

# ΠΟΛΥΠΛΟΚΑ ΑΣΤΡΙΚΑ ΣΜΗΝΗ

## Πρόλογος

Μέχρι πριν 10 χρόνια πιστεύαμε ότι τα αστρικά σμήνη αποτελούνται από έναν <απλό> αστρικό πληθυσμό. Πιστεύαμε ότι όλα τα αστέρια σε ένα σμήνος έχουν παρόμοια ηλικία, και ότι σχηματίστηκαν σε μικρό χρονικό εύρος από το ίδιο νεφέλωμα.

Σήμερα δεν θεωρούμε πια τα αστέρια των σμηνών απλούς αστρικούς πληθυσμούς. Βρίσκουμε διαφορές των ηλικιών και της μεταλλικότητας στα αστέρια ενός σμήνους. Σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη ενός σμήνους έχουν τα διπλά συστήματα αστεριών. Παρατηρούμε στο διάγραμμα H/R των σμηνών να παρουσιάζεται εκτεταμένη περιοχή αποκοπής (εκτροπής), δηλαδή να αφήνουν την κυρία ακολουθία αστέρια διαφορετικής μάζας την ίδια χρονική περίοδο. Αυτό μπορεί να γίνει μόνο αν τα μεγάλης μάζας αστέρια σχηματίστηκαν αργότερα. Ή πρέπει να υπάρχει ένας πληθυσμός αστεριών με πολύ ταχέα περιστροφή.

Το σενάριο μοναδικού αστρικού πληθυσμού στα σμήνη υποστηρίζει ότι στο κέντρο ενός πυκνού νεφελώματος επικρατεί η βαρύτητα, με αποτέλεσμα την κατάρρευση τμημάτων του νεφελώματος και τον σχηματισμό αστεριών. Μόλις δημιουργηθούν τα πρωταστέρια, δεν αφήνουν να καταρρεύσει περισσότερο αέριο προς την κεντρική περιοχή ενός νεφελώματος, αλλά το απομακρύνουν μέσω των αστρικών ανέμων τους. Αυτή η διαδικασία, που ενισχύεται από τις εκρήξεις σουπερνόβα II, έχει ως αποτέλεσμα την παύση της αστρογέννησης. Έτσι ένας απλός αστρικός πληθυσμός έχει αστέρια παρόμοιας ηλικίας και μεταλλικότητας (και αφθονίας σε ήλιον). Αυτό το σενάριο αμφισβητείται επειδή ανακαλύπτουμε πολλαπλούς αστρικούς πληθυσμούς σε αστρικά σμήνη.

## Αστρική εξέλιξη και πληθυσμοί

Τα αστρικά σμήνη στον Γαλαξία μας είναι κυρίως νεαρής ηλικίας, μερικών εκατοντάδων εκατομμυρίων ετών. Μετά διαλύονται σε μεμονωμένα αστέρια. Υπάρχουν εξαιρέσεις, δηλαδή σμήνη (μεγάλης μάζας) ηλικίας δις ετών, όπως το M67.

Τα σφαιρωτά σμήνη έχουν ηλικία συγκρίσιμη με αυτή του Γαλαξία. Περιέχουν εκατοντάδες χιλιάδες αστέρια και έχουν σφαιρική εμφάνιση. Βρίσκονται στην γαλαξιακή άλω, αντίθετα με τα νεαρά ανοιχτά σμήνη στις σπείρες του Γαλαξία. Δεν είναι βέβαιο ότι τα σφαιρωτά και τα ανοιχτά σμήνη έχουν κοινή προέλευση. Θα πρέπει να έχει ένα νεαρό σμήνος πολύ μάζα ώστε να μην διαλυθεί και να επιβιώσει ως σφαιρωτό. Στον Γαλαξία μας παρατηρούνται ελάχιστα σμήνη ενδιάμεσης ηλικίας (μερικών δις ετών) που θα μπορούσαν να εξελιχτούν σε σφαιρωτά. Σμήνη νεαρής ηλικίας και μεγάλης μάζας (YMC, young massive clusters) παρατηρούμε σε άλλους γαλαξίες. Στο μεγάλο

Μαγγελανικό νέφος υπάρχει το NGC1818, που μπορεί να εξελιχτεί σε σφαιρωτό.

### **Η περιοχή εκτροπής και η φάση του υπό- γίγαντα**

Όταν ένα αστέρι έχει συντήξει όλο το υδρογόνο στον πυρήνα του σε ήλιον, αρχίζει να συρρικνώνεται υπό την πίεση της βαρύτητας. Απελευθερώνει βαρυτική ενέργεια που θερμαίνει τον φλοιό γύρω από τον πυρήνα, με αποτέλεσμα την έναρξη σύντηξης υδρογόνου σε φλοιό γύρω από τον πυρήνα. Έτσι σταματάει η κατάρρευση και το κέλυφος διαστέλλεται προς τα έξω. Στον πυρήνα η θερμοκρασία δεν είναι ακόμα αρκετά μεγάλη ώστε να συντήξει το ήλιον, με αποτέλεσμα ο πυρήνας να συνεχίσει την συρρίκνωση και να γίνεται όλο και πιο πυκνός. Τότε το αστέρι φτάνει στο σημείο εκτροπής από την κυρία ακολουθία και εξελίσσεται σε υπό- γίγαντα. Η ακτίνα του διαστέλλεται και μειώνεται η επιφανειακή θερμοκρασία του. Το αστέρι αποκτάει πιο ψυχρή επιφανειακή θερμοκρασία (γίνεται πιο κόκκινο). Τα αστέρια μικρής μάζας (ως 2,3 ηλιακές μάζες) παρουσιάζουν σημαντική αύξηση της λαμπρότητας στο σημείο εκτροπής, επειδή η καύση στον φλοιό προκαλεί αύξηση του ρυθμού σύντηξης. Στο διάγραμμα κινείται προς τα δεξιά. Αυτή η φάση αστρικής εξέλιξης είναι πολύ σύντομη. Μετά το αστέρι θα μπει στον κλάδο των γιγάντων.

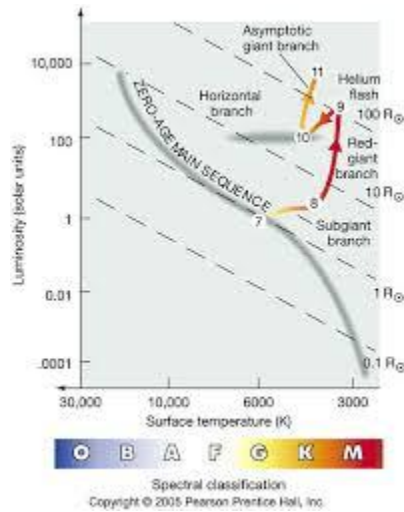
### **Η φάση του ερυθρού γίγαντα**

Η καύση υδρογόνου στον φλοιό τον μετατρέπει σε φλοιό ηλίου. Το ήλιον καταρρέει προς τον πυρήνα. Αυτός συνεχίζει να συρρικνώνεται με αποτέλεσμα να μεγαλώνει η πυκνότητά του και η μάζα του. Η συρρίκνωση της αυξημένης μάζας του απελευθερώνει περισσότερη βαρυτική ενέργεια ενισχύοντας την καύση υδρογόνου στον φλοιό. Σε αυτή τη φάση σχεδόν όλος ο φλοιός παρουσιάζει συναγωγή (convection). Συνολικά το 70% του αστεριού παρουσιάζει συναγωγή. Η λαμπρότητα του αστεριού αυξάνεται ανάλογα την μάζα του πυρήνα από ήλιον, φτάνοντας τις 1000- 10000 φορές την λαμπρότητα που είχε το αστέρι στην κύρια ακολουθία.

Στον πυρήνα η πυκνότητα είναι τόσο μεγάλη ώστε η ύλη (ήλιον) να είναι εκφυλλισμένη. Ο πυρήνας γίνεται ισόθερμος και εκλύει νετρίνα, ψύχοντας την ύλη γύρω από αυτόν. Το κέλυφος συνεχίζει να διαστέλλεται και να ψύχεται. Έτσι το αστέρι κατευθύνεται δεξιά στο διάγραμμα H/R. Η ακτίνα του μεγαλώνει μερικές εκατοντάδες φορές σε σχέση με την ακτίνα του στην κύρια ακολουθία.

Η συμπεριφορά ενός ισόθερμου εκφυλλισμένου πυρήνα από ήλιον είναι πολύπλοκη. Αν η μάζα του είναι μικρότερη από την κρίσιμη (0,45 ηλιακές) η συρρίκνωση δεν θα αυξήσει την θερμοκρασία. Αν υπερβαίνει αυτό το όριο (που αντιστοιχεί σε αρχική μάζα του αστεριού 1,3 ηλιακές) η θερμοκρασία του πυρήνα θα αυξηθεί. Όταν φτάσει τους 100 εκατομμύρια βαθμούς θα αρχίσει η καύση του ήλιου. Αυτή η διαδικασία είναι πολύ σύντομη και ονομάζεται helium flash. Εκεί είναι και το τέλος της φάσης του ερυθρού γίγαντα. Να σημειώσουμε ότι τα παραπάνω δεν ισχύουν για αστέρια μεγαλύτερης

μάζας από 2,3 ηλιακές, που δεν βιώνουν helium flash (λόγω μικρότερης πυκνότητας του αστρικού πυρήνα).



### Απλός αστρικός πληθυσμός

Αυτός ο όρος φέρει την παραδοχή ότι όλα τα αστέρια σε ένα σμήνος δημιουργήθηκαν από ένα μόνο επεισόδιο αστρογέννησης, και έχουν παρόμοια ηλικία και μεταλλικότητα. Τα αστέρια δεν γεννιούνται ταυτόχρονα στην ίδια περιοχή στο νεφέλωμα, άρα υπάρχει ένα εύρος ηλικίας (1 εκατομμύριο έτη) και χώρου (5 με 200 pc). Έτσι κυμαίνεται και λίγο η μεταλλικότητα. Με τα παραπάνω κριτήρια αναμένουμε να έχουμε μια στενή κύρια ακολουθία στο διάγραμμα H/R των αστεριών ενός σμήνους και ένα περιορισμένο, καλά ορισμένο σημείο εκτροπής. Αυτό θα εξελιχτεί σε ένα στενό κλάδο υπό-γιγάντων και στενό κλάδο ερυθρών γιγάντων, στενό οριζόντιο κλάδο και ερυθρό συμπύκνωμα (red clump, όπου βρίσκονται τα αστέρια μεγάλης μεταλλικότητας του οριζόντιου κλάδου).

### Μη απλός αστρικός πληθυσμός (πολλαπλός)

Οι αστρικοί πληθυσμοί που δεν προέρχονται από ένα μοναδικό γεγονός αστρογέννησης ονομάζονται πολλαπλοί πληθυσμοί. Για παράδειγμα, ο Γαλαξίας δεν είναι απλός αστρικός πληθυσμός. Τα αστέρια του διαφέρουν σε ηλικία και μεταλλικότητα. Ο Γαλαξίας αποτελείται από πολλούς απλούς αστρικούς πληθυσμούς.

Οι μηχανισμοί που μπορεί να κάνουν τον πληθυσμό ενός σμήνους να είναι πολλαπλός είναι

.Μερικά αστρικά σμήνη (ιδίως σφαιρωτά) μπορεί να προέρχονται από νάνους γαλαξίες που συγχωνεύτηκαν με τον δικό μας. Απέμειναν μόνο οι πυρήνες τους (οι παλιρροιακές δυνάμεις απογύμνωσαν τους νάνους από τα εξωτερικά τους αστέρια) που αποτελούνται από πολλαπλούς αστρικούς πληθυσμούς.

.Μερικά σμήνη σχηματίζονται σε πυκνά αστρικά περιβάλλοντα (συμπλέγματα σμηνών). Μπορεί να ενωθούν σε 1 γιγάντιο σμήνος πολλαπλού πληθυσμού (NGC1023, NGC2419, NGC3603, Westerlund 1 και 2, R136).

.Τα αστέρια με μάζα μικρότερη από 8 ηλιακές θα περάσουν από τον ασυμπτωτικό κλάδο, απελευθερώνοντας μεγάλη ποσότητα χημικά εμπλουτισμένης ύλης (πλανητικό νεφέλωμα). Αυτό μπορεί να παραμείνει μέσα στο περιβάλλον του σμήνους και να πυροδοτήσει ένα δεύτερο επεισόδιο αστρογέννησης. Αυτό το υλικό κινείται πολύ πιο αργά από τα κρουστικά μέτωπα των σουπερνόβα, άρα η βαρύτητα του σμήνους μπορεί να το δεσμεύσει. Το ίδιο μπορεί να συμβεί και μέσω των αστρικών ανέμων των αστεριών με ταχεία περιστροφή. Το υλικό μπορεί να <μολύνει> αστέρια μικρότερης μάζας, εμπλουτίζοντάς τα σε ήλιον.

.Οι συγκρούσεις αστεριών και οι συγχωνεύσεις τους δημιουργούν BBS (Blue Straggler Stars), που εμφανίζονται φασματοσκοπικά ως ξεχωριστός αστρικός πληθυσμός.

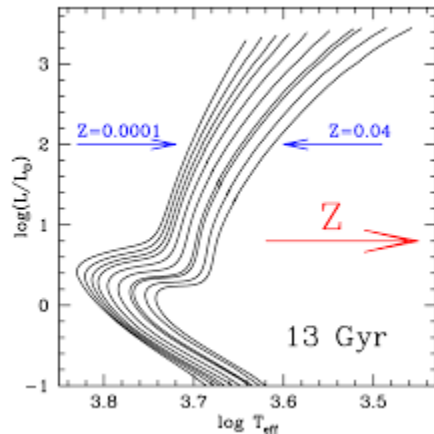
### **Οι πολλαπλοί αστρικοί πληθυσμοί (multiple stellar populations)- ιδιότητες**

Οι αστρικοί πληθυσμοί είναι συνήθως πολύπλοκοι, με διασπορά στο σημείο (περιοχή) εκτροπής από την κύρια ακολουθία. Παρατηρούμε τα εξής

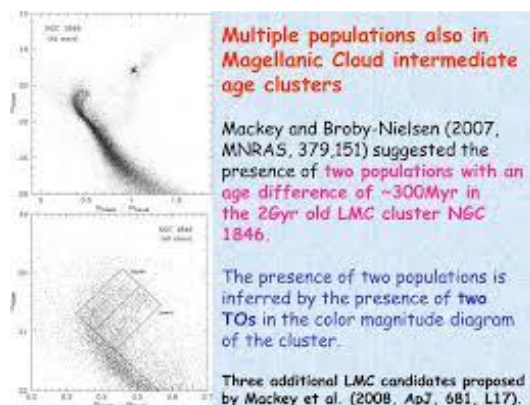
1) Αστρικούς πληθυσμούς με σημαντική διαφορά ηλικίας. Παρουσιάζουν μετατοπίσεις στην περιοχή εκτροπής και στον κλάδο των υπό- γιγάντων. Αυτό συμβαίνει γιατί τους παρατηρούμε να βρίσκονται σε διαφορετικό στάδιο αστρικής εξέλιξης. Υπάρχει αναλογία της λαμπρότητας στην περιοχή εκτροπής και της ηλικίας ενός πληθυσμού. Η θερμοκρασία (χρώμα) στην περιοχή εκτροπής μειώνεται (κοκκινίζει) με την αύξηση της ηλικίας του πληθυσμού, επειδή εγκαταλείπουν την κύρια ακολουθία αστέρια όλο και μικρότερης μάζας με την πάροδο του χρόνου. Χαρακτηριστική περίπτωση διαφοράς ηλικίας και αστρικής εξέλιξης ενός πληθυσμού αποτελούν οι Blue Straggler Stars (BBS), αστέρια που προέρχονται από συνένωση 2 αστεριών.

2) Αστρικούς πληθυσμούς με διαφορετική αναλογία του στοιχείου ήλιον. Η αστρική επιφανειακή θερμοκρασία είναι ευαίσθητη στην αδιαφάνεια (ικανότητα της ακτινοβολίας να διαπερνάει ένα υλικό). Η αύξηση της αδιαφάνειας ενός αστεριού αυξάνει την απορρόφηση της ακτινοβολίας που προέρχεται από τον αστρικό πυρήνα, ιδίως της σκληρής ακτινοβολίας. Αυτό σημαίνει ελάττωση της επιφανειακής θερμοκρασίας του αστεριού, με αποτέλεσμα να εμφανίζεται μετατοπισμένο προς τα δεξιά στο διάγραμμα H/R σχετικά με την μάζα και ηλικία του. Η αστρική λαμπρότητα εξαρτάται επίσης από το μοριακό βάρος. Η αύξηση του μοριακού βάρους (εμπλουτισμός σε στοιχεία εκτός του υδρογόνου) σημαίνει ελάττωση του υδρογόνου στον πυρήνα, άρα αύξηση της θερμοκρασίας και πίεσης από τον πυρήνα, αλλά και του ρυθμού θερμοπυρηνικής σύντηξης, ώστε να ισορροπήσει βαρυτικά το αστέρι. Ο εμπλουτισμός σε ήλιον αυξάνει την αδιαφάνεια (λόγω μεγαλύτερης αδιαφάνειας του ήλιον από το υδρογόνο), όπως και το μοριακό βάρος. Ο αυξημένος ρυθμός σύντηξης ελαττώνει την παραμονή τους στην κύρια ακολουθία. Παρουσιάζονται με πιο καυτό σημείο εκτροπής

και κλάδο ερυθρών γιγάντων (αριστερά στο διάγραμμα), αλλά το σημείο εκτροπής είναι λίγο πιο αμυδρό, λόγω μικρότερης παραμονής στην κύρια ακολουθία. Επίσης παρατηρούμε αύξηση της λαμπρότητας στην απότομη κορύφωση (συμπύκνωμα) του κλάδου των ερυθρών γιγάντων (RGB bump, ένα εγγενές χαρακτηριστικό του κλάδου, σαν αυτός να κορυφώνεται σε μια πολύ συγκεκριμένη λαμπρότητα όταν ο φλοιός καύσης ηλίου επεκτείνεται μέχρι το εξωτερικό αστρικό κέλυφος).



3) Αστρικοί πληθυσμοί με διαφορετικές μεταλλικότητες. Η αύξηση της μεταλλικότητας αυξάνει την αδιαφάνεια, άρα μειώνει την επιφανειακή θερμοκρασία. Παρατηρούμε μετατόπιση θέσης στον κλάδο των κόκκινων γιγάντων. Έτσι αυτός ο κλάδος μας βοηθάει να συμπεράνουμε την μεταλλικότητα των αστρικών πληθυσμών.



### Οι αστρικοί πληθυσμοί στα σμήνη

Σχεδόν όλα τα αστέρια σχηματίζονται σε αστρικά σμήνη. Τα αστέρια από τα περισσότερα σμήνη θα διασκορπιστούν στον γαλαξία τους. Το σενάριο ενός μοναδικού αστρικού πληθυσμού υποστηρίζει ότι όλα τα αστέρια δημιουργήθηκαν σε

ένα σμήνος από ένα επεισόδιο αστρογέννησης (κατάρρευσης του νεφελώματος), επειδή ο αστρικός άνεμος, ιδίως των αστεριών μεγάλης μάζας, αλλά αργότερα και οι εκρήξεις σουπερνόβα, απομακρύνουν το αέριο από τα νεαρά αστρικά σμήνη εμποδίζοντας την δημιουργία νέου επεισοδίου αστρογέννησης. Αυτή η εξάλειψη του αερίου θα συμβεί σε σύντομο χρονικό διάστημα, πολύ μικρότερο από τον χρόνο διάσχισης του σμήνους (crossing time, ο χρόνος που απαιτείται ώστε ένα αστέρι να διασχίσει το σμήνος). Έτσι το εύρος ηλικιών ενός σμήνους κανονικά δεν ξεπερνάει τα λίγα εκατομμύρια έτη.

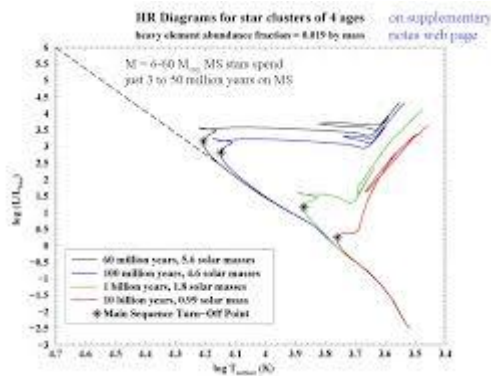
Μόνο αν το σμήνος έχει πολύ μεγάλη μάζα (10- 100 εκατομμύρια ηλιακές) θα δεσμεύσει βαρυντικά αυτό το αέριο ώστε να είναι διαθέσιμο για νέα αστρογέννηση. Τα αστέρια με μικρότερη μάζα από 8 ηλιακές απελευθερώνουν μεγάλη ποσότητα χημικά εμπλουτισμένης ύλης όταν βρεθούν στον ασυμπτωτικό κλάδο, ενισχύοντας έτσι μια δευτερογενής αστρογέννηση. Αυτό συμβαίνει τουλάχιστον 30 εκατομμύρια χρόνια μετά το πρώτο επεισόδιο αστρογέννησης. Σε αυτό το διάστημα τα σμήνη μικρότερης μάζας θα έχουν διασταλεί κατά πολύ και οι εκρήξεις σουπερνόβα θα έχουν απομακρύνει πολύ από το αέριό τους. Για να διατηρήσει ένα σμήνος το αέριο από τα αστέρια στον ασυμπτωτικό κλάδο πρέπει να έχει τόση μάζα ώστε η ταχύτητα διαφυγής να ξεπερνάει τα 100 km/s (ταχύτητα που μπορεί να φτάσει το παραπάνω αέριο). Στον Γαλαξία μας δεν έχουμε ανακαλύψει κάποιο ανοιχτό σμήνος με τόση μεγάλη μάζα. Αυτό σημαίνει ότι όλα τα ανοιχτά σμήνη του θα διαλυθούν κάποτε, αν δεν ενωθούν με άλλο σμήνος/νεφέλωμα. Σε άλλους γαλαξίες (γαλαξίες εκρηκτικής αστρογέννησης, starburst galaxies) έχουμε εντοπίσει νεαρά σμήνη τόσο μεγάλης μάζας. Αυτά θα εξελιχτούν σε σφαιρωτά σμήνη. Τα σφαιρωτά του Γαλαξία μας περιέχουν σήμερα το 10% της αρχικής μάζας τους, που σημαίνει ότι ο Γαλαξίας μας στην αρχική του φάση περιείχε νεαρά αστρικά σμήνη τεράστιας μάζας.

### **Πολύπλοκοι αστρικοί πληθυσμοί στα σμήνη**

Σχεδόν όλα τα ανοιχτά αστρικά σμήνη έχουν χημική ομοιογένεια (ίδιες αναλογίες χημικών στοιχείων στα αστέρια τους), που δείχνει την κοινή προέλευσή τους, από το ίδιο νεφέλωμα. Μία μέθοδος εκτίμησης της ηλικίας ενός άστρου είναι η μέτρηση της αναλογίας Λιθίου στην επιφάνειά του. Το Λίθιο καταστρέφεται στα αστέρια και με την ηλικία ελαττώνεται η αναλογία του σε αυτά. Για την μέτρηση της ηλικίας των αστεριών ενός σμήνους χρησιμοποιούμε τις ισόχρονες και την περιοχή εκτροπής από την κυρία ακολουθία στο διάγραμμα χρώματος/ λαμπρότητας. Όμως αυτές οι μετρήσεις δείχνουν μεγάλη απόκλιση στις αστρικές ηλικίες ενός σμήνους, ακόμα και για τα κοντινά και καλά μελετημένα σμήνη Υάδες και Πλειάδες. Παρατηρούμε εύρη ηλικιών εκατοντάδων εκατομμυρίων ετών. Οι μάζες τους δεν δικαιολογούν πολλαπλά επεισόδια αστρογέννησης.

Στα σφαιρωτά σμήνη παρατηρούμε διασπορά στην αναλογία του N, αλλά και των Na, O, Mg, Al. Φαίνεται αυτή η διασπορά να δημιουργείται από την ικανότητα αυτών των σμηνών μεγάλης μάζας να συγκρατήσουν τα αέρια που απελευθερώνονται κατά την αστρική εξέλιξη, αλλά και να συσσωρεύουν εμπλουτισμένο αέριο από το περιβάλλον τους. Οι διαφορετικοί αστρικοί πληθυσμοί τους εντοπίζονται και από την κινηματική τους (θέση στο σμήνος, ιδίες ταχύτητες των αστεριών). Ο εμπλουτισμός σε Fe προέρχεται από τις SN Ia, χονδρικά 1 δις έτη μετά τον σχηματισμό των αστεριών του σμήνους.

Σε πολλά σμήνη παρατηρούμε να έχουν από 2 τουλάχιστον κλάδους γιγάντων κάθε κατηγορίας, που κανονικά σημαίνει δύο τουλάχιστον αστρικούς πληθυσμούς. Ο νεαρότερος πληθυσμός δείχνει και μεγαλύτερη χωρική συγκέντρωση στο σμήνος.



## Η ταχεία περιστροφή ως εναλλακτικό σενάριο του εύρους αστρικής ηλικίας στα αστρικά σμήνη

Η προφανής εξήγηση της εκτεταμένης περιοχής (αντί σημείου) εκτροπής από την κύρια ακολουθία (extended main sequence turn off regions) στα αστρικά σμήνη είναι μια παρατεταμένη αστρογέννηση. Σε σμήνη του μικρού και μεγάλου Μαγγελανικού νέφους αυτή πρέπει να ξεπερνάει τα 300 εκατομμύρια έτη. Υπάρχει ένα σενάριο που υποστηρίζει ότι τα σμήνη μεγάλης μάζας διατηρούνε αέριο στο εσωτερικό τους, επειδή η ταχύτητα διαφυγής υπερβαίνει την ταχύτητα του αερίου, που τείνει να διαφύγει μέσω των αστρικών ανέμων και της αστρικής εξέλιξης στον ασυμπτωτικό κλάδο. Αυτή η θεωρία προβλέπει ότι μπορεί να σημειωθεί δευτερογενής αστρογέννηση από αέριο που παγιδεύτηκε στην βαρυτική έλξη ενός σμήνους. Όμως μετά από κάποια εκατομμύρια έτη το αέριο θα εξατληθεί από την αστρογέννηση και τις συνεχόμενες εκρήξεις σουπερνόβα. Το πρόβλημα είναι ότι δεν παρατηρούμε αέριο στα νεαρά σμήνη μεγάλης μάζας (YMC, young massive clusters). Ακόμα, αν υπήρχε διασπορά ηλικιών 300 εκατομμυρίων ετών σε ένα αστρικό σμήνος, θα παρατηρούσαμε και πολλά αστέρια προ κύριας ακολουθίας (τα <νεογέννητα>). Μία άλλη εξήγηση της

εκτεταμένης περιοχής εκτροπής είναι οι συγχωνεύσεις νεαρών αστρικών σμηνών που έχουν κάποια διαφορά ηλικίας.

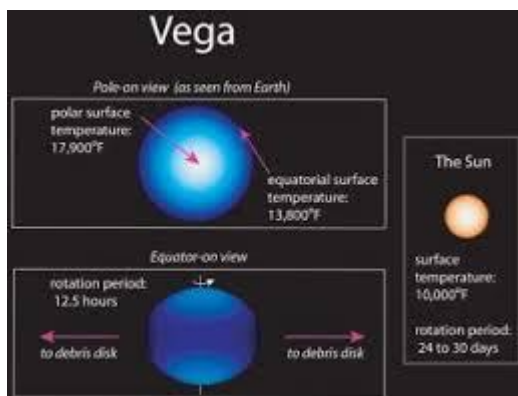
Μια διαφορετική εκδοχή είναι να επηρεάζεται η θέση στο διάγραμμα ενός μέρους των αστεριών ενός σμήνους από φυσικές διεργασίες, που οφείλονται στα διπλά αστρικά συστήματα. Η αστρική περιστροφή επηρεάζει την θέση του σημείου εκτροπής στο διάγραμμα ως εξής. 1) Η αυξημένη φυγόκεντρος ελαττώνει την επιφανειακή αστρική βαρύτητα, μειώνοντας την επιφανειακή θερμοκρασία. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ένα ταχέως περιστρεφόμενο αστέρι ίδιας φάσης εξέλιξης (ίδιας ηλικίας, μάζας και μεταλλικότητας) να εμφανίζεται πιο κόκκινο από ένα άλλο με αργή περιστροφή. Ακόμα, η ελαττωμένη βαρύτητα σημαίνει μικρότερη λαμπρότητα, επειδή ελαττώνεται και ο ρυθμός σύντηξης στον αστρικό πυρήνα. Οι περιοχές κοντά στον αστρικό ισημερινό επηρεάζονται περισσότερο από την ταχεία περιστροφή, με αποτέλεσμα να εμφανίζονται πιο κόκκινες από τους πόλους του αστεριού. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται βαρυτική ελάττωση φωτός (gravity darkening). 2) Η αυξημένη περιστροφή διαστέλλει την περιοχή συναγωγής του αστρικού πυρήνα (convective core), με αποτέλεσμα να εμπλουτίζεται ο πυρήνας σε υδρογόνο από τα εξωτερικά αστρικά στρώματα, και να παρατείνεται η παραμονή του αστεριού στην κύρια ακολουθία. Έτσι ένα ταχέως περιστρεφόμενο αστέρι έχει παρόμοιο χρόνο παραμονής στην κύρια ακολουθία με ένα μικρότερης μάζας, με αποτέλεσμα η περιοχή εκτροπής από την κύρια ακολουθία να παρουσιάζει διασπορά αστρικών μαζών και λαμπροτήτων. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται μείξη λόγω περιστροφής (rotational mixing).

Τα αστέρια με μάζα μικρότερη από 1,2 ηλιακές δεν αναμένεται να αποκτήσουν ταχεία περιστροφή, λόγω ενός μηχανισμού που ονομάζεται μαγνητική πέδηση (magnetic braking). Με αυτόν τον μηχανισμό το αστρικό μαγνητικό πεδίο μεταφέρει την επιπλέον στροφορμή μακριά από το αστέρι. Ενώ τα αστέρια μεγαλύτερης μάζας από τύπου F0 μπορούν να αναπτύξουν ταχύτητα περιστροφής 100- 200 km/s, τα αστέρια τύπου G0 φτάνουν σε ταχύτητα περιστροφής ως 12 km/s. Πολλά αστέρια τύπου O, B έχουν διαπιστωθεί ως ταχέως περιστρεφόμενα. Να σημειώσουμε ότι τα αστέρια μεγάλης μάζας ανήκουν κατά μεγάλο ποσοστό σε διπλά συστήματα, με αποτέλεσμα τα περισσότερα να επηρεάζονται από συνοδό αστέρα. Οι παραπάνω 2 επιδράσεις της ταχύτητας περιστροφής στην αστρική εξέλιξη έχουν αντίθετα αποτελέσματα, με αποτέλεσμα να αλληλοεξουδετερώνονται σε μεγάλο βαθμό. Είναι ασαφές κατά πόσο επηρεάζει ο καθένας από τους 2 μηχανισμούς την αστρική εξέλιξη. Στο διάγραμμα χρώματος/ λαμπρότητας Color / Magnitude (αντί του H/R) η βαρυτική ελάττωση φωτός μετατοπίζει την περιοχή εκτροπής των ταχέως περιστρεφόμενων αστεριών προς τα δεξιά (κόκκινο) ενώ η μείξη περιστροφής προς τα αριστερά (μπλε).

Ενδιαφέρον έχει να παρατηρήσουμε τι συμβαίνει στον κλάδο των υπό- γιγάντων. Η μαγνητική ελάττωση φωτός δεν έχει ως αποτέλεσμα την διασπορά μάζας στην περιοχή εκτροπής. Μόλις τα αστέρια εγκαταλείψουν την κύρια



ακολουθία παρουσιάζουν επιβράδυνση της περιστροφής τους, λόγω διατήρησης της στροφορμής σε μεγαλύτερη διάμετρο. Έτσι ο κλάδος των υπό- γιγάντων πρέπει να έχει στενότερο εύρος από την περιοχή εκτροπής. Από την άλλη, η περιστροφική μείξη έχει ως αποτέλεσμα την διασπορά μάζας στην περιοχή εκτροπής, προκαλώντας διαπλάτυνση της περιοχής εκτροπής αλλά και του κλάδου υπό- γιγάντων. Έτσι ο κλάδος των υπό- γιγάντων μπορεί να μας δείξει ποιος από τους 2 μηχανισμούς επικρατεί. Ένας αστρικός πληθυσμός ταχέως περιστρεφόμενων αστεριών επηρεάζεται περισσότερο από την βαρυτική ελάττωση φωτός, ενώ ένας πληθυσμός αστεριών με αργή περιστροφή επηρεάζεται περισσότερο από την περιστροφική μείξη. Σε μερικά αστρικά σμήνη (NGC 411, 1651, 1806, 1846) παρατηρούμε πλάτυνση του κλάδου των υπό- γιγάντων προς το μπλε και στένωση προς το κόκκινο, που σημαίνει επιβράδυνση της περιστροφής των αστεριών στον κλάδο (τα πιο εξελιγμένα αστέρια στον κλάδο παρουσιάζουν πιο αργές περιστροφές). Φαίνεται να επικρατεί η βαρυτική ελάττωση φωτός, άρα τα περισσότερα αστέρια αυτών των σμηνών έχουν μεγάλες ταχύτητες περιστροφής. Στο ηλικίας 150 εκατομμύρια έτη σμήνος NGC 1856 του μεγάλου Μαγγελανικού νέφους φαίνεται να υπάρχει διασπορά ηλικίας 80 εκατομμύρια έτη, ή τα 2/3 των αστεριών του παρουσιάζουν ταχέα περιστροφή.



## Οι πολλαπλοί αστρικοί πληθυσμοί στα παλαιά σφαιρωτά σμήνη

Υπάρχουν 2 σενάρια για τους αστρικούς πληθυσμούς στα σφαιρωτά. Το πρώτο (πρωταρχικό, primordial) υποστηρίζει ότι πρόκειται για αρχικούς διαφορετικούς αστρικούς πληθυσμούς με διαφορετικές χημικές ιδιότητες λόγω χημικής ανομοιομορφίας του σμήνους και το δεύτερο (εξελικτικό, evolutionary) ότι προέρχονται από έναν μοναδικό αστρικό πληθυσμό και εμφανίζονται ως πολλαπλοί αστρικοί πληθυσμοί λόγω ιδιαιτεροτήτων της αστρικής εξέλιξης.

Το πρώτο σενάριο προβλέπει τον χημικό εμπλουτισμό από το αέριο που υπήρχε μέσα στα σφαιρωτά στην αρχική τους φάση. Ακόμα, χημικό εμπλουτισμό μέσω ταχέως περιστρεφόμενων αστεριών μεγάλης μάζας, διπλών αστεριών

μεγάλης μάζας και αστεριών που εξελίχθηκαν μετά τον κλάδο των γιγάντων. Μία ανάλυση του σεναρίου προβλέπει ότι τα σφαιρωτά με αρχική μάζα 1 δις ηλιακές δέσμευσαν βαρυτικά τις εκροές ύλης από τα αστέρια μεγάλης μάζας, και των SN II. Αυτά με μάζα μερικές εκατοντάδες εκατομμύρια ηλιακές μπόρεσαν να δεσμεύσουν μέρος των αστρικών ανέμων των αστεριών μεγάλης μάζας, ενώ τα σφαιρωτά με μικρότερη αρχική μάζα δέσμευσαν μόνο το αέριο από τους ανέμους των αστεριών μικρής μάζας. Στον ασυμπτωτικό κλάδο αποτυπώνεται ο εμπλουτισμός / δευτερογενής αστρικός πληθυσμός μετά τις μαζικές εκρήξεις SN II (αυτές οι εκρηκτικές καταρρεύσεις πυρήνων αστεριών μεγάλης μάζας συμβαίνουν λίγα εκατομμύρια έτη μετά την δημιουργία των αστεριών ενός σμήνους). Όμως ο δεύτερος/ εμπλουτισμένος αστρικός πληθυσμός στα σφαιρωτά έχει τόσο μεγάλη αναλογία στον συνολικό αστρικό πληθυσμό τους, που θα έπρεπε τα σφαιρωτά να έχουν 100 φορές πιο μεγάλη αρχική μάζα (πρωτογενή αστρικό πληθυσμό) από την σημερινή. Επίσης αυτό το σενάριο του αυτό-εμπλουτισμού δεν δικαιολογεί τις αναλογίες των He, Na, O που παρατηρούμε στους αστρικούς πληθυσμούς των σφαιρωτών. Παρατηρούμε ότι ανεξάρτητα αρχικής μάζας, τα σφαιρωτά έχουν εξαλείψει το αέριό τους μετά από 2- 3 εκατομμύρια έτη. Αυτό το αποτέλεσμα των παρατηρήσεων μας δείχνει ότι τα σφαιρωτά (με την σημερινή μάζα τους) δεν μπορούν να συγκρατήσουν το αέριό τους, αλλά δεν αποκλείει να συσσωρεύσουν αέριο από την γειτονιά τους, κατά την κίνησή τους στον γαλαξιακό χώρο. Μία εναλλακτική μορφή του σεναρίου είναι οι συγχωνεύσεις σμηνών, κάτι που δεν απαιτεί την τεράστια αρχική μάζα ενός σφαιρωτού. Τα σμήνη σε πυκνά αστρικά περιβάλλοντα μπορούν να συγχωνευτούν, με αποτέλεσμα την παρουσία πολλαπλών αστρικών πληθυσμών σε ένα σμήνος. Όμως τα σφαιρωτά εμφανίζονται κυρίως στις γαλαξιακές άλως, σε πολύ αραιά περιβάλλοντα.

Το εξελικτικό σενάριο αιτιολογεί την διακύμανση των χημικών αφθονιών στα αστέρια των σφαιρωτών (που αποτυπώνεται ως πολλαπλός αστρικός πληθυσμός στο H/R) ως ίδια εξέλιξη των αστεριών. Υλικό από το εσωτερικό των αστεριών, που δημιουργήθηκε μέσω του κύκλου CNO, εμπλούτισε τις αστρικές επιφάνειες. Υπάρχουν πολλοί γνωστοί μηχανισμοί <ανακατέματος> του αστρικού υλικού με την επιφάνειά του. Έχουμε διαπιστώσει μια σχέση της αναλογίας Na- O με την λαμπρότητα ενός αστέρα στον RGB. Ακόμα και τα αστρικά μαγνητικά πεδία μπορούν να είναι σημαντικά για τον εμπλουτισμό της αστρικής επιφάνειας. Το πρόβλημα αυτού του σεναρίου είναι ότι τα σφαιρωτά έχουν γερασμένους αστρικούς πληθυσμούς τύπου G, K που δεν έχουν τόσο μεγάλη θερμοκρασία στον πυρήνα για να δικαιολογήσουν την διασπορά αναλογίας Na- O που παρατηρούμε. Μία πιθανή λύση είναι η παρουσία και εξέλιξη των διπλών αστεριών. Τα αστέρια μεγάλης μάζας μπορούν να συγχωνευτούν σε Blue Stragglers stars (BSS). Αυτά παρουσιάζουν ταχέα περιστροφή και μεγάλη ανάμειξη υλικού, με αποτέλεσμα να έχουν διακύμανση χημικών ιδιοτήτων στον RGB. Μπορούν

να δημιουργήσουν την διασπορά αναλογίας Na- O που παρατηρούμε. Αυτή η εκδοχή του σεναρίου εξαρτάται από την αναλογία των διπλών αστεριών μεγάλης μάζας, και πόσα από αυτά θα συγχωνευτούν. Παρατηρούμε ότι τα περισσότερα από τα αστέρια σε ένα νεαρό σμήνος μεγάλης μάζας (YMC) είναι διπλά.

## Η αναλογία διπλών αστεριών στα νεαρά σμήνη μεγάλης μάζας (YMC).

Τουλάχιστον τα μισά αστέρια ανήκουν σε διπλά συστήματα. Η δυναμική των διπλών αστεριών σε ένα σμήνος έχει μεγάλη σημασία για την εξέλιξή του. Τα διπλά αστέρια έχουν ως σύστημα μεγαλύτερη μάζα από τα μεμονωμένα αστέρια με συνέπεια να αποτελούν καλούς ανιχνευτές δυναμικού διαχωρισμού αστρικής μάζας. Τα αστέρια μεγαλύτερης μάζας τείνουν να συσσωρεύονται στο κέντρο ενός σμήνους (2 body relaxation, επακόλουθο της βαρυτικής αλληλεπίδρασης σε πυκνό αστρικό περιβάλλον). Τα αστέρια μικρότερης μάζας καταλαμβάνουν πιο εξωτερικές τροχιές γύρω από το κέντρο μάζας ενός σμήνους. Επίσης τα διπλά συστήματα που τα 2 αστέρια έχουν μεγάλη απόσταση μεταξύ τους (wide binaries, χαλαρά διπλά) θα διαχωριστούν σε μεγάλο βαθμό. Αυτό το φαινόμενο θα συμβεί περισσότερο στο πυκνό εσωτερικό των σμηνών, και ενισχύεται αν υπάρχει μια μαύρη τρύπα μεσαίου μεγέθους στο κέντρο ενός σμήνους, όπως συμβαίνει στα σφαιρωτά σμήνη.

Στα παλαιά σφαιρωτά υπάρχει μια εξισορρόπηση κινητικής ενέργειας. Στον Γαλαξία μας συναντάμε λίγα YMC, όπως το Westerlund 1. Βρίσκονται κοντά στο γαλαξιακό κέντρο, με αποτέλεσμα να δέχονται ισχυρές βαρυτικές παρενοχλήσεις και να μην αποτελούν αντιπροσωπευτικά δείγματα εξέλιξης σμηνών και των διπλών συστημάτων τους. Έτσι προτιμούμε τα YMC του μεγάλου Μαγγελανικού νέφους, αλλά λόγω απόστασης δεν έχουμε ανάλυση των διπλών αστρικών συστημάτων.

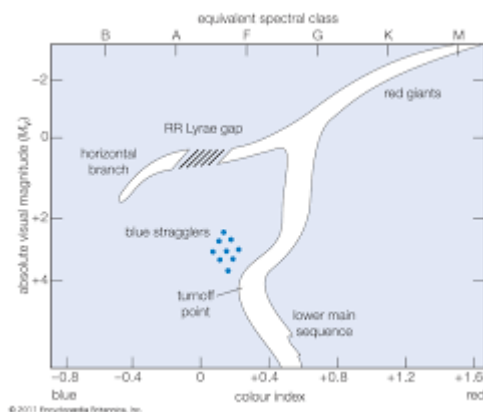
Μία μέθοδος μελέτης της αναλογίας διπλών αστεριών είναι η μελέτη του διαγράμματος χρώματος/ λαμπρότητας. Τα διπλά αστέρια, όταν δεν αναλύονται αλλά εμφανίζονται ως μια πηγή φωτός, φαίνονται πιο κόκκινα και πιο λαμπρά. Έτσι καταλαμβάνουν ανάλογη θέση στο διάγραμμα. Μελετήσαμε 2 σμήνη του μεγάλου Μαγγελανικού νέφους, το NGC 1805 και το NGC 1818, και συγκεκριμένα τα αστέρια τύπου F. Αυτά είναι αρκετά λαμπρά, έχουν σημαντικό πληθυσμό διπλών αστεριών και η διασπορά διπλών- μονών αστεριών στην κυρία ακολουθία είναι ευδιάκριτη. Αυτό δεν συμβαίνει σε αστέρια μεγαλύτερης μάζας, όπου μας μπερδεύουν και οι BBS. Στο NGC 1805 η αναλογία διπλών ελαττώνεται απότομα από το κέντρο του σμήνους προς τα έξω, ως τις 3 φορές την διάμετρο του πυρήνα του σμήνους, και μετά αυξάνεται ομαλά, ισορροπώντας στις εξωτερικές περιοχές του σμήνους. Εδώ βλέπουμε τα αποτελέσματα του διαχωρισμού μάζας, τα διπλά (μεγάλη μάζα) κινήθηκαν προς το κέντρο του σμήνους. Ενώ στο NGC 1818 παρουσιάζεται μια μονότονη αύξηση με την ακτίνα των αστρικών τροχιών γύρω από το κέντρο του σμήνους. Πρέπει να υπήρχε και άλλη επίδραση που είχε ως αποτέλεσμα τα 2 σμήνη με παρόμοιες ηλικίες να παρουσιάζουν διαφορετική διασπορά των διπλών συστημάτων. Μάλλον

στο NGC 1818 τα χαλαρά διπλά διαχωρίστηκαν ήδη. Στα σμήνη μεγάλης μάζας τα χαλαρά διπλά διαλύονται και τα ισχυρά (hard) γίνονται ισχυρότερα ή ακόμη και συγχωνεύονται. Η διάλυση των χαλαρών συστημάτων συμβαίνει σε χρόνο πριν την δυναμική ισορρόπηση του σμήνους. Η διασπορά αστρικών ταχυτήτων στο πρώτο σμήνος είναι 10 φορές μικρότερη από ότι στο δεύτερο. Αυτή η διαφορά έφερε και την διαφορετική εξέλιξη στην αναλογία των διπλών αστεριών στα 2 σμήνη. Στο NGC 1818 τα περισσότερα διπλά διαχωρίστηκαν πριν φτάσουν στην κεντρική περιοχή του σμήνους.

Η αναλογία διπλών αστεριών είναι μεγαλύτερη σε αυτά τα 2 νεαρά σμήνη από ότι στα σφαιρωτά, επειδή στα τελευταία πολλά διπλά συστήματα έχουν διαταραχτεί βαρυτικά.

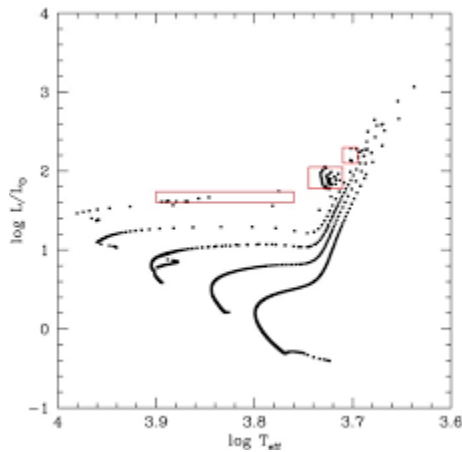
### Σχηματισμός και εξέλιξη των BSS (Blue Straggler Stars) στα σφαιρωτά σμήνη

Όταν τοποθετήσουμε έναν αστρικό πληθυσμό στο διάγραμμα χρώματος- λαμπρότητας (CMD) αναμένουμε τα αστέρια με μεγαλύτερη μάζα από αυτήν των αστεριών στο σημείο εκτροπής (MSTO) να εξελίσσονται εκτός κυρίας ακολουθίας (MS), με την παραδοχή ότι αυτά τα αστέρια εξελίσσονται ανεξάρτητα χωρίς δυναμική αλληλεπίδραση με άλλα αστέρια. Αυτή η παραδοχή δεν ισχύει για τα αστρικά σμήνη όπου πολλά αστέρια είναι υπό αλληλεπίδραση με άλλα, ειδικά στα σφαιρωτά σμήνη (λόγω μεγάλης αστρικής πυκνότητας και ηλικίας). Είδαμε ότι σε ένα σφαιρωτό σμήνος τα χαλαρά διπλά διαλύονται και τα ισχυρά μεταναστεύουν προς το κέντρο. Τελικά πολλά διπλά αστέρια συγχωνεύονται σε BSS. Έτσι διακρίνουμε μια πλάτυνση της κυρίας ακολουθίας προς το μπλε (μεγάλη μάζα). Ένα άλλο σενάριο δημιουργίας BSS είναι η απευθείας σύγκρουση 2 ανεξάρτητων αστεριών λόγω μεγάλης αστρικής πυκνότητας.



Η αναλογία των BSS στην κύρια ακολουθία με αυτά που έχουν εξελιχτεί σε γίγαντες είναι σημαντική για την εξέλιξη του σμήνους. Σε σφαιρωτά νεαρά δυναμικά

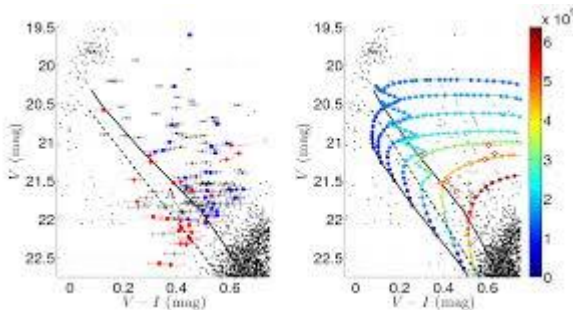
ηλικίας (ηλικία όπου δεν έχουν σημειωθεί ακόμα πολλές ανακατατάξεις στον αστρικό πληθυσμό και δεν έχει ισορροπήσει το σύστημα), όπως το Ω Κενταύρου, η διαδικασία της συγχώνευσης διπλών επικρατεί στην δημιουργία των BSS, ενώ σε μέσης δυναμικής ηλικίας όπως το 47 Tucana το πυκνό αστρικό περιβάλλον στο κέντρο του σμήνους ευνοεί την σύγκρουση αστεριών και στα εξωτερικά στρώματα του σμήνους οι BSS δημιουργούνται μέσω συγχωνεύσεων. Σε σφαιρωτά μεγάλης δυναμικής ηλικίας (M30) παρατηρούμε 2 ακολουθίες από BSS που αντιπροσωπεύουν τους 2 τρόπους δημιουργίας τους. Πάλι παρατηρούμε ότι στο εσωτερικό του σμήνους επικρατεί η δημιουργία μέσω συγκρούσεων. Οι BSS που δημιουργήθηκαν μέσω συγκρούσεων δεν έχουν χημική ομοιογένεια (τα 2 αστέρια που συγκρούστηκαν δεν δημιουργήθηκαν μαζί) και παρουσιάζονται πιο μπλε και πιο λαμπροί. Όμως επειδή οι BSS δημιουργούνται σε μεγάλο χρονικό εύρος, δεν αποτυπώνονται οι 2 τρόποι δημιουργίας τους στο διάγραμμα με την εμφάνιση του κάθε ένα σε διακριτή περιοχή, αλλά οι περιοχές τους αλληλεπικαλύπτονται.



(Οι περιοχές σε κόκκινο πλαίσιο δείχνουν τους BSS)

Σε μερικά σφαιρωτά ο αριθμός των BSS που ανακαλύπτουμε ξεπερνάει τα 100. Έχουμε μερικά συμπεράσματα από τις παρατηρήσεις των 150 περίπου BSS που ανακαλύψαμε στο σφαιρωτό Hodge 11 του μεγάλου Μαγγελανικού νέφους, ηλικίας 5 δις ετών περίπου. Η πυκνή σε άστρα κεντρική του περιοχή μας δείχνει ότι εκεί κυριαρχεί η δημιουργία BSS μέσω συγκρούσεων. Το αντίθετο συμβαίνει στις πιο αραιές εξωτερικές περιοχές του. Στο διάγραμμα χρώματος- λαμπρότητας παρατηρούμε ότι στην περιοχή ανάμειξης των 2 διαδικασιών δημιουργίας BSS έχουμε περισσότερα αστέρια στην δεξιά επάνω περιοχή (συγκρούσεων) από την αριστερή κάτω περιοχή (συγχωνεύσεων). Ένα ζήτημα είναι ότι μπορεί να παρατηρούμε μερικά BSS στην κεντρική περιοχή του σμήνους, αλλά αυτό να οφείλεται στην δισδιάστατη εικόνα που έχουμε, άρα αυτά στην πραγματικότητα να βρίσκονται στις εξωτερικές περιοχές και να φαίνονται

σαν προβολή στο εσωτερικό του σμήνους. Ακόμα, στο διάγραμμα απεικονίζεται και η εξέλιξη των BSS. Τα BSS της αριστερής κάτω περιοχής εξελίσσονται προς τα δεξιά πάνω (κλάδο των γιγάντων), ενώ φυσικά δεν συμβαίνει το αντίθετο.



Στο αριστερό διάγραμμα χωρίζονται οι BSS συγχώνευσης (κόκκινοι αριστερά κάτω) και συγκρούσεων (δεξιά πάνω, μπλε) του Hodge 11. Στο δεξί διάγραμμα έχουμε τις ισόχρονες BSS διαφορετικών μαζών ( 1 ως 1,6 ηλιακές μάζες).

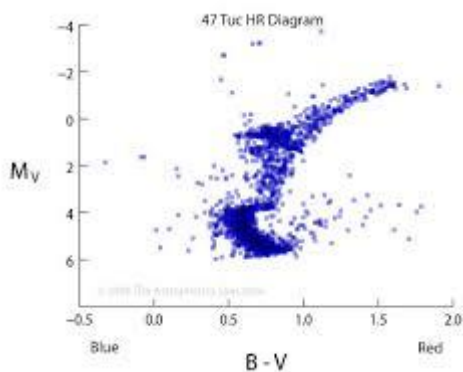
Συμπεραίνουμε ότι η αλληλεπίδραση διπλών αστέρων είναι ένα πιθανό σενάριο που εξηγεί τους φαινομενικά 2 διαφορετικούς αστρικούς πληθυσμούς (από διαφορετικά επεισόδια αστρογέννησης). Η ισχύς αυτού του σεναρίου κυμαίνεται ανάλογα το ποσοστό των BSS στην περιοχή εκτροπής του διαγράμματος CMD (ιδιαίτερα υψηλό, στο 10%, για το Hodge 11).

## Πολλαπλοί αστρικοί πληθυσμοί στον κλάδο των γιγάντων των σφαιρωτών σμηνών του Γαλαξία μας.

Το σφαιρωτό σμήνος 47 Τουκάνα παρουσιάζει 2 διακριτές κύριες ακολουθίες στο CMD, μια με πληθυσμό φτωχό σε CN, πλούσιο σε O και φτωχό σε Na και μια με πληθυσμό πλούσιο σε CN, φτωχό σε O και πλούσιο σε Na. Ο τελευταίος πληθυσμός προέρχεται από τον πρωτεύον αστρικό πληθυσμό. Παρομοίως, στο M3 βρέθηκαν 2 κλάδοι ερυθρών γιγάντων (RGB), ένας φτωχός σε N και Na, και ένας πλούσιος σε αυτά τα στοιχεία. Το 47 Τουκάνα είναι ένα σφαιρωτό με εμφανή διχοτόμηση της κυρίας ακολουθίας στην αφθονία του Αζώτου. Παρουσιάζει πολλαπλούς κλάδους των υπογιγάντων (SGB) και ερυθρών γιγάντων. Οι κλάδοι RGB και HB (οριζόντιος κλάδος) δείχνουν έναν πληθυσμό εμπλουτισμένο σε ήλιον και Na, αποτέλεσμα εμπλουτισμού μέσω αστρικών ανέμων εξελιγμένων αστεριών.

Όπως αναφέραμε και στην αρχή, πιθανοί μηχανισμοί εμπλουτισμού του δευτερέου αστρικού πληθυσμού είναι η εκτίναξη ύλης από ταχέως περιστρεφόμενα αστέρια μεγάλης μάζας, η αλληλεπίδραση διπλών αστεριών μεγάλης μάζας και η απώλεια ύλης από τα αστέρια του ασυμπτωτικού κλάδου (AGB). Ο δευτερεύον πληθυσμός παρουσιάζει μεγαλύτερη συγκέντρωση προς το κέντρο του σμήνους του.

Τα αστέρια του SGB των εξωτερικών περιοχών του σμήνους είναι πιο λαμπρά και με μικρότερη διασπορά λαμπρότητας από αυτά της κεντρικής περιοχής. Τα πιο μπλε αστέρια (πιο καυτά) του RGB βρίσκονται στις εξωτερικές περιοχές του σμήνους και τα πιο κόκκινα στην κεντρική περιοχή του. Η φαινόμενη μη συνοχή του πληθυσμού στο εσωτερικό του σμήνους οφείλεται κατά πολύ στην προβολή αστεριών των εξωτερικών περιοχών, λόγω δισδιάστατης εικόνας. Μια σημαντική διασπορά ηλικιών, τουλάχιστον 250 εκατομμύρια έτη, των 2 αστρικών πληθυσμών μπορεί να εξηγήσει αυτόν το εμπλουτισμό. Οι ισόχρονες των πλούσιων σε ήλιον και μέταλλα αστεριών ( $Z= 0,0051$ ) δείχνουν ηλικία 12,25 δις έτη έναντι 12,75 δις έτη για τα φτωχά σε ήλιον και μέταλλα αστέρια ( $Z= 0,0033$ ). Αυτή η διαφορά των 500 εκατομμυρίων ετών δικαιολογεί την μορφή των κλάδων SGB και RGB των 2 πληθυσμών. Τα αστέρια του δευτερόν πληθυσμού έχουν αναλογία στον RGB από 10% στις εξωτερικές περιοχές του σμήνους ως 90% στο κέντρο του. Αυτό δείχνει ότι κατά μεγάλο μέρος τα αστέρια του πρωτεύον πληθυσμού αποδεσμεύτηκαν από το σμήνος. Το σμήνος μπορεί να διασπάλλει λόγω πίεσης από τις εκρήξεις SN II ή/ και να δέχτηκε ισχυρές παλλοιροικές διαταραχές από το περιβάλλον του στον Γαλαξία μας. Τα αστέρια του δευτερεύον πληθυσμού σχηματίστηκαν στις εσωτερικές περιοχές του σμήνους, όπου είναι ισχυρά βαρυτικά δεσμευμένα στο σμήνος. Το Τουκάννα 47 είχε αρκετή μάζα ώστε να συγκρατήσει στο εσωτερικό του την ύλη από τις εκρήξεις SN II. Η μεγάλη ηλικία του όμως έχει σβήσει τα ίχνη από τα αστέρια μεγάλης μάζας του πρωτεύον πληθυσμού, στα πρώτα 10 εκατομμύρια έτη του σμήνους.



Τελικά είχε εκτεταμένη διάρκεια η αστρογέννηση στα σμήνη μέσης ηλικίας?

Ένα μεμονωμένο επεισόδιο αστρογέννησης έχει διάρκεια 1- 3 εκατομμύρια έτη. Όμως παρατηρούμε εκτεταμένες περιοχές εκτροπής της κυρίας ακολουθίας στα διαγράμματα χρώματος- λαμπρότητας σε σμήνη ηλικίας 1- 2 δις ετών των Μαγγελανικών νεφών. Η προφανής εξήγηση είναι η αστρογέννηση να διάρκεσε μερικές εκατοντάδες εκατομμύρια έτη. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με την αδυναμία αυτών των σμηνών να δεσμεύσουν το απαραίτητο αέριο

για την αστρογέννηση για μεγάλο χρονικό διάστημα. Αναλύσαμε τα σενάρια που υπάρχουν ώστε να ξεπεραστεί αυτό το παράδοξο.

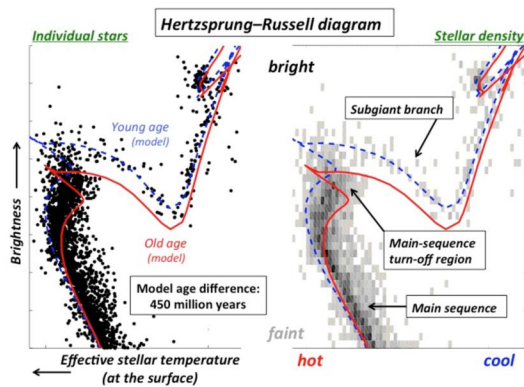
Τα σενάρια που επικρατούν είναι η συννένωση σημνών που δικαιολογεί το εύρος αστρικών ηλικιών και τα ταχέως περιστρεφόμενα αστέρια, που εμφανίζονται μετατοπισμένα στο διάγραμμα λόγω ελάττωσης της λαμπρότητας και της επιφανειακής θερμοκρασίας (βαρυτικής ελάττωσης της λαμπρότητας, gravity darkening). Πρόκειται για διπλά αστέρια που απέκτησαν ταχέα περιστροφή, λόγω συγχώνευσης ή αλληλεπίδρασης μέσω δίσκου συσσώρευσης. Το πρώτο σενάριο δεν μπορεί να αιτιολογήσει την καθολικότητα του φαινομένου της διασποράς ηλικιών (σχεδόν όλα τα σμήνη θα έπρεπε να προέρχονται από συνενώσεις). Ακόμα, τα νεαρά σμήνη μεγάλης μάζας (YMC) δεν παρουσιάζουν σημαντική διασπορά ηλικιών.

Το σενάριο της ταχέας περιστροφής αμφισβητείται επειδή έχει το μειονέκτημα ότι θεωρητικά το φαινόμενο της επιμήκυνσης της παραμονής στην κύρια ακολουθία, λόγω εμπλουτισμού του αστρικού πυρήνα σε υδρογόνο από τα εξωτερικά αστρικά στρώματα, αναιρεί το φαινόμενο της βαρυτικής ελάττωσης της λαμπρότητας. Η περιοχή εκτροπής στο διάγραμμα θα έπρεπε να είναι πολύ πιο στενή. Στην πραγματικότητα επικρατεί η ταχέα περιστροφή και σε μερικές περιπτώσεις, όπως στο NGC 1755 YMC, εξηγεί την διχοτόμηση της κυρίας ακολουθίας.

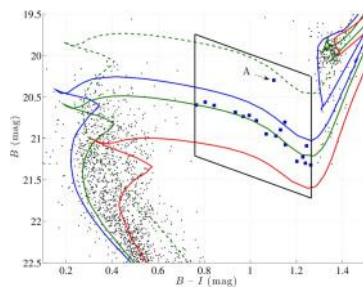
Η μελέτη του κλάδου των υπογιγάντων (SGB) σε σμήνη με εκτεταμένη περιοχή εκτροπής μπορεί να βοηθήσει ώστε να βγουν πιστά συμπεράσματα. Αυτή η φάση ακολουθεί την εκτροπή από την κυρία ακολουθία. Αν σε ένα σμήνος είχαμε εκτεταμένη περίοδο αστρογέννησης, ο κλάδος θα είχε μεγάλο πλάτος, γιατί σε αυτή την φάση τα αστέρια ακόμα δεν έχουν απολέσει σημαντικό μέρος από την μάζα τους. Αν η διασπορά της περιοχής εκτροπής οφείλεται σε ταχέως περιστρεφόμενα αστέρια, ο κλάδος των υπογιγάντων θα παρουσιάσει στένωση, επειδή τα αστέρια σε αυτόν επιβραδύνουν την περιστροφή τους, λόγω αύξησης της ακτίνας τους και διατήρηση της στροφορμής.

Το NGC1651 παρουσιάζει 2 ισόχρονες, μια μπλε με ηλικία 1,73 δις έτη και μια κόκκινη με ηλικία 2,18 δις έτη, παρόμοιας μεταλλικότητας. Παρατηρούμε στένωση της πλατιάς περιοχής εκτροπής της κυρίας ακολουθίας στην κλάδο των υπογιγάντων, που σημαίνει ότι δεν υπάρχει πραγματικό εύρος ηλικιών.





Το NGC 411 παρουσιάζει το ίδιο φαινόμενο. Μια φαινόμενη διαφορά αστρικών ηλικιών στα 800 εκατομμύρια έτη, που σημαίνει πλατιά περιοχή εκτροπής αλλά στενό κλάδο υπογιγάντων και παρόμοια μεταλλικότητα. Ο κλάδος των υπογιγάντων ανταποκρίνεται σε αστρικό πληθυσμό ηλικίας 1,78 δις ετών. Παρατηρούμε και έναν δευτερεύον πληθυσμό, αστεριών μεγαλύτερης μάζας, στο ερυθρό συμπύκνωμα (RC, red clump, ένα συμπύκνωμα αστεριών στον οριζόντια κλάδο των γιγάντων που πέρασαν τη φάση σύντηξης helium flash, μια ταχεία καύση ήλιου στον εκφυλισμένο αστρικό πυρήνα). Ένας μοναδικός αστρικός πληθυσμός δεν μπορεί να εξελιχτεί με τέτοιο τρόπο, αλλά απαιτούνται αστέρια ταχέως περιστροφής.



Στο πλαίσιο φαίνεται ο στενός κλάδος των υπογιγάντων και πάνω δεξιά το κόκκινο συμπύκνωμα.

Και στο NGC 419 εμφανίζεται εκτεταμένη περιοχή εκτροπής, που αναλογεί σε διασπορά ηλικιών 700 εκατομμύρια έτη. Ο κλάδος των υπογιγάντων παρουσιάζει πλάτυνση μόνο προς το μπλε. Από τα 3 σμήνη μόνο αυτό είχε αρκετή μάζα να συγκρατήσει τους αστρικούς ανέμους εξελιγμένων αστεριών, ώστε να παρατείνει την αστρογέννηση. Όμως οι αλληπάλληλες εκρήξεις SN δεν του επέτρεψαν να διατηρήσει το αέριο για χρονικό διάστημα ανάλογο της φαινόμενης διασποράς ηλικίας του.

Το επικρατέστερο σενάριο για τα 3 σμήνη είναι η ταχεία αστρική περιστροφή. Όταν τα αστέρια με ταχεία περιστροφή φτάσουν στην περιοχή εκτροπής (εξάντληση του υδρογόνου στον αστρικό πυρήνα), η διαστολή τους επιβραδύνει την περιστροφή (διατήρηση της στροφομής). Αν η ταχεία περιστροφή δεν έχει διασπάσει τον αστρικό πυρήνα (μέσω εμπλουτισμού με υδρογόνο από τα αστρικά εξωτερικά στρώματα), τότε αυτά εμφανίζονται να δημιουργούν ένα εύρος στην περιοχή εκτροπής. Όμως αυτή η παραδοχή δεν είναι

ρεαλιστική, αφού η ταχέα αστρική περιστροφή θα εμπλουτίσει και θα διασπάσει τον αστρικό πυρήνα, κάνοντας ένα αστέρι με ταχέα περιστροφή να εμφανιστεί πιο λαμπρό από ένα αργά περιστρεφόμενο αστέρι ίδιας μάζας. Αυτό το φαινόμενο εξηγεί την μόνο προς το μπλε πλάτυση του κλάδου των υπογιγάντων του NGC 419. Η πλάτυση της περιοχής εκτροπής και του κλάδου υπογιγάντων οφείλεται στον σημαντικό αριθμό ταχέως περιστρεφόμενων αστεριών που βρίσκονται στην περιοχή εκτροπής μαζί με τα αργά περιστρεφόμενα αστέρια διαφορετικής μάζας.

Να σημειώσουμε ότι στα γερασμένα σφαιρωτά σμήνη όλες οι περιοχές του διαγράμματος μετά την κυρία ακολουθία παρουσιάζουν πλάτυση (η περιοχή εκτροπής αλλά και όλοι οι κλάδοι). Στα σμήνη μεσαίας ηλικίας η πλάτυση της περιοχής εκτροπής οφείλεται σε διεργασίες αστρικής εξέλιξης και όχι σε πολλαπλούς αστρικούς πληθυσμούς.

## Συμπεράσματα

Αν τα σφαιρωτά σμήνη έχουν πράγματι πολλαπλούς αστρικούς πληθυσμούς, που σημαίνει ότι συγκράτησαν βαρυτικά το απαραίτητο αέριο για την παρατεταμένη αστρογέννηση, τότε οι μάζες των σημερινών νεαρών σμηνών δεν επαρκούν για την δημιουργία σφαιρωτών. Μια εκδοχή για τα σφαιρωτά είναι να πρόκειται για πυρήνες νάνων γαλαξιών που συγχωνεύτηκαν με τον δικό μας. Αυτή η θεωρία βοηθάει να εξηγήσουμε το παράδοξο των <χαμένων δορυφόρων> γαλαξιών. Η πιο πιστή κοσμολογική θεωρία (μοντέλο  $\Lambda$ CDM, ψυχρής σκοτεινής μάζας) προβλέπει την ύπαρξη πολύ περισσότερων νάνων γαλαξιών από ότι παρατηρούμε σήμερα. Είδαμε όμως να εμφανίζονται ως πολλαπλοί και οι αστρικοί πληθυσμοί σε σμήνη ηλικίας μερικών δις ετών και μικρότερης μάζας από τα σφαιρωτά. Εδώ μας δίνει πολύ καλά αποτελέσματα η θεωρία της μετατόπισης θέσεως στο διάγραμμα χρώματος/ λαμπρότητας των αστεριών με ταχέα περιστροφή. Τα αστέρια με ταχέα περιστροφή, προϊόντα αλληλεπίδρασης διπλών αστεριών, παρουσιάζουν διαφορετική λαμπρότητα, θερμοκρασία, αναλογία χημικών στοιχείων και έχουν μεγαλύτερη μάζα από τα μεμονωμένα αστέρια ίδιας αρχικής μάζας. Η αλληλεπίδραση των διπλών αστεριών διαμορφώνει την εικόνα του αστρικού πληθυσμού. Οι BSS (blue stragglers) μπορούν να θεωρηθούν δευτερεύον αστρικός πληθυσμός, με την έννοια ότι σχηματίζονται σε δεύτερη φάση από διπλά αστέρια ενός σμήνους. Τα αστρικά σμήνη κατά την αλληλεπίδραση με τον γαλαξία τους μπορούν να συσσωρεύσουν αέριο που θα οδηγήσει σε δευτερεύουσα αστρογέννηση, αλλά δεν μπορεί να εξηγηθεί έτσι η εικόνα της (φαινομενικά) παρατεταμένης για εκατοντάδες εκατομμύρια έτη αστρογέννησης. Σημαντική κατηγορία αστεριών για την μελέτη μας είναι τα αστέρια τύπου F με διάρκεια στην κύρια ακολουθία 2- 10 δις έτη. Τα αστέρια με ταχέα περιστροφή παρουσιάζουν πλάτυση των φασματικών γραμμών τους. Μια

μελέτη σε αυτή την κατεύθυνση θα μας έδινε σημαντικά αποτελέσματα σχετικά με τις ταχύτητες αστρικής περιστροφής στα σμήνη. Επίσης θα είχε ιδιαίτερο ενδιαφέρον η μελέτη νεαρών σμηνών πολύ μεγάλης μάζας σε γαλαξίες αστρογέννησης (starburst galaxies).