

Διπλά αστέρια και αστρική εξέλιξη

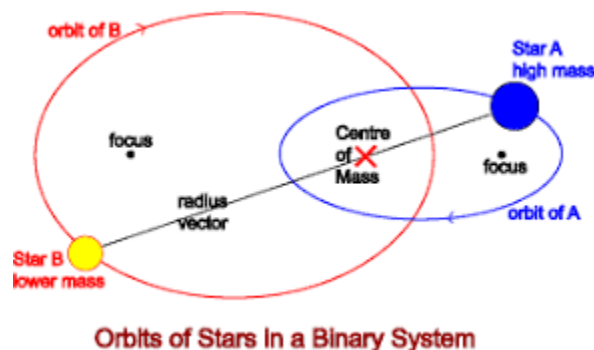
A ΜΕΡΟΣ

ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΑ ΔΙΠΛΑ ΑΣΤΕΡΙΑ, ΔΙΠΛΑ ΑΣΤΕΡΙΑ ΜΙΚΡΗΣ ΚΑΙ ΜΕΣΑΙΑΣ ΜΑΖΑΣ

Πρόλογος

Πολλά γνωστά μας αστέρια, όπως ο Σείριος και ο α Κενταύρου, είναι στην πραγματικότητα διπλά ή πολλαπλά συστήματα αστεριών. Το πιο εντυπωσιακό διπλό σύστημα που μελετάμε είναι το η Καρίνας, που αποτελείται από έναν αστέρα 120 ηλιακών μαζών τύπου μπλε λαμπρού μεταβλητού (LBV, Luminous Blue Variable) και έναν συνοδό 30 ηλιακών μαζών που ολοκληρώνει μια περιφορά γύρω από το κοινό κέντρο μάζας κάθε 5,5 έτη. Όλο το σύστημα βρίσκεται μέσα στο νεφέλωμα Homunculus, και μια τεράστια έκρηξη το έκανε να είναι το δεύτερο πιο λαμπρό αστέρι στον νυχτερινό ουρανό το 1840.

Η αναλογία των διπλών αστεριών με τα μεμονωμένα αστέρια είναι ανάλογη της αστρικής μάζας του κυρίως αστεριού (primary). Τα αστέρια πολύ μεγάλης μάζας (πάνω από 30 ηλιακές μάζες) έχουν κατά 90% συνοδούς. Τα μισά περίπου αστέρια παρόμοιας μάζας με τον ήλιο έχουν συνοδό. Ένα στοιχείο που προκύπτει από τα παραπάνω είναι ότι τα αστέρια μεσαίας και μικρής μάζας είναι πολύ περισσότερα από ότι παρατηρούμε, αφού πολλά <κρύβονται> ως δευτερεύοντες αστέρες σε διπλά συστήματα (συνοδοί αστερών μεγαλύτερης μάζας). Το 70% από τα αστέρια μεγάλης μάζας θα αλληλεπιδράσουν με τον συνοδό τους (ανταλλαγή ύλης), ποσοστό που είναι σημαντικά ελαττωμένο στα αστέρια μικρότερης μάζας, που αλληλεπιδρούν συνήθως όταν το ένα εξελιχτεί σε ερυθρό γίγαντα. Αυτό σημαίνει ότι η αλληλεπίδραση των διπλών αστεριών καθορίζει την εξέλιξη των αστερών μεγάλης μάζας.



Διπλοί υπό αλληλεπίδραση

Τα είδη αλληλεπίδρασης των διπλών αστεριών είναι η βαρυτική αλληλεπίδραση (παλιρροιακές δυνάμεις), η συσσώρευση αστρικού ανέμου του συνοδού, η πλήρωση του λοβού Roche (Roche-lobe overflow) και η εξέλιξη σε κοινό κέλυφος. Η φύση των αστεριών σε ένα διπλό σύστημα και το είδος αλληλεπίδρασης καθορίζουν την εξέλιξη των αστεριών του συστήματος.

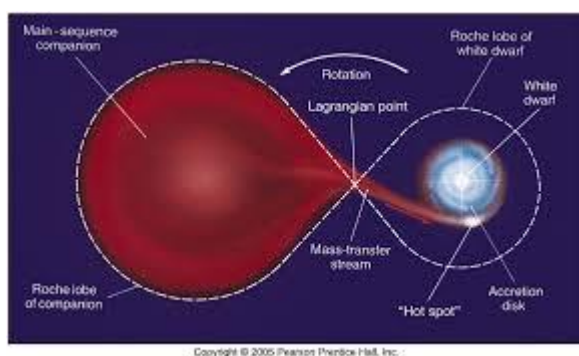
Η συσσώρευση αστρικού ανέμου

Όταν τα αστέρια που απαρτίζουν ένα διπλό σύστημα δεν έχουν επαφή (δεν γειμίζουν τους λοβούς Roche) η μεταφορά μάζας συμβαίνει μέσω του αστρικού ανέμου. Τα αστέρια μεγάλης μάζας καθώς και τα εξελιγμένα αστέρια μικρότερης μάζας (όπως οι ερυθροί γίγαντες) έχουν πολύ ισχυρούς αστρικούς ανέμους. Αυτοί οι άνεμοι επιτρέπουν την μεταφορά μάζας προς τον συνοδό και τον χημικό εμπλουτισμό του (μεταφέροντας και βαρύτερα στοιχεία που έχουν ανέρθει στην επιφάνεια από το αστρικό εσωτερικό). Προκαλούν απώλεια στροφορμής, με αποτέλεσμα την διατάραξη των τροχιών τους. Η ροή της ύλης εξαρτάται από τον λόγο της ταχύτητας του αστρικού ανέμου προς την τροχιακή ταχύτητα των 2 αστεριών (γύρω από το κοινό κέντρο μάζας τους). Έτσι η ροή μπορεί να ποικίλλει από την ασύμμετρη ροή ως την πλήρωση του λοβού Roche. Συνήθως παρατηρούμε την πλήρωση του λοβού σε αστέρια AGB (ασυμπτωτικού κλάδου), όπου ο αστρικός άνεμος έχει ταχύτητες 5-10 km/s και είναι πιο αργός από την τροχιακή ταχύτητα των 2 αστεριών. Και η απώλεια στροφορμής εξαρτάται από την ταχύτητα του αστρικού ανέμου. Η σημαντική απώλεια στροφορμής κάνει το σύστημα να αποκτήσει μικρότερη τροχιά, κάτι που εξηγεί την συνένωση αστεριών όπως οι BSS (Blue Straggler Stars).

Τα αστέρια Βαρίου (Barium stars) έχουν εμπλουτιστεί με Άνθρακα και στοιχεία αργού εμπλουτισμού νετρονίων (s process, στοιχεία που παράγονται σε εξελιγμένα αστέρια μικρής και μεσαίας μάζας) και είναι μέλη διπλού συστήματος με λευκό νάνο. Αυτά τα στοιχεία μεταφέρθηκαν στο αστέρι όταν ο συνοδός ήταν αστέρι του ασυμπτωτικού κλάδου, πριν εξελιχτεί σε λευκό νάνο.

Στα συμβιωτικά αστέρια μεταφέρεται επίσης ύλη από έναν ερυθρό ή κίτρινο γίγαντα σε ένα αστέρι μεγάλης θερμοκρασίας, κύριας ακολουθίας ή λευκό νάνο. Ο ερυθρός γίγαντας σε συμβιωτικά αστέρια παρουσιάζει ταχύτερη απώλεια μάζας από έναν μεμονωμένο ερυθρό γίγαντα.

Ένα αστέρι θα πληρώσει τον λοβό Roche, με αποτέλεσμα την μεταφορά ύλης, όταν η ακτίνα του ξεπεράσει αυτή του λοβού.



Η πλήρωση του λοβού εξαρτάται από την περίοδο της τροχιάς των 2 αστέρων (ουσιαστικά την απόστασή τους) και το στάδιο της αστρικής εξέλιξής τους. Για ένα αστέρι κυρίας ακολουθίας παρόμοιο με τον ήλιο μας θα πρέπει ο συνοδός να απέχει μόλις λίγες φορές την ακτίνα του ηλίου, δηλαδή να έχει τροχιά μερικών ωρών. Τέτοια συστήματα είναι, για παράδειγμα, οι *κατακλυσμικοί διπλοί μεταβλητοί*. Για εξελιγμένα αστέρια (ερυθρούς γίγαντες) η περίοδος μπορεί να είναι μεταξύ μερικών ημερών (Algol) ως μερικών ετών (συμβιωτικοί διπλοί). Κατά την μεταφορά ύλης για την πλήρωση του λοβού μεταφέρεται και στροφορμή, με αποτέλεσμα την δημιουργία δίσκου προσαύξησης. Σε αστέρια με πολύ μικρή περίοδο ο ένας συνοδός που αναπτύσσει δίσκο είναι λευκός νάνος (κατακλυσμικοί διπλοί μεταβλητοί), αστέρας νετρονίων (*διπλοί ακτινών X μικρής μάζας*) ή μαύρη τρύπα (*διπλοί ακτινών X μεγάλης μάζας*). Αυτό συμβαίνει επειδή το υπέρπυκνο σώμα (λευκός νάνος, αστέρας νετρονίων ή μαύρη τρύπα) έχει πολύ μικρή ακτίνα. Σε σύστημα με μεγάλη περίοδο ο δίσκος αναπτύσσεται γύρω από ένα αστέρι κυρίας ακολουθίας, όπως στα συμβιωτικά αστέρια. Αν το αστέρι που έλκει υλικό είναι κυρίας ακολουθίας αλλά μικρής περιόδου τροχιάς, τότε δεν μπορεί να αναπτυχθεί δίσκος αλλά το υλικό πέφτει άμεσα στο αστέρι (Algol).

Ο λοβός μετά την πλήρωσή του μπορεί να γίνει ασταθής και να μετατραπεί σε κοινό για τα 2 αστέρια κέλυφος (common envelope). Αυτό συμβαίνει όταν το αστέρι που παρουσιάζει απώλεια μάζας είναι ερυθρός γίγαντας με μεγάλη περιοχή συναγωγής (convection) στο εσωτερικό του. Τότε ο ερυθρός γίγαντας διαστέλλεται κατά πολύ, με αποτέλεσμα η μεταφορά ύλης να συμβαίνει σε υψηλούς ρυθμούς και να υπερχειλίζει ο λοβός (σαν να <καταπίνει> τον συνοδό του). Ο συνοδός που συσσωρεύει την ύλη δεν μπορεί να την απορροφήσει και μοιραία διαστέλλεται. Σχηματίζεται ένα κοινό κέλυφος. Οι 2 αστρικοί πυρήνες πλησιάζουν περιστρέφοντας ο ένας γύρω από τον άλλο, και το κέλυφος απομακρύνεται διαστελλόμενο. Αυτό το σενάριο εξηγεί την ύπαρξη διπλών με λευκό νάνο που παρουσιάζουν περίοδο περιφορές μικρότερη από 1 ημέρα, όπως οι κατακλυσμικοί μεταβλητοί, που εξελίσσονται σε SN1a.

Το κοινό κέλυφος είναι σημαντικό για τον σχηματισμό πλανητικών νεφελωμάτων. Το 80% των πλανητικών νεφελωμάτων δεν είναι σφαιρικό και πολλά από αυτά παρουσιάζουν δομές πιδάκων. Η μορφολογία των πλανητικών νεφελωμάτων συνδέεται με τα διπλά αστρικά συστήματα.

Αλληλεπιδράσεις αστέρων μεγάλης μάζας και αστρικές εκρήξεις

Αναφέραμε ότι τα αστέρια μεγάλης μάζας βρίσκονται κατά μεγάλο ποσοστό σε διπλά συστήματα, και πολλά από αυτά έχουν μικρή περίοδο περιφοράς, με αποτέλεσμα να αλληλεπιδράσουν με τους συνοδούς τους κατά την εξέλιξή τους. Ίσως το σημαντικότερο φαινόμενο αυτής της αλληλεπίδρασης να είναι ο σχηματισμός μπλε λαμπρών μεταβλητών (LBV, Luminous Blue Variables), τα πιο λαμπρά αστέρια του Γαλαξία μας. Η αλληλεπίδραση αυτών των διπλών (μεταφορά μάζας) έχει ως αποτέλεσμα να συμβούν διαφορετικά είδη εκρήξεων σουπερνόβα από ότι στα μεμονωμένα αστέρια μεγάλης μάζας. Οι βραχύχρονες εκρήξεις ακτινών γ (short gamma-ray burst) συνδέονται με συγκρούσεις αστέρων νετρονίων (που ήταν σε διπλό σύστημα). Ακόμα και οι μακρόχρονες εκρήξεις ακτινών γ (long gamma-ray burst) προέρχονται από διπλά αστρικά συστήματα.

Η σύνθεση αστρικού πληθυσμού στα διπλά συστήματα

Πολλά είδη αστεριών υπάρχουν μόνο σε διπλά συστήματα, όπως οι Wolf-Rayet, οι Blue Stragglers, οι αστέρες Βαρίου, οι αστέρες ηλίου (He) μικρής μάζας και οι σχετικοί με αυτούς υπό-νάνοι τύπου O/B, όπως και τα αποτελέσματα των αλληλεπιδράσεων τους, SN1a, short gamma-ray bursts, long gamma-ray burst, Novae, και τα πολύπλοκα πλανητικά νεφελώματα. Τα τριπλά και πολλαπλά αστρικά συστήματα είναι κυρίως ιεραρχικά, με ένα διπλό στο εσωτερικό του συστήματος και το/τα υπόλοιπα αστέρια σε μεγαλύτερες τροχιές. Υπάρχουν πολλά αναπάντητα ερωτηματικά για την μεταφορά μάζας, στροφορμής και τα κοινά κελύφη στα διπλά αστέρια. Μία στατιστική τεχνική που χρησιμοποιούμε στην μελέτη των διπλών είναι η σύνθεση αστρικού πληθυσμού (stellar population synthesis), δηλαδή η σύγκριση των αστρικών μοντέλων με τα αστέρια που παρατηρούμε. Για παράδειγμα, παρατηρούμε αποκλίσεις στην χημική σύνθεση των διπλών αστεριών από τα αστρικά μοντέλα.

Βασικοί παράμετροι της αστρικής εξέλιξης αποτελούν η μάζα, η μεταλλικότητα και η ταχύτητα περιστροφής. Τα περισσότερα αστέρια που παρατηρούμε έχουν παραπλήσια μεταλλικότητα με τον ήλιο και ταχύτητα περιστροφής που δεν αλλοιώνει την δομή τους, και μάζες ανάμεσα σε 0,8 και 100 ηλιακές. Στα διπλά συστήματα οι μάζες αυξάνονται (μάζα συστήματος αντί μάζα αστεριού), και στην κινηματική των αστεριών προστίθεται μία περίοδο περιφοράς γύρω από το κοινό κέντρο μάζας και μια εκκεντρικότητα αυτής της περιφοράς. Οι αλληλεπιδράσεις των διπλών αστεριών έχουν αποτελέσματα όπως η μεταφορά της στροφορμής, η απώλεια αστρικής μάζας, η απώλεια στροφορμής μέσω μαγνητικής πέδησης (magnetic braking), ο εμπλουτισμός των αστρικών πυρήνων με ύλη από το αστρικό εξωτερικό λόγω ταχείας περιστροφής ή/και επέκτασης της ζώνης συναγωγής, η δημιουργία κοινού αστρικού κελύφους, ο σχηματισμός δίσκου προσαύξησης και οι αστρικές εκρήξεις νόβα και σουπερνόβα, καθώς και οι συνενώσεις αστεριών.

Τα αποτελέσματα αυτής της έρευνας μας δείχνουν ότι το χρώμα των γαλαξιών επηρεάζεται από τα διπλά αστέρια τους. Για παράδειγμα, ο βαθμός εκπομπής υπεριώδης ακτινοβολίας των ελλειπτικών γαλαξιών επηρεάζεται από τους υπό-νάνους τύπου O/B (πολύ καυτά και λαμπρά αντικείμενα, μάλλον προϊόντα συνένωσης 2 λευκών νάνων που η συνολική μάζα τους δεν ξεπερνάει το όριο Chandrasekhar), που σχηματίζονται μόνο σε διπλά συστήματα. Σημαντική συνεισφορά στην λαμπρότητα έχουν και οι Blue Stragglers. Παρατηρούνται αστέρια με ταχύτητες μεγαλύτερες από την ταχύτητα διαφυγής του Γαλαξία μας, που πιθανώς τις αποκτάνε από την ώθηση της έκρηξης σουπερνόβα του συνοδού του.

Η εξέλιξη διπλών αστεριών μικρής και μεσαίας μάζας

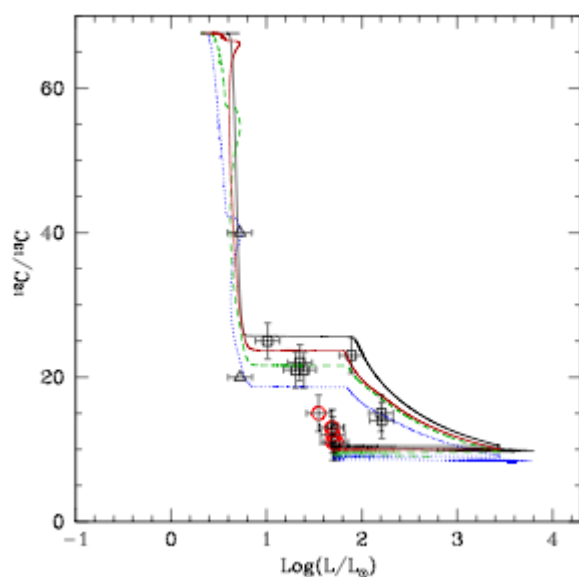
Ο βαθμός συναγωγής στο αστρικό εσωτερικό έχει σημαντικό ρόλο στην αστρική εξέλιξη. Μέσω της συναγωγής ο αστρικός πυρήνας των αστεριών μικρής/ μεσαίας μάζας εμπλουτίζεται με υδρογόνο και αντίθετα μεταφέρονται στην αστρική επιφάνεια βαρύτερα χημικά στοιχεία. Το αποτέλεσμα είναι να αυξάνεται η παραμονή ενός αστεριού με εκτεταμένη συναγωγή στην κυρία ακολουθία (καύση υδρογόνου στον πυρήνα). Θα παρουσιάσει μεγαλύτερο πυρήνα από ήλιον κατά την αστρική εξέλιξη που έχει ως

αποτέλεσμα την ταχύτερη καύση του και την αυξημένη λαμπρότητά του. Όλα αυτά έχουν ως αποτέλεσμα να εμφανίζονται μετατοπισμένα αυτά τα αστέρια στο διάγραμμα H/R και να αλλοιώνουν τις εκτιμήσεις αστρικής ηλικίας, ιδίως για τα σμήνη.

Η ανάμειξη μέσω αστάθειας thermohaline

Αυτή η διαδικασία ανάμειξης υλικού έχει να κάνει με την πυκνότητα (όπως η ανάμειξη των υδάτων ενός ωκεανού έχει να κάνει με την ποσόστωση αλατιού). Μπορεί να συμβεί λόγω της συσσώρευσης μάζας από συνοδό αστέρα.

Όταν εξαπλώνεται η ζώνη συναγωγής στα αστέρια μετά το σημείο εκτροπής από την κυρία ακολουθία, η αστρική επιφάνεια εμπλουτίζεται με βαρύτερα στοιχεία από το αστρικό εσωτερικό. Αυτή η πρώτη φάση εμπλουτισμού (first dredge-up) ολοκληρώνεται όταν η ζώνη συναγωγής φτάσει το μέγιστο μέγεθός της, κοντά στον φλοιό καύσης υδρογόνου και τον εκφυλισμένο πυρήνα ηλίου. Από αυτό το σημείο δεν αναμένεται εμπλουτισμός της αστρικής επιφάνειας μέσω συναγωγής στον κλάδο των ερυθρών γιγάντων. Όμως φασματοσκοπικές μελέτες αστεριών στο συμπύκνωμα του κλάδου των ερυθρών γιγάντων (bump, τα αστέρια του κλάδου ερυθρών γιγάντων παρουσιάζουν μια ελάττωση λαμπρότητας όταν φτάσουν στο μέγιστο της συναγωγής) δείχνουν μια διαδικασία χημικού εμπλουτισμού που έχει ως αποτέλεσμα την απότομη ελάττωση της αναλογίας του $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$, την ελάττωση του Li και του C και την αύξηση του N. Στα αστέρια μικρής και μεσαίας μάζας η θερμοπυρηνική σύντηξη εκτελείται κυρίως με την διαδικασία αλυσίδας pp. Στον κλάδο των ερυθρών γιγάντων, μια αντίδραση της pp αλυσίδας είναι ικανή να δημιουργήσει μια αναστροφή στην μέση αναλογία μοριακού βάρους, που είναι αποτελεσματική και σε σύντηξη σε φλοιούς γύρω από τον αστρικό πυρήνα. Αυτό έχει ως συνέπεια το ^3He να συσσωρεύεται σε μια πλατιά ζώνη μετά την περιοχή σύντηξης. Κατά την φάση first dredge-up αυτό το ^3He ανακατεύεται στην ζώνη συναγωγής με συνέπεια, κατά την εξέλιξη του αστεριού στον κλάδο των ερυθρών γιγάντων, να παρουσιάζεται εμπλουτισμός του εξωτερικού αστρικού στρώματος (υδρογόνου).



Σμήνος M67. Εξέλιξη της αναλογίας των στοιχείων στην

αστρική επιφάνεια για αρχική αστρική μάζα 1,25 ηλιακές. Το μοντέλο προβλέπει αστάθεια thermohaline και ανάμειξη αστρικής ύλης λόγω ταχείας περιστροφής (οι ταχύτητες των 50, 80, και 110 km/s εμφανίζονται με κόκκινη, διακεκομμένη πράσινη και μπλε τελείες αντίστοιχα). Με μαύρη γραμμή είναι το μοντέλο χωρίς αστρική περιστροφή. Με τρίγωνο

απεικονίζεται ένας υπό-γίγαντας, με μαύρα τετράγωνα τα αστέρια του κλάδου ερυθρών γιγάντων και με κόκκινους κύκλους τα αστέρια του Bump.

Ατομική διάχυση (atomic diffusion)

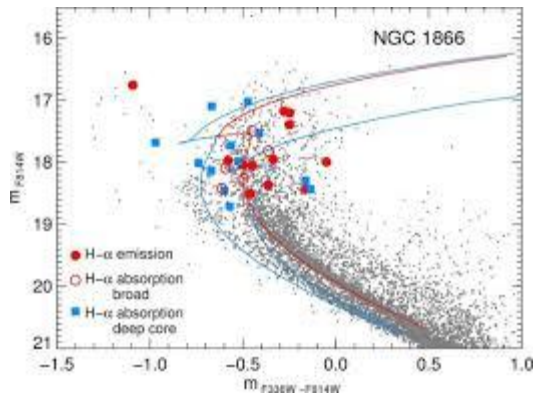
Λόγω των συγκρούσεων των σωματιδίων του αερίου συμβαίνει μια αργή μεταφορά στοιχείων στην αστρική ζώνη ακτινοβολίας. Ανεξάρτητα ιόντα αναγκάζονται να κινηθούν μέσω της πίεσης και των διαφορών θερμοκρασίας. Έτσι τα βαρύτερα στοιχεία κινούνται προς το κέντρο του αστεριού. Η ακτινοβολία πιέζει τα ιόντα προς την αστρική επιφάνεια όταν η επιτάχυνση των ιόντων ξεπερνάει την τοπική βαρυτική επιτάχυνση.

Στοιχεία όπως τα He, Li, C, N, O βυθίζονται κάτω από την ζώνη συναγωγής και άλλα στοιχεία όπως τα Mg, Si, S, Fe δέχονται πίεση ακτινοβολίας που τα φέρνει μέσα στην ζώνη συναγωγής, με αποτέλεσμα τον εμπλουτισμό της αστρικής επιφάνειας σε αυτά κατά την παραμονή του αστεριού στην κύρια ακολουθία. Αυτό συμβαίνει μέχρι την φάση first dredge-up.

Παρατηρούμε ότι σε αστέρια των σμηνών αυτό το φαινόμενο μετριάζεται. Το πιο πιθανό είναι να επηρεάζεται η αστρική επιφάνεια αυτών των αστεριών από την μείξη περιστροφής (rotational mixing). Αυτό το σενάριο ενισχύεται με την παρατήρηση ότι τα αστέρια μεγάλης θερμοκρασίας (> 11000 K) στον οριζόντιο κλάδο, άρα μικρής ταχύτητας περιστροφής, παρουσιάζουν ανάμειξη στοιχείων μέσω της ατομικής διάχυσης, σε αντίθεση με ψυχρότερα και μεγαλύτερης ταχύτητας περιστροφής αστέρια. Η ανάμειξη περιστροφής των αστεριών είναι ανάλογη της ταχύτητα περιστροφής τους. Ένα άλλο σενάριο μετρίασης του φαινομένου ατομικής διάχυσης προβλέπει την απώλεια μέρος των αστρικών εξωτερικών στρωμάτων, μέχρι το βάθος όπου η επιτάχυνση από την πίεση ακτινοβολίας είναι μεγαλύτερη από την τοπική βαρυτική επιτάχυνση. Τα βαρύτερα στοιχεία επηρεάζονται περισσότερο από τον αστρικό άνεμο. Η ταχεία περιστροφή και η μεγάλη απώλεια μάζας δικαιολογούνται από την παρουσία συνοδού αστέρα.

Μείξη περιστροφής (rotational mixing)

Η βασική αστάθεια που προκαλείται στο εσωτερικό ενός αστέρα από την ταχεία περιστροφή του είναι η μεσημβρινή κυκλοφορία αερίου (Meridional circulation). Αυτή η διαδικασία προκαλεί εισροή υλικού από τον ισημερινό της αστρικής επιφάνειας και άνοδο υλικού στους αστρικούς πόλους. Ακόμα, προκαλεί την μεταφορά στροφορμής, προκαλώντας διακυμάνσεις της στροφορμής στην αστρική επιφάνεια. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την τοπική συρρίκνωση και διαστολή των αστρικών ζωνών, προκαλώντας διακυμάνσεις της γωνιακής ταχύτητας στη ζώνη ακτινοβολίας, ανάλογα με το βάθος της. Προκαλείται αστάθεια ανάμεσα στις αστρικές ζώνες. Η μεταφορά υλικού από και προς την αστρική επιφάνεια κατά την παραμονή του αστέρα στην κύρια ακολουθία έχει ως αποτέλεσμα τον εμπλουτισμό της αστρικής επιφάνειας με βαρύτερα στοιχεία (όπως τα He, 14N) και τον εμπλουτισμό του πυρήνα με επιπλέον καύσιμο- υδρογόνο. Έτσι παρατηρούμε φασματοσκοπικές διαφοροποιήσεις από τα αστέρια με πιο αργή περιστροφή, και παρατείνεται η παραμονή των αστεριών με ταχεία περιστροφή στην κύρια ακολουθία (άρα μετατοπίζεται το σημείο εκτροπής τους σε περιοχές που αναλογούν σε σημεία εκτροπής για μικρότερες αστρικές μάζες).



Η εκτεταμένη περιοχή εκτροπής και τα αστέρια ταχείας περιστροφής

Οι συμβιωτικοί διπλοί αστέρες

Τα συμβιωτικά αστέρια έφεραν αμηχανία στους αστρονόμους όταν παρατηρήθηκαν για πρώτη φορά (όπως το CI Cyg), επειδή παρουσίαζαν ταυτόχρονα φασματικές γραμμές εκπομπής TiO που είναι τυπικές για ψυχρούς γίγαντες τύπου M και γραμμές H α που παρατηρούμε μόνο στα αστέρια τύπου O. Επίσης το φάσμα εκπομπής τους ταιριάζει σε αυτό των πλανητικών νεφελωμάτων. Αρχικά ως συμβιωτικά αστέρια ορίζαμε τους διπλούς που αποτελούνται από έναν ερυθρό γίγαντα και έναν καυτό συνοδό ώστε να παρουσιάζει γραμμές εκπομπής H α ή μεγαλύτερου ιονισμού. Τα περισσότερα συμβιωτικά αστέρια έχουν πολύ μεγάλη λαμπρότητα (100- 1000 φορές την ηλιακή). Ο πιο πρόσφατος ορισμός (2016) χαρακτηρίζει συμβιωτικούς τους διπλούς αστέρες όπου ένας λευκός νάνος ή αστέρας νετρονίων συσσωρεύει αρκετή ύλη από έναν συνοδό ερυθρό γίγαντα με τρόπο ώστε αυτή η αλληλεπίδραση των 2 αστεριών να ανιχνεύεται σε συγκεκριμένα μήκη κύματος.



Συμβιωτικά αστέρια καύσης (Burning, δηλαδή θερμοπυρηνικής σύντηξης)

Η ποσότητα του υλικού που καίγεται (συντήκεται) στην επιφάνεια ενός λευκού νάνου παραδοσιακά θεωρείται ίση με αυτήν που ο νάνος συσσωρεύει από τον ερυθρό γίγαντα συνοδό του. Με την συνεχή καύση του υδρογόνου που συσσωρεύει ο νάνος διατηρείται μια ισορροπία. Ούτε διακόπτεται η καύση (μικρή συσσώρευση), ούτε συσσωρεύεται τόσο πολύ υλικό ώστε η επιφάνεια του νάνου να φτάσει το μέγεθος ενός ερυθρού γίγαντα. Όμως

η ακτινοβολία του λευκού νάνου, που φτάνει στο όριο Eddington (όριο συνοχής του αστέρα) μπορεί να ελαττώσει την συσσώρευση με αποτέλεσμα την διακοπή της καύσης. Είτε καύση συμβαίνει προσωρινά, όταν <γемίσει> πάλι η επιφάνεια του νάνου, είτε το αστέρι δεν πλησιάζει το όριο Eddington κατά διακριτά επεισόδια συσσώρευσης, όπως όταν μεταφέρεται απότομα πολύ υλικό στον δίσκο προσαύξησης. Αυτό μπορεί να συμβεί όταν τα αστέρια πλησιάζουν κατά την έκκεντρη περιφορά τους γύρω από το κοινό κέντρο μάζας. Κατά την διαδικασία καύσης στον λευκό νάνο εκπέμπεται ακτινοβολία X (μαλακή). Σε πολλούς συμβιωτικούς οι μαλακές ακτίνες X απορροφώνται από το περιαστρικό αέριο και δεν φτάνουν σε εμάς.

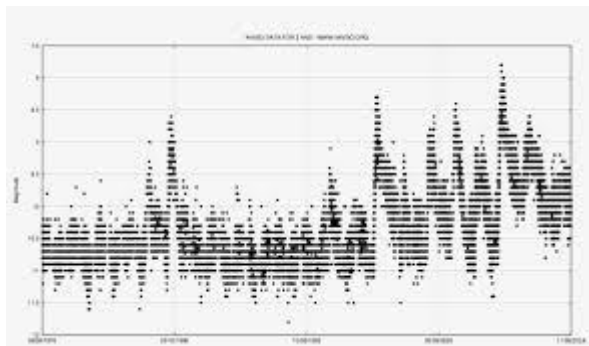
Μόνο οι συμβιωτικοί παρουσιάζουν εκπομπή του OVI, που για να συνυπάρξει με το ουδέτερο υδρογόνο απαιτείται ένας πολύ εκτεταμένος αστρικός άνεμος από τον ερυθρό γίγαντα (100 αστρονομικές μονάδες) να καταλήγει σε περιφορά (δίσκο) σε μια στενή ακτίνα γύρω από τον λευκό νάνο.

Η απόσταση των 2 αστέρων, ώστε να <χωρέσει> ο πολύ εκτεταμένος ερυθρός γίγαντας, μετρίεται σε αστρονομικές μονάδες και όχι σε ηλιακές ακτίνες όπως στους κατακλυσμικούς. Οι περίοδοι τροχιάς τους κυμαίνονται ανάμεσα σε 1- 5 έτη. Οι περισσότεροι συμβιωτικοί καύσης του Γαλαξία μας ανήκουν στην μεγάλης μεταλλικότητας γαλαξιακή κοιλιά και είναι πλούσιοι σε O (τύπου M). Ενώ στα Μαγγελανικά νέφη είναι πλούσιοι σε C, λόγω της μικρής μεταλλικότητας του δορυφόρου γαλαξία μας. Το 15% των ερυθρών γιγάντων στα συμβιωτικά καύσης είναι τύπου Μίρα (M7III) με περιόδους παλμών μεγαλύτερες από αυτές των μεμονωμένων Μίρα. Η μεταφορά μάζας από τον ερυθρό γίγαντα μπορεί να συμβεί ή μέσω αστρικού ανέμου ή μέσω υπερχειλίσσης (overflow) του λοβού Roche. Αυτοί οι 2 τύποι συμβιωτικών ξεχωρίζουν φασματοσκοπικά. Προσομοιώσεις μας δείχνουν ότι ο άνεμος του ερυθρού γίγαντα μπορεί να περιοριστεί μέσα στον λοβό και να ευθυγραμμιστεί με το επίπεδο του διπλού αστρικού συστήματος. Αυτή η υπερχειλίσση του λοβού μέσω αστρικού ανέμου (WRLOF, wind Roche-lobe overflow) μπορεί να επιτρέψει στον λευκό νάνο να συσσωρεύσει ως το 50% της μάζας του ερυθρού γίγαντα. Έτσι εξηγείται και η ύπαρξη κίτρινων συμβιωτικών (μεγαλύτερης θερμοκρασίας). Εδώ οι ερυθροί γίγαντες είναι τύπου G/ K με μικρή μεταλλικότητα και κινηματική που ταιριάζει σε αστέρια της γαλαξιακής άλως. Είναι εμπλουτισμένοι σε στοιχεία s- process, ιδίως Βάριο, λόγω εμπλουτισμού από το αστέρι που εξελίχτηκε σε λευκό νάνο. Μερικά παρουσιάζουν ακραία ταχεία περιστροφή, που σημαίνει ότι κέρδισαν στροφορμή από τον συνοδό τους πριν αυτός εξελιχτεί σε λευκό νάνο.

Συμβιωτικοί συσσώρευσης υλικού (accreting- only symbiotic stars)

Υπάρχει ένας πληθυσμός ερυθρών γιγάντων που έχουν για συνοδούς λευκούς νάνους ή αστέρες νετρονίων, και εκπέμπουν σκληρή ακτινοβολία X. Η μικρής έντασης εκπομπή τους μας περιορίζει στην παρατήρηση μόνο των κοντινών, ως 1 kpc, συστημάτων. Οι λευκοί νάνοι εκπέμπουν περισσότερο στο υπεριώδες και λιγότερο στις ακτίνες X, ενώ για τα αστέρια νετρονίων ισχύει το αντίθετο. Αυτοί οι συμβιωτικοί θεωρούνται οι κύριες πηγές εκρήξεων SN 1a. Οι συμβιωτικοί με συνοδό αστέρι νετρονίων ονομάζονται συμβιωτικοί διπλοί ακτινών X. Σε αυτά τα συστήματα ο αστέρας νετρονίων περιστρέφεται σχετικά αργά. Η εκπομπή ακτινών X μπορεί να κυμαίνεται ως 4 mag, που σημαίνει ότι υπάρχει συσσώρευση ενός ακανόνιστου αστρικού ανέμου, που συνδέεται με μια πολύ ελλειπτική

τροχιά. Ένας γεωμετρικά λεπτός και οπτικά παχύς δίσκος προσαύξησης μπορεί να εκπέμπει την υπεριώδης ακτινοβολία που απαιτείται ώστε να ιονιστεί ο άνεμος από τον ερυθρό γίγαντα.



Διαφορετικοί τύποι ξεσπάσματος (outburst) της εκροής της ύλης των συμβιωτικών αστεριών

Κανονικά οι συμβιωτικοί αστέρες παρουσιάζουν σειρές από εκροές ύλης. Για παράδειγμα, το CI Cyg παρουσίασε το 1979 τρία μέγιστα εκροής με φθίνουσα ένταση και διάρκεια, με διαχωρισμό περίπου 1 περίοδος της τροχιάς του. Κατά τις εκροές το φάσμα του παρουσίασε ελάττωση του ιονισμού σε σχέση με την περίοδο ηρεμίας, ένα ισχυρότερο συνεχές εκπομπής στο μοριακό φάσμα του ερυθρού γίγαντα και μια μακρά ενίσχυση των γραμμών εκπομπής. Αυτός ο τύπος συχνών και πολλαπλών ξεσπασμάτων ονομάζεται Z ή τύπος Z-And, από το πρωτότυπο συμβιωτικό αστέρι στον αστερισμό της Ανδρομέδας. Σε 12 συμβιωτικά αστέρια έχουμε παρατηρήσει πίδακες, και οι περισσότεροι συνδέονται με ξεσπάσματα αστεριών τύπου Z-And. Οι ταχύτητες των πιδάκων είναι 1000- 1500 km/s, συγκρίσιμες με την ταχύτητα διαφυγής ενός λευκού νάνου. Οι ερυθροί γίγαντες στα συμβιωτικά περιστρέφονται ταχύτερα από αυτούς του πεδίου και είναι συγχρονισμένοι με την περίοδο περιφοράς. Αυτοί στους συμβιωτικούς με πίδακες περιστρέφονται ακόμη ταχύτερα, ταχύτερα από την ταχύτητα περιφοράς τους. Τα αίτια των ξεσπασμάτων μπορεί να είναι μία ξαφνική αύξηση του ρυθμού συσσώρευσης μάζας, εσωτερικές διεργασίες στον ερυθρό γίγαντα (λόγω ισχυρής συναγωγής), το πέρασμά του από το περίαστρο, ο σχηματισμός μιας αδιαφανής και σχετικά ψυχρής ζώνης υλικού γύρω από τον ισημερινό του λευκού νάνου ως αποτέλεσμα του ενισχυμένου ανέμου από τον λευκό νάνο, ο ενισχυμένος άνεμος από τον λευκό νάνο που σχηματίζει κώνους υλικού γύρω από τον άξονά του με αποτέλεσμα τις ευθυγραμμισμένες εκροές ύλης (πίδακες), μεταβολή στην κινηματική του συστήματος λόγω σύγκρουσης των αστρικών ανέμων του ερυθρού γίγαντα και του λευκού νάνου, κλπ. Μπορούμε να κατατάξουμε τα πιθανά αίτια των ξεσπασμάτων σε 2 κατηγορίες. 1) αποδέσμευση ενέργειας από το σύστημα λόγω επιπλέον συσσωρευμένης ύλης και 2) Μετάβαση της εκπομπής της καύσης στον φλοιό του λευκού νάνου σε μεγαλύτερο μήκος κύματος, λόγω διαστολής του φλοιού μέσω αυξημένης συσσώρευσης υλικού.

Συμβιωτικές Νόβα

Έχουμε παρατηρήσει μόλις 10 εκρήξεις από συμβιωτικές Νόβα στον Γαλαξία μας, ενώ κάποιες άλλες ανιχνεύτηκαν μετά την έκρηξη. Δεν πρέπει να τις συγχέουμε με τις Νόβα που βιώνουν έκρηξη σε συμβιωτικούς διπλούς, που περιγράψαμε νωρίτερα. Το ξέσπασμα ενός συμβιωτικού Νόβα (SyN) διαρκεί περίπου έναν αιώνα. Μέσα σε ένα έτος έχουμε μεγάλη αύξηση της λαμπρότητας και ακολουθεί μια πολύ αργή ελάττωση της λαμπρότητας ώστε το σύστημα να επανέλθει μέσα σε έναν αιώνα. Το ίδιο αργή είναι και η εξέλιξη του φάσματος. Αρχικά, κατά την αύξηση λαμπρότητας, ψύχεται σε υπεργίγαντα τύπου F με ισχνές γραμμές εκπομπής και κατά την ελάττωση λαμπρότητας το συνεχές του φάσματος υπεργίγαντα τύπου F φθίνει και αναπτύσσεται ένα συνεχές τύπου νεφελώματος. Οι γραμμές εκπομπής αποκτούν μεγαλύτερη ένταση και βαθμό ιονισμού.

Ένα ξέσπασμα συμβιωτικού Νόβα μπορεί να σημαίνει την έναρξη ενός συμβιωτικού κύκλου του συστήματος ερυθρός γίγαντας- λευκός νάνος, μετά από μια μακρά περίοδο ήρεμης συσσώρευσης ύλης από τον λευκό νάνο. Ο υψηλός ρυθμός μεταφοράς ύλης στην περίπτωση υπερχειλίσσης του λοβού Roche έχει ως αποτέλεσμα την συσσώρευση ύλης σε μη εκφυλισμένη μορφή στην επιφάνεια του καυτού λευκού νάνου. Ως ότου αναπτυχθούν οι συνθήκες για έναρξη θερμοπυρηνικής σύντηξης, αυτή η ύλη θα βρίσκεται σε θερμοδυναμική ισορροπία. Αυτή η ύλη στην επιφάνεια του λευκού νάνου θα διασταλεί σε διαστάσεις υπεργίγαντα, λόγω απουσίας μαζικής εκροής ύλης. Η καύση (σύντηξη) του υλικού θα γίνει με αργούς ρυθμούς σε σταθερές συνθήκες, δικαιολογώντας το χρονοδιάγραμμα του ενός αιώνα που αναφέραμε παραπάνω. Ο AG Peg πρόσφατα επανήλθε στην κατάσταση ηρεμίας και την αρχική του λαμπρότητα μετά το ξέσπασμα το 1850. Τώρα είναι ένας κανονικός συμβιωτικός καύσης με ομαλά ξεσπάσματα τύπου Z- And. Αν υπάρχει ισορροπία ανάμεσα στην συσσώρευση και την καύση του υδρογόνου, σε κάποια φάση το υλικό στην επιφάνεια του λευκού νάνου θα ελαττωθεί κάτω από την μάζα που απαιτείται για θερμοπυρηνική σύντηξη, η οποία θα διακοπεί. Μετά θα ξεκινήσει καινούργιος κύκλος.

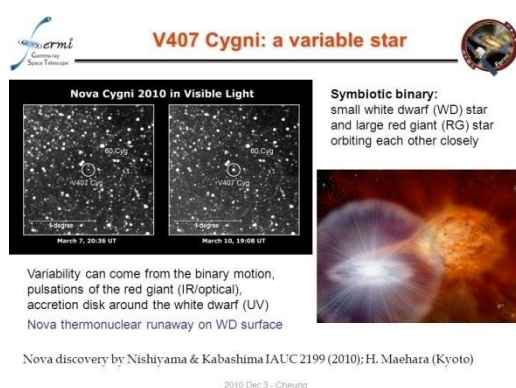
Εκρήξεις Νόβα σε συμβιωτικά αστέρια

Με την παραπάνω ισορροπία ανάμεσα στην συσσώρευση και την καύση, οι λευκοί νάνοι στα συμβιωτικά αστέρια αυξάνουν την μάζα τους (το ήλιον μετά την καύση του υδρογόνου) μέχρι να αποκτήσουν την μάζα Chandrasekhar. Τότε τερματίζουν την ζωή τους με μία έκρηξη SN Ia. Προς το τέλος του ο λευκός νάνος βιώνει απανωτές εκρήξεις νόβα σε μικρό χρονικό διάστημα. Τέτοιες γνωστές επαναλαμβανόμενες Νόβα σε συμβιωτικούς είναι οι RS Oph (7 ξεσπάσματα), V745 Sco (3), T GrB (2), V 3890 Sgr (2 ξεσπάσματα).

Μία έκρηξη Νόβα σε συμβιωτικά αστέρια εξελίσσεται διαφορετικά από μια κλασσική Νόβα. Όταν ο ρυθμός θερμοπυρηνικής καύσης κορυφώνεται με μία αναλαμπή (φλας) μεγάλης έντασης στις υπεριώδεις, ο άνεμος του ερυθρού γίγαντα θα απορροφήσει την περισσότερη από αυτή την ακτινοβολία, θα ιονιστεί και θα επανέ- εκπέμψει την ακτινοβολία λόγω επανασύνδεσης (το αντίθετο του ιονισμού). Η μεγάλη πυκνότητα σε ηλεκτρόνια του ανέμου από τον ερυθρό γίγαντα σημαίνει ότι η επανασύνδεση θα συμβεί πολύ γρήγορα, σε 3- 6 ημέρες. Η ύλη που εκτινάσσεται από τον λευκό νάνο με μεγάλη ταχύτητα (χιλιάδες km/s) παράγει πολύ πλατιές γραμμές εκπομπής. Αυτή η ταχέως κινούμενη ύλη θα συγκρουστεί με τον άνεμο του ερυθρού γίγαντα και θα επιβραδύνει απότομα, με αποτέλεσμα την απότομη στένωση των γραμμών εκπομπής. Αυτό το κρουστικό κύμα θα παράγει ακτινοβολία γ. Το

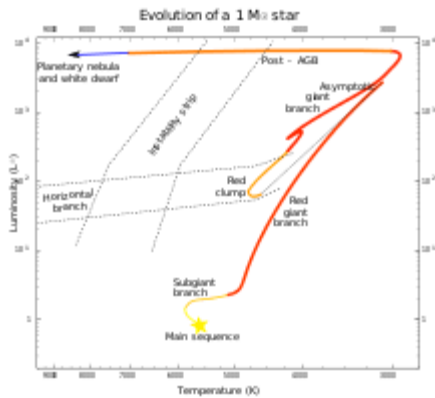
πιο καλό δείγμα Νόβα σε συμβιωτικά αστέρια αποτελεί το Mira V407 Cyg που παρατηρήθηκε το 2010.

Μια συμβιωτική Νόβα θα κορυφωθεί στιγμιαία σε λαμπρότητα στο ορατό, ενώ στις κλασσικές Νόβα η αναλαμπή στις υπεριώδεις θα διασκορπιστεί στον πολύ αραιό περιβάλλον χώρο. Μετά από ώρες ή ημέρες θα αλληλεπιδράσει με το εκτεταμένο υλικό (σαν μεγάλο αραιό κέλυφος) γύρω από τον λευκό νάνο.



Τα μετά τον ασυμπτωτικό κλάδο γιγάντων διπλά αστέρια ως δείκτες αστρικής εξέλιξης

Το τελικό στάδιο εξέλιξης των αστέρων μικρής και μεσαίας μάζας (0,8- 8 ηλιακές μάζες) είναι η σύντομη μετάβαση από τον ασυμπτωτικό κλάδο στο διάγραμμα H/R στην φάση μετά του ασυμπτωτικού κλάδου, προς τον σχηματισμό πλανητικού νεφελώματος. Ο εξωτερικός αστρικός φλοιός απομακρύνεται μέσω αυξημένου ρυθμού απώλειας μάζας (1 ηλιακή μάζα/ 10000 έτη) στο τέλος του ασυμπτωτικού κλάδου και το αστέρι μπαίνει στην μετά ασυμπτωτικού κλάδου φάση. Σε αυτή την φάση ο αμέσως επόμενος αστρικός φλοιός, που δεν αποδεσμεύεται από το αστέρι, θα συρρικνωθεί (να θυμίσουμε ότι η θερμοπυρηνική σύντηξη στον αστρικό πυρήνα έχει παύσει στον ασυμπτωτικό κλάδο λόγω καύσης του ήλιου σε άνθρακα) με αποτέλεσμα η επιφανειακή θερμοκρασία του αστέρα να αυξηθεί ενώ η λαμπρότητα παραμένει σταθερή (μετάβαση στο διάγραμμα H/R οριζόντια προς τα αριστερά). Αν η επιφανειακή θερμοκρασία αυξηθεί σε μικρότερο χρόνο από αυτόν που χρειάζεται για να διασκορπιστεί η ύλη του πρώτου εξωτερικού φλοιού (που εκτινάχτηκε από το αστέρι), θα σχηματιστεί ένα πλανητικό νεφέλωμα. Αυτό θα λάμψει λόγω ιονισμού από το καυτό πια αστέρι του. Κατά την μετάβαση από τον ασυμπτωτικό κλάδο στο πλανητικό νεφέλωμα μερικά αστέρια παρουσιάζουν ένα νεφέλωμα ανάκλασης που ονομάζουμε πρώτο- πλανητικό νεφέλωμα. Παρατηρούμε ότι τα πρώτο- πλανητικά νεφελώματα και οι μετά του ασυμπτωτικού κλάδου αστέρες γενικά δεν ταιριάζουν με την εξελικτική πορεία των αστέρων του ασυμπτωτικού κλάδου ή με τα πλανητικά νεφελώματα.



Ερευνούμε αν υπάρχει σημαντική επίδραση από συνοδούς αστέρες (διπλά συστήματα) σε αυτό το στάδιο αστρικής εξέλιξης. Η αλληλεπίδραση των διπλών αστεριών μεταβάλλει ιδιότητες των εξελιγμένων αστεριών όπως οι παλμοί τους, η απώλεια μάζας μέσω αστρικού ανέμου, ο σχηματισμός σκόνης, η μορφή του περιαστρικού κελύφους κ.α. Επίσης έχει σημαντικό ρόλο στην τελική αστρική εξέλιξη. Η μεταφορά μάζας ανάμεσα στα άστρα ενός διπλού συστήματος έχει ως αποτέλεσμα φαινόμενα όπως οι εκρήξεις Νόβα, οι SN Ia, οι SN μικρής λαμπρότητας (subluminoi), οι πηγές βαρυτικών κυμάτων, τα αστέρια Βαρίου, οι κατακλυσμικοί μεταβλητοί, τα δίπολα πλανητικά νεφελώματα κ.α.

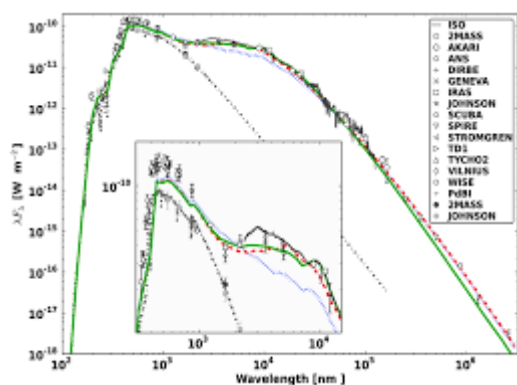
Η αλληλεπίδραση των διπλών αστεριών μικρής και μεσαίας μάζας θα αποκτήσει μεγαλύτερη ένταση όταν το ένα αστέρι εξελιχτεί σε ερυθρό γίγαντα. Τότε η δυναμική του συστήματος θα εξαρτάται από την ισορροπία ανάμεσα στον λοβό Roche και την ακτίνα του ερυθρού γίγαντα. Τα διπλά με διαχωρισμό (στην κύρια ακολουθία) μικρότερο από 2 AU θα <δεθούν> παλιρροιακά στον κλάδο ερυθρών γιγάντων ή στον ασυμπτωτικό κλάδο. Όταν η μεταφορά μάζας γίνει ασταθής, θα σχηματιστεί ένα κοινό περιαστρικό κέλυφος, που θα έχει ως αποτέλεσμα την σημαντική ελάττωση της περιόδου περιφοράς των αστεριών γύρω από το κοινό κέντρο μάζας τους. Αυτό μπορεί να εξελιχτεί σε συγχώνευση των αστεριών ή σε ταχεία εξέλιξή τους μετά την φάση των γιγάντων. Αν έχουν μεγαλύτερο διαχωρισμό, η αλληλεπίδραση θα σημειωθεί μέσω συσσώρευσης αστρικού ανέμου και το κύριο αστέρι θα εξελιχτεί μετά την φάση των γιγάντων σε μεγάλη τροχιά γύρω από το κοινό κέντρο μάζας (θα έχει συρρικνωθεί σε πολύ μικρή ακτίνα). Όταν εξελιχτεί και ο συνοδός σε ερυθρό γίγαντα, θα αρχίσει εκ νέου μεταφορά μάζας, αλλά αυτή τη φορά σε ένα υπέρπυκνο αντικείμενο. Τα μοντέλα προβλέπουν ότι οι τελικές τροχιές των εξελιγμένων διπλών αστεριών θα είναι περιόδου μιας ημέρας για τα διπλά μικρού διαχωρισμού και κοινού κελύφους, και περίοδου άνω των 1000 ημερών για τα διπλά μεγάλου διαχωρισμού και συσσώρευσης αστρικού ανέμου.

Τα παραπάνω δεν είναι σύμφωνα με τις παρατηρήσεις των διπλών αστεριών μετά τον ασυμπτωτικό κλάδο. Αυτό συμβαίνει για 2 λόγους. Πρώτον, δεν έχουμε κατανοήσει καλά αρκετά από τα φαινόμενα αλληλεπίδρασης των διπλών αστεριών, όπως η αποτελεσματικότητα της απομάκρυνσης του εξωτερικού αστρικού φλοιού, οι ιδιότητες του κοινού κελύφους, η επίδραση της πίεσης ακτινοβολίας στο σχήμα του λοβού Roche και τέλος η αποτελεσματικότητα μεταφοράς μάζας και η εξάρτησή της από την απόσταση

διαχωρισμού των 2 αστέρων. Δεύτερον, υπάρχει δυσκολία παρατήρησης της αστρικής εξέλιξης σε διπλά συστήματα.

Η SED (Spectral Energy Distribution)

Η SED είναι η κατανομή της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας τα διάφορα μήκη κύματος. Στην περίπτωση των διπλών αστεριών μετά τον ασυμπτωτικό κλάδο παρατηρούμε ότι έχουν παρόμοιες SED, αλλά με διαφορές ανάλογα την απόσταση του περιαστρικού υλικού (κελύφους που θα εξελιχτεί σε πλανητικό νεφέλωμα) από το αστέρι. Αν είναι αρκετά κοντά, παρατηρούμε μια κορύφωση της SED στην εκπομπή της σκόνης στα 10 μ m. Αυτή η SED παραπέμπει σε δίσκο γύρω από τα 2 αστέρια.



Οι ιδιότητες των τροχιών των εξελιγμένων διπλών αστεριών (γύρω από το κοινό κέντρο βάρους)

Σε μια επισκόπηση εξελιγμένων αστεριών του Γαλαξία μας βρέθηκαν πολλά διπλά συστήματα με SED δίσκου με περιόδους τροχιάς ανάμεσα σε 100 και 2000 ημέρες. Παρατηρούμε την απουσία σύντομων τροχιών λίγων ημερών (δηλαδή στενούς διπλούς), κάτι που δεν οφείλεται σε σφάλμα της επισκόπησης, αφού αυτοί θα ήταν πιο εύκολο να ανακαλυφτούν σε σχέση με τους διπλούς μακροχρόνιας περιόδου τροχιάς. Επίσης δεν είχαμε μηδενική εκκεντρικότητα, αλλά πολύ έκκεντρες τροχιές. Συμπεραίνουμε ότι οι στενοί διπλοί δεν περνάνε την φάση του ασυμπτωτικού κλάδου κατά την αστρική εξέλιξη, και οι <μακρινοί> διπλοί δεν ελαττώνουν την μεταξύ τους απόσταση. Ακόμα, οι τροχιές δεν χάνουν την εκκεντρικότητά τους κατά την αστρική εξέλιξη. Φαίνεται τα περιαστρικά κελύφη να είναι πολύ εκτεταμένα και να μην επιδρούν στην δυναμική των τροχιών των αστεριών τους.

Οι περιαστρικοί δίσκοι από μέσα προς τα έξω

Είδαμε ότι η SED των διπλών αστεριών στον ασυμπτωτικό κλάδο παραπέμπει σε δίσκο, και μάλιστα σταθερό, γύρω από το σύστημα. Η ανάλυση τέτοιων δίσκων μας πληροφορεί ότι περιέχουν αρκετή σκόνη, με μεγάλους κόκκους (μεγέθους χιλιοστών). Συμπεραίνουμε την δημιουργία των κόκκων από τον μεγάλο βαθμό κρυσταλλώματος του Πυριτίου. Επίσης η σκόνη των δίσκων είναι πλούσια σε Οξυγόνο και Μαγνήσιο. Κάποιοι δίσκοι είναι εμπλουτισμένοι σε Άνθρακα και πολυκυκλικούς αρωματικούς υδρογονάνθρακες.

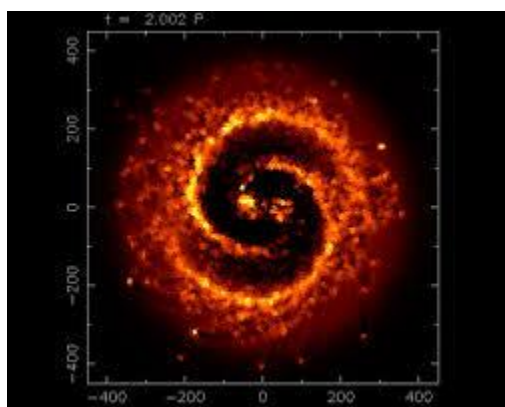
Παρατηρούμε μια δομή των δίσκων από μέσα προς τα έξω, μιας και το εσωτερικό τους επηρεάζεται περισσότερο από τους αστρικούς ανέμους και την τροχιά των αστεριών γύρω από το κοινό κέντρο μάζας τους. Παρουσιάζονται διπολικές εκροές ύλης (πίδακες). Η χρονική διάρκεια της ζωής ενός τέτοιου δίσκου είναι στα 8000- 10000 έτη.

Ανάδραση μέσω κοινού περιαστρικού δίσκου (Circumbinary disk)

Σε πολλά αστέρια που εξελίχτηκαν πέρα από τον ασυμπτωτικό κλάδο παρατηρούμε μια χημική ανωμαλία στην αστρική επιφάνεια που ονομάζουμε εξάλειψη (depletion). Η χημική σύσταση πλέον μοιάζει με αυτή του μεσοαστρικού αερίου. Παρατηρούμε ελάττωση των πυρίμαχων στοιχείων (refractory elements) και αύξηση των πτητικών αερίων. Δείκτες της εξάλειψης είναι οι αναλογίες $\{S/Ti\}$, $\{Zn/Ti\}$, $\{Zn/Fe\}$. Τα στοιχεία της αργής απορρόφησης νετρονίων (s process) είναι και αυτά πυρίμαχα, άρα ο εμπλουτισμός του αστεριού στον ασυμπτωτικό κλάδο σε αυτά τα στοιχεία δεν είναι ορατός. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό δεν μας είναι γνωστός. Ο σχηματισμός σκόνης δημιουργεί χημική κλασμάτωση (chemical fractionation) στο περιαστρικό κέλυφος. Η πίεση της ακτινοβολίας πρέπει να διαχωρίζει την σκόνη από το αέριο (η ακτινοβολία αλληλεπιδράει περισσότερο με τους κόκκους σκόνης), και το αέριο συσσωρεύεται πίσω στην αστρική επιφάνεια. Αυτή η διαδικασία συνδέεται με την ύπαρξη δίσκου προσαύξησης. Το ίδιο φαινόμενο έχει παρατηρηθεί και σε αστέρια που εξελίχτηκαν πέρα από τον ασυμπτωτικό κλάδο στα Μαγγελανικά νέφη, αλλά με άλλη χημική ταυτότητα λόγω χαμηλής μεταλλικότητας. Αν η συσσώρευση αερίου ξεπερνάει την ελάττωση της μάζας του κελύφους, το χρονοδιάγραμμα εξέλιξης του αστεριού στην μετά ασυμπτωτικού κλάδου φάση θα επιμηκυνθεί.

Συμπεράσματα

Τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της SED των αστεριών που εξελίχτηκαν πέρα από τον ασυμπτωτικό κλάδο παραπέμπουν σε δίσκους γύρω από διπλά αστέρια με περιόδους 100-2000 ημέρες. Η διαφορά αυτών των δίσκων με τους πρωτοπλανητικούς δίσκους είναι ότι έχουν πολύ μεγαλύτερη αναλογία λαμπρότητας/ μάζας. Έχουν μια εκτεταμένη εσωτερική περιοχή χωρίς σκόνη. Ο κοινός περιαστρικός δίσκος μπορεί να αυξήσει την εκκεντρικότητα της τροχιάς του συστήματος. Αυτό εξαρτάται από την μάζα και το χρονοδιάγραμμα του δίσκου, καθώς και την γωνιακή διασπορά μάζας στον δίσκο.



Διπλά αστέρια και πλανητικά νεφελώματα

Τα πλανητικά νεφελώματα είναι λαμπρά κελύφη από αέριο και σκόνη γύρω από λευκούς νάνους. Παλαιότερα επικρατούσε το σενάριο όπου ένα αστέρι με μάζα ως 8 ηλιακές, που μόλις εξελίχτηκε πέρα από τον ασυμπτωτικό κλάδο σε λευκό νάνο, ιονίζει το κέλυφος από ύλη που το ίδιο εκτίναξε. Το κέλυφος διαστέλλεται με αργή ταχύτητα και το αστέρι, μέσω του μεγάλης ταχύτητας ανέμου του, το ιονίζει. Αυτό το μοντέλο ονομάζεται αστρικοί άνεμοι αλληλεπίδρασης (Interacting Stellar Winds, ISW) και προβλέπει με επιτυχία πολλές ιδιότητες των πλανητικών νεφελωμάτων. Δεν μπορεί όμως να εξηγήσει την ποικιλία σχημάτων στα πλανητικά νεφελώματα, που πολλές φορές παρουσιάζουν μεγάλη συμμετρία στον άξονα.

Προτάθηκαν εναλλακτικές λύσεις της θεωρίας όπως μεγάλη ταχύτητα περιστροφής και μαγνητικά πεδία σε μονά αστέρια, αλλά δεν έδωσαν λύσεις. Φαίνεται η συμμετρία στους άξονες των κελυφών (πλανητικών νεφελωμάτων) να οφείλεται σε διπλά αστρικά συστήματα. Λόγω της διατήρησης της στροφορμής, το πλανητικό νεφέλωμα θα έχει αυτή την συμμετρία. Η αλληλεπίδραση ανάμεσα στον αστρικό άνεμο και το κέλυφος θα έχει ως αποτέλεσμα την συμμετρία στον άξονα και την διπολικότητα που συχνά παρατηρούμε. Η αναλογία διπλών αστεριών στα πλανητικά είναι τουλάχιστον 20%, και μάλλον πολύ μεγαλύτερη.

Πως συνδέεται το σχήμα των πλανητικών νεφελωμάτων με τα διπλά αστέρια

Υπάρχει ισχυρή σύνδεση της διπολικότητας με τα διπλά αστέρια στα πλανητικά νεφελώματα. Ο άξονας συμμετρίας των πλανητικών νεφελωμάτων είναι κάθετος στο επίπεδο της τροχιάς των διπλών αστεριών. Ακόμα και το γνωστό ring nebular έχει διπολική δομή. Επίσης τα διπλά αστέρια στα πλανητικά νεφελώματα συνδέονται με την παρουσία ισημερινού δίσκου/ κυλίνδρου, πίδακες και νηματοειδείς δομές χαμηλού ιονισμού. Οι κύλινδροι (tori) εξηγούνται παρόμοια με τις διπολικές δομές, αν το μεγαλύτερο μέρος από το υλικό του πλανητικού νεφελώματος κατέλαβε το επίπεδο της τροχιάς των αστεριών. Οι πίδακες είναι φυσικό αποτέλεσμα της μεταφοράς μάζας ανάμεσα στα 2 αστέρια του συστήματος. Οι νηματοειδείς δομές χαμηλού ιονισμού που δεν είναι ευθυγραμμισμένοι με τα διπλά αστέρια τους μάλλον προέρχονται από την αλληλεπίδραση του αστρικού ανέμου με το κέλυφος και τις ανομοιομορφίες του.

Οι σουπερνόβα Ia

Πολλές, αν όχι όλες οι SN Ia προέρχονται από συγχωνεύσεις 2 λευκών νάνων. Το καλύτερο υποψήφιο διπλό αστέρι για SN Ia είναι το Hen 2-428. Η συνολική μάζα των 2 λευκών νάνων ξεπερνάει το όριο Chandrasekhar. Παρατηρούμε και λευκούς νάνους που συσσωρεύουν υλικό από τον συνοδό τους και βρίσκονται κοντά στο όριο Chandrasekhar. Το περιαστρικό περιβάλλον στις SN Ia παραπέμπει σε διαλυμένο πλανητικό νεφέλωμα.

Μεταφορά μάζας πριν από την δημιουργία κοινού κελύφους

Στα διπλά αστέρια με έναν λευκό νάνο και ένα αστέρι κύριας ακολουθίας παρατηρούμε το τελευταίο να έχει 2 φορές την διάμετρο από ότι τα μονά αστέρια ίδιου τύπου. Αυτό συμβαίνει λόγω μεταφοράς μάζας πριν ή κατά την διάρκεια σχηματισμού κοινού κελύφους (CE, common envelope). Η σημαντική μεταφορά μάζας αναγκάζει το δευτερεύον αστέρι

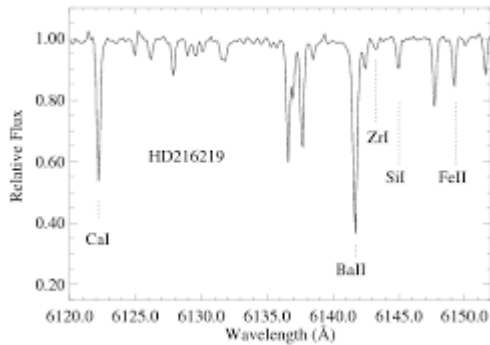
(κυρίας ακολουθίας) να απολέσει την θερμική ισορροπία του (ισορροπία ανάμεσα στην πίεση του αστεριού και την βαρύτητα) αναγκάζοντάς το να διασταλεί. Αυτό επιβεβαιώνεται και από τους πίδακες που παρατηρούμε σε πλανητικά νεφελώματα κοινού κελύφους. Οι πίδακες είναι επακόλουθο της συσσώρευσης μάζας. Στο νεφέλωμα Necklace, όπου παρατηρούμε πίδακες, το δευτερεύον αστέρι είναι ένας νάνος άνθρακα (carbon dwarf, λαμπρό κόκκινο αστέρι του ασυμπτωτικού κλάδου που περιέχει περισσότερο άνθρακα από οξυγόνο). Έχει εμπλουτιστεί με υλικό από το κέλυφος που ανέπτυξε πρώτα ο συνοδός του. Εναλλακτικά, μπορεί οι πίδακες να έχουν μεγαλύτερη ηλικία και να αναπτύχθηκαν στην προ κοινού κελύφους φάση του διπλού αστέρα.



Πολλά διπλά σε πλανητικά νεφελώματα έχουν ανιχνευτεί στις ακτίνες Χ. Η εκπομπή ακτινών Χ πρέπει να προέρχεται από το στέμμα του δευτερεύον αστεριού, που είναι αστέρι της κυρίας ακολουθίας που επιταχύνθηκε η περιστροφή του λόγω αλληλεπίδρασης με τον συνοδό του.

Πλανητικά νεφελώματα από διπλά αστέρια χωρίς κοινό κέλυφος

Πρόκειται για διπλά με ασθενή σύνδεση (με μεγάλη απόσταση μεταξύ των 2 αστεριών). Τέτοια αστέρια είναι τα αστέρια Βαρίου (Barium stars), που αποτελούνται από έναν λευκό νάνο και έναν γίγαντα τύπου G ή K που έχει εμπλουτιστεί με Βάριο και άλλα στοιχεία αργής απορρόφησης νετρονίων (s- process). Οι γίγαντες δεν έχουν εξελιχτεί αρκετά ώστε να παράγουν οι ίδιοι αυτόν τον εμπλουτισμό στοιχείων, άρα εμπλουτίστηκαν μέσω του μηχανισμού υπερχειλίσσης του λοβού Roche (Roche lobe overflow). Σε αυτόν τον μηχανισμό ο πρωτεύων αστέρας δεν γεμίζει τον λοβό του αλλά το κάνει ο αστρικός του άνεμος. Η μεταφορά μάζας είναι πολύ σημαντική. Αν η ακτίνα επιτάχυνσης του ανέμου είναι όμοια ή μεγαλύτερη από την ακτίνα του λοβού Roche τότε ο άνεμος θα αλληλεπιδράσει με τον δευτερεύον αστέρα, και θα συσσωρευτεί σε αυτόν μέσω του σημείου Lagrange 1 (σημείο βαρυτικής ισορροπίας που βρίσκεται ανάμεσα στα 2 αστέρια). Σε μερικά αστέρια Βαρίου έχουμε μετρήσει την περιστροφή του γίγαντα να επιταχύνεται σημαντικά σε περίοδο λίγων ημερών, λόγω της μεταφοράς μάζας. Οι γίγαντες παραμορφώνονται σε κυλινδρικούς σχήμα. Αυτό σημαίνει ότι η μεταφορά μάζας συμβαίνει και μέσα από τα σημεία Lagrange 2 και 3. Τα αστέρια Βαρίου μας επιτρέπουν να ορίσουμε το πλανητικό νεφέλωμα ως τα υπολείμματα του αερίου που διέφυγε από το διπλό αστρικό σύστημα.



Διπλοί αστέρες μακρόχρονης περιόδου και γωνιακή ταχύτητα

Έχουν παρατηρηθεί μερικά κεντρικά αστέρια πλανητικών νεφελωμάτων (CSPN, central star of planetary nebula) μακρόχρονης περιόδου μέσω παρατήρησης της γωνιακής ταχύτητας. Σε 3 περιπτώσεις το πιο λαμπρό αστέρι των διπλών είναι το δευτερεύων, δηλαδή ένας γίγαντας. Η ανακάλυψη τέτοιων συστημάτων απαιτεί μακροχρόνια παρατήρηση, έτσι δεν έχουμε μεγάλο δείγμα τους. Τα ερωτήματα είναι 2, πόσο μεγάλο είναι το πλήθος τους (υπολογίζεται να υπάρχει πληθώρα διπλών μεγάλης περιόδου) και αν εξελίσσονται διαφορετικά από τα μεμονωμένα αστέρια, άρα αν επηρεάζουν τα πλανητικά νεφελώματα. Σε τέτοια συστήματα κανένα αστέρι δεν γεμίζει άμεσα τον λοβό Roche, αλλά αυτό μπορεί να συμβεί μέσω του αστρικού ανέμου. Τα πλανητικά νεφελώματα των 3 περιπτώσεων δείχνουν ότι έχουν επηρεαστεί από την αστρική δυαδικότητα, που παρουσιάζουν σχήματα με συμμετρία στον άξονα. Το NGC 1514 που έχει περίοδο 9 έτη έχει ένα ζευγάρι δακτύλιων σκόνης. Αυτό το παρατηρούμε και σε νεφελώματα από συμβιωτικά αστέρια. Οι χημικές ταυτότητες των 2 από τις 3 περιπτώσεις δείχνουν ανωμαλίες που παραπέμπουν σε διπλό αστέρι, το LoTr5 είναι αστέρι Βαρίου ενώ το πλανητικό νεφέλωμα G052.7+50.7 δείχνει σημαντική ελάττωση πυρίμαχων στοιχείων (refractory elements) όπως παρατηρούμε στα μετά- ασυμπυκτωτικού κλάδου διπλά με κοινό δίσκο (Circumbinary disc).

CLASSIFICATION OF ELEMENTS

NEBULAR ENVIRONMENT:

- condensation temperatures at which 50% the mass of an element precipitates out of a nebular gas (typical assumption: 10^4 atm of H)
- >1400 K refractory: Ca, Al, Ti, Th, U, REE, Re, Os
- 1350 – 1250 K major components: Mg, Fe, Ni, Co, Si
- 1200 – 800 K moderately volatile: K, Pb, S, Rb, Au, Cd, halides
- <800 K volatile: H, C, N, O, noble gases

PLANETARY ENVIRONMENT:

- what's in the core, mantle and atmosphere/hydrosphere
- in the mantle lithophile: Mg, Ca, Al, Ti, Th, U, REE
- Mostly in the core siderophile: Ni, Fe, Co, Ir, Au, Os
- in the core & mantle chalcophile: S, Cu, Pb,
- Mostly in the atm/hydro atmophile: N, H, C, O, noble gases

Χημικός εμπλουτισμός μέσω της σκόνης

Ο εμπλουτισμός των πλανητικών νεφελωμάτων εξαρτάται από την αλληλεπίδραση του άνθρακα με το οξυγόνο. Το στοιχείο με την λιγότερη αναλογία από τα 2 δεσμεύεται στο μονοξείδιο του άνθρακα, αφήνοντας αυτό με την μεγαλύτερη αναλογία να σχηματίσει τους κόκκους σκόνης. Έτσι τα περισσότερα πλανητικά νεφελώματα αναπτύσσουν χημεία πλούσια σε άνθρακα, με πολυκυκλικούς αρωματικούς υδρογονάνθρακες (PAHs), ή πλούσια σε οξυγόνο, με πυριτικά άλατα (silicates). Υπάρχει και μια σημαντική μερίδα πλανητικών

νεφελωμάτων που επιδεικνύουν διπλή χημική ταυτότητα (με PAHs και silicates, dual-dust chemistry) στο φάσμα τους. Αυτά τα πλανητικά νεφελώματα έχουν χαρακτηριστικά που δείχνουν εξέλιξη μέσω κοινού κελύφους, όπως ισημερινοί δακτύλιοι.

Η ανωμαλία των χημικών αφθονιών στα πλανητικά νεφελώματα

Τα φάσματα των πλανητικών νεφελωμάτων είναι πολύ πλούσια σε γραμμές εκπομπής, που παράγονται μέσω επανασύνδεσης των ηλεκτρονίων ή διέγερσης από συγκρούσεις σωματιδίων, για μεγάλο εύρος χημικών στοιχείων. Οι εντάσεις αυτών των γραμμών κυμαίνονται σύμφωνα με την αφθονία κάθε στοιχείου και τις συνθήκες (πυκνότητα σε ηλεκτρόνια και θερμοκρασία) του αερίου που τις εκπέμπει. Όμως παρατηρούμε μια ασυμφωνία στις αφθονίες των στοιχείων στα πλανητικά νεφελώματα. Ως αίτιο προτείνεται ο συνδυασμός της ανομοιογένειας των συνθηκών όπως η θερμοκρασία και η πυκνότητα, της ανώμαλης διασποράς ηλεκτρονίων και των διακυμάνσεων στον ιονισμό του νεφελώματος. Όλα αυτά μπορούν να εξηγηθούν αν θεωρήσουμε τα αστέρια των πλανητικών νεφελωμάτων ως κοντινά διπλά. Τα πλανητικά νεφελώματα με τις μεγαλύτερες ανωμαλίες αναλογίας στοιχείων παρουσιάζουν μια κεντρική περιοχή με μεγαλύτερη μεταλλικότητα (άρα χαμηλότερη θερμοκρασία). Φαίνεται να υπήρχε ένα δεύτερο επεισόδιο δημιουργίας νεφελώματος στο σύστημα, που είχε μεγαλύτερη μεταλλικότητα εμπλουτίζοντας το παλαιότερο, πιο εκτεταμένο νεφέλωμα (πλανητικό νεφέλωμα αναγέννησης, born-again PN).



Abell 30

Συμπεράσματα

Η δυαδικότητα του κεντρικού αστεριού των πλανητικών νεφελωμάτων έχει μεγάλη σημασία για την μορφολογία τους. Τουλάχιστον το 20% των πλανητικών νεφελωμάτων, αλλά ίσως και όλα τους, προέρχονται από διπλά αστέρια. Η συμμετρία σε 2 άξονες σε πολλά πλανητικά δείχνει προέλευση από διπλά αστέρια. Ακόμα και τα διπλά αστέρια μακράς περιόδου χωρίς κοινό κέλυφος σχηματίζουν πλανητικά νεφελώματα. Μέσω των πλανητικών νεφελωμάτων μπορούμε να αναγνωρίσουμε τα είδη αλληλεπίδρασης των διπλών αστεριών, όπως η φάση κοινού κελύφους, η πλήρωση του λοβού Roche μέσω αστρικού ανέμου, οι πίδακες από τον δίσκο συσσώρευσης και οι χημικές ανωμαλίες στις αστρικές ατμόσφαιρες. Ακόμη παρατηρούμε τους προγεννήτορες αστέρες από αστέρια Βαρίου, κατακλυσμικούς διπλούς, Νόβα, SN Ia, R Coronae Borealis stars, διπλούς ακτινών X

μικρής μάζας. Η μελέτη των πλανητικών νεφελωμάτων μας προσφέρει πολλά στην κατανόησή τους. Ακόμα μπορεί να διευκρινίσουμε αν υπάρχει γενιά δευτερογενών πλανητών στα πλανητικά νέφη (πλανήτες που δημιουργήθηκαν από το εμπλουτισμένο υλικό των πλανητικών νεφών, ενώ η πρώτη γενιά επιβίωσε την αστρική εξέλιξη μέχρι την δημιουργία του πλανητικού νεφελώματος).