

## Διπλά αστέρια και αστρική εξέλιξη 3, αστρική και συμπαντική εξέλιξη

### Διπλά αστέρια και συνιστώσα αρχικής αστρικής μάζας (IMF, initial mass function)

Η IMF είναι μια συνισταμένη που μας δείχνει το πλήθος των αστεριών ανά αρχική μάζα τους σε ένα σύστημα, όπως ένας γαλαξίας. Το γενικό συμπέρασμα για το σημερινό σύμπαν είναι ότι το πλήθος των αστεριών είναι αντιστρόφως ανάλογο με την μάζα τους. Δεν υπάρχει απόλυτη IMF, αφού συνέχεια γεννιούνται και πεθαίνουν αστέρια, και τα αστέρια μικρής μάζας σχηματίζονται σε διαφορετικό χρονικό ορίζοντα από τα αστέρια μεγάλης μάζας. Η IMF ποικίλλει με την ένταση της αστρογέννησης (παρουσία μοριακών νεφελωμάτων πολύ μεγάλης μάζας) και την μεταλλικότητα ενός γαλαξία. Ακόμη και μέσα σε έναν γαλαξία υπάρχει διαφοροποίηση της IMF, ανάλογα την αστρογέννηση και την μεταλλικότητα κάθε περιοχής του.

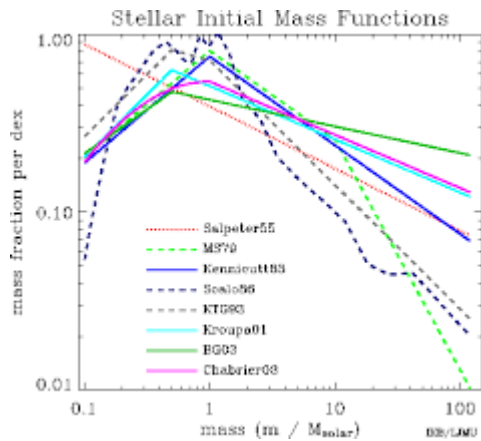
Η συνήθης αποτελεσματικότητα αστρογέννησης (star formation efficiency, πόσο από το διαθέσιμο υλικό θα καταρρεύσει σε αστέρια) ενός πυκνού νεφελώματος όπως το νεφέλωμα του Ωρίωνα είναι κοντά στο 33%. Τα νεαρά αστέρια παραμένουν ενσωματωμένα στα νεφελώματα για μικρό χρονικό διάστημα (600 χιλιάδες έτη), ακόμη και οι συναθροίσεις αστεριών μικρής μάζας T-Tauri (1 εκατομμύριο έτη). Η γρήγορη εξάλειψη του αερίου (τα 2/3 του αερίου δεν θα καταρρεύσουν σε αστέρια) συμβαίνει λόγω πίεσης των αστρικών ανέμων και στροβιλισμών. Έχει παρατηρηθεί ότι τα νεαρά αστρικά σμήνη διαστέλλονται κατά 10 φορές σε 1-3 εκατομμύρια έτη παρασέρνοντας και το υπόλοιπο αέριο. Όλα αυτά δείχνουν την δυσκολία ορισμού της IMF.

Η αστρική μάζα υπολογίζεται ως ανάλογη της λαμπρότητας. Έτσι η IMF εκτιμάται έμμεσα, από την αστρική λαμπρότητα, και μόνο για αστέρια κυρίας ακολουθίας. Όμως σε ένα νεαρό σμήνος τα αστέρια μεγάλης μάζας έχουν εξελιχτεί πριν τα αστέρια μικρής μάζας μπουν καν στην κύρια ακολουθία! Ακόμη, τα κενά στην κατανόηση της φυσικής των αστεριών (συναγωγή, ακτινοβολία, περιστροφή και μαγνητικά πεδία) δυσκολεύουν τον υπολογισμό της IMF.

Τα περισσότερα αστέρια με μάζα μεγαλύτερη από μερικές φορές την μάζα του ηλίου είναι σε διπλά συστήματα. Σε ένα σμήνος τα μισά περίπου αστέρια ανήκουν σε διπλά συστήματα. Αν τα αναλύσουμε σε μεμονωμένα αστέρια, η IMF <βαραίνει> ακόμη περισσότερο προς μικρότερες αστρικές μάζες.

Η IMF <βαραίνει> στην κορυφή της (top heavy, δηλαδή ενισχύεται στην κορυφή του διαγράμματος, όπου είναι τα αστέρια μεγάλης μάζας) όσο ελαττώνεται η μεταλλικότητα και όσο αυξάνεται η αστρική πυκνότητα. Δηλαδή στα νεφελώματα μικρής μεταλλικότητας σχηματίζονται περισσότερα αστέρια μεγάλης μάζας (σχεδόν όλα σε διπλά συστήματα),

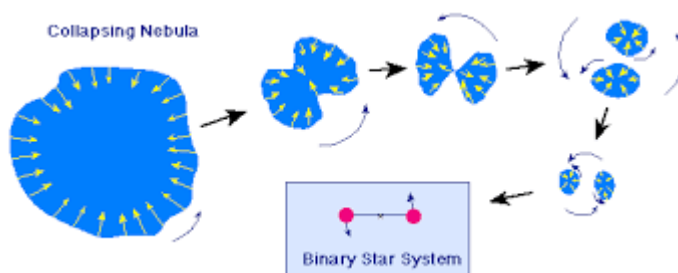
όπως και σε νεφελώματα μεγάλης μάζας. Αν ο ρυθμός αστρογέννησης φτάνει τις 0,1 ηλιακές μάζες το έτος για ένα σμήνος, τότε η IMF <βαραίνει> στην κορυφή της.



## Ο σχηματισμός των διπλών αστρικών συστημάτων, θεωρία και παρατήρηση

Ο σχηματισμός διπλών και πολλαπλών αστρικών συστημάτων αποτελεί μέρος της αστρογέννησης. Αν υποθέσουμε ότι τα αστέρια σε ένα σμήνος έχουν ίδιες ταχύτητες όμοιες με την ταχύτητα διαστολής του σμήνου (τα ανοιχτά σμήνη διαστέλλονται και διαμελίζονται), ο μόνος τρόπος να δημιουργηθεί ένα διπλό σύστημα αστεριών είναι το σύστημα να απολέσει κινητική ενέργεια προς ένα τρίτο αστέρι. Αυτό σημαίνει ότι η τοπική πυκνότητα σε αστέρια πρέπει να υπερβαίνει την μέση πυκνότητα του νεαρού σμήνου. Με αυτόν τον τρόπο μπορούν να δημιουργηθούν μόνο λίγα διπλά συστήματα, και αυτά στην πυκνή κεντρική περιοχή του σμήνου.

Εναλλακτικά, μπορεί δύο αστέρια να δημιουργηθούν σε απόσταση μόλις μερικών αστρικών διαμέτρων με αποτέλεσμα την μεταξύ τους ανάπτυξη παλιρροϊκών δυνάμεων. Αυτός είναι ένας σημαντικός μηχανισμός δημιουργίας στενών διπλών ( με ισχυρή σύνδεση). Ακόμα και σε απόσταση 100 AU μεταξύ τους μπορεί να αναπτυχθεί ισχυρός δεσμός, αρκεί να έχουν εκτεταμένους πρωτοαστρικούς δίσκους. Οι χαλαροί διπλοί ( με μεγάλη απόσταση μεταξύ τους, π.χ. 10.000 AU) μπορεί να επιβιώσουν, αν δεν διαχωριστούν γρήγορα. Με την πάροδο του χρόνου μειώνεται η αστρική πυκνότητα ενός σμήνου, με αποτέλεσμα οι χαλαροί διπλοί να μην δέχονται μακροχρόνια ισχυρές βαρυτικές παρενοχλήσεις από άλλα αστέρια.



Ακόμα δεν έχουμε ένα τελικό συμπέρασμα για την δημιουργία διπλών αστεριών, όσον αφορά την διαδικασία κατάτμησης και τις επιδράσεις από το περιβάλλον (μαγνητικά πεδία, θερμική ανάδραση από γειτονικά αστέρια, στροβιλισμοί). Οι προσομοιώσεις που προβλέπουν αλληλεπιδράσεις των διπλών αστεριών με άλλα αστέρια επιβεβαιώνονται παρατηρησιακά. Η δημιουργία διπλών ευνοείται σε μικρές συγκεντρώσεις νεαρών αστεριών (υπό- σμήνη). Οι διπλοί αστέρες είναι πιο πιθανό να έχουν κοντά τους (10.000 AU) ένα γειτονικό αστέρι από τα μεμονωμένα αστέρια. Στα πολύ νεαρά αστέρια υπάρχουν κατά 8% τριπλά αστέρια και 4% τετραπλά. Τα τετραπλά συστήματα είναι συνήθως 2 διπλοί που συνδέονται βαρυτικά ως 2 συστήματα. Πολλά νεαρά τριπλά συστήματα χάνουν το ένα (εξωτερικό) μέλος τους.

## Διπλά συστήματα και ενέργεια

Τα διπλά αστρικά συστήματα θεωρούνται οι ταμειυτήρες ενέργειας των σμηνών. Η ενέργεια ενός διπλού αστρικού συστήματος εκφράζεται από τις μάζες των 2 αστεριών, την ταχύτητα περιφοράς τους και την μεταξύ τους απόσταση. Μπορεί να δώσουν ενέργεια σε ένα μεμονωμένο αστέρι που πλησιάζει ένα σύστημα ή να πάρουν ενέργεια από αυτό. Στην πρώτη περίπτωση η κινητική ενέργεια του τρίτου αστεριού αυξάνεται ενώ το σύστημα στενεύει (αυξάνεται η ενέργεια σύνδεσης των 2 μελών του). Το αντίθετο συμβαίνει αν το σύστημα απορροφήσει ενέργεια από το μεμονωμένο αστέρι. Η τάση είναι οι στενοί διπλοί να γίνονται όλο και στενότεροι, ενώ οι χαλαροί χαλαρότεροι. Η συχνότητα αυτών των αλληλεπιδράσεων εξαρτάται από το περιβάλλον (αστρική πυκνότητα και διασπορά αστρικών ταχυτήτων). Ακόμα, ένα διπλό σύστημα μπορεί να διαλυθεί τελείως.

Μια άλλη αστρική αλληλεπίδραση είναι η ανταλλαγή συνοδού. Ένας εισβολέας μπορεί να πάρει την θέση ενός αστεριού σε ένα διπλό σύστημα, ιδίως αν έχει μεγαλύτερη μάζα. Έτσι υπάρχει η τάση αύξησης της μάζας των διπλών συστημάτων.

Οι διπλοί ενός σμήνους μπορούν να διοχετεύσουν ενέργεια σε αυτό αλλάζοντας την κατάστασή του, μέσω αλληλεπίδρασης με μονά αστέρια.

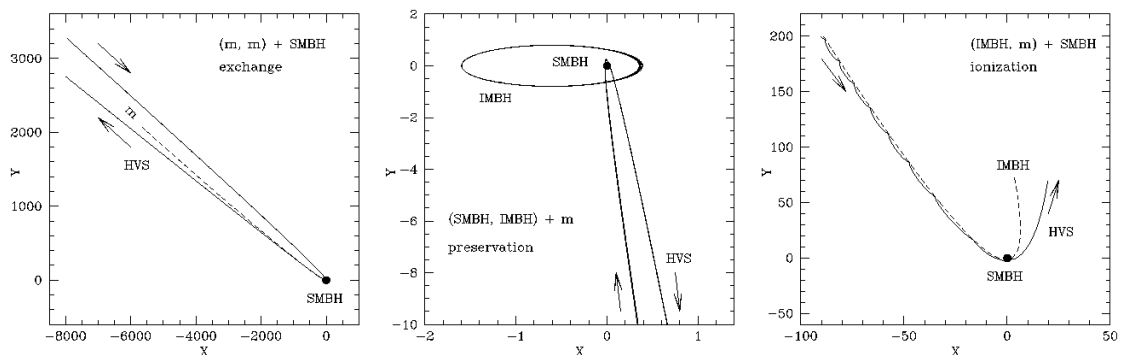
### *Επίδραση των διπλών συστημάτων στην κατάρρευση του πυρήνα των αστρικών σμηνών*

Τα απομονωμένα αστρικά σμήνη με πυκνό (σε αστέρια) πυρήνα που περιβάλλονται από μια άλως μικρής αστρικής πυκνότητας βιώνουν κατάρρευση του πυρήνα. Τα αστέρια με μεγάλη ίδια ταχύτητα διαφεύγουν από τον πυρήνα, ως αποτέλεσμα του φαινομένου 2 body relaxation (η τροχιά ενός αστεριού μεταβάλλεται υπό την βαρυτική επίδραση ενός άλλου αστεριού). Έτσι ο πυρήνας χάνει κινητική ενέργεια και συστέλλεται (η δυναμική ενέργεια δεν επηρεάζεται σημαντικά), αυξάνοντας την πυκνότητά του. Η συστολή ενισχύει το παραπάνω φαινόμενο και ο πυρήνας συστέλλεται και άλλο κ.λπ. Αυτός ο μηχανισμός απομάκρυνσης αστεριών ονομάζεται κατάρρευση του πυρήνα (core collapse).

Δεν έχουμε παρατηρήσει σμήνη όπου οι πυρήνες να έχουν τέτοια τάση. Δυο τρόποι υπάρχουν να σταματήσουν αυτή την εξέλιξη, η απομάκρυνση δυναμικής ενέργειας από τον πυρήνα χωρίς την απομάκρυνση κινητικής ενέργειας και η εισροή νέας κινητικής ενέργειας

στο σύστημα. Όταν η πυκνότητα στον πυρήνα ενός σμήνους είναι χαμηλή, οι διπλοί δεν αλληλεπιδρούν συχνά με μεμονωμένα αστέρια. Κατά την κατάρρευση του πυρήνα αλληλεπιδρούν με μεμονωμένα αστέρια όλο και συχνότερα. Επίσης, η αυξημένη αστρική πυκνότητα δημιουργεί όλο και περισσότερα διπλά συστήματα. Οι στενοί διπλοί μεταφέρουν ενέργεια σε μονά αστέρια. Αν οι εισβολείς αστέρες δεν εκσφενδονιστούν από τον πυρήνα, αυξάνουν την κινητική του ενέργεια. Αν εκσφενδονιστούν η κινητική τους ενέργεια χάνεται από τον πυρήνα, αλλά δεν πυροδοτούν περισσότερη κατάρρευση του πυρήνα, γιατί δεν είχαν μεγάλη κινητική ενέργεια (δεν είχαν μεγάλη ίδια ταχύτητα) πριν αλληλεπιδράσουν με ένα διπλό σύστημα. Το αποτέλεσμα είναι ότι η κινητική ενέργεια του πυρήνα αυξάνεται, με αποτέλεσμα αυτός να διαστέλλεται. Επίσης, η απώλεια μάζας από την εξέλιξη των αστεριών μεγάλης μάζας ελαττώνει την δυναμική ενέργεια, ισορροπώντας την απώλεια κινητικής ενέργειας, αλλά μόνο στα πρώτα εκατομμύρια έτη του σμήνους. Σε σμήνη με μεγάλη μεταλλικότητα η απώλεια αερίου μέσω αστρικών ανέμων είναι επίσης αποτελεσματική στην αναστροφή της κατάρρευσης του πυρήνα.

Η παρεμπόδιση της κατάρρευσης του πυρήνα των αστρικών σμηνών είναι η σημαντικότερη επίδραση των διπλών αστρικών συστημάτων σε αυτά. Όμως υπάρχουν και άλλες δευτερεύουσες επιδράσεις. Οι στενοί διπλοί έχουν σημαντικό ρόλο στο φαινόμενο αστάθεια του Spitzer. Γνωρίζουμε ότι σε ένα σύστημα, όπως ένα αέριο, η ενέργεια θερμικής ισορροπίας (thermal equilibrium energy) μοιράζεται ισότιμα σε όλα τα σωματίδια. Ανάλογα αναμένουμε σε ένα σύστημα όπου ισχύει το φαινόμενο 2 body relaxation τα αστέρια μεγάλης μάζας να μεταδώσουν κινητική ενέργεια στα αστέρια μικρότερης μάζας μέχρι να εξισορροπήσουν οι κινητικές ενέργειες όλων των αστεριών. Αν οι διαφορές αστρικών μαζών είναι πολύ μεγάλες (πάω από 8 περίπου φορές) τότε το σύστημα δεν επιτυχαίνει ποτέ εξισορρόπηση. Αυτό σημαίνει πως αν υπάρχουν πολλά αστέρια μεγάλης μάζας στο σμήνος (όπως στα νεαρά σμήνη μεγάλης μάζας) τα αστέρια μικρότερης μάζας δεν απορροφάνε αποτελεσματικά κινητική ενέργεια από αυτά. Έτσι τα αστέρια μικρότερης μάζας εκσφενδονίζονται σε μεγαλύτερες τροχιές (γύρω από το κέντρο βάρους του σμήνους) ενώ τα μεγάλης μάζας διαχωρίζονται από αυτά και αλληλεπιδρούν μεταξύ τους, σχηματίζοντας διπλά αστέρια. Τελικά εκσφενδονίζουν το ένα το άλλο μέσω αλληλεπίδρασης 3 σωμάτων (3 body encounters).

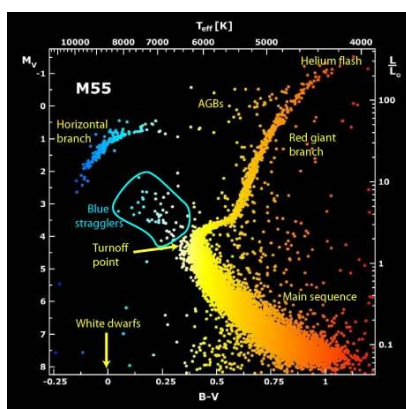


Φαίνεται το παραπάνω φαινόμενο (αστάθεια Spitzer) να ισχύει γενικά στα αστρικά σμήνη, ανοιχτά και σφαιρωτά. Υπάρχει μια σχέση ανάμεσα στον σχηματισμό διπλών αστεριών και την παραπάνω αστάθεια. Αυτό σημαίνει ότι οι διπλοί σε ένα σμήνος έχουν δυναμική (μέσω

αλληλεπίδρασης) προέλευση, και δημιουργούνται μετά από 30 εκατομμύρια έτη, όταν εκδηλώνεται η αστάθεια. Το πλήθος των διπλών και η ενέργεια βαρυτικής σύνδεσης μεταξύ των μελών τους αναπτύσσονται πολύ γρήγορα.

### Εξωτικά αστέρια

Οι blue stragglers βρίσκονται στην κύρια ακολουθία του διαγράμματος H/R (καίνε υδρογόνο στον αστρικό πυρήνα) αλλά πάνω από το σημείο εκτροπής από αυτήν. Δηλαδή εμφανίζονται πιο μπλε (καυτά) από ότι θα έπρεπε για την μάζα τους. Υπολογίζουμε ότι πρόκειται για διπλά αστέρια με μεταφορά μάζας ή για προϊόντα συγχώνευσης αστεριών της κύριας ακολουθίας. Όπως και να έχει, είναι προϊόντα αλληλεπίδρασης διπλών αστεριών. Θεωρούνται καλά δείγματα της δυναμικής εξέλιξης των αστρικών σμηνών. Η ακτινική διασπορά τους σε ένα σμήνος ακολουθεί την διασπορά λαμπρότητας (εκπομπής) σε αυτό. Αποτελούν τα συστήματα με την μεγαλύτερη μάζα (τα αστέρια μεγάλης μάζας έχουν ήδη εξελιχτεί από τα πρώτα εκατομμύρια έτη) σε ένα σμήνος με αποτέλεσμα να βυθίζονται στο κέντρο του σμήνους μέσω δυναμικής τριβής (dynamical friction, η απώλεια ορμής και κινητικής ενέργειας μέσω βαρυτικής αλληλεπίδρασης). Οι blue stragglers αποτελούν ένδειξη του χρονοδιαγράμματος της δυναμικής τριβής και της 2 body relaxation σε ένα σμήνος. Μπορούν να καθορίσουν την δυναμική ηλικία του (μέθοδος χρονολόγησης των αστρικών σμηνών).

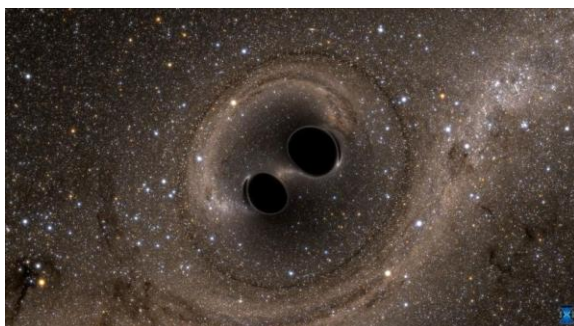


### Διπλές αστρικές μαύρες τρύπες μεγάλης μάζας

Τις ανακαλύψαμε μέσω των βαρυτικών κυμάτων που εκλύουν όταν συγχωνεύονται. Σε 5 τέτοια συμβάντα οι 3 μαύρες τρύπες είχαν πάνω από 30 ηλιακές μάζες η καθεμιά. Υπάρχουν 2 σενάρια δημιουργίας τόσο μεγάλης μάζας αστρικών μαύρων τρυπών, η απομονωμένη αστρική εξέλιξη ενός διπλού συστήματος πολύ μεγάλης μάζας και η δυναμική δημιουργία τους στα αστρικά σμήνη. Στο πρώτο σενάριο δημιουργούνται 2 αστέρια πολύ μεγάλης μάζας με μεταξύ τους βαρυτική σύνδεση και εξελίσσονται μέσω πολλαπλών διαδικασιών αλληλεπίδρασης (πλήρωση λοβού Roche, απόκτηση κοινού κελύφους κ.λπ.). Τελικά εξελίσσονται σε 2 μαύρες τρύπες και συγχωνεύονται. Οι 2 προγεννήτορες αστέρες πρέπει να ήταν μικρής μεταλλικότητας, ώστε να μην αποβάλλουν σημαντικό ποσοστό από την αρχική μάζα τους. Στο δεύτερο σενάριο μπορεί να σχηματίστηκαν μέσω αστρικής εξέλιξης και δυναμικής 2 μαύρες τρύπες στο κέντρο ενός σμήνους. Αυτές μπορεί να αύξησαν τις μάζες τους μέσω συγχωνεύσεων με αστέρια αλλά και άλλες μαύρες τρύπες. Είδαμε ότι οι αλληλεπιδράσεις στο εσωτερικό ενός σμήνους

έχουν ως αποτέλεσμα την δημιουργία όλο και μεγαλύτερης μάζας διπλών συστημάτων. Ακόμα, αυτά τα συστήματα έχουν μεγάλες εκκεντρικότητες τροχιών (που βοηθάει στην μακροχρόνια διατήρησή τους). Οι αλληλεπιδράσεις κάνουν τις 2 τελικές μαύρες τρύπες να έχουν διαφορετική κατεύθυνση περιστροφής (spin).

Η αλληλεπίδραση 3 σωμάτων που αναφέραμε παραπάνω μπορεί να εκσφενδονίσει διπλές μαύρες τρύπες από τα σμήνη τους. Μετά από μια τέτοια αλληλεπίδραση το διπλό σύστημα γίνεται πιο στενό. Αρχίζει η αποτελεσματική εκπομπή βαρυτικών κυμάτων με αποτέλεσμα οι 2 μαύρες τρύπες να στενεύουν την τροχιά τους (απώλεια στροφορμής), κάτι που οδηγεί στην τελική συγχώνευση.



### *Μαύρες τρύπες μεσαίας μάζας*

Μερικά παραδείγματα υποψήφιων μαύρων τρυπών μεσαίας μάζας είναι

Η ESO 243-49HLX-1, που συνδέεται με μια υπέρλαμπρη πηγή ακτινών Χ με περιοδικότητα λαμπρότητας.

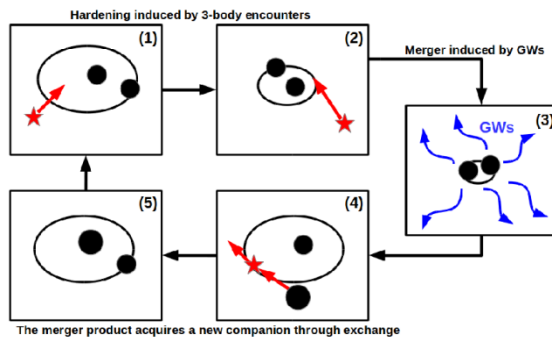
Η κινηματική των πάλσαρ στο κέντρο του σφαιρωτού σμήνους 47 Τουκάνα φαίνεται να οφείλεται στην διαταραχή από μια μαύρη τρύπα με περίπου 2000 ηλιακές μάζες.

Η δημιουργία των μαύρων τρυπών μεσαίας μάζας συνδέεται με τα διπλά αστρικά συστήματα. Το ένα σενάριο δημιουργίας τους είναι η επαναλαμβανόμενη συγχώνευση, (repeated merger) όπου μια διπλή μαύρη τρύπα αστρικής μάζας στον πυρήνα ενός σφαιρωτού σμήνους (πολύ πυκνό σε αστέρια περιβάλλον) βιώνει επαναλαμβανόμενα επεισόδια αλληλεπίδρασης 3 σωμάτων (3 body encounters) και τελικά συγχωνεύεται σε μία. Αυτή πάλι θα συγχωνευτεί με άλλη μαύρη τρύπα, και η διαδικασία επαναλαμβάνεται συνεχώς. Το αδύναμο σημείο αυτού του σεναρίου είναι ότι η μαύρη τρύπα πιθανώς θα εκσφενδονιστεί λόγω της αλληλεπίδρασης 3 σωμάτων πριν συσσωρεύσει αρκετή μάζα μέσω των συγχωνεύσεων.

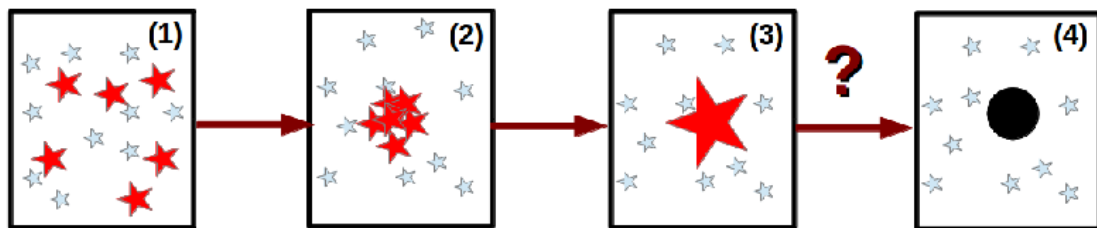
Το σενάριο των συγκρούσεων μέσω διαφυγής (runaway collision) μπορεί να συμβεί μόνο σε πολύ νεαρά και πυκνά αστρικά σμήνη, όπως το R136 στο μεγάλο Μαγγελανικό νέφος. Το χρονοδιάγραμμα δυναμικής τριβής (dynamical friction) για τα αστέρια πολύ μεγάλης μάζας είναι συντομότερο από τις πρώτες εκρήξεις σουπερνόβα στο σμήνος. Έτσι τα αστέρια πολύ μεγάλης μάζας θα βυθιστούν στο κέντρο του σμήνους πριν εκραγούν ως σουπερνόβα, αυξάνοντας πολύ την πυκνότητα σε αστρική μάζα στο κέντρο του σμήνους. Αυτά τα αστέρια

πολύ πιθανώς να αποκτήσουν συνοδούς και να συγκρουστούν με αυτούς. Θα αποκτήσουν τεράστια αστρική μάζα και πιθανώς να εξελιχτούν σε μαύρες τρύπες μεσαίου μεγέθους. Το μειονέκτημα του σεναρίου είναι ότι υπάρχει μεγάλη αβεβαιότητα στα θεωρητικά μοντέλα αν αυτά τα τεράστια μάζας αστέρια αφήνουν ως απομεινάρια μαύρες τρύπες με τόση μάζα. Για μικρές μεταλλικότητες, θεωρητικά μπορεί να αφήσουν μαύρες τρύπες 100- 500 ηλιακών μαζών.

### Repeated mergers

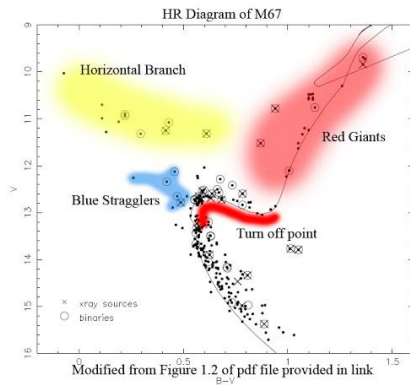


### Runaway collision



### Εναλλακτικοί οδοί αστρικής εξέλιξης

Η κατανόηση της αστρικής εξέλιξης έχει ως πεδίο τα αστρικά σμήνη. Εδώ και πολλά χρόνια γνωρίζουμε ότι στα διαγράμματα H/R σμηνών όπως το M67 υπάρχουν πολλά αστέρια που δεν βρίσκονται στην κύρια ακολουθία ή σε κάποιο κλάδο γιγάντων, όπως οι blue stragglers (αστέρια που βρίσκονται κοντά στην κύρια ακολουθία και εμφανίζονται πιο μπλε από ότι έπρεπε για το φάσμα και έχουν μεγαλύτερη μάζα από την μάζα του σημείου εκτροπής της κυρίας ακολουθίας). Στο παραπάνω σμήνος το 25% των αστεριών που έχουν εξελιχτεί πέρα από την κυρία ακολουθία δεν βρίσκονται στον κλάδο των γιγάντων ή αυτόν των υπό-γιγάντων. Αυτά τα αστέρια εξελίσσονται διαφορετικά, ανήκουν σε διπλά αστρικά συστήματα και δέχονται αλληλεπίδραση από τους συνοδούς τους.



### Οι blue stragglers των NGC 188 και NGC 6819

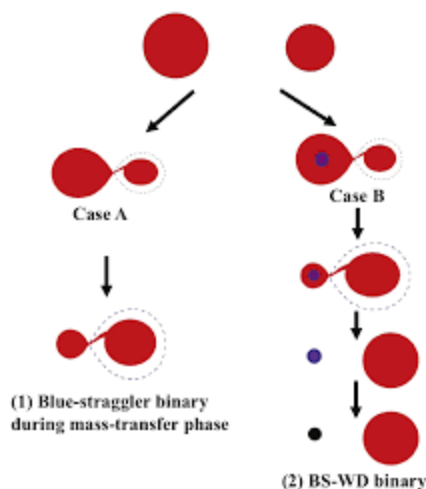
Η δημιουργία των blue stragglers μπορεί να συμβεί από μεταφορά μάζας στον κλάδο των γιγάντων ή στον ασυμππτωτικό κλάδο σε αστέρι κυρίας ακολουθίας σε ένα διπλό σύστημα, μέσω σύγκρουσης 2 αστεριών σε πυκνό αστρικό περιβάλλον ή συγχώνευσης των αστεριών ενός διπλού συστήματος λόγω απώλειας στροφορμής. Στο ηλικίας 7 δις ετών σμήνος NGC 188 το σημείο εκτροπής από την κυρία ακολουθία είναι στις 1,1 ηλιακές μάζες (δεν υπάρχουν αστέρια μεγαλύτερης μάζας στην κυρία ακολουθία). Υπάρχει μεγάλο πλήθος από blue stragglers. Αυτοί παρουσιάζουν κάποια σημαντικά χαρακτηριστικά. Το 80% των περιόδων περιφοράς σε διπλά συστήματα με blue stragglers είναι μικρότερα από 10.000 ημέρες, και συνήθως κοντά στις 1000 ημέρες. Η μάζα του συνοδού είναι τυπικά στις 0,5 ηλιακές, που παραπέμπει σε λευκό νάνο. Αυτοί οι blue stragglers περιστρέφονται ταχύτατα, με 100 km/s. Αυτά τα χαρακτηριστικά έχουν βρεθεί και σε blue stragglers του M67, αλλά και σε άλλα του πεδίου. Τα παραπάνω συνηγορούν στο να σχηματίζονται οι διπλοί μακράς περιόδου με blue straggler, το μεγαλύτερο μέρος του πληθυσμού τους στον NGC 188, από μεταφορά μάζας στον κλάδο των γιγάντων ή στον ασυμππτωτικό κλάδο σε αστέρι κυρίας ακολουθίας. Σε 3 τέτοια συστήματα έχει ανιχνευτεί ως συνοδό αστέρι ένας καυτός λευκός νάνος, άλλη μια απόδειξη για την μεταφορά μάζας από εξελιγμένο αστέρι. Αυτοί οι λευκοί νάνοι εξελίχτηκαν μόλις πριν από 300 εκατομμύρια έτη (έχουν επιφανειακή θερμοκρασία πάνω από 12000 K), άρα οι blue stragglers έχουν δημιουργηθεί πρόσφατα (σχετικά με την μεγάλη ηλικία του σμήνους).

Η μικρή τους ηλικία περιορίζει την αρχική μάζα των 2 αστεριών, πριν εξελιχτεί το κυρίως αστέρι, και την περίοδο περιφοράς τους (αν ήταν πολύ μακρινοί διπλοί, δεν θα αλληλεπιδρούσαν έτσι). Οι 3 blue stragglers δημιουργήθηκαν με διαφορετικό τρόπο συσσώρευσης μάζας. Ο πρώτος με συσσώρευση από αστέρι του κλάδου των ερυθρών γιγάντων, ο δεύτερος με συσσώρευση μάζας από αστέρι του ασυμππτωτικού κλάδου (και οι 2 με υπερχειλίση του λοβού Roche (Roche lobe overflow)) ενώ ο τρίτος με συσσώρευση αστρικού ανέμου από αστέρι του ασυμππτωτικού κλάδου. Συνολικά έχουν ανιχνευτεί 8 διπλοί blue stragglers με λευκούς νάνους σε αυτό το σμήνος. Το 67% των blue stragglers έχουν ως μηχανισμό δημιουργίας την μεταφορά μάζας.

Υπάρχουν ενδείξεις ότι κάποια blue stragglers του σμήνους δημιουργήθηκαν από σύγκρουση αστεριών και κάποια άλλα από συγχώνευση διπλών αστεριών. Δεν υπάρχει



σαφής εξάρτηση της λαμπρότητας ή του χρώματος των blue stragglers ανάλογα με τον τρόπο δημιουργίας τους.

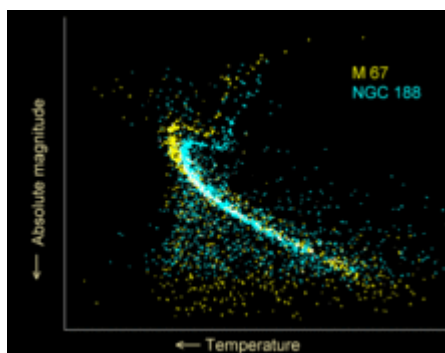


Οι blue stragglers του νεότερου σμήνους (2,5 δις ετών) NGC 6819 έχουν επιφανειακές θερμοκρασίες από 6500 K ως 8500 K, ενώ αυτοί του NGC 188 από 6200 K ως 6705 K. Η μάζα στο σημείο εκτροπής του NGC 6819 είναι 1,4 ηλιακές, με αποτέλεσμα να μας προσφέρεται η ευκαιρία για την καλύτερη μελέτη δημιουργίας των blue stragglers. Για παράδειγμα, τα αστέρια του κλάδου των γιγάντων έχουν θερμικούς παλμούς που δημιουργούν βαρύτερα χημικά στοιχεία τύπου s (slow progress, αργής απορρόφησης νετρονίων). Αυτά αποτελούν ανιχνευτές της μεταφοράς μάζας ανάμεσα στα αστέρια ενός διπλού συστήματος. Αυτά τα στοιχεία δεν δημιουργούνται στα αστέρια του πρώτου σμήνους (δεν δημιουργούνται σε αστέρια κάτω από 1,3 ηλιακές μάζες), και η ανίχνευσή τους στους blue stragglers μας δείχνει τον τρόπο δημιουργίας τους. Χαρακτηριστικό στοιχείο που παρουσιάζει υπέρβαση αναλογίας στους blue stragglers σμηνών μεσαίας ηλικίας, αλλά όχι σε αυτά από σμήνη μεγάλης ηλικίας είναι το Βάριο.

#### Οι κίτρινοι γίγαντες και υπό- υπογίγαντες

Ως κίτρινους γίγαντες ονομάζουμε τα αστέρια προς το μπλε μέρος του κλάδου των γιγάντων ενός σμήνους. Μερικοί είναι διπλά συστήματα που αποτελούνται από ένα αστέρι κυρίας ακολουθίας (ή έναν blue straggler) και έναν ερυθρό γίγαντα, αλλά άλλοι είναι εξελιγμένοι blue stragglers. Το S 1040 στο M67 αποτελείται από ένα αστέρι αρχικής μάζας 1,24 ηλιακές και ένα με 0,82 ηλιακές μάζες, με περίοδο περιφοράς 1,86 ημέρες. Η μεταφορά μάζας στην διάρκεια της αστρικής εξέλιξης είχε ως αποτέλεσμα να αποκτήσει το πρωτεύον αστέρι, ένας blue straggler, 1,48 ηλιακές μάζες και το δευτερεύον (άλλαξαν ρόλους) να είναι ένας λευκός νάνος ηλίου (μικρής μάζας) με 0,25 ηλιακές μάζες. Πλέον έχουν περίοδο 42 ημερών. Ο blue straggler χρειάζεται μόλις 75 εκατομμύρια έτη από την δημιουργία του ώστε να εξελιχτεί σε κίτρινο γίγαντα. Ένας άλλος κίτρινος γίγαντας στο M67 είναι ο S1237. Έχει περίπου 3 ηλιακές μάζες, πολύ περισσότερο από την μάζα του σημείου εκτροπής της κυρίας ακολουθίας. Μάλλον πρόκειται για προϊόν συγχώνευσης ή σύγκρουσης 3 αστεριών (δεν φτάνουν 2 αστέρια με μάζα κάτω από 1,4 ηλιακές, την μάζα του σημείου εκτροπής, για την

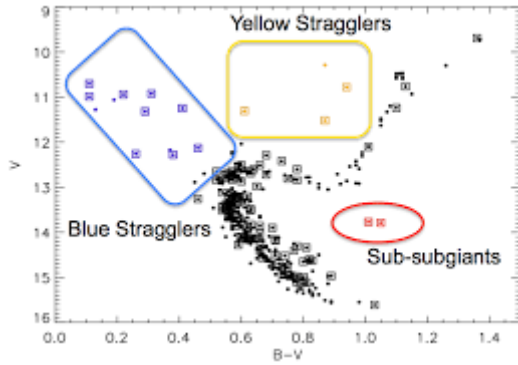
δημιουργία του). Και σε άλλα σμήνη έχουν βρεθεί ανάλογα μεγάλης μάζας κίτρινοι γίγαντες, αλλά υπάρχουν και blue stragglers που εξελίσσονται σε ερυθρούς γίγαντες.



Οι υπό- υπογίγαντες ανιχνεύτηκαν πρώτα στο M67 και στο 47 Τουκάνας. Γνωρίζουμε 70 από αυτούς σε σφαιρωτά και ανοιχτά σμήνη. Έχουν παρόμοια εκπομπή ακτινών X και της γραμμής H $\alpha$  και τροχιές συνοδών μικρότερες από 30 ημέρες. Πρόκειται για αστέρια που δημιουργήθηκαν από αλληλεπίδραση διπλών. Κάποιοι διπλοί αστέρες με το πρωτεύον να είναι γίγαντας ή υπό- γίγαντας έχουν κερδίσει στροφορμή με αποτέλεσμα την ταχεία περιστροφή τους. Αυτή δημιουργεί ισχυρά μαγνητικά πεδία που έχουν ως αποτέλεσμα την εκπομπή ακτινών X, H $\alpha$  και την δημιουργία μεγάλων σκοτεινών κηλίδων στις αστρικές επιφάνειες. Η μικρή λαμπρότητά τους οφείλεται στην απώλεια θερμότητας λόγω ισχυρών μαγνητικών πεδίων ή στην απώλεια των εξωτερικών στρωμάτων (ισχυρός αστρικός άνεμος λόγω ταχείας περιστροφής). Οι λαμπρότητές τους στα σμήνη M67, NGC6791 αντιστοιχούν σε μάζες μερικά δέκατα της ηλιακής μάζας λιγότερα από την μάζα ενός κανονικού γίγαντα των σμηνών. Η υπερχειλίση του λοβού Roche προς τον μικρότερης μάζας συνοδό μπορεί να δημιουργήσει ένα τέτοιο αστέρι, αρκεί ο συνοδός να είναι μικρής μάζας, ώστε να μην έχει σημαντική λαμπρότητα, ακόμα και μετά την συσσώρευση μάζας από τον πρωτεύοντα. Αυτή η σταθερή μεταφορά μάζας σε συνοδό μικρής μάζας μπορεί να συμβεί μόνο στο αρχικό στάδιο αστρικής εξέλιξης του υπό- γίγαντα. Η ανταλλαγή μάζας μπορεί να συμβεί και εκτός υπερχειλίσης του λοβού Roche, από την συσσώρευση του αστρικού ανέμου του συνοδού.

Εναλλακτικά, η <απογύμνωση> ενός ερυθρού γίγαντα μπορεί να δημιουργήσει έναν υπογίγαντα μικρότερης μάζας. Αυτός ο μηχανισμός δημιουργίας υπό- υπογίγαντων απαιτεί να συμβεί η συσσώρευση μάζας από το δεύτερο αστέρι (ιδίως αστέρι νετρονίων ή αστρική μαύρη τρύπα) σε σύντομο χρονικό διάστημα, όπως μια δυναμική συνάντηση 2 αστεριών που δεν οδηγεί σε συνένωση. Τα ανοιχτά σμήνη δεν έχουν αρκετή αστρική πυκνότητα ώστε ο παραπάνω μηχανισμός να είναι σημαντικός, αλλά στα σφαιρωτά σμήνη τα πράγματα είναι διαφορετικά.

Οι υπό- υπογίγαντες μπορεί να έχουν κανονική μάζα για υπογίγαντα, αλλά εκτεταμένη ακτίνα, ψυχρότερη επιφάνεια και μικρότερη λαμπρότητα λόγω των ισχυρών μαγνητικών πεδίων. Αυτά ελαττώνουν την αστρική συναγωγή.



### *Εναλλακτική αστρική εξέλιξη στην κύρια ακολουθία*

Η μεταφορά μάζας ανάμεσα σε διπλά αστέρια μπορεί να δημιουργήσει και αστέρια που δεν ξεπερνάνε την μάζα του σημείου εκτροπής ενός σμήνους. Αυτά τα αστέρια δεν είναι τόσο λαμπρά σαν τους blue stragglers, με αποτέλεσμα να μην ξεχωρίζουν εύκολα. Τα αναγνωρίζουμε από την ταχεία περιστροφή τους. Έχουμε εντοπίσει αστέρια κυρίας ακολουθίας που παρουσιάζουν ταχύτητα περιστροφής 100 km/s και έχουν συνοδούς νέους λευκούς νάνους. Τα αστέρια κυρίας ακολουθίας με ταχεία περιστροφή χωρίς να φαίνεται ότι επηρεάζονται παλιρροιακά από συνοδό αστέρια πρέπει να βίωσαν τέτοια μεταφορά μάζας στο παρελθόν. Στο M67 έχουμε ανακαλύψει 13 τέτοια αστέρια. Ο μικρός αριθμός τους οφείλεται στην δυσκολία διάκρισής τους από τα υπόλοιπα αστέρια κυρίας ακολουθίας. Έχουν περίοδο περιστροφής μικρότερη από 8 ημέρες, ενώ τα υπόλοιπα αστέρια της κυρίας ακολουθίας έχουν περίοδο περιστροφής 20- 30 ημέρες. Ξεχωρίζουν στο διάγραμμα από τους blue stragglers και θεωρούνται προέκταση αυτής της κατηγορίας αστεριών. Τα 9 από αυτά βρίσκονται σε διπλά συστήματα με μεγάλες περιόδους περιφοράς. Όπως συμβαίνει και για τους blue stragglers, το ποσοστό τους σε διπλά συστήματα είναι πολύ μεγαλύτερο από τα υπόλοιπα αστέρια του σμήνους. Η μεταφορά μάζας σε αστέρια κυρίας ακολουθίας από εξελιγμένα αστέρια έχει ανιχνευτεί μέσω της υπέρβασης αναλογίας στοιχείων όπως το Βάριο, το Οξυγόνο, τον Άνθρακα και το Λίθιο.

### *Η εξέλιξη της αστρικής στροφορμής*

Αναφέραμε ότι τα αστέρια που συσώρευαν μάζα από συνοδό ή μέσω συγκρούσεων ή συσσωρεύσεων, όπως οι blue stragglers, επιτάχυναν πολύ την περιστροφή τους. Η αύξηση της στροφορμής αυτών των αστεριών αποτελεί πεδίο μελέτης της αστρονομίας. Παρατηρούμε ότι οι blue stragglers που έχουν συνοδό περιστρέφονται πιο γρήγορα από τους μεμονωμένους. Αυτό σημαίνει ότι οι blue stragglers που προέρχονται από σύγκρουση ή συγχώνευση αστεριών κέρδισαν λιγότερη στροφορμή. Οι πιο νέοι έχουν γενικά ταχύτερη περιστροφή από τους παλαιότερους.

### *Συμπεράσματα*

Τα τελευταία χρόνια αναγνωρίζουμε ότι πολλές κατηγορίες <ιδιαίτερων> αστεριών, όπως οι blue stragglers, τα αστέρια Βαρίου, τα αστέρια Άνθρακα, τα εμπλουτισμένα σε άνθρακα

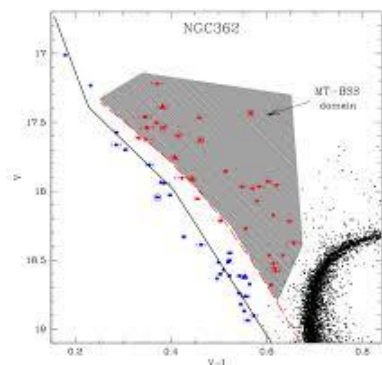
αστέρια μικρής μεταλλικότητας και τα πλανητικά νεφελώματα αποτελούν προϊόντα αλληλεπίδρασης διπλών αστεριών.

## Η φυσική των blue stragglers

Όπως αναφέραμε παραπάνω, πρόκειται για αστέρια που συντήκουν υδρογόνο στον πυρήνα αλλά έχουν μεγαλύτερη μάζα (και θερμοκρασία) από τα αστέρια του σημείου εκτροπής της κυρίας ακολουθίας ενός σμήνους. Προέρχονται από συσσώρευση μάζας/ συγχώνευση / σύγκρουση αστεριών. Τα συναντάμε ειδικά σε σφαιρωτά σμήνη, όπου το αστρικό περιβάλλον είναι πυκνό, και έχει εξαλειφτεί το διαθέσιμο για αστρογέννηση αέριο (άρα δεν πρόκειται για νεαρά αστέρια). Γνωρίζουμε ότι το πλήθος τους στον πυρήνα ενός σμήνους είναι ανάλογο με την αστρική μάζα αυτής της περιοχής. Να σημειώσουμε ότι ως αστέρια με μεγάλη μάζα σε σχέση με τα υπόλοιπα του σμήνους κινούνται προς το κέντρο του (δυναμική τριβή). Αυτό ενισχύεται από το γεγονός ότι πολλά ανήκουν σε διπλά συστήματα. Υπάρχει αναλογία των διπλών αστρικών συστημάτων ενός σμήνους με τους blue stragglers του. Επίσης στο κέντρο των σμηνών η αστρική πυκνότητα είναι αυξημένη, με αποτέλεσμα οι συγκρούσεις αστεριών να είναι αρκετά πιθανές. Γενικά στο κέντρο ενός σφαιρωτού δημιουργούνται περισσότεροι blue stragglers δυναμικά, δηλαδή μέσω συγκρούσεων με αστέρια που δεν ήταν συνοδοί τους, ενώ στις αραιότερες εξωτερικές περιοχές του δημιουργούνται μέσω συγχώνευσης/ συσσώρευσης μάζας από συνοδό αστέρι. Μας δείχνουν ότι τα σφαιρωτά σμήνη δεν είναι ανενεργά συστήματα, αλλά έχουν δυναμική στο εσωτερικό τους.

### Η διπλή ακολουθία των blue stragglers

Στο σφαιρωτό σμήνος M30 ανακαλύψαμε 2 παράλληλες <κύριες> ακολουθίες στο διάγραμμα χρώματος/λαμπρότητας που αντιστοιχούν στους blue stragglers που προέρχονται από συσσώρευση μάζας και αυτούς που προέρχονται από σύγκρουση αστεριών. Στα θεωρητικά μοντέλα ταιριάζει η μπλε ακολουθία, για ηλικία (πότε έγινε η σύγκρουση των 2 αστεριών) των blue stragglers στα 2 δις έτη, αλλά όχι η κόκκινη (είναι πολύ κόκκινη, δηλαδή ψυχρή, για κάθε ηλικία των blue stragglers), όπως και δεν δικαιολογείται το κενό ανάμεσα στις 2 ακολουθίες. Παρόμοια αποτελέσματα έχουμε και στα διαγράμματα άλλων σμηνών, αλλά όχι σε όλα τα σφαιρωτά σμήνη.

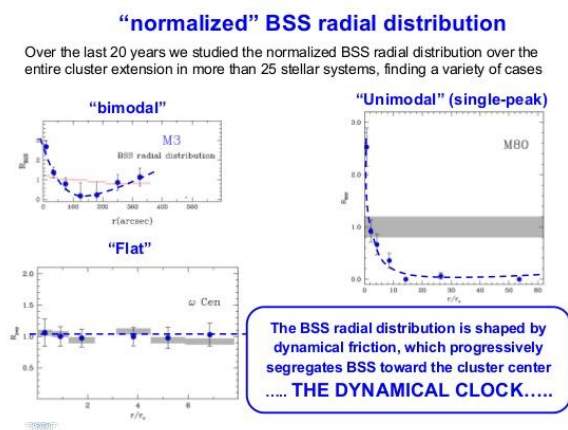


MT= mass transfer, blue stragglers που δημιουργήθηκαν μέσω μεταφοράς μάζας.

### Χρονολόγηση των σφαιρωτών σμηνών

Μέσω των blue stragglers μπορούμε να χρονολογήσουμε ένα σφαιρωτό σμήνος. Υπάρχουν 3 κατηγορίες ακτινικής διασποράς των blue stragglers στα σμήνη, η family 1 με την διασπορά των blue stragglers να ακολουθεί την διασπορά του φωτός (ακτινική διακύμανση της λαμπρότητας του σμήνους), η family 2, όπου η διασπορά των blue stragglers παρουσιάζει μια κορύφωση στο κέντρο, μετά ελάττωση και πάλι αύξηση στις εξωτερικές περιοχές του σμήνους και η family 3, όπου το πλήθος των blue stragglers κορυφώνεται στο κέντρο του σμήνους με μονότονη ελάττωση προς τις εξωτερικές του περιοχές. Είδαμε ότι οι blue stragglers κινούνται προς το κέντρο ενός σμήνους λόγω δυναμικής τριβής (dynamical friction), επειδή έχουν μεγάλη μάζα σχετικά με τα υπόλοιπα αστέρια του σμήνους. Η αποτελεσματικότητα αυτού του μηχανισμού εξαρτάται από την αστρική πυκνότητα (ελαττώνεται στις αραιές από αστέρια εξωτερικές περιοχές ενός σμήνους). Άρα η πρώτη κατηγορία δείχνει ότι η δυναμική τριβή ακόμα δεν έχει σημαντική επίδραση στον πληθυσμό των blue stragglers. Αυτά τα σφαιρωτά ονομάζονται δυναμικά νεαρά. Τα πιο εξελιγμένα σφαιρωτά, κατηγορίας 2, βιώνουν όλο και πιο αποτελεσματική δυναμική τριβή, και σε όλο και πιο εξωτερικές περιοχές τους. Στα δυναμικά παλαιά σφαιρωτά σμήνη της τρίτης κατηγορίας τα περισσότερα blue stragglers έχουν ήδη δεχτεί την επίδραση της δυναμικής τριβής και το σύστημα φαίνεται να ισορροπεί.

Το  $\omega$  Κενταύρου ανήκει στην πρώτη κατηγορία, το M3 στην δεύτερη και το M30 στην τρίτη κατηγορία.



### Οι εξελιγμένοι blue stragglers

Η διάκριση εξελιγμένων blue stragglers είναι δύσκολη, επειδή δεν ξεχωρίζουν από τα άλλα εξελιγμένα αστέρια, αντίθετα με ότι συμβαίνει στην κύρια ακολουθία. Με την χρήση της αστροσεισμολογίας έχουμε ανακαλύψει υποψήφιους εξελιγμένους blue stragglers ανάμεσα στον οριζόντια κλάδο και το ασυμπτωτικό κλάδο. Δημιουργήσαμε την φασματοσκοπική αστρική κλίμακα (stellar scale). Η αφθονία των χημικών στοιχείων που ανιχνεύουμε από τις γραμμές απορρόφησης των ιονισμένων ατόμων εξαρτώνται από την αστρική βαρύτητα, ενώ δεν συμβαίνει το ίδιο για τις γραμμές των ουδέτερων ατόμων. Η

διαφορά των 2 φασμάτων μας βοηθάει να καθορίσουμε την αστρική μάζα. Αν είναι μηδέν, η αστρική μάζα καθορίζεται μονοσήμαντα. Αυτή η προσέγγιση μας βοηθάει στον καθορισμό της αστρικής μάζας σε αστέρια που δεν μπορούμε να συγκρίνουμε τις μάζες τους φωτομετρικά (αστέρια που βρίσκονται στην ίδια περιοχή του διαγράμματος χρώματος/ λαμπρότητας). Έτσι ξεχωρίζουμε τους blue stragglers από τα μικρότερης μάζας κανονικά αστέρια. Στο σφαιρωτό σμήνος 47 Τουκάνα βρέθηκε ένα εξελιγμένο αστέρι με 1,4 ηλιακές μάζες (το EBBS1), ενώ η μάζα εκτροπής από την κύρια ακολουθία είναι 0,8 ηλιακές. Τα αστέρια στην ίδια περιοχή στο διάγραμμα έχουν μάζες 0,6 ηλιακές. Πρόκειται για έναν εξελιγμένο blue straggler. Το αστέρι είναι στην περιοχή του διαγράμματος όπου αναμένουμε να βρούμε ένα blue stragglers καύσης ηλίου στον πυρήνα του και εμφανίζεται λίγο πιο μπλε από τα κανονικά αστέρια του οριζώντιου κλάδου. Η φασματοσκοπική ανάλυση των μεγάλης λαμπρότητας εξελιγμένων blue stragglers μας δείχνει αν ένας από αυτούς έχει συνοδό έναν λευκό νάνο (άρα δημιουργήθηκε μέσω απορρόφησης μάζας από τον συνοδό του) ή όχι (δημιουργία μέσω αστρικής σύγκρουσης). Ακόμα, η προέλευση μέσω συσσώρευσης συμπεραίνεται από την απουσία χημικών στοιχείων όπως ο Άνθρακας και το Οξυγόνο.

## Διπλοί αστέρες μικρής μεταλλικότητας

Οι διπλοί αστέρες μπορούν να χρησιμεύσουν ως ανιχνευτές αστέρων μικρής μεταλλικότητας και στην κατανόηση ιδιαίτερων αναλογιών κάποιων χημικών στοιχείων σε αστέρια μικρής μεταλλικότητας. Χρησιμοποιούμε τον σίδηρο ως κριτήριο μεταλλικότητας, αν και ιδίως για τα αστέρια μικρής μεταλλικότητας δεν ακολουθεί την χημική αφθονία άλλων στοιχείων. Τα διπλά αστέρια μας δίνουν πληροφορίες για τις συνθήκες δημιουργίας τους. Η αναλογία σε διπλά αστέρια, οι περίοδοι περιφοράς και οι διασπορά της αστρικής μάζας οριοθετούν τα μοντέλα αστρογέννησης. Γνωρίζουμε ότι η αστρογέννηση επηρεάζεται από την μεταλλικότητα. Επειδή στο χωρίς μέταλλα νεαρό σύμπαν τα νεφελώματα δεν μπορούσαν να ψυχτούν αποτελεσματικά, ο πρώτος αστρικός πληθυσμός αποτελούνταν μόνο από αστέρια πολύ μεγάλης μάζας. Αυτά ήταν πολύ βραχύβια με αποτέλεσμα σήμερα να μην έχει επιβιώσει κανένα.

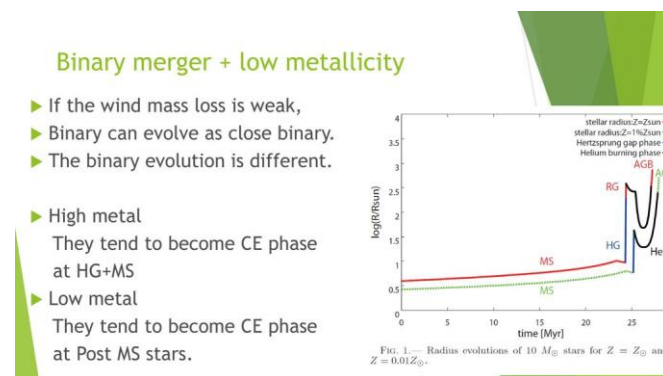
Στα αστέρια με την μικρότερη μεταλλικότητα (αμέσως επόμενης γενιάς, ελαφρώς χημικά εμπλουτισμένα αστέρια μικρής μάζας) παρατηρούμε πολύ μικρές αναλογίες στοιχείων όπως τα Fe, Mg, Ca, C, Si, Ti, Ni. Αυτό σημαίνει ότι ακόμη και σε νεφελώματα πολύ μικρής μεταλλικότητας δημιουργήθηκαν αστέρια μικρής μάζας. Σε αυτά τα αστέρια μικρής μάζας και μεταλλικότητας υπάρχουν αναλογικά περισσότερα διπλά και πολλαπλά αστρικά συστήματα και με μικρότερες περιόδους περιφοράς από ότι στα αστέρια μεγάλης μεταλλικότητας. Αυτό συμβαίνει επειδή στα νεφελώματα χαμηλής μεταλλικότητας οι πυκνές περιοχές (πυρήνες) δημιουργούνται σε μεγαλύτερο χρόνο από ότι στα χημικά εμπλουτισμένα νεφελώματα, με αποτέλεσμα η κατάτμηση (fragmentation) να συμβαίνει πιο εύκολα, σε συνθήκες μικρότερης ενέργειας περιστροφής.

Στα αστέρια μικρής μεταλλικότητας υπάρχει ένα μεγάλο πλήθος από αστέρια με ενισχυμένη αναλογία Άνθρακα (CEMP, Chemical enriched metal- poor stars). Η αναλογία

τους αυξάνεται όσο πιο μικρή είναι η μεταλλικότητα του αστρικού πληθυσμού και όσο απομακρυνόμαστε από το γαλαξιακό επίπεδο. Παρουσιάζουν ποικιλία χημικών ταυτοτήτων (αναλογιών στοιχείων) που δεν μπορεί ακόμα να εξηγηθεί. Τα περισσότερα έχουν υπέρβαση αναλογίας σε Άνθρακα, Άζωτο και στοιχείων s- process. Φαίνεται να είναι όλα μέλη διπλών αστρικών συστημάτων και να απορρόφησαν εμπλουτισμένη μάζα από τον συνοδό τους όταν αυτός εξελίχτηκε στον ασυμπυκνωτικό κλάδο (κύρια αστέρια των διπλών με μάζες 1,5- 4 ηλιακές). Σε αστέρια με πολύ μικρή αφθονία του Σιδήρου βρίσκουμε CEMP με πολύ μικρή αναλογία στοιχείων απορρόφησης νετρονίων (n- capture elements), τα αστέρια CEMP-no. Σε αυτά τα αστέρια η αναλογία διπλών συστημάτων είναι μικρότερη, όμοια με αυτή στα αστέρια με την μεταλλικότητα του ηλίου μας. Φαίνεται ότι η ιδιαιτερότητα της αναλογίας των χημικών στοιχείων σε αυτά τα αστέρια δεν έχει ως μηχανισμό την αλληλεπίδραση διπλών αστεριών.

### Γενικά συμπεράσματα

Η μελέτη των διπλών αστεριών πολύ μικρής μεταλλικότητας είναι δύσκολη. Αυτά τα αμυδρά αστέρια (μόνο τα μικρής μάζας υπάρχουν πια σήμερα στον Γαλαξία μας) βρίσκονται συνήθως μακριά, έξω από τον λεπτό γαλαξιακό δίσκο. Η απουσία έντονων φασματικών γραμμών δυσκολεύει μετρήσεις όπως η γωνιακή τους ταχύτητα. Γίνεται μια προσπάθεια ώστε να καθορίσουμε την αναλογία των εμπλουτισμένων σε Άνθρακα αστεριών μικρής μεταλλικότητας, και να κατανοήσουμε τον τρόπο εμπλουτισμού τους.



## Η επίδραση των διπλών αστεριών στην φασματική σύνθεση (spectral synthesis) του αστρικού πληθυσμού

Η σύνθεση ενός αστρικού πληθυσμού αναφέρεται στις παραμέτρους του μέσω συνδυασμού ανεξάρτητων αστρικών μοντέλων. Η φασματική σύνθεση συνδέει τους αστρικούς πληθυσμούς με τα μοντέλα των αστρικών ατμοσφαιρών. Βάση της θερμοκρασίας, βαρύτητας και χημικής σύνθεσης τα μοντέλα μας δείχνουν την εκπομπή των αστεριών. Τα περισσότερα αστρικά μοντέλα περιέχουν την παραδοχή ότι τα αστέρια είναι μονά. Έτσι δεν μπορούν να εφαρμοστούν σε πολλές περιπτώσεις, αφού στα στενά διπλά συστήματα τουλάχιστον το ένα αστέρι θα επηρεαστεί κατά την εξέλιξή του.

Τα μοντέλα αστρικής εξέλιξης δυσκολεύονται να προβλέψουν διαδικασίες όπως η απώλεια μάζας, η αστρική περιστροφή και η επίδραση της αστρικής συναγωγής. Οι παρατηρήσεις

(πολύ σημαντικές είναι αυτές του ηλίου μας) μας βοηθάνε να βελτιώσουμε τα μοντέλα. Στα μοντέλα διπλών αστεριών πρέπει να υπολογίζονται πολύπλοκοι μηχανισμοί όπως η πλήρωση του λοβού Roche, το κοινό περιαστρικό κέλυφος και φυσικά η ανταλλαγή μάζας ανάμεσα στα αστέρια. Τα διπλά αστέρια αλληλεπιδρούν μετά την εκτροπή από την κύρια ακολουθία (με μερικές εξαιρέσεις όπως οι blue stragglers).

Για όλους τους αστρικούς πληθυσμούς χρησιμοποιούμε μια συνιστώσα αρχικής αστρικής μάζας (IMF, initial mass function, ένα μέγεθος που μας δείχνει την αναλογία δημιουργίας αστεριών ανά αστρική μάζα) που μας δείχνει την πιθανότητα να δημιουργηθεί ένα αστέρι συγκεκριμένης μάζας σε ένα επεισόδιο αστρογέννησης. Σε έναν πληθυσμό διπλών αστεριών πρέπει να περιγράψουμε την διασπορά των αρχικών περιόδων περιφοράς, τις εκκεντρικότητες και τις μάζες των αστεριών. Τα αστέρια μεγάλης μάζας, >10 ηλιακές μάζες, έχουν σχεδόν όλα συνοδό και το 70% των διπλών τους είναι αρκετά στενοί ώστε τα αστέρια να αλληλεπιδράσουν κατά την εξέλιξή τους. Για αστέρια με λιγότερη από 1 ηλιακή μάζα, το ποσοστό των διπλών είναι 20%- 40%. Η διασπορά των περιόδων περιφοράς κυμαίνεται επίσης ανάλογα την αστρική μάζα. Μια επιπλοκή στην μελέτη των διπλών αστεριών είναι οι εκρήξεις σουπερνόβα. Ο συνοδός του αστεριού που βιώνει την έκρηξη ή θα απομακρυνθεί και θα εξελιχτεί ως μεμονωμένο αστέρι ή θα συνεχίσει ως συνοδός αστρικού πτώματος. Στην τελευταία περίπτωση θα δημιουργηθεί ένας διπλός αστέρας ακτινών X. Αν η μάζα που θα απομακρυνθεί από την έκρηξη είναι μεγαλύτερη από την μισή του διπλού συστήματος, ο συνοδός θα αποδεσμευτεί. Έτσι είναι σημαντικό πόση μάζα θα απομείνει στο αστρικό πτώμα και πόση θα εκτιναχτεί στην μεσοαστρική ύλη. Η δημιουργία αστέρα νετρονίων ή μαύρης τρύπας δίνει μια ώθηση στο αστρικό απομεινάρι (επειδή είναι έκκεντρη διαδικασία) που φτάνει ακόμη και τα 1000 km/s, δηλαδή μπορεί εύκολα να αποδεσμεύσει τον συνοδό.

Γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι η αστρική δυαδικότητα είναι πολύ σημαντική στην κατανόηση της αστρικής εξέλιξης. Χαρακτηριστική είναι η περίπτωση των αστεριών μεγάλης μάζας WR (χωρίς υδρογόνο στο φάσμα τους). Η αναλογία τους με αστέρια τύπου O, δηλαδή επίσης αστέρια μεγάλης μάζας που αντίθετα παρουσιάζουν υδρογόνο στο φάσμα τους στην κύρια ακολουθία, είναι διπλάσια στα αστέρια που βρίσκονται σε αλληλεπίδραση με τον συνοδό τους. Η αλληλεπίδραση των 2 αστεριών εξαλείφει αποτελεσματικά το υδρογόνο από την ατμόσφαιρα του αστεριού μεγαλύτερης μάζας του συστήματος.

#### *Σε γαλαξιακή και συμπαντική κλίμακα*

Η διασπορά του αστρικού πληθυσμού στον Γαλαξία μας και στους άλλους γαλαξίες στο κοντινό σύμπαν μας δείχνει την εξέλιξη και την πολυπλοκότητα των γαλαξιών εδώ και 13 δις έτη. Ενώ τα βραχύβια αστέρια μεγάλης μάζας εξελίσσονται στην περιοχή όπου δημιουργήθηκαν, τα υπόλοιπα αστέρια μπορεί να δημιουργήθηκαν σε διαφορετική περιοχή από αυτή που βρίσκονται ή ακόμα και σε άλλο γαλαξία που συγχωνεύτηκε με τον δικό μας. Για την κατανόηση των αστρικών πληθυσμών πρέπει να υπολογίζουμε τις διαδικασίες κοσμικής κλίμακας, χρονικής και χωρικής.

Οι πληροφορίες που έχουμε προέρχονται από το αστρικό φως, που πολλές φορές μεταβάλλεται περνώντας μέσα από σκόνη ή αέριο πριν φτάσει σε εμάς. Ακόμη και για τους πιο κοντινούς μας γαλαξίες η άμεση απεικόνιση και ανάλυση των αστεριών είναι πέρα από



τις δυνατότητες των τηλεσκοπίων μας. Έτσι αναλύουμε το φως από έναν ή πολλούς αστρικούς πληθυσμούς και όχι από ένα μόνο αστέρι. Στο υπέρυθρο και στο ορατό βλέπουμε συνήθως τα πιο νέα και μεγάλης μάζας αστέρια, επειδή επισκιάζουν με τις ισχυρές εκπομπές τους τα πιο αμυδρά αλλά πολυπληθέστερα αστέρια μικρής μάζας. Στο υπέρυθρο ή σε γαλαξίες χωρίς αστρογέννηση, με γερασμένο αστρικό πληθυσμό, παρατηρούμε πιο αντιπροσωπευτικά δείγματα κάθε αστρικού πληθυσμού. Από τα παραπάνω καταλαβαίνουμε ότι η γνώση της συνιστώσας αρχικής αστρικής μάζας και του ιστορικού αστρογέννησης (star formation history) είναι απαραίτητα για να βγάλουμε ασφαλή συμπεράσματα για τους αστρικούς πληθυσμούς.

Στους μακρινούς γαλαξίες παρατηρούμε το σύμπαν σε μια εποχή με έντονη αστρογέννηση και χαμηλή μεταλλικότητα, με διαφορετικούς αστρικούς πληθυσμούς από το σημερινό σύμπαν. Στα σφαιρωτά σμήνη τα αστέρια παρουσιάζονται πιο εμπλουτισμένα σε στοιχεία α, λόγω πληθώρας εκρήξεων σουπερνόβα αστρικής κατάρρευσης. Κάτι ανάλογο παρατηρούμε και σε μεγάλη ερυθρολίσηση, σε μακρινούς γαλαξίες στο νεαρό σύμπαν. Οι ιδιότητες των αστεριών μεγάλης μάζας είναι πολύ σημαντικές για τον αστρικό πληθυσμό στο νεαρό σύμπαν, που σημαίνει ότι η αλληλεπίδραση των διπλών αστεριών είναι καθοριστική.

Το φάσμα ιονισμένων γραμμών από τους μακρινούς γαλαξίες ( $z > 2$ ) περιέχει λεπτές και χοντρές γραμμές εκπομπής, που προέρχονται από ισχυρούς αστρικούς ανέμους και ιονισμένες περιοχές των νεφελωμάτων αντίστοιχα. Οι γαλαξίες του πολύ πρώιμου σύμπαντος ( $z > 5$ ) παρουσιάζουν πολύ μπλε και υπεριώδης εκπομπή (έχουμε υπολογίσει την ισχυρή ερυθρολίσηση), που αναλογεί σε πιο καυτά αστέρια. Ενώ αρχικά νομίζαμε ότι οφείλεται σε αστέρια πληθυσμού III (τα πολύ μεγάλης μάζας αρχικά αστέρια του σύμπαντος, που δημιουργήθηκαν από τα πρώτα νεφελώματα χωρίς μέταλλα), αυτή η εκπομπή μάλλον πρόκειται για αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης διπλών αστεριών σε συνθήκες ακραίας χαμηλής μεταλλικότητας. Μια επίδραση των διπλών είναι τη δημιουργία των αστεριών ηλίου και των αστεριών που έχουν μεγάλη ανάδευση βαρύτερων στοιχείων από το εσωτερικό τους λόγω ταχείας περιστροφής. Οι επιφανειακές θερμοκρασίες τους είναι υψηλότερες από αυτές στα κανονικά αστέρια, και εκπέμπουν πολύ ιονισμένο φως. Ακόμα, η εξέλιξη των αστεριών μεγάλης μάζας παρατείνεται στα διπλά συστήματα, με αποτέλεσμα το υπόβαθρο της εκπομπής να μην περιορίζεται σε λίγα εκατομμύρια έτη. Έτσι οι περιοχές φωτοϊονισμού έχουν μεγάλη χρονική διάρκεια και εμφανίζονται σε πολλούς γαλαξίες εκείνης της εποχής ταυτόχρονα.

Η επίδραση των διπλών συστημάτων εξαρτάται πολύ από την μεταλλικότητα, λόγω της εξάρτησης της αδιαφάνειας (opacity) από την μεταλλικότητα. Στους κοντινούς μας γαλαξίες που είναι πλούσιοι σε μέταλλα και έχουν χαμηλούς ρυθμούς αστρογέννησης τα μοντέλα αστρικών πληθυσμών για τα μονά αστέρια παρεκκλίνουν λίγο από την πραγματικότητα. Η επίδραση των διπλών μπορεί να γίνει προβλέψιμη.

Η ένταση του πεδίου αστρικής ακτινοβολίας αποτελεί δείκτη του ρόλου των γαλαξιών σε μια πολύ σημαντική καμπή του σύμπαντος, τον επαναιονισμό. Στην περίοδο του επαναιονισμού οι πιο λαμπρές περιοχές στο πολύ νεαρό σύμπαν, δηλαδή οι γαλαξίες αστρογέννησης, ιόνισαν σταδιακά τον μεσογαλαξιακό χώρο για πρώτη φορά από την

δημιουργία των ατόμων υδρογόνου (δέσμευση ενός ηλεκτρονίου από ένα πρωτόνιο, την εποχή  $z = 1100$ ). Αναπτύχθηκαν περιοχές ιονισμένου υδρογόνου (HII) γαλαξιακών μεγεθών, με αποτέλεσμα το σύμπαν να ιονιστεί κατά μεγάλο μέρος. Η διασπορά αυτών των περιοχών μας δείχνει την διασπορά των γαλαξιών αστρογέννησης. Από την ακτινοβολία υποβάθρου στα μικροκύματα παρατηρούμε ότι στην εποχή  $z = 9$  το σύμπαν ήταν ιονισμένο κατά 50%. Ο ιονισμός είχε απότομη αύξηση το διάστημα  $z = 6$  ως  $z = 10$ . Η αποτελεσματικότητα της εκπομπής ακτινοβολίας που ιονίζει την μεσογαλαξιακή ύλη έχει να κάνει με τον ρυθμό και την διάρκεια αστρογέννησης και την μεταλλικότητα ενός γαλαξία. Η ισχυρή εκπομπή ιονισμού (στο υπεριώδες) πετυχαίνεται πιθανώς μέσω ενός σημαντικού πληθυσμού διπλών αστέρων. Όπως ήδη αναφέραμε, η μεταλλικότητα καθορίζει τον πληθυσμό διπλών αστεριών, και οι διπλοί αστέρες ενισχύουν τον ιονισμό της ύλης.



