης από την κεντρική μαύρη τρύπα.

Διαχωρισμός αστρικής μάζας

Ο διαχωρισμός της αστρικής μάζας είναι σημαντικός για την δομή ενός σμήνους. Στο Arches υπάρχει σαφής διαχωρισμός των αστεριών μεγάλης μάζας, που δείχνουν πιο απότομη ελάττωση προς τις εξωτερικές περιοχές του σμήνους από τα αστέρια μικρής μάζας.

Αρχική (IMF) και σημερινή συνιστώσα αστρικής μάζας

Υπάρχει το ερώτημα αν η IMF είναι καθολική στο σύμπαν ή κυμαίνεται ανάλογα το περιβάλλον. Τα σμήνη στο κέντρο του Γαλαξία αποτελούν δείγματα ακραίου περιβάλλοντος. Ενώ είναι νεαρά σε ηλικία, έχουν ήδη εξελιχθεί αρκετά ώστε να διαφοροποιήσουν την σημερινή MF από την αρχική. Φαίνεται η IMF στην κεντρική περιοχή του γαλαξία να παρουσιάζει διακυμάνσεις.

Το YNC βρίσκεται στο πιο ακραίο Γαλαξιακό περιβάλλον. Παρουσιάζει IMF <βαριάς κορυφής> (top heavy), που σημαίνει αυξημένο ποσοστό αστεριών μεγάλης μάζας (>8 ηλιακές μάζες). Αυτό μπορεί να επιβεβαιωθεί αν η αναλογία μάγνεταρ/ πάλσαρ είναι αυξημένη, αφού τα πρώτα προέρχονται από αστέρια με αρχική μάζα > 40 ηλιακές. Ακόμα, οι παρατηρήσεις στις ακτίνες X μας παρουσιάζουν τον πληθυσμό αστεριών μικρής μάζας (λόγω της στεμματικής δραστηριότητάς τους), και φαίνεται να είναι λιγότερα κατά 10 φορές στον πυρήνα του σμήνους από τις μετρήσεις που αναμένουμε για ένα ανάλογο σμήνος στην γειτονιά του ηλίου μας.

Στα Arches και Quintuplet δεν έχουμε την ακραία IMF του YNC. Σε αυτά φαίνεται να είναι όμοια με την IMF που ισχύει γενικά στον Γαλαξία μας.

Οι τροχιές των σμηνών και οι τοποθεσίες δημιουργίας τους

Επειδή βρίσκονται πολύ κοντά στο κέντρο του Γαλαξία, τα σμήνη αυτά έχουν διανύσει σημαντικό μέρος της τροχιάς τους γύρω από αυτό, σε αντίθεση με τα σμήνη του γαλαξιακού δίσκου. Έτσι τα Arches και Quintuplet έχουν μεταναστεύσει σε

περιβάλλοντα με ισχυρότερη ή ασθενέστερη βαρυτική επίδραση. Οι σημερινές τοποθεσίες τους δεν αποτελούν τους τόπους σχηματισμού τους.

Αντίθετα, το YNC εκτείνεται από την κεντρική μαύρη τρύπα του Γαλαξία για 0,4 pc απόσταση, και παρουσιάζει σημαντική παραμόρφωση. Η απουσία ουράς από νεαρά αστέρια σε μεγαλύτερη απόσταση μας δείχνει ότι τα αστέρια του σχηματίστηκαν εκεί που τα παρατηρούμε σήμερα.

Δεν γνωρίζουμε που σχηματίστηκαν τα Arches και Quintuplet, μιας και η ηλικία τους δηλώνει ότι έχουν ολοκληρώσει τουλάχιστον 1 περιφορά γύρω από το γαλαξιακό κέντρο. Η ταχύτητα και η ίδια κίνηση των αστεριών του Arches μας πληροφορούν ότι η τροχιά τους είναι στα 8 kpc από τον ήλιο μας. Και τα 2 βρίσκονται μάλλον μέσα στην κεντρική μοριακή ζώνη του Γαλαξία, στα 200 pc από το κέντρο του.

Μέθοδοι παρατήρησης των παραπάνω

- .Μας είναι απαραίτητα τα φάσματα και δεδομένα στο υπέρυθρο ώστε να αποφύγουμε την μεγάλη εξάλειψη του φωτός προς το γαλαξιακό κέντρο.
- .Η μεγάλη χωρική ανάλυση είναι απαραίτητη ώστε να ξεπεράσουμε την επικάλυψη αστεριών (crowding) και να πετύχουμε τον διαχωρισμό αστεριών, ακόμα και μικρής μάζας.
- .Η σχέση φαινόμενης λαμπρότητας/ αστρικής μάζας πρέπει να προσαρμόζεται βάσει φασματοσκοπίας αστεριών κύριας ακολουθίας. Αυτό εξαλείφει σφάλματα εκτίμησης ηλικίας και απόστασης που συμβαίνουν όταν χρησιμοποιούμε μόνο την φωτομετρία.
- . Χρειάζονται πιστά θεωρητικά μοντέλα για να περιορίσουμε τις αβεβαιότητες σε μεγέθη όπως η IMF, η ηλικία του σμήνους, η απόσταση και ο βαθμός εξάλειψης του φωτός.

Είναι η αστρογέννηση σύνηθες ή ιδιαίτερο φαινόμενο?

Ο νεαρός αστρικός πληθυσμός κοντά στο γαλαξιακό κέντρο μας πληροφορεί μόνο κατά το ήμισυ αν η αστρογέννηση εκεί διαφέρει από την αντίστοιχη στην γειτονιά του ηλίου. Η υπόλοιπη πληροφορία βρίσκεται στα μοριακά νέφη και γενικά στο μοριακό αέριο (δηλαδή αν αυτά έχουν τις ίδιες ιδιότητες με αυτά στον δίσκο). Οι έρευνες έδειξαν ότι η κεντρική μοριακή ζώνη έχει πιο ακραίες ιδιότητες (αυξημένη θερμοκρασία και πίεση, ισχυρότερο μαγνητικό πεδίο, ακτινοβολία, και υπόβαθρο σε κοσμικές ακτίνες), που οδηγούν σε ελάττωση της αστρογέννησης σχετικά με νέφη ίδιας πυκνότητας στον γαλαξιακό δίσκο.

Τα Arches και Quintuplet πιθανώς να σχηματίστηκαν στην κεντρική μοριακή ζώνη, αν λάβουμε υπόψη ότι τα μοριακά νέφη της παρουσιάζουν διάφορα στάδια αστρογέννησης. Οι διαφορετικές ιδιότητες των μοριακών νεφών της περιοχής από αυτά στον δίσκο παραπέμπουν σε γαλαξίες μεγάλης ερυθρολίθησης (μακρινούς, άρα παλαιότερης, πιο <βίαιης> εποχής). Η διάταξη των νεφών στην κεντρική μοριακή περιοχή δεν είναι τυχαία αλλά σχηματίζουν έναν δακτύλιο ή αστρικά ρεύματα (streamers). Υπάρχουν υπόνοιες ότι τα 2 σμήνη προέρχονται από την ίδια δακτυλιοειδής δομή.

Το YNC φαίνεται να σχηματίστηκε εκεί που το παρατηρούμε. Το σενάριο που συμφωνεί καλύτερα με τις παρατηρήσεις προβλέπει ότι 2 μοριακά νέφη συγκρούστηκαν και κατάρρευσαν στο κεντρικό pc του Γαλαξία μας. Αυτό είχε ως συνέπεια την δημιουργία δίσκου νεαρών αστεριών καθώς επικάθεται το υπόλοιπο αέριο σε αυτόν. Ο δίσκος καταρρέει μετά από μια κρίσιμη μάζα. Πολλά αστέρια μένουν εκτός δίσκου σε αστρικά ρεύματα διάφορων κατευθύνσεων. Αυτό το σενάριο δεν εξηγεί την προέλευση των αστεριών S (ψυχρά αστέρια με ίση ποσότητα άνθρακα και οξυγόνου στο φάσμα, αποτέλεσμα αλληλεπίδρασης με συνοδό) στο γαλαξιακό κέντρο, που πρέπει να έχουν μεταναστεύσει εκεί από μακρινότερες περιοχές. Το YNC αποτελεί μόνο το πιο πρόσφατο επεισόδιο αστρογέννησης στο κεντρικό pc του Γαλαξία μας. Το 80% των αστεριών της κεντρικής περιοχής έχει ηλικία άνω των 5 δις ετών. Έτσι το YNC δεν συμβάλλει σημαντικά στην αστρική μάζα της περιοχής.

Ανοιχτά ζητήματα

Υπάρχουν αναπάντητα ερωτήματα σχετικά με την αστρογέννηση και την δημιουργία σμηνών στο γαλαξιακό κέντρο.

- 1) Διαφέρει ριζικά η αστρογέννηση στο ακραίο περιβάλλον κοντά στο κέντρο του Γαλαξία μας από ότι στον γαλαξιακό δίσκο?
- 2) Που σχηματίστηκαν τα αρχικά σμήνη και πως σχετίζεται η περιοχή σχηματισμού με δομές όπως το ρεύμα/δακτύλιος αερίου των 100 pc, ο περί του γαλαξιακού κέντρου δίσκος, και η κεντρική υπερμεγέθης μαύρη τρύπα?
- 3) Ποιες είναι οι τροχιές των Arches και Quintuplet και πόσο πλησιάζουν την κεντρική μαύρη τρύπα?
- 4) Σε πόσο χρονικό διάστημα σχηματίστηκαν και τα 3 παραπάνω σμήνη? Αυτός ο σχηματισμός 3 σμηνών αποτελεί εξαίρεση ή είναι σύνηθες για την περιοχή?
- 5) Μπορούμε να κατασκευάσουμε πιστά μοντέλα εξέλιξης αστρικών σμηνών σε ισχυρό παλιρροϊκό πεδίο βάσει των μετρήσεων της παλιρροϊκής επίδρασης, του διαχωρισμού της μάζας και της δυναμικής κατάστασης των Arches και Quintuplet?
- 6) Πως σχηματίστηκαν και εξελίσσονται οι κινηματικές δομές του YNC (δίσκος, αστέρια εκτός δίσκου, αστέρια S), και περιέχει κάθε δομή ξεχωριστό αστρικό πληθυσμό?
- 7) Η κεντρική μοριακή ζώνη παρουσιάζει ενισχυμένη ή ελαττωμένη αστρογέννηση σχετικά με τον δίσκο?
- 8) Διαφέρει σημαντικά η διασπορά μάζας των σμηνών στο γαλαξιακό κέντρο από ότι στον δίσκο?
- 9) Πως συνδέεται ο σχηματισμός και η ανάπτυξη του YNC με την αύξηση μάζας της κεντρικής μαύρης τρύπας?
- 10) Από πού προέρχονται τα νεαρά αστέρια που κινούνται με υπερβολικά μεγάλες ταχύτητες και πόσο συχνά εκτινάσσονται σε διάφορες κατευθύνσεις (αποδεσμεύονται βαρυτικά από τα σμήνη)?

Ο κύκλος ζωής των σμηνών στον Γαλαξία μας

Οι περιοχές αστρογέννησης του Γαλαξία και των άλλων γαλαξιών μας δείχνουν ότι τα περισσότερα αστέρια σχηματίζουν σμήνη, που προέρχονται από τις πυκνότερες περιοχές των μοριακών νεφών. Η κατανομή αρχικής αστρικής μάζας (IMF) και οι διαταραχές (turbulence) συμβάλλουν στην δημιουργία αστρικών σμηνών. Έτσι η αστρογέννηση εμφανίζεται ως ιεραρχική διαδικασία στα γιγάντια μοριακά νέφη κλίμακας 1 kpc. Τα νεαρά αστρικά σμήνη να αποτελούν την βάση της. Οι διαταραχές είναι ένας από τους μηχανισμούς που κυριαρχούν στην αστρογέννηση. Τα αστέρια σχηματίζονται μόνο σε περιοχές αυξημένης πυκνότητας αερίου, και μόνο ένα (μεγάλο) μέρος τους θα σχηματίσουν σμήνη (με βαρυτική συνοχή). Μπορούμε να ανιχνεύουμε τα νεαρά σμήνη (YSC) σε γαλαξίες αστρογέννησης ως 100 Mpc απόσταση. Πολλά από αυτά θα παραμείνουν ως σμήνη για δις έτη. Έτσι μας παρουσιάζουν τα ιστορικά της αστρογέννησης του γαλαξία τους. Τα σφαιρωτά σμήνη, απομεινάρια ακραίας διαδικασίας σχηματισμού αστεριών στο νεαρό σύμπαν, πλαισιώνουν τα σημερινά YSC που παρατηρούμε. Μερικά σφαιρωτά προήλθαν από αυτά, άλλα είναι πυρήνες νάνων γαλαξιών. Τα YSC μπορεί να γεφυρώνουν το χάσμα ανάμεσα στα συνήθη αστρικά σμήνη μικρότερης ακτίνας από 1 pc και των γαλαξιών ακτίνας πολλών kpc. Η κατανόηση της δημιουργίας, εξέλιξης και διάλυσης θα μας δώσει πολύτιμες πληροφορίες για την εξέλιξη της αστρογέννησης στον κοσμικό χρόνο και χώρο.

Οι πληθυσμοί των σμηνών

Η μελέτη ολόκληρων αστρικών πληθυσμών μας προσφέρει 1) Το εύρος και την διασπορά των ιδιοτήτων των σμηνών, 2) Την σχέση αυτών των διασπορών, και 3) Πως αυτές οι διασπορές εξαρτώνται από το περιβάλλον, και πως εξελίσσονται στον χρόνο. Μεγέθη όπως η ηλικία, η μάζα και η εξάλειψη του φωτός μετρώνται με φωτομετρία στο ορατό και υπεριώδες, καθώς και οι μεταλλικότητες και οι γωνιακές ταχύτητες. Όμως αυτό μπορεί να εφαρμοστεί μόνο σε μεμονωμένα σμήνη και όχι σε πληθυσμό.

Η μάζα των αστρικών σμηνών

Η συνιστώσα αρχικής μάζας σμηνούς (ICMF) μετριέται συνήθως σε μεγάλους πληθυσμούς σμηνών σε γαλαξίες αστρογέννησης (υπό συγχώνευση γαλαξίες). Όμως αν παρατηρήσουμε τον σχηματισμό σμηνών σε έναν γαλαξία- νάνο θα διαπιστώσουμε μεγάλη διαφορά. Στους νάνους ο σχηματισμός αστρικών σμηνών αποτελεί σποραδικό φαινόμενο. Στην κορύφωση της αστρογέννησής τους οι νάνοι μπορεί να σχηματίσουν σμήνη πολύ μεγάλης μάζας ή και ελάχιστα, ακόμη και καθόλου σμήνη. Αντίθετα, στους σπειροειδείς γαλαξίες ο σχηματισμός σμηνών είναι εκτεταμένη και συνεχής διαδικασία. Σε αυτούς οι πληθυσμοί σμηνών είναι σταθεροί σε διασπορά ηλικίας και μάζας. Παρατηρούμε ότι η ICMF σε μερικούς γαλαξίες έχει όριο στις μεγάλες μάζες, με διαφοροποιήσεις από γαλαξία σε γαλαξία

ή ακόμα και μέσα στον ίδιο γαλαξία. Οι γαλαξίες συγχώνευσης Antennae, με τα τεράστια και πολύ πυκνά μοριακά νέφη τους, παρουσιάζουν ανώτερο όριο το 1- 10 εκατομμύρια ηλιακές μάζες, όριο που σπάνια φτάνουν σμήνη σε σπειροειδείς γαλαξίες. Φαίνεται ότι δεν είναι δυνατή η δημιουργία αστρικών σμηνών μεγαλύτερης μάζας. Το περιβάλλον καθορίζει το ανώτατο όριο αστρικής μάζας των σμηνών κάθε γαλαξία.

Η επίδραση του πλήθους των δειγμάτων

Με το διαστημικό τηλεσκόπιο Hubble έγινε εφικτή η μελέτη νεαρών αστρικών σμηνών πέρα και από τα Μαγγελανικά νέφη. Αυτό εμπλούτισε το εύρος περιβαλλόντων και ρυθμών αστρογέννησης της μελέτης. Τώρα γνωρίζουμε ότι τα σφαιρωτά σμήνη δεν σχηματίστηκαν μόνο στο πολύ πρώιμο σύμπαν, αλλά σχηματίζονται και σήμερα σε πολλούς γαλαξίες αστρογέννησης. Ο σχηματισμός ενός σμήνους κυριαρχείται από τις αρχικές συνθήκες και την μετέπειτα εξέλιξή του, που ορίζουν τις τελικές ιδιότητές του όπως η μάζα και το μέγεθός του. Σε αυξημένο ρυθμό αστρογέννησης (SFR, star formation rate) έχουμε αναλογικά περισσότερα αστρικά σμήνη (έναντι μεμονωμένων αστεριών). Παρατηρούμε να υπάρχει μια αναλογία λαμπρότητας σμηνών/ SFR στους γαλαξίες. Αυτή η αναλογία φαίνεται να διακόπτεται στους γαλαξίες έντονης αστρογέννησης, κάτι που μπορεί να οφείλεται στο ισχυρό φαινόμενο της απόκρυψης σμηνών από άλλα σμήνη στην γραμμή θέασης (crowding) και σε μεγάλη σκέδαση του φωτός από σκόνη (όπως στους λαμπρούς στο υπέρυθρο γαλαξίες, luminous infrared galaxies).

Η αποτελεσματικότητα σχηματισμού σμηνών (cluster formation efficiency) σε κοσμική κλίμακα

Η αστρογέννηση δεν παρουσιάζει σαφή μοντέλα σχηματισμού σμηνών και μεμονωμένων αστεριών. Η αστρογέννηση γενικά σχηματίζει σμήνη, σε κοντινούς και μακρινούς γαλαξίες (πρόσφατο και μη παρελθόν). Αυτό οφείλεται στην βαρυτική συνοχή που αποκτάνε τα αστέρια μεταξύ τους κατά την διαδικασία αστρογέννησης και όχι στην συνοχή του νεφελώματος. Τα νεαρά αστρικά σμήνη μεγάλης μάζας περιέχουν συνήθως μεγάλο αριθμό αστεριών μεγάλης μάζας. Έτσι τα σμήνη, μέσω ιονισμού και δυναμικής, έχουν επίδραση στην εξέλιξη των γαλαξιών. Τα μεγάλης μάζας νεαρά αστρικά σμήνη έχουν σημαντική συνεισφορά (20%) στην συνολική εκπομπή υπεριώδους ακτινοβολίας ενός γαλαξία αστρογέννησης. Αυτή η εκπομπή υπεριώδους ακτινοβολίας επιδρά στην μεσογαλαξιακή ύλη με τρόπο που να δημιουργεί διαταραχές στα γιγάντια μοριακά νέφη, με συνέπεια την έντονη αστρογέννηση και τον σχηματισμό σμηνών μεγάλης μάζας. Έτσι είναι σαφές ότι έχουμε μια σχέση μάζας αστρικών σμηνών με ποσοστό αστεριών που γεννιούνται σε σμήνη και όχι μεμονωμένα. Το ποσοστό αστεριών που θα σχηματιστούν σε σμήνη περιορίζεται από το διαθέσιμο προς αστρογέννηση αέριο στον γαλαξιακό δίσκο, την απομάκρυνση του αερίου από την ανάδραση των αστεριών μεγάλης μάζας (ιονισμός, αστρικοί άνεμοι), και γενικά την αποτελεσματικότητα αστρογέννησης (πόσο από το διαθέσιμο αέριο <αξιοποιείται> για τον σχηματισμό αστεριών). Στον γαλαξία M83 παρατηρούμε την αποτελεσματικότητα σχηματισμού σμηνών να μειώνεται με την απόσταση από το κέντρο του. Το συμπέρασμα είναι ότι η

αποτελεσματικότητα σχηματισμού σμηνών έχει διακυμάνσεις και μέσα στον ίδιο γαλαξία, από 3% στους <μικρές> αστρογέννησης νάνους ως και 50% στους γαλαξίες αστρογέννησης.

Η επιβίωση των σμηνών στους γαλαξίες

Μόλις σχηματιστεί ένα σμήνος, μια σειρά επιδράσεων μειώνει την μάζα του (διαφεύγουν αστέρια του στον περιβάλλον χώρο). Αν μετά τον σχηματισμό των αστεριών το αέριο που απέμεινε συνεχίζει να κυριαρχεί βαρυτικά του συστήματος, τότε η απομάκρυνσή του (μέσω ιονισμού και αστρικών ανέμων), αν συμβεί σε μικρό χρονικό διάστημα, θα παρασύρει πολλά αστέρια διαλύοντας το σμήνος (λύεται η βαρυτική του συνοχή, φαινόμενο που ονομάζουμε <παιδική θνησιμότητα>, infant mortality). Αυτό δεν συμβαίνει στα σμήνη μεγάλης μάζας, αυτά ισορροπούν βαρυτικά και μετά την απομάκρυνση του αερίου. Μία άλλη επίδραση προέρχεται από το γιγάντιο μοριακό νέφος γύρω από το σμήνος. Αν το νέφος είναι πολύ πυκνό το σμήνος δέχεται ισχυρά βαρυτικά κρουστικά μέτωπα από αυτό. Αυτά μπορούν να διαλύσουν το σμήνος. Αυτό συμβαίνει πριν το σμήνος απομακρυνθεί από το νεφέλωμα, και πάλι δεν φαίνεται να επηρεάζει τα σμήνη μεγάλης μάζας. Μετά από αυτήν την φάση ένα σμήνος έχει να αντιμετωπίσει το βαρυτικό πεδίο του γαλαξία του (παλιρροιακές διαταραχές), την αλληλεπίδραση με άλλα γιγάντια μοριακά νέφη και την αστρική εξέλιξη των μελών του (εκρήξεις σουπερνόβα, ισχυροί αστρικοί άνεμοι των γιγάντων). Το συμπέρασμα είναι ότι στα περισσότερα γαλαξιακά περιβάλλοντα τα σμήνη μεγάλης μάζας επιβιώνουν, σε αντίθεση με τα σμήνη μικρής μάζας που διαλύονται σε μεμονωμένα αστέρια. Έτσι τα σμήνη μεγάλης ηλικίας έχουν και μεγάλη μάζα. Σε σμήνη νεαρής ηλικίας υπάρχει ισορροπία ανάμεσα σε μικρή και μεγάλη μάζα, που αργότερα χάνεται υπέρ των σμηνών μεγάλης μάζας. Το περιβάλλον ενός γιγάντιου μοριακού νεφελώματος μεγάλης πυκνότητας ευνοεί τον σχηματισμό σμηνών μεγάλης μάζας, αλλά και την καταστροφή των σμηνών μικρής μάζας.

Σε συγχωνεύσεις γαλαξιών με μεγάλη ποσότητα αερίου η βίαιη διάλυση συμβαίνει σε σμήνη μικρής, αλλά και μεγάλης μάζας. Αντίθετα, στους <ήρεμους > δίσκους ενός σπειροειδή γαλαξία τα σμήνη επιβιώνουν πιο εύκολα. Η διασπορά ηλικιών των σμηνών είναι ο καθρέπτης των συνθηκών του γαλαξία. Όταν αυτή είναι επίπεδη για εκατοντάδες εκατομμύρια έτη (σμήνη όλων των ηλικιών), τότε οι συνθήκες είναι τέτοιες ώστε τα σμήνη να μην διαλύονται εύκολα. Αν σχεδόν όλα τα σμήνη έχουν ηλικία ως 10 εκατομμύρια έτη, τότε οι συνθήκες είναι τέτοιες ώστε η επιβίωσή τους να είναι δύσκολη.

Ο πληθυσμός ανοιχτών σμηνών του Γαλαξία μας

Η εικόνα μας για τα ανοιχτά σμήνη του Γαλαξία δεν είναι ολοκληρωμένη, ιδίως για τις απομακρυσμένες περιοχές του. Το 90% των σμηνών είναι νεαρότερο από 100 εκατομμύρια έτη. Η διασπορά ηλικίας είναι αρκετά επίπεδη μέχρι εκεί, αλλά μετά φθίνει απότομα. Τα σμήνη με μάζα πάνω από 10000 ηλιακές έχουν μέση διάρκεια ζωής 1,7 δις έτη (για την γαλαξιακή περιοχή του ηλίου μας). Σε αυτό βοηθάει η απουσία ισχυρών παλλιρροικών δυνάμεων και μεγάλης μάζας μοριακών νεφών, παράγοντες διαμελισμού ανοιχτών σμηνών.

Ο πληθυσμός σμηνών του γαλαξία της Ανδρομέδας

Έχουμε την ανάλυση από 3 ακτινικές περιοχές στα 6, 10 και 15 kpc από το κέντρο του γαλαξία. Παρατηρούμε μια επίπεδη διασπορά ηλικίας ως τα 100 εκατομμύρια έτη, με απότομη ελάττωση σε μεγαλύτερες ηλικίες. Αυτή οφείλεται σε συνδυασμό της αδυναμίας αναγνώρισης των σμηνών, επειδή μειώνεται η λαμπρότητά τους, και της διάλυσης των σμηνών. Έχει ενδιαφέρον ότι παρατηρούμε και στις 3 περιοχές την ίδια διασπορά ηλικίας. Φαίνεται να υπάρχουν εκεί παρόμοιες συνθήκες με την γειτονιά του ηλίου μας.

Ο πληθυσμός σμηνών στο μεγάλο Μαγγελανικό νέφος

Πρόκειται για τον κοντινότερο (νάνο) γαλαξία, που περιέχει σημαντικό πληθυσμό νεαρών αστρικών σμηνών. Βρήκαμε μεγάλο πληθυσμό νεαρών (< 10 εκατομμύρια έτη), μεγάλης μάζας (10000 ηλιακές μάζες) σμηνών, όπως το γνωστό R136. Υπάρχει μια επίπεδη διασπορά ηλικίας ως τα 300 εκατομμύρια έτη, και ακολουθεί απότομη ελάττωση.

Ο πληθυσμός σμηνών στον M83

Πρόκειται για κοντινό μας (4,5 Mpc) σπειροειδή γαλαξία, που μας δίνει την δυνατότητα ανάλυσης περιοχών του με διαφορετικό περιβάλλον. Στην κεντρική του περιοχή ο διαμελισμός των σμηνών είναι εντονότερος, ενώ στις πιο εξωτερικές περιοχές (δίσκος) η διασπορά ηλικίας είναι πιο επίπεδη, λόγω μικρότερης παλιρροϊκής διαταραχής. Αυτές οι παρατηρήσεις επιβεβαιώνουν την εξάρτηση των αστρικών σμηνών από τις τοπικές γαλαξιακές συνθήκες.

Παρόμοιες μελέτες έχουν γίνει και σε άλλους κοντινούς γαλαξίες. Παντού βλέπουμε την επίδραση του περιβάλλοντος στην διατήρηση των αστρικών σμηνών.

Συμπεράσματα

Η αναλογία αστεριών που δημιουργούνται σε σμήνη αυξάνεται με την πυκνότητα (αυξημένο ρυθμό) αστρογέννησης. Αυτή η διακύμανση υπάρχει από γαλαξία σε γαλαξία, αλλά και μέσα στους γαλαξίες. Στο πρώιμο σύμπαν ο σχηματισμός σμηνών ήταν πιο έντονος, με αποτέλεσμα να παρατηρούμε σήμερα πολλά αρχαία σφαιρωτά σμήνη. Η κορύφωση σχηματισμού σμηνών μεγάλης μάζας πετυχαίνεται στους γαλαξίες υπό συγχώνευση (merging galaxies), όπου ενώνονται γιγάντια μοριακά νέφη σε πολύ πυκνές δομές. Η διασπορά ηλικίας των σμηνών εξαρτάται από το περιβάλλον τους. Στους περισσότερους (και <ήρεμους>) γαλαξίες δεν παρατηρείται διαμελισμός των σμηνών πριν τα 100 εκατομμύρια έτη τους. Η αλληλεπίδραση με γιγάντια μοριακά νέφη και οι παλιρροϊκές διαταραχές αποτελούν τους βασικούς παράγοντες διάλυσης αστρικών σμηνών.

Μελέτες σε διαφορετικά μήκη κύματος (Multiwavelength) των σμηνών αστεριών OB

Υπάρχουν μερικά ερωτήματα για τα σμήνη που κυριαρχούνται από αστέρια μεγάλης μάζας (τύπων O,B). Σχηματίζονται γρήγορα ή σε βάθος χρόνου (με διασπορά ηλικίας των

αστεριών τους)? Πότε διαμελίζονται, εμπλουτίζοντας τον μεσογαλαξιακό χώρο με αστέρια μεγάλης μάζας? Αυτά τα σμήνη σχηματίζονται μέσω συνένωσης μικρότερων σμηνών? Τι συμβαίνει στις περιοχές έντονης αστρογέννησης? Η μελέτη στις ακτίνες X και στο υπέρυθρο δίνει κάποιες απαντήσεις. Παρατηρούμε ότι υπάρχει μια διασπορά ηλικίας μέσα στα σμήνη, τα αστέρια στις άλω των σμηνών είναι γηραιότερα από αυτά στις κεντρικές περιοχές τους. Αυτό το συμπέρασμα υποστηρίζει την θεωρία της συνένωσης σμηνών.

Οι παρατηρήσεις στις ακτίνες X αποκαλύπτουν τα αστέρια προ κυρίας ακολουθίας μικρής μάζας, στο κοντινό υπέρυθρο διεισδύουν σε περιοχές με μεγάλη εξάλειψη φωτός, και στο μεσαίο υπέρυθρο αναλύουν τους περιστατρικούς δίσκους.

Στον Γαλαξία μας τα περισσότερα αστέρια σχηματίζονται σε σμήνη. Από τις λαμπρότητες των σμηνών του Γαλαξία μας αλλά και άλλων γειτονικών μας γαλαξιών συμπεραίνουμε ότι τα περισσότερα αστέρια σχηματίζονται σε σμήνη 100- 10000 αστεριών, και σε περιβάλλοντα έντονης αστρογέννησης όπως σε γαλαξίες υπό συγχώνευση, σε σμήνη 100000 αστεριών.

Υπάρχει δυσκολία στον εντοπισμό των σμηνών, που έχει να κάνει με την διάκριση των αστεριών τους από τα αστέρια του πεδίου. Ένα πρόβλημα αποτελεί η σκόνη στα πυκνά περιβάλλοντα όπως το εσωτερικό των μοριακών νεφών. Η παρατήρηση στα μικροκύματα και στο υπέρυθρο μας βοηθάει πολύ. Το ιονισμένο αέριο από τα αστέρια O, B ανιχνεύεται στα ραδιοκύματα, και η θέρμανση της σκόνης, που προκαλεί την δημιουργία πολυκυκλικών υδρογονανθράκων, παρατηρείται στο υπέρυθρο. Όμως ο αστρικός πληθυσμός των σμηνών σε απόσταση μεγαλύτερη από 1 kpc μας είναι άγνωστος. Σε αυτή την απόσταση τα παλαιότερα αστέρια του πεδίου μπερδεύουν τις μετρήσεις (παρουσιάζουν αυξημένη πυκνότητα στην γραμμή θέασης). Η εξάλειψη του φωτός είναι τόση ώστε να επηρεάζει και τις παρατηρήσεις στο υπέρυθρο. Έτσι μπορεί να υποτιμάται το μέγεθος των σμηνών, αφού παρατηρούμε κυρίως τα αστέρια O, B στο εσωτερικό τους και όχι τα παλαιότερα, μικρότερης μάζας και λαμπρότητας αστέρια των εξωτερικών περιοχών των σμηνών. Οι παρατηρήσεις στις ακτίνες X βοηθάνε να ξεπεραστεί αρκετά αυτό το πρόβλημα, ανακαλύπτοντας τις μαγνητικές εκλάμψεις των νεαρών, κυρίως μικρής μάζας αστεριών (εκλάμψεις πολύ συχνότερες και ισχυρές από τις αντίστοιχες ηλιακές), χωρίς να εξαλείφεται ή να σκεδάζεται η σκληρή αυτή ακτινοβολία από το μεσογαλαξιακό περιβάλλον.

Πηγές ακτινών X- υπέρυθρου

Lagoon Nebula (M8) Σε αυτή την περιοχή σχηματισμού αστεριών μεγάλης μάζας (Massive Star Formation Region) παρατηρούμε 2 κύρια σμήνη, το NGC 6523 με το γνωστό αστέρι μεγάλης μάζας Herschel 36 και το NGC 6530. Υπάρχει και άλλη μια συμπύκνωση αστεριών με το λαμπρό εμβαπτισμένο σε αέριο αστέρι M8E.

NGC 6334. Πρόκειται για μία μεγάλη MSFR κατά μήκος του γαλαξιακού επιπέδου. Περιέχει μερικά διακριτά σμήνη, κάποια κυρίως με νεαρά, λαμπρά στο υπέρυθρο αστέρια και άλλα με παλαιότερα αστέρια που εκπέμπουν ακτίνες X. Υπάρχει μια εξέλιξη της αστρογέννησης από νοτιοδυτικά προς βορειοανατολικά, αλλά μπορεί τα

παλαιότερα σμήνη να επικαλύπτονται από νεαρότερα. Παρατηρούμε μια διασπορά των πολύ νεαρών αστεριών κατά μήκος ενός μοριακού νήματος.

NGC 6357. Πρόκειται για μια πολύ ενεργή περιοχή αστρογέννησης στον βραχίονα της Καρίνας, που περιέχει πολλά MSFR. Μερικά από τα πλούσια σμήνη του περιέχουν ως και 100 αστέρια τύπου O3.

Το νεφέλωμα του Αετού (M3). Και εδώ ο αριθμός των αστεριών που παρατηρήθηκαν στις ακτίνες X ξεπερνάει αυτόν από τις παρατηρήσεις στο υπέρυθρο, που σημαίνει ότι η αστρογέννηση διαρκεί εκεί πολλά εκατομμύρια έτη.

Μετρήσεις στα αστρικά σμήνη

Ως μεθόδους μέτρησης ηλικίας των προ κυρίας ακολουθίας αστεριών σε αυτά τα σμήνη χρησιμοποιούμε την θεωρητική εξελικτική πορεία στο διάγραμμα H/R και την παρουσία και εξέλιξη (σε ποιό στάδιο βρίσκεται) του περιαστρικού δίσκου, που εκπέμπει κυρίως στο υπέρυθρο. Όμως η έντονη ερυθροποίηση των αστεριών στις MSFR δεν μας επιτρέπει να έχουμε ασφαλή συμπεράσματα. Τώρα χρησιμοποιούμε και την αντίστροφη αναλογία εκλάμψεων (ακτινών X)/ αστρική μάζα σε αστέρια κυρίας ακολουθίας. Πρόκειται για ένα φαινόμενο που δεν έχει εξηγηθεί ακόμα, αλλά έχει να κάνει με την πλήρη συναγωγή που επικρατεί στο εσωτερικό των αστεριών μικρής μάζας.

Σε πολλές MSFR παρατηρούμε, εκτός από τα σμήνη, και υπό- σμήνη, δομές που δεν είναι σφαιρικές αλλά κυρίως ελλειπτικές και πολλές φορές μπαίνει η μία μέσα στην άλλη.

Παρατηρούμε μεγάλες διαφορές στην επιφανειακή πυκνότητα των σμηνών. Το σμήνος NGC2244 στο Rosette Nebular είναι πολύ πιο αραιό από το RCW38 και τα Orion Nebular Cluster, M17. Πρέπει να βρίσκονται σε διαφορετική δυναμική κατάσταση, κάτι που φαίνεται από την απουσία διαχωρισμού μάζας (mass segregation, διαχωρισμός μεγάλης μάζας αστεριών από τα μικρής μάζας) στο NGC2244.

Τα σμήνη διαστέλλονται με την πάροδο του χρόνου. Παρατηρούμε αύξηση κατά παράγοντα 10 στην ακτίνα και ελάττωση της πυκνότητας κατά παράγοντα 1000 για τις κεντρικές περιοχές των σμηνών στο διάστημα 0,5 εκατομμυρίων ως 5 εκατομμυρίων ετών. Αυτό είναι επακόλουθο της δυναμικής της διαστολής του αερίου. Τα πρώτα αστέρια που διασπείρονται από τα σμήνη είναι τα γηραιότερα, εξωτερικά αστέρια.

Η μορφολογία ενός σμήνους είναι αποτέλεσμα της εξέλιξής του στον χρόνο. Η αστρογέννηση ξεκινάει σε νηματοειδή νέφη, μετά συνεχίζεται σε συμπυκνώματα που δημιουργούνται από τις συνενώσεις υπό- σμηνών και τερματίζεται σε σμήνη αστεριών με διακριτό πυρήνα και άλω, σε δυναμική ισορροπία. Σε μεγάλους σχηματισμούς έχουμε διασπάσεις, όπως παρατηρούμε στο W40 και στα 3 σμήνη του NGC6357. Το M17, πυκνό αλλά με συμπυκνώματα, μάλλον θα σχηματίσει ένα ενιαίο πλούσιο σμήνος. Αν τα πλούσια σμήνη σχηματίζονταν μονολιθικά χωρίς συνενώσεις, ο αριθμός τους που παρατηρούμε θα ήταν πολύ μεγαλύτερος. Για ένα εκτεταμένο χρονικό διάστημα, υπό- σμήνη και αέριο καταρρέουν βαρυτικά προς το κυρίως σμήνος, παρατείνοντας την αστρογέννηση. Τα παλαιότερα αστέρια που

σχηματίστηκαν στα υπό- σμήνη έχουν μεγαλύτερη διασπορά ταχύτητας και θα βρεθούν στις εξωτερικές περιοχές του σμήνους, μακριά από το κέντρο του. Τα παραπάνω είναι σύμφωνα με την διασπορά ηλικίας των αστεριών που παρατηρούμε στα σμήνη, κάτι που παραπέμπει σε παρατεταμένη αστρογέννηση.

Ο σχηματισμός πολύ νεαρών αστρικών σμηνών μεγάλης μάζας και η σύνδεση με τον πληθυσμό των σφαιρωτών σμηνών

Ο σχηματισμός πολύ νεαρών σμηνών μεγάλης μάζας VYMC (> 10000 ηλιακές μάζες και ηλικία μερικά εκατομμύρια έτη) από τα γιγάντια μοριακά νέφη παραμένει μυστήριο. Τα συναντάμε στους βραχίονες του Γαλαξία (NGC 3603), όπου κυριαρχεί το μοριακό αέριο, και στην κεντρική μοριακή ζώνη του Γαλαξία (Arches, Quintuplet). Ακόμα, τα παρατηρούμε σε κοντινούς γαλαξίες (R136 στο μεγάλο Μαγγελανικό νέφος) και σε γαλαξίες αστρογέννησης, όπως οι γαλαξίες κεραίες (Antennae Galaxies). Η μικρή ηλικία τους σημαίνει ότι όλα τους τα αστέρια βρίσκονται ακόμα στην κύρια ακολουθία (συντήκουν υδρογόνο σε ήλιον στους πυρήνες τους). Οι λεπτομέρειες της δομής και οι εσωτερικές κινήσεις των αστεριών τους μας δείχνουν πως ήταν σε νεαρή ηλικία τα αστρικά σμήνη μεγάλης μάζας που δημιούργησαν τα σημερινά σφαιρωτά σμήνη.

Τα πολύ νεαρά σμήνη μεγάλης μάζας ξεχωρίζουν μορφολογικά ως αυτά με τον πλουσιότερο πυρήνα και την πλουσιότερη άλω, στα συμπλέγματα αστρικών σμηνών. Περιέχουν αναλογικά μεγάλο πληθυσμό αστεριών O,B, όπως το Cygnus OB2. Επίσης είναι σύνηθες να βρίσκονται μέσα σε ιονισμένο υδρογόνο (NGC 3603, R136). Η ακτίνα μισής λαμπρότητας (χωρική περιοχή από όπου προέρχεται η μισή από την συνολική εκπομπή φωτός) είναι μικρότερη από 1 pc. Αυτό σημαίνει ότι είναι κατά 3 τάξεις μεγέθους πιο πυκνά από τα σημερινά σφαιρωτά σμήνη του Γαλαξία μας. Αυτό κάνει τα πολύ νεαρά σμήνη μεγάλης μάζας να είναι υποψήφια μελλοντικά σφαιρωτά σμήνη, που θα διασταλούν λόγω διαχωρισμού μάζας (τα αστέρια μεγαλύτερης μάζας συγκεντρώνονται στο κέντρο του σμήνους), των στενών διελεύσεων αστεριών ή διπλών αστερών (φαινόμενο της σφεντόνας), και λόγω αστρικής εξέλιξης (εκρήξεις σουπερνόβα, ισχυροί αστρικοί άνεμοι γιγάντων). Αρκετά από τα πολύ νεαρά σμήνη μεγάλης μάζας έχουν πολλαπλές κεντρικές περιοχές (υπό- σμήνη με κοινή σφαιρική άλω).

Είναι εντυπωσιακό ότι τα τεράστια σε μέγεθος μοριακά νέφη σχηματίζουν τόσο μικρών διαστάσεων, σχεδόν σφαιρικά αστρικά σμήνη. Η αλληλεπίδραση μεταξύ των αστεριών πρέπει να είναι το μυστικό της σφαιρικής τους δομής (κέντρο- εξωτερική άλως). Γρήγορα επέρχεται δυναμική ισορροπία στο σύστημα, σε χρόνο μερικών αστρικών τροχιών (stellar orbit timescale, ο μέσος χρόνος που χρειάζεται ένα αστέρι του σμήνους να διαγράψει μία τροχιά γύρω από αυτό). Δεν παρατηρούμε διασπορά ηλικίας στα πολύ νεαρά σμήνη μεγάλης μάζας, άρα πρέπει να σχηματίστηκαν από ένα μοναδικό επεισόδιο αστρογέννησης.

Τα δύο σενάρια σχηματισμού πολύ νεαρών σμηνών μεγάλης μάζας

Υπάρχουν 2 σενάρια σχηματισμού τους (παρόμοια σενάρια, με τα ίδια ονόματα, εξετάζονται και για τον σχηματισμό των γαλαξιών). 1) Το μονολιθικό, δηλαδή ο σχηματισμός τους από ένα μεγάλης έντασης επεισόδιο αστρογέννησης. Το σμήνος σε πολύ πρώιμη φάση, όταν περιέχει αστέρια προ κυρίας ακολουθίας και κυρίας ακολουθίας, παραμένει εμβαπτισμένο στο αρχικό μοριακό νέφος. Αυτό ionίζεται μέσω της ισχυρής υπεριώδους ακτινοβολίας από τα αστέρια μεγάλης μάζας του σμήνους, και δέχεται ενέργεια από τις διπολικές εκροές των νεαρών άστρων. Το αποτέλεσμα είναι να αποδευμευτεί βαρυτικά το αέριο από το σμήνος και να διασκορπιστεί. Αυτό έχει ως συνέπεια το σμήνος να διασταλεί βίαια και να απολέσει ένα μέρος των αστεριών του (ανάλογο της αρχικής μάζας και πυκνότητας σε αστέρια). Το εναπομείναν σμήνος θα ισορροπήσει βαρυτικά. Αυτό το σενάριο το επιβεβαιώνουν οι παρατηρήσεις των R136, NGC3603. 2) Το ιεραρχικό σενάριο, που προβλέπει συνενώσεις υπό- σμηνών σε ένα σμήνος. Η βαρυτική επίδραση από το γύρω μοριακό αέριο επιταχύνει την κατάρρευση των υπό- σμηνών σε ένα τελικό πολύ νεαρό σμήνος μεγάλης μάζας. Οι δομές που παρατηρούμε σε αστρικά σμήνη υποστηρίζουν αυτό το σενάριο.

Στις υδροδυναμικές προσομοιώσεις τα σμήνη φαίνεται να σχηματίζονται στα μοριακά νέφη νήματα μεγάλης πυκνότητας, ως αποτέλεσμα της διαταραχής (turbulence). Όμως αυτές οι προσομοιώσεις εκτελούνται μόνο για σμήνη με μικρή σχετικά μάζα, ως 100 ηλιακές. Έτσι δεν έχουμε συμπεράσματα για ζητήματα, όπως για παράδειγμα, η γρήγορη εξάλειψη/ διαστολή του αερίου, που παρατηρούμε στα πολύ νεαρά σμήνη μεγάλης μάζας. Πρέπει να λάβουμε υπόψη παράγοντες όπως τα μαγνητικά πεδία και η βαρυτική κατάτμηση του νέφους.

Θεωρητικά, για να επιβιώσει το αρχικό σμήνος την απότομη διαστολή του αερίου, πρέπει να έχει μεγάλη αποτελεσματικότητα σχηματισμού αστεριών (SFE, Star Formation Efficiency, πόσο αποτελεσματικά καταναλώνεται το διαθέσιμο αέριο στην αστρογέννηση). Αυτή πρέπει να είναι πάνω από 70%, δηλαδή διπλάσια από αυτή που συμπεραίνουμε από παρατηρήσεις και προβλέπει η θεωρία, το πολύ 30%. Να σημειώσουμε ότι η SFE όλου του μοριακού νεφελώματος είναι κοντά στο 1%. Μια τόσο μεγάλη SFE μπορεί να δικαιολογηθεί μόνο με το μονολιθικό σενάριο. Στην πράξη όμως συμβαίνει και το φαινόμενο της <βίαιης χαλάρωσης> (violent relaxation). Δηλαδή σε ένα κλειστό βαρυτικό σύστημα που ακόμα δεν βρίσκεται σε δυναμική ισορροπία, η ανταλλαγή ενέργειας μεταξύ δύο σωμάτων (άστρων) συμβαίνει πολύ γρήγορα, επιφέροντας την ισορροπία του συστήματος σε χρόνο μίας μόνο διάβασης (χρόνος που απαιτείται σε ένα αστέρι να διασχίσει το σμήνος του). Πρόκειται για μια επιταχυμένη <χαλάρωση 2 σωμάτων> (2 body relaxation). Έτσι το σμήνος μπορεί να διατηρήσει την βαρυτική του συνοχή με SFE μικρότερη από 30%. Όπως είναι φυσικό, τα αστέρια του κέντρου ενός σμήνους <προστατεύονται> με αυτόν τον τρόπο περισσότερο από αυτά της άλως.

Τα νεαρά σμήνη που παρατηρούμε να έχουν αποδευμευτεί από το αέριο έχουν ακτίνα μισής μάζας (περιοχή όπου βρίσκεται η μισή από την συνολική μάζα τους) 3- 10 pc, από μόλις 1 pc στην φάση που είναι ακόμα εμβαπτισμένα στο νεφέλωμα. Είναι μάλλον απίθανο τα τόσο πυκνά σμήνη να διαστέλλονται τόσο πολύ σε τόσο μικρό χρονικό διάστημα, απλά με την κοσμική εξέλιξή τους (εξέλιξη των σμηνών λόγω

αστρικής εξέλιξης). Στο ιεραρχικό μοντέλο δεν υπάρχει αρκετός χρόνος να συνενωθούν τα υπό- σμήνη σε ένα τόσο μεγαλύτερης έκτασης, σχεδόν σφαιρικό σμήνος. Χρειάζονται αρκετές διαβάσεις των υπό- σμηνών μέχρι να ισορροπήσει το σύστημα. Έτσι φαίνεται να επικρατεί το μονολιθικό σενάριο πολύ αποτελεσματικής αστρογέννησης, που έχει ως αποτέλεσμα σφαιρικά σμήνη με συμπυκνώματα. Αυτές οι συνθήκες εντατικής αστρογέννησης ($SFE = 30\%$) μπορεί να δημιουργηθούν σε συγκρούσεις μοριακών νεφελωμάτων (Westerlund 2, NGC 3603). Το χρονοδιάγραμμα μιας τέτοιας σύγκρουσης δεν ξεπερνάει το 1 εκατομμύριο έτη. Όταν το ένα νεφέλωμα διασχίσει το άλλο, θα αραιώσει το αέριο στην περιοχή του σμήνους, με αποτέλεσμα αυτό να διασταλεί ταχύτατα.

Η εξάλειψη του αερίου

Όπως αναφέραμε, μια SFE κοντά στο 30% και ο έντονος ιονισμός του αερίου δικαιολογεί την εικόνα των σημερινών νεαρών σμηνών μεγάλης μάζας που έχουν αποδεσμευτεί από το αέριό τους. Η ταχύτητα του αερίου κατά την διαστολή μπορεί να φτάσει τα 10km/s, ταχύτητα του ήχου στο ιονισμένο υδρογόνο.

Στα σμήνη μεγάλης μάζας η ταχύτητα διαφυγής ξεπερνάει αυτό το όριο, κάνοντας την πίεση της ακτινοβολίας να κυριαρχεί στο αέριο. Τότε η διαστολή συνεχίζεται με αυτήν την ταχύτητα. Σε σμήνη πολύ μεγάλης μάζας (>1 εκατομμύριο ηλιακές), που θα αποτελέσουν τα μελλοντικά σφαιρωτά σμήνη, υπάρχει μια ακτίνα όπου το αέριο ψύχεται αποτελεσματικά μέσω της ακτινοβολίας, ώστε να πυροδοτηθεί μια δευτερογενείς αστρογέννηση. Σε αυτό το σενάριο, που παραμένει υπό αμφισβήτηση, έχουν σημαντικό ρόλο τα κρουστικά κύματα από την πίεση ακτινοβολίας στις εξωτερικές ψυχρότερες περιοχές. Να σημειώσουμε ότι στα σφαιρωτά σμήνη υπάρχει το πρόβλημα των 2 αστρικών πληθυσμών, δηλαδή εντοπίζουμε 2 αστρικούς πληθυσμούς με διαφορετικά χημικά αποτυπώματα (αναλογίες στοιχείων). Η επικρατέστερη θεωρία είναι ο γρήγορος εμπλουτισμός της μεσοαστρικής ύλης από εξελιγμένα αστέρια μεγάλης μάζας και η ανταλλαγή ύλης ανάμεσα σε διπλά αστέρια, και όχι η δευτερογενείς αστρογέννηση.

Η φάση που τα σμήνη μεγάλης μάζας παραμένουν εμβλαπτισμένα σε αέριο υπολογίζεται να διαρκεί 1 εκατομμύριο έτη. Αυτό επιβεβαιώνεται από τις μετρήσεις των σμηνών ONC, HD97950 που είναι αποδεσμευμένα από το αέριο και έχουν ηλικία 1 εκατομμύριο έτη. Σε αυτή την φάση τα περισσότερα αστέρια είναι προ κυρίας ακολουθίας (ακόμα δεν συντήκουν υδρογόνο σε ήλιον στους πυρήνες τους). Η IMF, συνιστώσα αρχικής αστρικής μάζας, επηρεάζεται από το μέγεθος του σμήνους μόνο στην αναλογία αστεριών πολύ μεγάλης μάζας (τύπου O,B).

Η αποτελεσματική αποδέσμευση των σμηνών από το αέριο παρατηρείται γενικά σε σμήνη νεαρής και μέσης ηλικίας. Δεν ανιχνεύουμε αέριο στα σμήνη του μεγάλου Μαγγελανικού νέφους με ηλικία 30- 300 εκατομμύρια έτη και μάζα >10000 ηλιακές.

Εξετάζοντας μερικά πολύ νεαρά σμήνη μεγάλης μάζας

Ο καλύτερος τρόπος να αξιολογήσουμε τα 2 σενάρια σχηματισμού τους είναι να τα συγκρίνουμε με τις παρατηρήσεις συγκεκριμένων τέτοιων σμηνών. Τα σμήνη

πρέπει να είναι σχετικά κοντινά και με μικρή μεσογαλαξιακή απορρόφηση του φωτός.

Το σμήνος του Ωρίωνα. Υπολογίζουμε ότι σε 100 εκατομμύρια έτη θα εξελιχτεί σε ένα σμήνος όμοιο με τις Πλειάδες. Αυτό το σμήνος επιτάχυνε την διαστολή του μετά από την αποδέσμευση από το αέριο. Αυτό συνέβη μέσω των εκρήξεων σουπερνόβα των αστεριών μεγάλης μάζας που βρίσκονται στο κέντρο του. Επίσης αποσταθεροποιούνται διπλά συστήματα αστεριών, με αποτέλεσμα το ένα αστέρι από τα 2 να εκσφενδονίζεται προς τα έξω. Τα εναπομείναντα αστέρια σχετικά μεγάλης μάζας και διπλά συστήματα καταρρέουν προς το κέντρο, αυξάνοντας την πυκνότητά του. Η ακτίνα του κέντρου, η πυκνότητα σε αστέρια, και η διασπορά ταχυτήτων των αστεριών του δείχνουν το μονολιθικό μοντέλο. Φαίνεται να δημιουργήθηκε ένα μοναδικό σμήνος νεογέννητων αστεριών σε ένα μόνο επεισόδιο εντατικής αστρογέννησης, σε ένα συμπύκνωμα στο μοριακό νέφος. Αυτό το σμήνος αποδεσμεύτηκε από το αέριο (το 70% της συνολικής μάζας αστεριών και αερίου, με SFE 30%).

Το νεφέλωμα Ταραντούλα (σμήνος R136) και η διασπορά ταχυτήτων. Η δυναμική ισορροπία των νεαρών αστρικών σμηνών μεγάλης μάζας περιορίζει την επίδραση της διαστολής του αερίου τους. Αυτό το παρατηρούμε στο κεντρικό σμήνος R136 στο νεφέλωμα Ταραντούλα στο μικρό Μαγγελανικό νέφος. Η μάζα του είναι 100.000 ηλιακές και η ηλικία των αστεριών της κεντρικής περιοχής 3 εκατομμύρια έτη. Πρόκειται για ένα από τα σμήνη με την μεγαλύτερη μάζα, διπλάσια από το Arches. Η διασπορά ταχυτήτων των αστεριών τύπου O είναι μόλις στα 5 km/s, κάτι που επιβεβαιώνει την δυναμική ισορροπία του. Αντίθετα με ότι συμβαίνει συνήθως, δηλαδή τα σμήνη να ακολουθούν την διαστολή του αερίου, όπως παρατηρούμε για παράδειγμα στο σμήνος ONC, στο R136 η διασπορά του αερίου δεν επηρέασε την ισορροπία του σμήνους, με αποτέλεσμα αυτό να μην διαστέλλεται (χαμηλή διασπορά ταχυτήτων). Για να συμβεί αυτό πρέπει η αρχική μάζα ή/ και αστρική πυκνότητα να είναι πολύ μεγάλες (μονολιθικό μοντέλο).

Το NGC 3603, δομή και κινηματικές. Το κεντρικό νεαρό σμήνος HD97950 είναι ένα από τα κοντινότερα (7 kpc από τον Ήλιο) και ίσως το καλύτερα μελετημένο νεαρό αστρικό σμήνος. Η λαμπρότητά του είναι 10000- 20000 ηλιακές και έχουμε υπολογίσει με ακρίβεια την αστρική πυκνότητα και την διασπορά ταχυτήτων στο κέντρο του. Οι ιδιότητες της δομής και των κινηματικών του σμήνους παραπέμπουν στο μονολιθικό μοντέλο.

Η περίπτωση του ιεραρχικού σχηματισμού σμηνών μεγάλης μάζας. Η περίπτωση του NGC 3603

Ενώ το μονολιθικό μοντέλο ταιριάζει με τις ιδιότητες των νεαρών αστρικών σμηνών μεγάλης μάζας του Γαλαξία μας, δεν μπορεί από μόνο του να δικαιολογήσει πως συνδέονται οι ομαλές εσωτερικές ιδιότητες αυτών των σμηνών με την άμορφη, με νήματα ή/ και με συμπυκνώματα δομή των γιγάντιων μοριακών νεφών και της κατανομής των εμβαπτισμένων αστεριών σε αυτά. Ακόμα και σμήνη με ανεπτυγμένους πυρήνες και άλως παρουσιάζουν υπό- σμήνη. Αυτά μπορεί να εμφανιστούν και να μεταναστεύσουν μέσω διαχωρισμού μάζας, σχηματίζοντας ένα

μεγάλης μάζας νεαρό αστρικό σμήνος, σε χρονοδιάγραμμα μερικών εκατομμυρίων ετών. Αυτή η σύντομη ιεραρχική συγχώνευση μπορεί να συνδέσει τις αρχικές μονολιθικές συνθήκες, που μπορούν να εξηγήσουν τις ιδιότητες των πολύ νεαρών αστρικών σμηνών μεγάλης μάζας που παρατηρούμε σήμερα, με τις ιδιότητες των πυκνών περιοχών αστρογέννησης στα μοριακά νέφη.

Γενικές ιδιότητες εξέλιξης των υπό- σμηνών

Τα υπό- σμήνη μπαίνουν το ένα μέσα στο άλλο και αργότερα, με πολύπλοκο τρόπο, συγχωνεύονται. Σχηματίζεται η άλως του σμήνους. Η τελική αστρική μάζα του σμήνους διαμορφώνεται αφού περάσει από την φάση των υπό- σμηνών (SUB, sub clusters) στην φάση πυρήνα- άλω (CH, core- halo). Το αρχικό μέγεθος των υπό- σμηνών καθορίζει το χρονοδιάγραμμα της παραπάνω εξέλιξης. Το δυναμικό χρονοδιάγραμμα (να έρθει το σμήνος σε βαρυτική ισορροπία) είναι καθοριστικό για την μορφολογία του. Ένα πολύ εκτεταμένο σμήνος μπορεί να παραμείνει στην πρώτη φάση, δηλαδή με υπό- σμήνη, για δεκάδες εκατομμύρια χρόνια. Ένα σφαιρικού σχήματος σμήνος μεγάλης μάζας μπορεί να περάσει την παραπάνω εξέλιξη σε μόλις 1 εκατομμύρια έτη.

Για το HD97950, το κεντρικό σμήνος του NGC 3603, πρέπει να ισχύει η παραπάνω περίπτωση. Δηλαδή σε ένα εκατομμύριο έτη να απέκτησε μορφολογία CH.

Έχουμε τα παρακάτω συμπεράσματα

.Ένα σύστημα υπό- σμηνών, που σχηματίστηκαν σε μια περιοχή ακτίνας 2 pc και με συνολική μάζα 10000 ηλιακές, συγχωνεύτηκε στο 1 εκατομμυρίων ετών σφαιρικού σχήματος σμήνος τύπου CH, HD97950. Αυτό μπορεί να συμβεί σε συνθήκες έντονης αστρογέννησης σε ένα συμπύκνωμα στο μοριακό νέφος.

.Τα νήματα μοριακού αερίου ή τα σημεία που τέμνονται αυτά καθορίζουν τα αρχικά μεγέθη των υπό- σμηνών. Η πυκνότητα της αστρικής μάζας στο κέντρο ενός σμήνους καθορίζεται από την συνολική αστρική μάζα που εμπλέκεται στην διαδικασία σχηματισμού υπό- σμηνών.

.Τα σμήνη με μεγάλη πυκνότητα προέρχονται από <ξηρή>, δηλαδή χωρίς την σημαντική παρουσία μοριακού αερίου ανάμεσα στα αστέρια, συγχώνευση υπό- σμηνών (τα αστέρια έχουν ήδη διαχωριστεί από το αέριο).

.Η εικόνα του HD97950 παραπέμπει σε 70% εξάλειψη του αερίου στο σμήνος. Φαίνεται ότι η αποτελεσματικότητα αστρογέννησης (SFE, star formation efficiency) ξεπερνάει τοπικά κατά πολύ το 30%. Αυτό όμως είναι στην πραγματικότητα ένα φαινόμενο της πληθυσμιακής ανακατανομής κατά την συνένωση των υπό- σμηνών και δεν αντικατοπτρίζει τις συνθήκες αστρογέννησης.

Το σμήνος Pismis στο NGC 6357 έχει ηλικία 1-3 εκατομμύρια έτη και περιέχει υπό- σμήνη που προέρχονται από μια περιοχή ακτίνας 1 pc. Κάτι παρόμοιο παρατηρήσαμε και στο σύμπλεγμα W3. Το σμήνος HD97950 στο NGC3603 έχει βιώσει μονολιθική εξέλιξη και βίαιη (μέσω βαρυτικών επιδράσεων) εξάλειψη του αερίου του. Η μονολιθική μορφή του οφείλεται στην εγγύτητα των λιγότερο πυκνών υπό- σμηνών,

που τα ανάγκασε να ενωθούν ταχύτατα, ή υπήρχε εξαρχής. Προέρχεται από ένα μοναδικό γεγονός αστρογέννησης με μικρή διάρκεια (100.000 έτη).

Σφαιρωτά σμήνη και αρχική αστρική μάζα (IMF)

Υπολογίζουμε ότι στον γαλαξία μας υπάρχουν 160 σφαιρωτά σμήνη. Τα περισσότερα είναι πολύ μεγάλης ηλικίας (13 δις ετών). Τα σφαιρωτά αποτελούν μια ξεχωριστή κατηγορία σμηνών από τα, συνήθως μικρής ηλικίας, ανοιχτά σμήνη. Οι (αστρικές) μάζες των αστρικών σμηνών γενικά κυμαίνονται από μερικές δεκάδες ως εκατοντάδες χιλιάδες ηλιακές μάζες, όπως τα μικρής ηλικίας τεράστια σμήνη σε γαλαξίες υπό αλληλεπίδραση. Ο σχηματισμός αστρικών σμηνών είναι μια συνεχής διαδικασία στους γαλαξίες. Τα σφαιρωτά προέρχονται από τα πολύ μεγάλης μάζας νεαρά αστρικά σμήνη.

Τα σμήνη χωρίζονται σε 3 κατηγορίες. Τα μικρής μάζας (μερικές δεκάδες ηλιακές μάζες) που δεν περιέχουν αστέρια τύπου O, που σημαίνει ότι χάνουν το αέριό τους αδιαβατικά (χωρίς την συμβολή από δυνατούς αστρικούς ανέμους και βίαιες εκρήξεις σουπερνόβα). Τα μεσαίας μάζας σμήνη (100- 100.000 ηλιακές μάζες) περιέχουν από 1 ως αρκετά αστέρια O, που φωτιονίζουν το αέριο εξωθώντας το. Η τρίτη κατηγορία περιλαμβάνει τα μεγάλης μάζας σμήνη (πάνω από 100.000 ηλιακές μάζες σε αστρική μάζα). Αυτά συγκρατούν βαρυτικά ακόμα και το φωτιονισμένο αέριο για μεγάλο χρονικό διάστημα. Να θυμίσουμε ότι η εξώθηση του αερίου συμπαρασύρει αστέρια και συμβάλλει στον διαμελισμό ενός σμήνους. Η τελευταία κατηγορία περιέχει τα σμήνη που θα εξελιχτούν σε σφαιρωτά (με σφαιρική δομή και μεγάλη συνοχή, που δεν χάνουν εύκολα αστέρια, αλλά μόνο αν βρεθούν σε πυκνές σε ύλη περιοχές ενός γαλαξία).

Παρατηρούμε ότι τα σφαιρωτά με μικρή αστρική συγκέντρωση έχουν απολέσει ένα σημαντικό μέρος από τα αστέρια μικρής μάζας τους, κάτι που οφείλεται στον διαχωρισμό αστρικής μάζας (mass segregation). Τα μικρής μάζας αστέρια εξωθήθηκαν προς την άλω του σμήνους με αποτέλεσμα αρκετά από αυτά να διαφύγουν από τα σφαιρωτά λόγω βαρυτικών παρενοχλήσεων από το περιβάλλον. Αυτό το φαινόμενο μας εξηγεί τους 2 αστρικούς πληθυσμούς που παρατηρούμε στην γαλαξιακή άλω και μας δείχνει την εξέλιξη αυτών των σφαιρωτών κατά το πρώτο 1 δις έτη τους, όταν εισήλθαν στην γαλαξιακή άλω.

Η IMF των σφαιρωτών του Γαλαξία μας με μεγάλη συγκέντρωση αστεριών παρουσιάζεται <βαριάς κορυφής>, δηλαδή με μεγάλη αναλογία αστεριών μεγάλης μάζας. Σε αυτό συμβάλλει και η μικρή τους μεταλλικότητα (αρχαία σμήνη), που δεν ευνοεί την δημιουργία αστεριών μικρής μάζας. Η IMF είναι κανονική για σφαιρωτά που δημιουργήθηκαν με πυκνότητα αστρογέννησης μικρότερη από 0,1 ηλιακή μάζα/κυβικό pc ανά έτος. Πολλά πυκνά σφαιρωτά έχουν παρόμοιες ιδιότητες με τα UCD (Ultra compact dwarfs), τους πολύ πυκνούς νάνους γαλαξίες.

Το συμπέρασμα είναι ότι τα σφαιρωτά δημιουργούνται από μεγάλης μάζας σμήνη με πολύ πυκνό μείγμα αστεριών- πλάσματος για τα πρώτα εκατομμύρια έτη, σε γαλαξίες έντονης αστρογέννησης. Να σημειώσουμε ότι σε πολλά σφαιρωτά έχουμε

ανακαλύψει την ύπαρξη 2 αστρικών πληθυσμών, με διαφορές στην χημική τους σύσταση (στις αναλογίες μερικών στοιχείων α). Η επικρατέστερη θεωρία είναι ότι ο δεύτερος πληθυσμός εμπλουτίστηκε από τις ατμόσφαιρες των ερυθρών γιγάντων του πρώτου.

Συμπεράσματα για τα εμβαπτισμένα σε αέριο σμήνη και τα σμήνη χωρίς αέριο

Για την κατανόηση της δημιουργίας των πολύ νεαρών αστρικών σμηνών μεγάλης μάζας μας λείπουν γνώσεις όπως για την ανάδραση μέσω ακτινοβολίας και μαγνητικών πεδίων. Είδαμε ότι τα μονολιθικά μοντέλα συμφωνούν με τα δεδομένα από τις παρατηρήσεις. Συμπεραίνουμε ότι τα πολύ νερά αστρικά σμήνη μεγάλης μάζας (VYMC) σχηματίζονται από την συγχώνευση υπό- σμηνών σε σύντομο χρονικό διάστημα. Παρατηρούμε κάποια VYMC να πετυχαίνουν την γρήγορη εξάλειψη του αερίου ενώ κάποια άλλα να παραμένουν εμβαπτισμένα για μερικά εκατομμύρια έτη. Ένα τέτοιο παράδειγμα αποτελεί το W3M, η πιο εμβαπτισμένη περιοχή του συμπλέγματος αστρογέννησης W3/W4/W5, στα 2 kpc απόσταση από τον ήλιο. Από τα αστέρια τύπου O του W3M συμπεραίνουμε την ηλικία του στα 2- 3 εκατομμύρια έτη. Αυτό σημαίνει ότι η παρουσία αστεριών OB δεν αρκεί από μόνη της για την γρήγορη εξάλειψη του αερίου. Μπορεί να έχουν σημασία οι ιδιότητες του αερίου, όπως για παράδειγμα η μεταλλικότητα. Η αυξημένη μεταλλικότητα του αερίου επιτρέπει στους αστρικούς ανέμους να το εξωθήσουν πιο εύκολα. Παρατηρούμε ότι τα σμήνη που προέρχονται από μια πυκνή, αλλά καθόλου εκτεταμένη περιοχή του μοριακού νεφελώματος απομακρύνουν ευκολότερα το αέριό τους (σμήνος RCW38), λόγω μικρής αστρικής διασποράς, άρα αποτελεσματικότερου ιονισμού του αερίου από τα αστέρια τύπου OB. Τέτοιες περιοχές είναι οι διασταυρώσεις νημάτων των νεφελωμάτων. Η εξέλιξη ενός νεαρού σμήνους μεγάλης μάζας φαίνεται να καθορίζεται από τις αρχικές συνθήκες του όπως η έκτασή του.

Η αστρογέννηση αποτελεί μια με τοπικά χαρακτηριστικά και χρονικά συσχετισμένη διαδικασία. Η διαδικασία της αστρογέννησης έχει ως αποτέλεσμα την συνεχή διασπορά της μάζας των εμβαπτισμένων σμηνών. Το ανώτερο όριο της μάζας των σμηνών καθορίζεται από τον γαλαξιακό ρυθμό αστρογέννησης (SFR), δηλαδή το γαλαξιακό περιβάλλον. Τα νεαρά σμήνη με την πιο ακραία μεγάλη μάζα θα σχηματίσουν τα σφαιρωτά σμήνη.

