

## ΑΣΤΡΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΚΑΙ ΔΙΠΛΟΙ ΑΣΤΕΡΕΣ, ΑΣΤΕΡΙΑ ΜΕΓΑΛΗΣ ΜΑΖΑΣ

Ως αστέρια μεγάλης μάζας ορίζουμε αυτά που έχουν πάνω από 8 ηλιακές μάζες στην κύρια ακολουθία και εξελίσσονται με έκρηξη σουπερνόβα ή άμεση κατάρρευση αστρικού πυρήνα σε μαύρη τρύπα. Στον πυρήνα τους μεταστοιχειώνουν τα χημικά στοιχεία, μέχρι και το πυρίτιο. Τα περισσότερα αστέρια μεγάλης μάζας έχουν συνοδό ή συνοδούς. Το 50%- 70% των διπλών αστεριών μεγάλης μάζας θα αλληλεπιδράσουν βαρυτικά με τον συνοδό τους. Στα μονά αστέρια μεγάλης μάζας υπάρχει αβεβαιότητα ως προς την αστρική εξέλιξη, άρα δεν είναι εύκολο να συμπεράνουμε τις επιδράσεις των συνοδών στην εξέλιξή τους. Η αλληλεπίδραση και εξέλιξη των διπλών αστεριών μεγάλης μάζας εξαρτάται από τις αρχικές μάζες τους, τις περιόδους περιφοράς (τροχιές), την εκκεντρικότητα του συστήματος και την αναλογία μαζών των 2 αστεριών. Οι περισσότεροι διπλοί μεγάλης μάζας που ανακαλύπτουμε είναι στενοί διπλοί και αναμένεται να αλληλεπιδράσουν μεταξύ τους.



### *Απώλεια μάζας*

Τα αστέρια μεγάλης μάζας παρουσιάζουν σημαντική απώλεια μάζας στην εξέλιξή τους, ανάλογα την μάζα τους. Για μεταλλικότητα όπως του ηλίου μας, ένα αστέρι με 15 ηλιακές μάζες στην κύρια ακολουθία, θα απολέσει 2- 3 ηλιακές μάζες στην εξέλιξή του, και μόλις μερικά δέκατα της ηλιακής μάζας στην κύρια ακολουθία. Ένα αστέρι 120 ηλιακών μαζών θα απολέσει πάλι μικρή ποσότητα μάζας στην κύρια ακολουθία, αλλά 100 ηλιακές μάζες στην σύντομη διάρκεια της υπόλοιπης ζωής του. Οι πολύ ισχυροί αστρικοί τους άνεμοι οφείλονται στην πίεση ακτινοβολίας και όχι στην πίεση αερίου όπως συμβαίνει στα αστέρια μικρότερης μάζας. Στην πράξη παρατηρούμε μεγάλες αποκλίσεις απώλειας μάζας ανάμεσα σε αστέρια με όμοια μεγάλη μάζα. Η μεγαλύτερη απώλεια μάζας για τα αστέρια τύπου O, WR συμβαίνει όταν αυτά φτάνουν το όριο Eddington (όριο όπου η πίεση του αστεριού τείνει να το διαμελίσει). Επίσης σημαντικό ρόλο στην απώλεια αστρικής μάζας έχει η μεταλλικότητα. Αστέρια μεγάλης μεταλλικότητας επηρεάζονται περισσότερο από τον αστρικό άνεμο (τα φωτόνια <σπρώχνουν> πιο εύκολα τους πυρήνες των

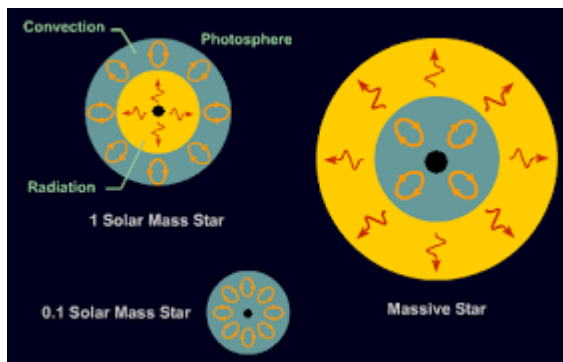
μετάλλων). Μεγαλύτερη ασάφεια σχετικά με την απώλεια μάζας υπάρχει στην φάση του ερυθρού υπεργίγαντα.

#### Εσωτερική ανάμειξη υλικού

Η ανάμειξη υλικού (mixing progress) συμβαίνει με την μεταφορά υλικού από το εξωτερικό του αστέρα (υδρογόνο) στον πυρήνα και αντίθετα, βαρύτερων χημικών στοιχείων προς την αστρική επιφάνεια. Αυτό το φαινόμενο μπορεί να επηρεάσει την αστρική εξέλιξη και τις ιδιότητες της αστρικής επιφάνειας (θερμοκρασία, φάσμα). Κύρια αίτια της ανάμειξης υλικού είναι η μεγάλη περιοχή (πυρήνας) συναγωγής των αστεριών μεγάλης μάζας και η μεγάλη ταχύτητα περιστροφής τους.

#### Συναγωγή (convection)

Οι προσομοιώσεις υδροδυναμικής της συναγωγής στο εσωτερικό των αστεριών έχουν σημειώσει μεγάλη πρόοδο. Είναι πολύ σημαντικές, επειδή μας επιτρέπουν να μελετήσουμε την ροή του υλικού μέσα στα αστέρια. Έχουμε προσομοιώσεις για τον φλοιό καύσης ηλίου σε αστέρια μεσαίας μάζας και για τους φλοιούς καύσης άνθρακα, οξυγόνου, πυριτίου στα τελευταία στάδια εξέλιξης των αστεριών μεγάλης μάζας. Αυτές οι προσομοιώσεις μας δίνουν πληροφορίες για τα την περιοχή συναγωγής, καθώς και την κίνηση της ύλης και την ανάμειξη των χημικών ορίων της συναγωγής. Επίσης μας πληροφορούν για την αλληλεπίδραση της πυρηνικής καύσης με την συναγωγή. Οι μέθοδοι της αστροσεισμολογίας μας παρέχει δεδομένα για την συναγωγή σε αστέρια φασματικού τύπου B. Η συναγωγή επηρεάζει σημαντικά την αστρική εξέλιξη και την τελική κατάληξη του αστέρα.



#### Αστρική περιστροφή

Η περιστροφή επηρεάζει με 2 τρόπους την αστρική εξέλιξη. 1) Η ταχεία περιστροφή παραμορφώνει το σχήμα ενός αστέρα από σφαιρικό σε ωειδές, με αποτέλεσμα οι μετρήσεις μας να εξαρτώνται από τον προσανατολισμό του αστέρα προς εμάς. Επίσης το αστερί παρουσιάζει ανισότροπη απώλεια μάζας, με ισχυρότερο αστρικό άνεμο στον ισημερινό του. Η εξάρτηση της επιφανειακής θερμοκρασίας από το αστρικό ύψος (απόσταση από τον αστρικό ισημερινό) έχει παρατηρηθεί στον Altair και σε άλλα αστέρια. Ένα αστέρι με ταχεία περιστροφή έχει μεγαλύτερη επιφανειακή θερμοκρασία και λαμπρότητα στους πόλους από ότι στον (διογκωμένο) ισημερινό. Από τον ισημερινό έχουμε μεγαλύτερη απώλεια στροφορμής, λόγω ταχύτερης περιστροφής, με αποτέλεσμα να έχουμε και μεγαλύτερη εκροή μάζας.

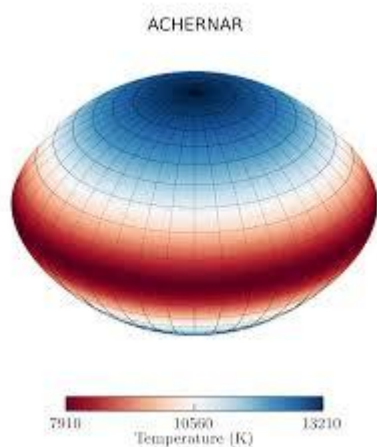
2) Ενισχύει την εσωτερική ανάμειξη υλικού και αυξάνει την στροφορμή του αστέρα. Έτσι υπάρχουν σημαντικές διαφοροποιήσεις από τα μοντέλα αστρικής εξέλιξης για αστέρια χωρίς σημαντική περιστροφή. Εμπλουτίζεται περισσότερο ο αστρικός πυρήνας σε υδρογόνο και αντίθετα εμπλουτίζεται η επιφάνεια σε βαρύτερα στοιχεία από το αστρικό εσωτερικό.

#### *Οι επιδράσεις στην αστρική εξέλιξη*

Να δούμε τώρα πως συνδυάζονται όλα τα παραπάνω στην αστρική εξέλιξη. Η περιστροφική μείξη (rotational mixing) εμπλουτίζει τον πυρήνα με νέα καύσιμα. Έτσι παρατείνεται η παραμονή του αστέρα στην κύρια ακολουθία και μάλιστα με μεγαλύτερη λαμπρότητα. Όμως το αστέρι δεν παρουσιάζει μονότονη μεταβολή ανάλογα την αύξηση της περιστροφής του. Αρχικά στην κύρια ακολουθία κυριαρχούν οι υδροστατικές επιδράσεις και το αστέρι εμφανίζεται λίγο ψυχρότερο και πιο αμυδρό. Στην εξέλιξη η ανάμειξη υλικού έχει ως αποτέλεσμα την συρρίκνωση του αστρικού πυρήνα αυξάνοντας την λαμπρότητα, ενώ η θερμοκρασία ελαττώνεται επειδή αλλάζει η χημική σύσταση. Η επίδραση της μείξης υλικού κυριαρχεί στα αστέρια με αργή και μέση περιστροφή, ενώ σε αστέρια ταχείας περιστροφής υπάρχει συνδυασμός επίδρασης από την μείξη και τις υδροστατικές επιδράσεις. Έτσι τα λαμπρότερα αστέρια δεν είναι αυτά με την ταχύτερη περιστροφή, αλλά με περιστροφή λίγο ταχύτερη από την μέση τιμή. Υπάρχουν αστέρια (ιδίως μικρής μεταλλικότητας) που σημειώνουν ακραία μεγάλη μείξη υλικού στην κύρια ακολουθία. Εξελίσσονται σε πολύ καυτά και συμπαγή αστέρια και θεωρούνται προγεννήτορες μακρόχρονων μαλακών εκρήξεων ακτινών  $\gamma$  (long soft gamma- ray burst).

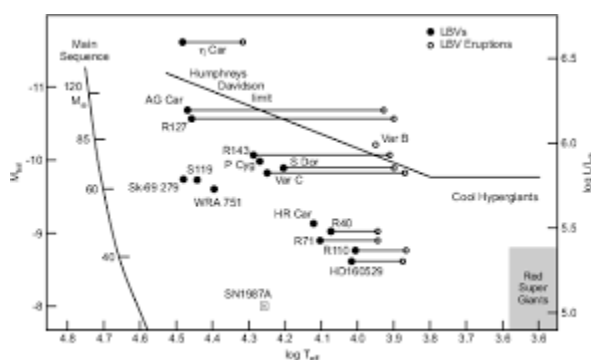
#### *Εξέλιξη της επιφανειακής αστρικής ταχύτητας*

Με την διαστολή της αστρικής επιφάνειας αναμένουμε να ελαττωθεί η στροφορμή, λόγω της αρχής της διατήρησής της. Βάση αυτής της εξέλιξης παρατηρούνται 2 φαινόμενα, η απώλεια μάζας (μαζί με την απώλεια στροφορμής) και η εσωτερική μεταφορά ύλης (λόγω μεταφοράς στροφορμής από το αστρικό εσωτερικό στην επιφάνεια). Αυτά τα φαινόμενα είναι ανάλογα (ενισχυμένα) με την αστρική μάζα και μεταλλικότητα. Τα φαινόμενα αυτά είναι σημαντικά για αστρικές μάζες πάνω από 20 ηλιακές και πολύ έντονα για 60 ηλιακές μάζες, για ηλιακή μεταλλικότητα.



## Λαμπροί μπλε μεταβλητοί (luminous blue variables, LBV), σχηματισμός και αστάθειες λόγω αστρικής αλληλεπίδρασης

Οι LBV παρουσιάζουν μεγάλη απώλεια μάζας. Είναι ανώμαλοι μεταβλητοί αστέρες με επεισόδια εκρηκτικής απώλειας μάζας. Έχουν μάζα από μερικές δεκάδες ως 100 ηλιακές. Η λαμπρότητά τους μπορεί να ξεπερνάει το όριο Humphreys- Davidson (υπέρβαση του ορίου Eddington για αστρική λαμπρότητα, που μπορεί να συμβεί μόνο με εκρηκτική απώλεια μάζας). Οι LBV έχουν γύρω τους ένα κέλυφος μάζας 0,1- 40 ηλιακές, που δημιουργείται μέσω των εκρηκτικών επεισοδίων απώλειας μάζας.



Οι LBV βιώνουν 2 είδη εκρήξεων (εκροών) με χρονοδιαγράμματα από μερικούς μήνες ως δεκαετίες. Οι εκροές ύλης τύπου S Doradus έχουν ως αποτέλεσμα την μεταβολή της λαμπρότητας του αστέρα κατά 1- 2 mag, ενώ οι γιγαντιαίες εκρήξεις πάνω από 2 mag. Κατά τις εκροές S Doradus το αστέρι κινείται στο διάγραμμα H/R προς τα δεξιά (χαμηλότερες θερμοκρασίες) σε διάστημα μερικών μηνών ως μερικών ετών. Σε κατάσταση ηρεμίας, οι LBV έχουν επιφανειακή θερμοκρασία 12000K- 30000K, με φάσμα μπλε υπεργίγαντα ή μεταγενέστερου τύπου Of/ WN. Η απώλεια μάζας τότε υπολογίζεται στο ένα εκατομμυριοστό της ηλιακής μάζας το έτος. Κατά την εκροή S Doradus η επιφανειακή θερμοκρασία μειώνεται στους 8000K και το φάσμα αντιστοιχεί σε υπεργίγαντα F. Η απώλεια μάζας φτάνει το 1/10000 της ηλιακής μάζας.

Κατά τις γιγαντιαίες εκρήξεις- εκτινάξεις ύλης η απώλεια μάζας φτάνει την 1 ηλιακή μάζα το έτος, με φάσμα F ή G υπεργίγαντα.

Μας είναι γνωστοί περίπου 40 LBV στην τοπική ομάδα γαλαξιών, και πολλοί άλλοι υποψήφιοι. Οι LBV είναι πιο πλούσιοι σε άζωτο και ήλιον από τα αστέρια τύπου O, αλλά και έχουν περισσότερο υδρογόνο στις ατμόσφαιρές τους από τα φτωχά σε υδρογόνο αστέρια WR. Υπήρχε η εντύπωση πως αποτελούν μεταβατικό στάδιο ανάμεσα στα αστέρια O και WR, αλλά παρατηρούμε προγεννήτορες σουπερνόβα να είναι και αστέρια LBV που δεν εξελίχθηκαν σε WR. Αστέρια LBV ταχείας περιστροφής με 20- 25 ηλιακές μάζες μπορούν να εξελιχτούν σε σουπερνόβα. Οι περισσότερες SN IIη δείχνουν εκρηκτική απώλεια μάζας του αστεριού πριν την κατάρρευση, που παραπέμπει σε LBV (ανιχνεύουμε φασματοσκοπικά την αλληλεπίδραση της σουπερνόβα με το κέλυφος του LBV). Ο προγεννήτορας της SN 2005gl ήταν ένας πολύ λαμπρός μπλε αστέρας, μάλλον LBV. Το ίδιο ισχύει για τις SN 2006gy, SN 2009ip, SN 2010mc. Οι LBV εμφανίζονται πιο απομονωμένοι

από τα αστέρια O, WR και μπορούν να θεωρηθούν ως οι μεγάλης μάζας BSS (Blue Stragglers stars).



#### *Η αιτία της αστάθειας- LBV σε διπλά συστήματα*

Αρχικά νομίζαμε ότι οι εκτινάξεις ύλης του S Doradus εμφανίζουν σταθερή βολομετρική (σε όλο το φάσμα) λαμπρότητα. Αυτό θα σήμαινε ότι μια μεταβολή στην θερμοκρασία προκαλεί την μεταβολή της ακτίνας της φωτόσφαιρας. Μία εναλλακτική θεωρία υποστήριζε ότι οι εκτινάξεις ύλης ήταν μεγάλης μάζας, με αποτέλεσμα να δημιουργείται μια ψευδό-φωτόσφαιρα. Οι φασματοσκοπικές και φωτομετρικές διακυμάνσεις μας δείχνουν ότι οι εκτινάξεις ύλης δεν έχουν αρκετή μάζα για να δημιουργηθεί μια ψευδό-φωτόσφαιρα. Αποδείχτηκε ότι οι εκτινάξεις δεν έχουν σταθερή λαμπρότητα. Η μεταβολή της ακτίνας της φωτόσφαιρας προκαλείται από παλμούς ή διαστολή του κελύφους μέσω αλληλεπίδρασης των σωματιδίων σιδήρου με τον αστρικό άνεμο (iron opacity bump). Αντίθετα, οι γιγάντιες εκτινάξεις (giant eruptions) οφείλονται σε ανέμους υπέρ- Eddington (όριο συνοχής του αστεριού) ή υδροδυναμικές εκρήξεις.

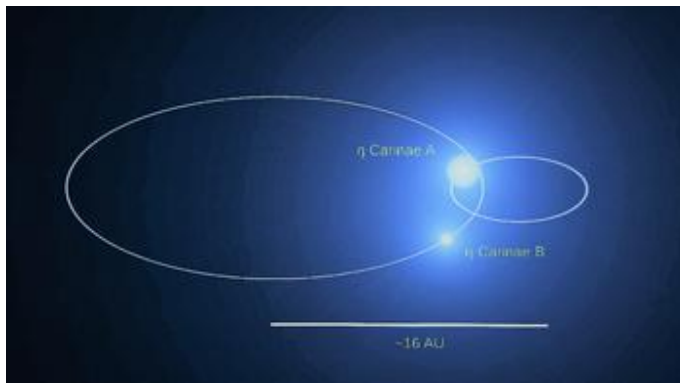
Η ανακάλυψη συνοδών αστεριών των LBV είναι πολύ δύσκολη, λόγω της μεγάλης λαμπρότητας τους και του μεταβλητού φάσματος. Θεωρητικά ένας συνοδός θα έχει επίδραση στις εκτινάξεις ύλης ενός LBV με τους παρακάτω τρόπους. 1) Κατά την εκτίναξη τύπου S Doradus το πρωτεύον αστέρι μπορεί να υπερβαίνει τον λοβό Roche τόσο ώστε ο συνοδός να περάσει μέσα από τα ανώτερα στρώματά του. Αυτό θα ενισχύσει την εκτίναξη ύλης. 2) Ένας συνοδός σε κοντινή, έκκεντρη τροχιά μπορεί να αποσταθεροποιήσει περιοδικά την ατμόσφαιρα του LBV, με αποτέλεσμα τις γιγάντιες εκτινάξεις ύλης. 3) Ακόμα και η μεταφορά μάζας από τον συνοδό μπορεί να φέρει αστάθεια στον LBV. Κατά το περίαστρο επηρεάζεται η αδιαφάνεια (opacity), η θερμοκρασία και η πυκνότητα της ατμόσφαιρας του πρωτεύοντα αστεριού.

Στον Γαλαξία μας έχουν επιβεβαιωθεί μόνο 2 κοντινοί διπλοί με LBV, το η Carina και το HR Carina. Η άμεση ανακάλυψη συνοδού σε LBV απαιτεί ανάλυση εκατομμυριοστού του δευτερολέπτου του τόξου, που πετυχαίνουμε μόνο στην συμβολομετρία στο ορατό φάσμα. Ακόμη, στις ακτίνες X και σε επισκόπηση με το διαστημικό τηλεσκόπιο Hubble βρέθηκαν πολλοί υποψήφιοι διπλοί LBV, όπως το Pistol star. Επίσης εξετάζουμε και την διπολικότητα του νεφελώματος (κουκούλι) γύρω από τους LBV. Το Homunculus nebular γύρω από τον η

Carina είναι διπολικό, όπως το 50% των κελυφών των LBV. Η διπολικότητα εξηγείται με την ύπαρξη συνοδού αστέρα.

#### *Το η Carina*

Πρόκειται για ένα από τα μεγαλύτερης μάζας εξελιγμένα αστέρια που γνωρίζουμε. Έγινε γνωστό με την γιγάντια εκτίναξη ύλης (10- 40 ηλιακές μάζες) στις αρχές του 19<sup>ου</sup> αιώνα και την μικρότερη εκτίναξη ύλης (0,1 – 1 ηλιακή μάζα) το 1890. Αναφέρεται ως LBV. Ο συνοδός του αστέρα με τροχιά 5,5 ετών φέρνει μεταβολές στην φωτομετρία και στο φάσμα του LBV σε κάθε περίαστρο. Η μάζα του συνοδού υπολογίζεται στις 30 ηλιακές. Η μεταφορά μάζας κατά το περίαστρο από τον (διεσταλμένο) πρωτεύον στον δευτερεύον αστέρα μπορεί να σημαίνει αύξηση της λαμπρότητας του συστήματος με διάρκεια από εβδομάδες ως και μήνες. Οι κορυφώσεις στο διάγραμμα της λαμπρότητας κατά τις εκτινάξεις ύλης συμβαίνουν στα περιάστρα. Η γιγαντιαία εκτίναξη του η Car μπορεί να συνέβη σε μια πολύ κοντινή προσέγγιση (σύγκρουση των εξωτερικών στρωμάτων) των 2 αστεριών. Ο ασταθής πρωτεύον μπορεί να διαστάλθηκε πέρα από την απόσταση του περιάστρου. Μόλις ο δευτερεύον μπήκε στην ατμόσφαιρα του πρωτεύον αστεριού, σημειώθηκε μια εκτίναξη ή και έκρηξη ύλης.



#### *Το HR Carina*

Γύρω από αυτό το LBV σε διπλό σύστημα υπάρχει ένα διπολικό κέλυφος με μεγάλη φασματοσκοπική και φωτομετρική μεταβλητότητα. Πρόσφατα (1991, 2001) παρουσίασε 2 εκτινάξεις τύπου S Doradus, στα περιάστρα του συστήματος. Η περίοδος του συνοδού είναι 6,5 έτη και η συνολική μάζα των 2 αστεριών είναι 50 ηλιακές. Παρατηρούμε την αλληλεπίδραση των 2 αστρικών ανέμων. Στο μέγιστο μιας εκροής τύπου S Doradus ο πρωτεύον γεμίζει τον χώρο ως το περίαστρο, με αποτέλεσμα ο συνοδός να μπαίνει μέσα στην ατμόσφαιρά του. Η περιοδικότητα του αστρικού ανέμου του πρωτεύον είναι στα 6,5 έτη, επιβεβαιώνοντας ότι έχει συνοδό και ότι επηρεάζεται από αυτόν. Σε αυτό το σύστημα, με μικρότερη μάζα και εκκεντρικότητα από το η Car, δεν έχουμε παρατηρήσει γιγάντια εκτίναξη ύλης. Οι εκτινάξεις που παρατηρούμε δεν ξεπερνάνε την 1 ηλιακή μάζα. Ελπίζουμε να έχουμε πληθώρα παρατηρήσεων από το επόμενο περίαστρο το 2020.

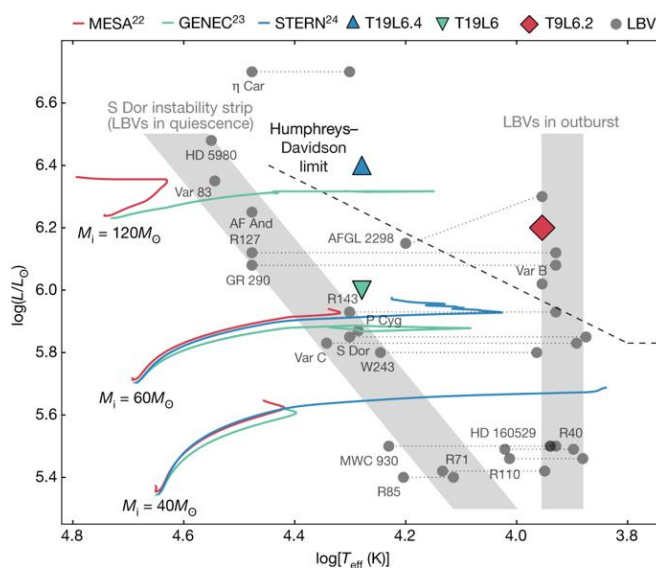
#### *Ο σχηματισμός των LBV μέσω διπλών αστεριών*

Υπάρχουν έρευνες που υποστηρίζουν ότι οι LBV βρίσκονται σε μεγαλύτερη απόσταση από τα σμήνη OB από ότι τα αστέρια WR. Ή οι LBV έχουν μικρότερη αρχική μάζα και μεγαλύτερη

παραμονή στην κύρια ακολουθία ώστε να προλάβουν να απομακρυνθούν από τα σμήνη τους, κάτι που έρχεται σε αντίθεση με την λαμπρότητά τους (που αντιστοιχεί σε πολύ μεγάλη μάζα και μικρή παραμονή στην κύρια ακολουθία), ή η μεγάλη λαμπρότητα οφείλεται σε αλληλεπίδραση διπλών αστεριών. Έτσι υπάρχουν 2 σενάρια για την δημιουργία ενός LBV, 1) να αποκτήσε ο υποψήφιος LBV επιπλέον μάζα από τον συνοδό του και αυτός να βίωσε έκρηξη σουπερνόβα, με αποτέλεσμα ο LBV να δέχτηκε ώθηση (Kick scenario) που να δικαιολογεί την απομάκρυνση από το σμήνος, και 2) Να προέρχεται από συγχώνευση 2 αστεριών.

Στο πρώτο σενάριο το δευτερεύον αστέρι ενός διπλού συστήματος συσσωρεύει μάζα από τον διεσταλμένο συνοδό του (που έχει εγκαταλείψει την κύρια ακολουθία), με αποτέλεσμα να αυξήσει την μάζα, την περιστροφή και την λαμπρότητά του. Το πρωτεύον αστέρι δεν θα εξελιχτεί σε ερυθρό υπεργίγαντα αλλά τελειώνει την ζωή του ως μπλε υπεργίγαντας. Χάνει έτσι όλον τον επιφανειακό φλοιό από υδρογόνο και βιώνει μια έκρηξη SN Ib/c. Το δευτερεύον αστέρι (LBV) δέχεται ισχυρή ώθηση από την έκρηξη. Ένας LBV έχει χαρακτηριστικά που δεν ταιριάζουν σε κανονικό αστέρι τόσο μεγάλης λαμπρότητας. Μπορεί να έχει την διπλή ηλικία από ένα κανονικό αστέρι ίδιας λαμπρότητας.

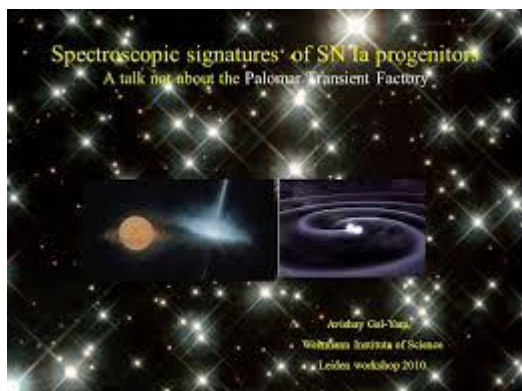
Στο δεύτερο σενάριο ενώνονται τα 2 αστέρια ενός συστήματος στην φάση του ερυθρού υπεργίγαντα και δημιουργούν έναν μπλε υπεργίγαντα. Ο ερυθρός υπεργίγαντας διαστέλλεται πολύ με αποτέλεσμα να μπει ο συνοδός στην ατμόσφαιρά του και τελικά να συγχωνευτούν. Μερικά από αυτά τα συστήματα μπορεί να είναι πολλαπλά, με αποτέλεσμα οι LBV που δημιουργήθηκαν να έχουν συνοδούς. Υπάρχουν παρατηρησιακά δεδομένα που υποστηρίζουν αυτό το σενάριο. 1) Οι LBV έχουν ταχέα περιστροφή, που ενισχύει την αστάθειά τους. 2) Έχουν σημαντικά μικρότερο ποσοστό διπλών από ότι τα άλλα αστέρια ίδιας μάζας (επειδή ήδη συγχωνεύτηκαν τα 2 αστέρια). 3) Η χωρική κατανομή τους εξηγείται με αυτό το σενάριο.



## Σουπερνόβα τύπου Ia

Η εξερεύνηση των SN Ia προβλέπει την κατανόηση της εξέλιξης της λαμπρότητας αυτών των εκρήξεων. Αυτό το χαρακτηριστικό και η συχνότητα αυτών των φαινομένων μας δίνει πληροφορίες για την φύση των προγεννήτορων αστέρων τους. Η ενέργεια και ο χημικός εμπλουτισμός από αυτές συμβάλλουν στην εξέλιξη των γαλαξιών. Επίσης μας βοηθάει να κατανοήσουμε την αλληλεπίδραση των διπλών αστρικών συστημάτων.

Αυτές οι σουπερνόβα δεν έχουν φασματικές γραμμές υδρογόνου και ηλίου και παρουσιάζουν όλες παρόμοια κορύφωση λαμπρότητας, φάσμα και μορφή καμπύλης φωτός. Εμφανίζονται και σε ελλειπτικούς γαλαξίες, σε αντίθεση με τις SN II. Οι τελευταίες προέρχονται από κατάρρευση πυρήνα αστεριού μεγάλης μάζας (άρα και μικρής ηλικίας), και δεν παρατηρούνται σε ελλειπτικούς γαλαξίες λόγω παύσης αστρογέννησης. Οι προγεννήτορες των SN Ia είναι λευκοί νάνοι (από αστέρια μεσαίας μάζας) με συνοδό. Το γεγονός ότι έχουν ίδια λαμπρότητα σημαίνει ότι όλες εκλύουν ίδια ποσότητα ραδιενεργού  $^{56}\text{Ni}$ . Επίσης εντυπωσιακό είναι ότι παρατηρούμε την απουσία υδρογόνου, του με μεγάλη διαφορά πιο συχνού στοιχείου του σύμπαντος. Αυτό το γεγονός δείχνει ότι πρόκειται για λευκούς νάνους άνθρακα- οξυγόνου. Η ενέργεια που εκλύεται από έναν τέτοιο λευκό νάνο με 0,6 ηλιακές μάζες  $^{56}\text{Ni}$  είναι 10<sup>51</sup> erg, που αντιστοιχεί στην λαμπρότητα αυτών των σουπερνόβα (-19,2 mag). Ένας λευκός νάνος βιώνει την έκρηξη όταν (η εκφυλισμένη ύλη του) περάσει το όριο Chandrasekhar (1,4 ηλιακές μάζες), λόγω συσσώρευσης υλικού από συνοδό αστέρα.



Οι διπλοί που θεωρούνται υποψήφιοι για SN Ia είναι οι επαναλαμβανόμενες Νόβα (recurrent nova), οι πολύ μαλακές πηγές ακτίνων Χ (super soft X ray sources, SSS), οι λευκοί νάνοι ταχείας συσσώρευσης (rapid accreting WD) και οι λευκοί νάνοι που έλκουν υλικό από αστέρι πλούσιο σε ήλιον (He-rich donors). Μια ξεχωριστή κατηγορία είναι τα συστήματα με 2 λευκούς νάνους. Υπάρχουν επαναλαμβανόμενες Νόβα όπως οι U Sco, RS Oph, T GrB όπου οι λευκοί νάνοι έχουν μάζα κοντά στην κρίσιμη για έκρηξη SN Ia. Προϋπόθεση οι λευκοί νάνοι να είναι άνθρακα- οξυγόνου. Αν είναι ONeMg τότε δεν θα σημειωθεί έκρηξη SN Ia. Στα παραπάνω συστήματα ο λευκός νάνος βρίσκεται μέσα στον δίσκο συσσώρευσης με αποτέλεσμα να μην είναι δυνατή η άμεση παρατήρησή του. Ακόμα, δεν γνωρίζουμε με ποιόν ρυθμό αυξάνει την μάζα του. Στις επαναλαμβανόμενες Νόβα ο λευκός νάνος μπορεί να χάνει περισσότερη μάζα κατά τις εκρήξεις από όση συσσωρεύει μέσου του δίσκου. Για εκατομμύρια έτη ένας λευκός νάνος σε σύστημα με μη εκφυλισμένο αστέρα (όχι λευκό

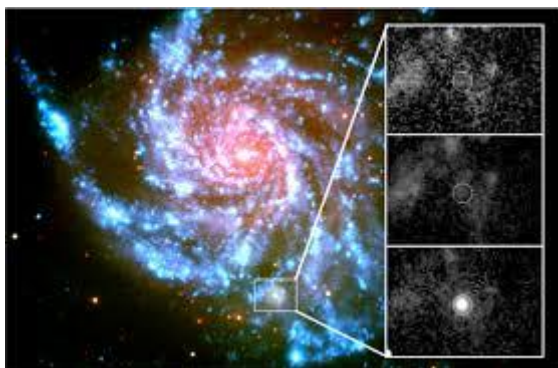


νάνο ή αστέρι νετρονίων) σημειώνει ομαλή θερμοπυρηνική σύντηξη συσσωρεύοντας υλικό από τον συνοδό του. Μπορεί να ανιχνευτεί ως SSS. Ακόμα και οι διπλοί με 2 λευκούς νάνους (DD) μπορεί να περάσουν την φάση SSS, με πολύ μικρότερη λαμπρότητα. Στη SN 2007on μπορέσαμε και συνδυάσαμε, με πολλές αμφιβολίες, την έκρηξη SN Ia με SSS προγεννήτορα. Αυτή η κατηγορία πρέπει να αντιστοιχεί στο μόλις 1% των SN Ia.

Για να βρούμε τον προγεννήτορα μιας SN Ia, ανατρέχουμε στο αρχείο να βρούμε εικόνες της περιοχής πριν την έκρηξη. Αυτό λειτουργούσε μόνο για σουπερνόβα κατάρρευσης αστρικού πυρήνα (SN II), μέχρι την SN 2011fe στον M101. Η μικρή απόσταση, 20 εκατομμύρια έτη φωτός, και η γρήγορα ανακάλυψη της SN Ia, σε μόλις μερικές ώρες, μας βοήθησε να την μελετήσουμε σε πολλά μήκη κύματος. Υπήρχαν αρχεία του τηλεσκοπίου Hubble που απέκλεισαν έναν ερυθρό γίγαντα στον τόπο της έκρηξης ως συνοδό του λευκού νάνου (θα υπήρχε στα πλάνα του αρχείου). Το ίδιο παρατηρήσαμε στην SN 2014J.

Στον καθορισμό της κρίσιμης μάζας του λευκού νάνου ώστε να σημειωθεί SN Ia είναι σημαντική η περιστροφή του λευκού νάνου. Η μάζα Chandrasekhar (1,4 ηλιακές μάζες) μπορεί να ξεπεραστεί λόγω ταχείας περιστροφής, και σε DD.

Οι ιδιότητες της έκρηξης μας δίνουν πληροφορίες για τον προγεννήτορα. Χαρακτηριστικές ιδιότητες είναι η καμπύλη φωτός, η εξέλιξη του φάσματος, τα κρουστικά κύματα στο συνοδό αστέρι, η ασυμμετρία της έκρηξης, η ύπαρξη ή όχι του υδρογόνου, η εκπομπή ακτίνων X και ραδιοκυμάτων του περιαστρικού υλικού, καθώς και η σκόνη, η απορρόφηση και η επανεκπομπή φωτός από αυτό. Οι 2 πρώτες ιδιότητες παρατηρήθηκαν στην SN 2011fe. Το κρουστικό κύμα έδειξε ότι πιθανώς να ήταν σύστημα DD. Το μέγεθος του αντικειμένου που βίωσε την έκρηξη καθορίστηκε σε 0,02 φορές την ακτίνα του ηλίου μας, μέγεθος που αναλογεί σε λευκό νάνο. Οι τυπικές SN Ia επιδεικνύουν σταθερά μηδενική πολικότητα, που αντιστοιχεί σε σφαιρική συμμετρία. Η ασυμμετρία της έκρηξης ταιριάζει σε λευκούς νάνους ταχείας περιστροφής. Δεν έχει παρατηρηθεί αλληλεπίδραση της έκρηξης με περιαστρικό κέλυφος. Αυτό το γεγονός ενισχύει το σενάριο SN Ia με προγεννήτορα DD, που δεν αφήνει σημαντική ποσότητα υλικού να σχηματίσει περιαστρικό κέλυφος. Η ταχεία περιστροφή μπορεί να επιτρέψει στο κέλυφος να διασταλεί αρκετά, λόγω καθυστερημένης έκρηξης, ώστε να μην είναι πιο πυκνό από τη μεσοαστρική ύλη, και να μην ανιχνευτεί άμεσα η αλληλεπίδραση με την έκρηξη. Μπορεί όμως να ανιχνεύσουμε μια μεταβλητότητα, όπως στην SN 2006X, αν το κέλυφος είναι σε απόσταση αρκετά μεγάλη ώστε να μην απορροφήσει και επανεκπέμψει το φως της έκρηξης, αλλά και αρκετά κοντά ώστε να επηρεαστεί από την ακτινοβολία της έκρηξης. Η έρευνα για μετατόπιση στο μπλε (blueshift) των γραμμών απορρόφησης του Na δηλώνουν υλικό που απωλέσθηκε από τον προγεννήτορα (κέλυφος) στο 20% των SN Ia.



Μία βασική διαφορά ανάμεσα σε ένα σύστημα DD και ένα σύστημα SD είναι ότι στην δεύτερη περίπτωση θα παραμείνει ο συνοδός- αστέρι, που θα αποδεσμευτεί μετά την έκρηξη SNIa του λευκού νάνου από το σύστημα, και θα απομακρύνεται από το σημείο της έκρηξης. Τα μοντέλα προβλέπουν ότι ο συνοδός- αστέρι επιβιώνει την έκρηξη, αποκτάει μεγάλη ίδια ταχύτητα και ταχύτητα περιστροφής και πιθανώς εμπλουτίζεται χημικά από τα υλικά της έκρηξης. Έτσι ψάχνουμε να ανιχνεύσουμε αστέρια που έχουν παράξενη σύσταση, μεγάλη ταχύτητα περιστροφής και απομακρύνονται με μεγάλη ταχύτητα από το υπόλειμμα μιας σουπερνόβα. Βρέθηκε ένα αστέρι που μπορεί να αποτέλεσε τον συνοδό λευκού νάνου, το αστέρι G στο υπόλειμμα του Tycho.

Μια άλλη ιδέα είναι να ψάξουμε για πιθανές αλληλεπιδράσεις του υπολείμματος της έκρηξης με το μεσοαστρικό υλικό. Στο σενάριο SD αναμένουμε να παρατηρήσουμε εσοχές που δημιουργήθηκαν από τον μεγάλης ταχύτητας άνεμο της εκροής ύλης από τον δίσκο συσσώρευσης στην μεσοαστρική ύλη, με βάθος 3- 30 pc. Δεν έχουμε παρατηρήσει κάτι τέτοιο, που σημαίνει ότι δεν υπήρχε τόσο ισχυρός άνεμος ή αυτός διακόπηκε αρκετά πριν από την έκρηξη.

Η συχνότητα των SNIa στον Γαλαξία μας είναι 1 στα 5000 έτη. Αυτό το πλήθος SNIa δικαιολογείται από τα συστήματα DD που πρέπει να υπάρχουν, βάσει των μοντέλων μας, ενώ μόνο ένα μέρος του μπορεί να οφείλεται στα συστήματα SD, ιδίως τα συστήματα λευκού νάνου- αστέρι κύριας ακολουθίας. Η συχνότητα των SNIa εξαρτάται από τον ρυθμό αστρογέννησης (SFR, star formation rate) και την χρονική καθυστέρηση (DTD, delay time distribution), δηλαδή τον χρόνο που χρειάζεται από την δημιουργία του αστέρα-προγεννήτορα ως την έκρηξη SNIa. Να σημειώσουμε ότι αυτός ο χρόνος είναι πολύ μεγαλύτερος (τυπικά 1 δις έτη) από τον αντίστοιχο χρόνο για τις σουπερνόβα αστρικής κατάρρευσης (μερικά εκατομμύρια έτη). Το συμπέρασμα είναι ότι τα συστήματα DD κυριαρχούν στις SNIa. Υπάρχουν όμως πράγματι αρκετά από αυτά? Οι έρευνες έδειξαν ότι υπάρχουν αρκετά τέτοια συστήματα στον Γαλαξία μας. Μάλιστα φαίνεται το 10% των λευκών νάνων να είναι προϊόντα συγχώνευσης 2 λευκών νάνων μικρής μάζας, χωρίς να σημειωθεί έκρηξη σουπερνόβα. Έτσι εξηγείται και ο πληθυσμός των λευκών νάνων με μάζα περίπου 1 ηλιακή (15- 20%). Αυτό σημαίνει ότι σε πολλές περιπτώσεις πρέπει τα συστήματα να είναι τριπλά, με τους 2 λευκούς νάνους να ενώνονται σε 1 με μια περίπου ηλιακή μάζα, που θα αποτελέσει σύστημα DD με τον τρίτο, μικρότερης μάζας λευκό νάνο, ώστε η συγχώνευσή τους να πυροδοτήσει την SNIa. Για παράδειγμα, το 10- 20% από τα

αστέρια φασματικού τύπου A, οι προγεννήτορες των περισσότερων λευκών νάνων που παρατηρούμε σήμερα, βρίσκονται σε τριπλά αστρικά συστήματα.

Η αναλογία των προγεννήτορων των SNIa είναι, σύμφωνα με τις εκτιμήσεις μας, SD 22%, DD 60%, CD 7% και λοιποί διπλοί 11%. Αν θεωρήσουμε τους CD (αστέρι στον ασυμπτωτικό κλάδο, άρα με εκφυλισμένο πυρήνα, και λευκό νάνο) ως είδος συστημάτων DD (δύο εκφυλισμένων λευκών νάνων), τότε το ποσοστό των συστημάτων από 2 εκφυλισμένα αστέρια γίνεται συντριπτικό.

## Εκρήξεις ακτινών γ και αλληλεπίδραση διπλών αστεριών

Οι εκρήξεις ακτινών γ (gamma ray burst, GRB) χωρίζονται σε 2 κατηγορίες. Στις βραχυχρόνιες και στις μακροχρόνιες. Το χρονικό όριο διάρκειας που χωρίζει τις 2 κατηγορίες είναι τα 2 δευτερόλεπτα. Η ανακάλυψη μεταγενέστερων αναλαμπών (afterglows) στις ακτίνες X και στο ορατό φάσμα μας βοηθάει στην ανακάλυψη του γαλαξία από όπου προέρχονται και επιβεβαιώνει ότι οι μακρόχρονες GRB συμβαίνουν σε μακρινούς γαλαξίες (άρα σε παλαιότερες εποχές του σύμπαντος). Αυτοί οι γαλαξίες βρίσκονται σε φάση έντονης αστρογέννησης (starforming galaxies, όπως οι γαλαξίες υπό συγχώνευσης) και παρατηρούμε τις εκρήξεις ακτινών γ ειδικά σε περιοχές τους με έντονη αστρογέννηση (πυκνά μοριακά νεφελώματα μεγάλης μάζας). Αυτό μας κάνει να συμπεράνουμε ότι δημιουργούνται από την βαρυτική κατάρρευση αστεριών μεγάλης μάζας, κάτι που επιβεβαιώθηκε από την παρατήρηση εκρήξεων σουπερνόβα που συνδέονται με τις GRB. Πρόκειται για SNIc (χωρίς υδρογόνο και ήλιον στο φάσμα, άρα κατάρρευση απογυμνωμένων από το εξωτερικό τους στρώμα αστέρες) με πλατιές γραμμές εκπομπής. Αυτή η διαπίστωση ταιριάζει με την θεωρία ύπαρξης πιδάκων. Αν η εκπομπή των ακτινών γ έπρεπε να διαπεράσει το περιαστρικό κέλυφος που δημιουργείται πριν την σουπερνόβα, θα είχε μεγαλύτερη χρονική διάρκεια από αυτές που παρατηρούμε. Θα χρειαζόταν αυτόν τον χρόνο να <τρυπήσει> το περιαστρικό υλικό.

Και οι βραχύχρονες GRB συμβαίνουν σε μακρινούς γαλαξίες. Μάλλον προέρχονται από συγχωνεύσεις αστερών νετρονίων. Έτσι συμβαίνουν σε απομεινάρια διπλών αστεριών.



Παραμένει ανοιχτό ερώτημα αν και οι μακρόχρονες GRB προέρχονται από διπλά αστέρια. Ο μηχανισμός των εκρήξεων ακτινών γ προβλέπει μεγάλη στροφορμή του αστεριού που θα συσσωρεύσει έναν δίσκο προσαύξησης μεγάλης μάζας. Ως κινητήριος μηχανισμός προτείνεται ένα μάγνηταρ (αστέρι νετρονίων με ισχυρότατο μαγνητικό πεδίο) που

περιστρέφεται ταχύτατα. Θα πρέπει να έχει απομακρυνθεί το περιαστρικό κέλυφος ώστε να μπορεί να επεκταθεί ο σχετικιστικός πίδακας σε κλάσματα του δευτερολέπτου. Κανονικά με την απομάκρυνση του εξωτερικού στρώματος ενός αστέρα (χαρακτηριστικό για αστέρια μεγάλης μάζας και υψηλής μεταλλικότητας) ελαττώνεται η στροφορμή του, άρα δεν θα έπρεπε το απομεινάρι του να έχει πολύ ταχεία περιστροφή.

Αν θεωρήσουμε ότι πρόκειται για μονό αστέρι, η ταχεία περιστροφή θα το έκανε να αναμείξει σε μεγάλο βαθμό εξωτερικό με το εσωτερικό υλικό του. Έτσι όλο το υδρογόνο θα κάηκε στον πυρήνα του και γύρω από αυτόν. Αυτά τα αστέρια δεν εξελίσσονται σε κόκκινους υπεργίγαντες (δεν έχουν εξωτερικό στρώμα υδρογόνο που θα διασταλεί και θα ψυχθεί κατά πολύ) και βιώνουν μικρή απώλεια μάζας. Αποτέλεσμα είναι να σχηματίσουν ένα απομεινάρι μεγάλης μάζας και με μεγάλη ταχύτητα περιστροφής (δεν βιώνουν σημαντική απώλεια στροφορμής). Αυτό το μοντέλο είναι πιστό για 10 φορές μικρότερη μεταλλικότητα από την ηλιακή, αλλά έχουμε ανακαλύψει μακρόχρονες GRB σε περιβάλλοντα με μεταλλικότητα ακόμα και μεγαλύτερη της ηλιακής.

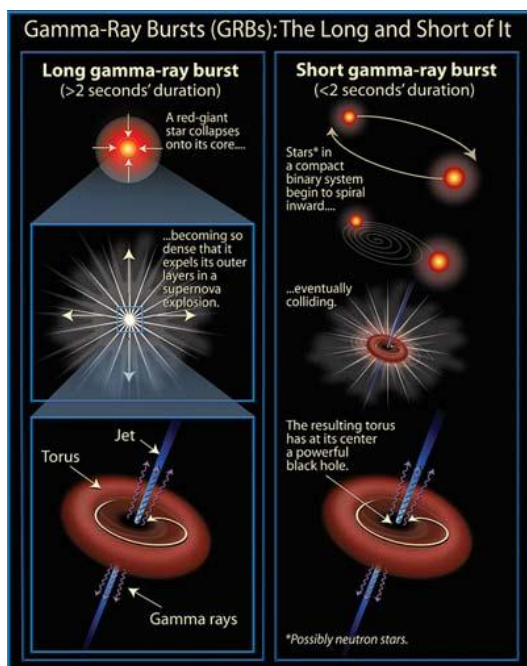
Εναλλακτικό μοντέλο είναι αυτό που προβλέπει ως προγεννήτορα ένα διπλό αστέρι. Τα περισσότερα αστέρια μεγάλης μάζας έχουν συνοδό και αλληλεπιδρούν με αυτόν σε κάποια φάση της εξέλιξής τους. Αυτή η αλληλεπίδραση μπορεί να αφαιρέσει το κέλυφος υδρογόνου που δημιουργείται γύρω από το σύστημα κατά την αστρική εξέλιξη. Η μεγάλη στροφορμή του αστρικού πτώματος μπορεί να εξηγηθεί με την μεταφορά στροφορμής από τον συνοδό του. Σε ένα σύστημα με ένα αστέρι μεγάλης μάζας (18 ηλιακές) και ένα μικρής μάζας (1- 5 ηλιακές), στην μεταγενέστερη φάση αστρικής εξέλιξης όπου τα 2 αστέρια αποκτάνε κοινό περιαστρικό κέλυφος (common envelope), το αστέρι μεγάλης μάζας μπορεί να συσσωρεύσει υδρογόνο από τον συνοδό του στον φλοιό καύσης ηλίου του, με αποτέλεσμα την εκρηκτική εκτίναξη του κελύφους. Αυτό θα είχε ως αποτέλεσμα να μείνει στο σύστημα ένα αστέρι- πυρήνας άνθρακα- οξυγόνου (χωρίς υδρογόνο και ήλιον) μεγάλης μάζας και ο συνοδός αστέρας. Δεν υπάρχει πια περιαστρικό κέλυφος και η απώλεια στροφορμής είναι ελάχιστη. Το αστέρι μεγάλης μάζας μπορεί επιπλέον να αποκτήσει περισσότερη στροφορμή από τις βαρυτικές αλληλεπιδράσεις με τον συνοδό του. Έτσι μπορεί να πυροδοτηθεί μία μακρόχρονη GRB. Αυτός ο μηχανισμός ταιριάζει καλύτερα και σε χαμηλές μεταλλικότητες.

Οι εκρήξεις ακτινών  $\gamma$  GRB μας βοηθάνε στον καθορισμό της εποχής του επαναιονισμού του σύμπαντος ( $z=6$ ). Έχουμε ανακαλύψει GRB από εκείνη την εποχή. Η σύνδεσή τους με την έντονη αστρογέννηση μας δίνει πληροφορίες για το σύμπαν και τους γαλαξίες εκείνης της εποχής. Για να συμβεί ο επαναιονισμός μόνο μέσω των αστεριών, πρέπει ένα σημαντικό μέρος της ακτινοβολίας από τα αστέρια να διέφυγε από τους γαλαξίες τους. Αυτό δεν συνέβη, γνωρίζουμε ότι το υπεριώδες, που μπορεί να οδηγήσει σε επαναιονισμό, απορροφάται αποτελεσματικά από την σκόνη και το ουδέτερο υδρογόνο. Οι λάμπσεις στο ορατό μετά τα GRB (afterglows) μας επιτρέπουν με το φάσμα τους να μετρήσουμε την πυκνότητα στήλης του ουδέτερου υδρογόνου στους γαλαξίες όπου συνέβησαν οι GRB. Έτσι γνωρίζουμε ότι οι γαλαξίες εκείνης της εποχής είχαν αρκετή αδιαφάνεια. Παραμένει μυστήριο πως ακριβώς συνέβη ο επαναιονισμός. (σελ. 185)

Οι συγχωνεύσεις 2 αστέρων νετρονίων και αστέρα νετρονίων με αστρική μαύρη τρύπα θεωρούνται οι πηγές των βραχυχρόνιων GRB. Οι λεγόμενες Κilonόβα λάμπουν μέσω της

ραδιενεργής διάσπασης των βαρέων στοιχείων, συγκεκριμένα των στοιχείων που δημιουργήθηκαν με την ταχεία απορρόφηση νετρονίων (r- process) στο πυκνό σε νετρόνια περιβάλλον συγχώνευσης αστέρων νετρονίων. Αυτή η διαδικασία είναι και ο βασικός προμηθευτής αυτών των στοιχείων στο σύμπαν. Η ανακάλυψη βαρυτικών κυμάτων GW170817 από συγχώνευση 2 αστέρων νετρονίων και οι μετά παρατηρήσεις στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα του GRB130303B επιβεβαίωσαν τα παραπάνω.

Τα διπλά αστρικά συστήματα και η εξέλιξή τους εμπλέκονται και στα 2 είδη GRB.



## Διπλοί αστέρες ως πηγές βαρυτικών κυμάτων

Η αστρονομία βαρυτικών κυμάτων μας έδωσε την ευκαιρία να παρατηρήσουμε την συνένωση 2 μαύρων τρυπών και πρόσφατα 2 αστέρων νετρονίων. Η εκπομπή βαρυτικών κυμάτων έχει ως συνέπεια την ελάττωση της στροφορμής των 2 μελών ενός συστήματος, με αποτέλεσμα την ελάττωση της περιόδου περιφοράς και την μείωση της εκκεντρικότητας. Τα βαρυτικά κύματα μας προσφέρουν την δυνατότητα να μάθουμε περισσότερα για τα συμπαγή αντικείμενα (Compact Objects, λευκοί νάνοι, αστέρες νετρονίων, μαύρες τρύπες). Για την κατανόηση της δημιουργίας των αστέρων νετρονίων και των μαύρων τρυπών πρέπει να γνωρίζουμε την εξέλιξη των αστεριών μεγάλης μάζας. Ανοιχτά θέματα παραμένουν οι αστρικοί άνεμοι και η επίδραση της αστρικής περιστροφής στην αστρική εξέλιξη, η κατάρρευση του αστρικού πυρήνα, καθώς και η εξέλιξη των εκρήξεων σουπερνόβα, η μάζα και η περιστροφή των συμπαγών αντικειμένων. Από τις παρατηρήσεις των αστέρων νετρονίων γνωρίζουμε ότι βίωσαν μια ασύμμετρη ώθηση (kick), αλλά δεν γνωρίζουμε αν αυτό ισχύει και για τις μαύρες τρύπες. Όλα τα παραπάνω γίνονται πιο πολύπλοκα αν υπάρχει και συνοδός αστέρας που επηρεάζει την αστρική εξέλιξη του αστέρα μεγάλης μάζας.

*Οι μαύρες τρύπες*

Είναι τα πιο άγνωστα αντικείμενα της φύσης. Δεν γνωρίζουμε ποια αστέρια εξελίσσονται σε μαύρες τρύπες, αν πρώτα δημιουργείται ένας αστέρας νετρονίων που καταρρέει σε δεύτερη φάση και αν η δημιουργία μαύρης τρύπας συνδέεται με έκρηξη σουπερνόβα. Πρόσφατες μελέτες διπλών με μαύρη τρύπα στις ακτίνες Χ έδειξαν ότι οι μαύρες τρύπες έχουν την ίδια κατανομή σε γαλαξιακό ύψος με τους αστέρες νετρονίων. Υποθέτουμε ότι δημιουργούνται στο γαλαξιακό επίπεδο (λεπτό δίσκο), όπου υπάρχει σημαντική αστρογέννηση, άρα αστέρια μεγάλης μάζας. Η διασπορά σε ύψος δείχνει ότι πρέπει να βίωσαν ασύμμετρη ώθηση. Η ώθηση δεν πρέπει να είναι πολύ ισχυρή γιατί θα διαλυθεί το διπλό σύστημα. Από τα βαρυτικά κύματα ανακαλύψαμε διπλές μαύρες τρύπες με μεγάλο εύρος μαζών. Αν οι άξονες περιστροφής των μαύρων τρυπών που ενώνονται έχουν κάποια ευθυγράμμιση, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι πρόκειται για διπλό σύστημα που και τα 2 αστέρια εξελίχτηκαν σε μαύρη τρύπα. Για να ισχύει αυτό, θα πρέπει να μην αλλοιώνεται ο άξονας περιστροφής κατά την αστρική κατάρρευση. Σήμερα (2018) γνωρίζουμε 15 διπλούς αστέρες νετρονίων στον Γαλαξία μας, που σημαίνει ότι η συγχώνευση αστέρων νετρονίων δεν είναι τόσο σπάνια. Παρατηρούμε συστήματα μικρής περιόδου περιφοράς (κοντινοί μεταξύ τους αστέρες νετρονίων) μερικά με πολύ και άλλα με λίγο εκκεντρική τροχιά, άρα η δημιουργία αυτών των συστημάτων δεν συμβαίνει μόνο με έναν τρόπο. Στα συστήματα με μικρή εκκεντρικότητα οι αστέρες νετρονίων πρέπει να δέχτηκαν μικρές ωθήσεις κατά την αστρική κατάρρευση, και συνδέονται με SN δέσμευσης ηλεκτρονίων (electron-capture), που συμβαίνει κυρίως σε στενούς διπλούς αστέρες και όχι σε χαλαρούς διπλούς ή μεμονωμένα αστέρια.

Για να δημιουργηθεί ένα διπλό σύστημα αστέρων νετρονίων, πρέπει ο κυρίως αστέρας να εκραγεί ως σουπερνόβα. Αν το σύστημα διατηρηθεί, θα είναι υπό την μορφή διπλού μεγάλης μάζας ακτινών Χ. Ο αστέρας νετρονίων θα συσσωρεύει μάζα από τον συνοδό του. Ο δευτερεύων θα είναι ένα αστέρι καύσης ηλίου, θα εκραγεί και θα δημιουργήσει τον δεύτερο αστέρα νετρονίων. Οι προσομοιώσεις προβλέπουν ότι μετά την συγχώνευση 2 αστέρων νετρονίων θα εκτιναχτεί υλικό από το σύστημα, και θα δημιουργηθεί (έστω προσωρινά πριν καταρρεύσει σε μαύρη τρύπα) ένας αστέρας νετρονίων μεγάλης μάζας. Αυτό σημαίνει ότι η συγχώνευση θα παρουσιάσει εκπομπή και στα ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Η ραδιενεργός διάσπαση του σχετικά μικρής πυκνότητας υλικού που εκτινάχτηκε θα έχει λαμπρότητα ανάμεσα σε νόβα και σουπερνόβα. Αυτή η έκρηξη λαμπρότητας ονομάζεται κλονόβα ή μακρονόβα. Η λαμπρότητα εξαρτάται από την ενέργεια της έκρηξης και την αδιαφάνεια της ύλης. Για σχετικά μικρή αδιαφάνεια η εκπομπή φωτός θα είναι άμεση και στο μπλε ενώ για μεγαλύτερη αδιαφάνεια καθυστερημένη και στο κόκκινο. Πολύ σημαντικό είναι η γρήγορη ταύτιση του σήματος στα βαρυτικά κύματα με αυτό στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα. Μια εκτίμηση είναι ότι συμβαίνουν 1500 συγχωνεύσεις αστέρων νετρονίων ανά τετραγωνικό Gpc το έτος.

Οι διπλοί λευκών νάνων ανιχνεύονται στο οπτικό, αλλά ακόμα όχι στα βαρυτικά κύματα.

Η ανίχνευση βαρυτικών κυμάτων είναι μια μέθοδος παρατήρησης που μόλις ξεκίνησε. Ελπίζουμε τα επόμενα χρόνια να έχουμε μεγάλο πλήθος μετρήσεων ώστε να εξελίξουμε τα θεωρητικά μοντέλα μας.

