

Τα πλανητικά νεφελώματα και τα διπλά αστρικά συστήματα

Λέων Παπασωτηρίου

* lesvos pulsar@gmail.com

Περίληψη

Όταν ένα αστέρι μικρής ή μεσαίας μάζας εξελίσσεται στον ασυμπτωτικό κλάδο, θα απολέσει τα εξωτερικά του στρώματα. Αυτή η ύλη θα σχηματίσει ένα πλανητικό νεφέλωμα, που θα ιονίζεται από το αστέρι (πλέον λευκός νάνος). Τα πλανητικά νεφελώματα αποκλίνουν, κατά κανόνα, από το σφαιρικό σχήμα. Μπορεί ένα αστέρι χωρίς συνοδό να δημιουργήσει μια τόσο πολύπλοκη δομή ή προέρχονται τα πλανητικά νεφελώματα αποκλειστικά από διπλά αστέρια; Η αλληλεπίδραση των διπλών αστεριών, με χαρακτηριστική φάση εξέλιξης το κοινό κέλυφος (CE, common envelope), μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα τα διπολικά σχήματα που παρατηρούμε σε πλανητικά νεφελώματα. Όμως δεν σχηματίζουν όλα τα διπλά αστέρια κοινό κέλυφος. Έχουμε ήδη ανακαλύψει ένα πλήθος πλανητικών νεφελωμάτων όπου ο λευκός νάνος έχει συνοδό. Σημαντική για την παραπάνω μελέτη είναι η φάση του προ πλανητικού νεφελώματος (PPN, pre planetary nebula), μετά τον ασυμπτωτικό κλάδο.

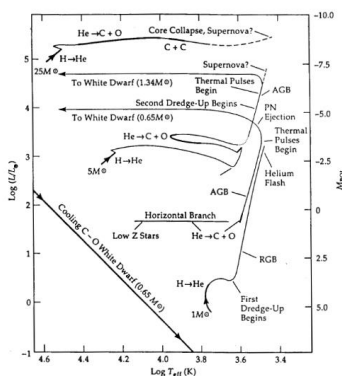
Η φάση του πλανητικού νεφελώματος είναι πολύ σύντομη στην αστρική εξέλιξη. Το πλήθος των πλανητικών νεφελωμάτων που παρατηρούμε στον Γαλαξία μας αναλογεί στο πλήθος διπλών αστεριών με σημαντική βαρυτική αλληλεπίδραση. Όμως η ανίχνευση συνοδών των λευκών νάνων είναι πολύ δύσκολη, απαιτεί μεγάλο χρόνο παρατήρησης και εμποδίζεται από τον αυξημένο θόρυβο των πλανητικών νεφελωμάτων. Οι σύγχρονες επισκοπήσεις ευρέως πεδίου αναμένεται να αυξήσουν δραματικά το πλήθος των διπλών αστεριών που φιλοξενούνται στα πλανητικά νεφελώματα.

Στόχος: Ο στόχος της παρακάτω θεωρητικής μελέτης είναι να αναδείξει την πολυπλοκότητα του μηχανισμού δημιουργίας πλανητικών νεφελωμάτων.

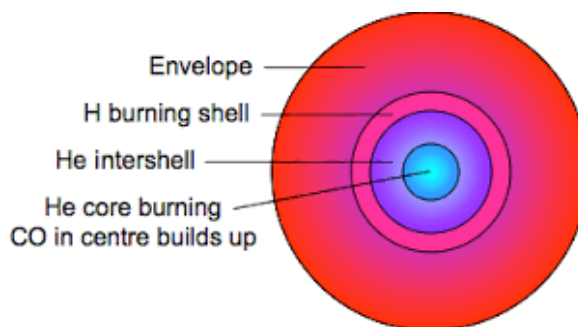
Λέξεις-κλειδιά: Πλανητικό νεφέλωμα, κοινό κέλυφος, διπλά αστέρια

1. Η αστρική εξέλιξη ως τα πλανητικά νεφελώματα

Τα πλανητικά νεφελώματα προέρχονται από αστέρια με μάζα 0,7 ως 8 ηλιακές. Τα αστέρια με μικρότερη μάζα δεν έχουν εξελιχτεί ακόμα (στην σημερινή ηλικία του σύμπαντος), ενώ αυτά με μάζα μεγαλύτερη από 8 ηλιακές βιώνουν βαρυτική κατάρρευση του πυρήνα με επακόλουθη έκρηξη σουπερνόβα. Η εξέλιξη των αστεριών μικρής μάζας (ως 2,3 ηλιακές μάζες) και μεσαίας μάζας (2,3 ως 8 ηλιακές μάζες) στο διάγραμμα H/R είναι παρόμοια.



Τα αστέρια μικρής και μεσαίας μάζας μεταστοιχειώνουν, μέσω θερμοπυρηνικής σύντηξης, Υδρογόνο σε Ήλιο στον πυρήνα. Όσο αυτό συμβαίνει το αστέρι παραμένει στην κύρια ακολουθία του διαγράμματος. Μετά την καύση του Υδρογόνου στον πυρήνα (που αποτελείται πλέον από Ήλιο) η καύση του Υδρογόνου συνεχίζεται εξωτερικά του πυρήνα, σε φλοιό. Το Ήλιο που παράγεται κατακάθεται στον πυρήνα. Το αστέρι βρίσκεται πλέον στον κλάδο των ερυθρών γιγάντων (red giant branch, RGB). Η έντονη συναγωγή μεταφέρει στην αστρική επιφάνεια χημικά στοιχεία από την περιοχή καύσης του Υδρογόνου. Όταν το αστέρι φτάσει στην κορυφή του κλάδου των ερυθρών γιγάντων, ο πυρήνας έχει αρκετά μεγάλη θερμοκρασία ώστε να πυροδοτηθεί η σύντηξη του Ηλίου με την διαδικασία 3 α (σύντηξη 3 πυρήνων Ηλίου). Το αστέρι αυξάνει δραματικά την ακτίνα και την λαμπρότητά του, και βρίσκεται πλέον στον οριζόντιο κλάδο (horizontal branch, HB).



Στον κλάδο των ερυθρών γιγάντων τα αστέρια μεσαίας μάζας εξελίσσονται όπως τα μικρής μάζας, με πιο ομαλή ανάφλεξη του Ηλίου στον πυρήνα. Μόλις εξαντληθεί το Ήλιο στους πυρήνες στα αστέρια μικρής και μεσαίας μάζας, η καύση του Ηλίου συνεχίζεται σε έναν φλοιό, ανάμεσα στον πυρήνα και τον φλοιό καύσης Υδρογόνου. Ο πυρήνας εμπλουτίζεται με Άνθρακα και Οξυγόνο από την καύση Ηλίου. Το αστέρι βρίσκεται πια στον ασυμπτωτικό κλάδο γιγάντων (asymptotic giant branch, AGB). Η μεγάλη εξάρτηση της καύσης 3 α από την θερμοκρασία περιορίζει το μέγεθος του φλοιού καύσης Ηλίου. Έτσι ο φλοιός καύσης Ηλίου συντήκει με ταχύτερο ρυθμό από τον φλοιό καύσης Υδρογόνου, με αποτέλεσμα το αστέρι να παρουσιάζει θερμικούς παλμούς (thermally pulsing AGB, TP-AGB).

Οι θερμικοί παλμοί δημιουργούν ένα επεισόδιο ανάδυσσης χημικών στοιχείων (third dredge up, TDU). Σε αυτό, στο τέλος κάθε παλμού (όταν διακοπεί η καύση Υδρογόνου σε φλοιό και ψυχθεί ο φλοιός καύσης Ηλίου) η ύλη από την αστρική επιφάνεια (κυρίως Υδρογόνο) φτάνει, μέσω συναγωγής, βαθειά μέσα στην περιοχή ανάμεσα στους 2 φλοιούς σύντηξης, ενώ τα προϊόντα καύσης Ηλίου (κυρίως Άνθρακας) ανέρχονται στην αστρική επιφάνεια. Η αύξηση της αναλογίας του Άνθρακα έναντι στο Οξυγόνο στην αστρική επιφάνεια έχει ως αποτέλεσμα το αστέρι να χαρακτηρίζεται αστέρας Άνθρακα (Carbon star). Σχεδόν όλο το Οξυγόνο στην (αρκετά ψυχρή λόγω διαστολής) αστρική επιφάνεια είναι δεσμευμένο στο CO. Στο φάσμα του αστεριού κυριαρχούν πλέον μόρια σαν το CN.

Τα αστέρια μεσαίας και μικρής μάζας χάνουν τα εξωτερικά τους στρώματα όσο βρίσκονται στην φάση θερμικών παλμών TP-AGB (διαφεύγουν από το βαρυτικό πεδίο του αστεριού), με την μορφή αργού, πυκνού αστρικού ανέμου. Στην πράξη έχει παρατηρηθεί και η ανάπτυξη επεισοδίων ανέμου μεγαλύτερης ταχύτητας σε αστέρια αυτής της φάσης εξέλιξης. Η απώλεια υπολογίζεται σε 1/100.000- 1/10.000 της ηλιακής μάζας το έτος. Αναπτύσσονται κόκκοι σκόνης σε αυτή την ύλη. Μόλις ένα αστέρι χάσει όλο το εξωτερικό του κέλυφος, σχεδόν αποκαλύπτεται ο καυτός πυρήνας του. Το αστέρι εγκαταλείπει τον ασυμπτωτικό κλάδο (post-AGB phase). Ο ρυθμός απώλειας μάζας ελαττώνεται σημαντικά, και ο αστρικός άνεμος είναι πια αραιός και ταχύτερος. Η αλληλεπίδραση (κρουστικό μέτωπο) αυτού του ανέμου με την ύλη που διέφυγε του αστέρα στην προηγούμενη φάση δημιουργεί το πλανητικό νεφέλωμα. Ο αστρικός πυρήνας εξελίσσεται σε λευκό νάνο, που ιονίζει το πλανητικό νεφέλωμα (το Υδρογόνο ιονίζεται στους 30000K και το Ήλιο στους 60000K).

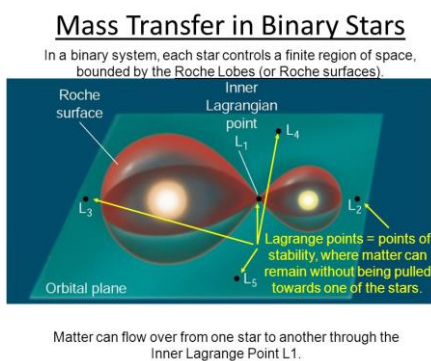
Η σύσταση της αστρικής επιφάνειας σε ένα εξελιγμένο αστέρι εξαρτάται από την μάζα του, λόγω ανάδυσης ύλης από το αστρικό εσωτερικό. Έτσι η χημική σύσταση των πλανητικών νεφελωμάτων μας δίνει πληροφορίες για τα κεντρικά αστέρια τους. Τα πλανητικά με αναλογίες των χημικών στοιχείων ($C/O < 1$, $N/O > 0,5$, $He/H > 0,125$) ονομάζονται πλανητικά τύπου I, και προέρχονται από σχετικά μεγάλης μάζας αστέρια.

2. Η φάση του κοινού κελύφους

Τα αστέρια μικρής και μεσαίας μάζας με συνοδό (διπλά αστέρια) μπορούν να δέχονται μεγάλη επίδραση στην εξέλιξή τους από την μεταξύ τους αλληλεπίδραση. Η πιο χαρακτηριστική περίπτωση είναι η ανάπτυξη κοινού κελύφους (common envelope). Το 80% των γνωστών μας πλανητικών νεφελωμάτων παρεκκλίνουν σημαντικά από το σφαιρικό σχήμα, μια ένδειξη αλληλεπίδρασης διπλών αστεριών. Ακόμα και οι άνεμοι των αστεριών στον ασυμπτωτικό κλάδο παρουσιάζουν πολλές φορές πολύπλοκες δομές.

Τα διπλά αστέρια αλληλεπιδρούν ανάλογα το στάδιο αστρικής εξέλιξης και την μεταξύ τους απόσταση. Η μεταφορά ύλης ανάμεσα στα αστέρια μπορεί να γίνει μέσω αστρικού ανέμου, ή το ένα αστέρι να διασταλεί τόσο ώστε να χάσει την βαρυτική του συνοχή. Τα αστέρια μικρής και μεσαίας μάζας στον κλάδο των γιγάντων ή στον ασυμπτωτικό κλάδο αναπτύσσουν ισχυρούς ανέμους, και μπορούν να μεταφέρουν ύλη στον συνοδό, όπως συμβαίνει στα συμβιωτικά αστέρια.

Ένας άλλος τρόπος μεταφοράς μάζας έχει να κάνει με την παραμόρφωση του σχήματος του αστεριού από την επίδραση των βαρυτικών δυνάμεων και της περιστροφής γύρω από το κοινό κέντρο μάζας ενός διπλού αστρικού συστήματος. Τα 2 αστέρια παρουσιάζουν περιστροφή σε κυκλικές τροχιές με αποτέλεσμα το ένα να γεμίζει τον λοβό Roche, το μεγαλύτερο χωρικό όριο όπου το αστέρι διατηρεί την βαρυτική του συνοχή. Σε αυτό το μοντέλο υπάρχουν διάφορα σημεία βαρυτικής εξισορρόπησης (Lagrangian points). Από αυτό ανάμεσα στα 2 αστέρια (L_1) μεταφέρεται η ύλη από τον δότη στον δέκτη αστέρα. Αυτή η φάση ονομάζεται υπερχείλιση του λοβού (Roche-lobe overflow, RLOF). Το μέγεθος του λοβού ενός αστεριού εξαρτάται από την μάζα του.



Αν το αστέρι δότης αναπτύσσει άνεμο σημαντικής μάζας και μικρότερης ταχύτητας από την ταχύτητα περιφοράς του γύρω από το κοινό κέντρο μάζας, αυτός ο άνεμος θα γεμίσει τον λοβό και θα μεταφέρει ύλη στον δέκτη, κάτι που συμβαίνει σε δότες αστέρια του ασυμπτωτικού κλάδου. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται υπερχείλιση του λοβού μέσω αστρικού ανέμου (wind Roche-lobe overflow, WRLOF).

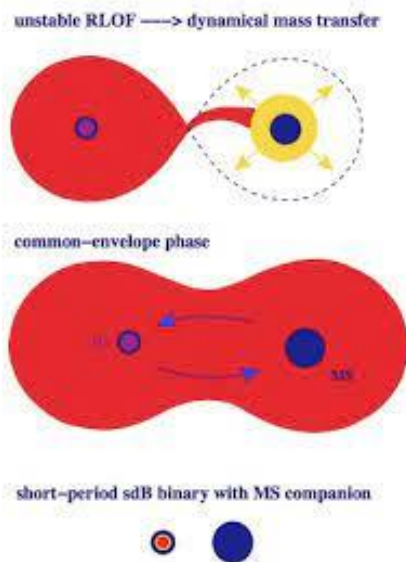
Όταν τα 2 αστέρια δεν καταλαμβάνουν τους λοβούς τους το σύστημα ονομάζεται ανέπαφο (detached). Η μεταφορά ύλης μπορεί να γίνει μόνο μέσω αστρικού ανέμου. Αν το ένα αστέρι (το μεγαλύτερης μάζας, που εξελίσσεται πιο γρήγορα σε γίγαντα) γεμίσει τον λοβό το σύστημα ονομάζεται ημι-ανέπαφο (semi-detached). Όταν και τα 2 αστέρια γεμίσουν τους λοβούς τους, οι επιφάνειές τους έρχονται σε επαφή (contact). Η απόσταση μεταξύ των 2 αστεριών (περίοδος

περιφοράς γύρω από το κοινό κέντρο μάζας) καθορίζει αν και σε ποια φάση της αστρικής εξέλιξης θα γεμίσουν τους λοβούς τους. Όταν ο δέκτης γεμίσει τον λοβό του στην κύρια ακολουθία έχουμε την περίπτωση A RLOF, στον κλάδο των ερυθρών γιγάντων την B RLOF και στον ασυμπωματικό κλάδο την C RLOF. Η πρώτη περίπτωση είναι αυτή με την μικρότερη απόσταση ανάμεσα στα 2 αστέρια και η τελευταία αυτή με την μεγαλύτερη.

Η ακτίνα των αστεριών μικρής μάζας στη φάση του ερυθρού γίγαντα μπορεί να είναι εκατοντάδες φορές μεγαλύτερη από αυτή στην κύρια ακολουθία. Το μέγεθος της ακτίνας και η απόσταση του συνοδού καθορίζει αν θα γεμίσει ένα εξελιγμένο αστέρι τον λοβό του. Έτσι παρατηρούμε συνήθως τα αστέρια σχετικά μικρής μάζας να γεμίζουν τον λοβό στον κλάδο των ερυθρών γιγάντων, ενώ τα μεγαλύτερης μάζας στον ασυμπωματικό κλάδο.

2.α Πως δημιουργείται το κοινό κέλυφος

Παρατηρούμε ότι κατά την μεταφορά ύλης ο ερυθρός γίγαντας δεν περιστρέφεται σύγχρονα με τον (δέκτη) συνοδό του. Δημιουργείται ένα κοινό κέλυφος ύλης (common envelope) γύρω από τα 2 αστέρια. Η μη σύγχρονη περιστροφή δημιουργεί ισχυρές βαρυτικές ροπές που αναγκάζουν τον συνοδό να ακολουθεί σπειροειδή τροχιά προς τον ερυθρό γίγαντα, με απότομη ελάττωση του χρόνου περιφοράς του γύρω από το κοινό κέντρο μάζας τους. Τα 2 αστέρια δεν θα συγχωνευτούν, αλλά θα εξελιχτούν σε σύστημα μικρής περιόδου περιφοράς, αν η ενέργεια που μεταφέρεται προς το κέλυφος αρκεί ώστε να το διαλύσει. Το σύστημα V471 Tau, που αποτελείται από έναν λευκό νάνο με μάζα 0,8 ηλιακές και ένα αστέρι κυρίας ακολουθίας τύπου K με μάζα 0,9 ηλιακές είχε αρχικό χρόνο περιφοράς 10 έτη που τώρα έχει μειωθεί σε μόλις 12,5 ώρες. Με την φάση του κοινού κελύφους εξηγούνται διπλά συστήματα όπως οι διπλοί ακτινών X, οι κατακλυσμικοί μεταβλητοί αστέρες με περίοδο περιφοράς μόλις μερικές ώρες και οι διπλοί με λευκό νάνο που θα εξελιχτούν με έκρηξη SN Ia. Μόνο με αυτό το μοντέλο μπορούμε να εξηγήσουμε την ύπαρξη διπλών αστεριών με λευκό νάνο, με περίοδο περιφοράς μόλις λίγες ημέρες.



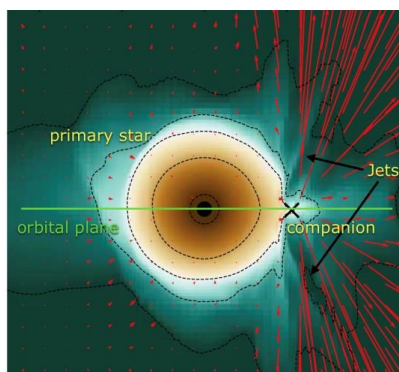
Η μεταφορά ύλης συμβαίνει κυρίως στο επίπεδο της τροχιάς περιφοράς των 2 αστεριών, με αποτέλεσμα η ύλη γύρω από τα 2 αστέρια να παίρνει την μορφή κυλίνδρου και να παρατηρούμε διπολικά σχήματα στα πλανητικά νεφελώματα. Η συνοχή του κοινού κελύφους αποτελεί καθοριστικό μέγεθος για την εξέλιξή του, αφού η μικρή διάρκεια ζωής του κοινού κελύφους είναι πολύ πιο σύντομη από το θερμικό του χρονοδιάγραμμα (ψύξη).

Στα συστήματα με 2 λευκούς νάνους (double degenerate systems, DD) συνέβησαν 2

επεισόδια μεταφοράς ύλης. Στο πρώτο (όταν εξελίχτηκε το μεγαλύτερης μάζας αστέρι) δεν δημιουργήθηκε κοινό κέλυφος ή δημιουργήθηκε αλλά δεν επέδρασε σημαντικά στο σύστημα. Πρέπει να διατηρήθηκε μια σημαντική απόσταση (περίοδο) ανάμεσα στα 2 αστέρια, ώστε να μπορέσει το μικρότερης μάζας αστέρι να εξελιχτεί σε ερυθρό γίγαντα. Στην δεύτερη μεταφορά ύλης (από τον μικρότερης μάζας γίγαντα στον λευκό νάνο που δημιουργήθηκε από το μεγαλύτερης μάζας αστέρι του συστήματος) μπορεί να δημιουργήθηκε κοινό κέλυφος. Από την άλλη, παρατηρούμε συμβιωτικά αστέρια (ερυθρούς γίγαντες με συνοδό λευκό νάνο) με περιόδους περιφοράς εκατοντάδες ή και χιλιάδες ημέρες, που μας δείχνουν ότι η ομαλή μεταφορά ύλης (χωρίς την δημιουργία κοινού κελύφους) δεν είναι ασυνήθιστη. Αυτό μπορεί να οφείλεται στην μικρή αρχική διαφορά μάζας των 2 αστεριών σε αυτές τις περιπτώσεις.

2.β Η αργή ενίσχυση στην ανάπτυξη κελύφους (Grazing envelope, GEE)

Μία εναλλακτική προσέγγιση εξέλιξης του κοινού κελύφους είναι η αργή ενίσχυση. Αυτός ο μηχανισμός προβλέπει ότι οι πίδακες από το συνοδό αστέρι, που αναπτύσσονται κλασικά όταν ένα σώμα συσσωρεύει ύλη, όπως για παράδειγμα ένας πρωτοαστέρας, συμβάλλουν σημαντικά στην ανάπτυξη κοινού κελύφους. Σε κάποια κεντρικά αστέρια πλανητικών νεφελωμάτων παρατηρούμε πίδακες, όπως στο NGC 2346, με περίοδο περιφοράς 16 ημερών. Η μεγάλη διαφορά αυτής της προσέγγισης είναι ότι αυξάνει την διάρκεια ζωής του κοινού κελύφους (στην τελική του μορφή) από μήνες σε δεκάδες έως εκατοντάδες έτη.



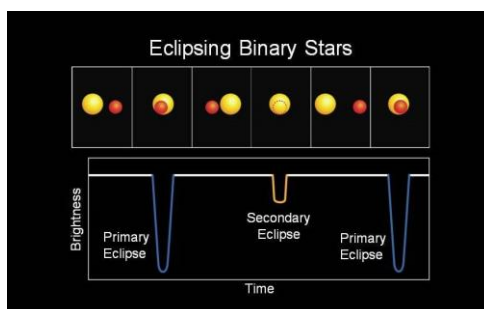
2.γ Εναλλακτικά σενάρια ανάπτυξης πολύπλοκων δομών στα πλανητικά νεφελώματα

Η ανάπτυξη ισχυρών μαγνητικών πεδίων (διπολικότητα) στον ασυμπτωτικό κλάδο δεν φαίνεται να είναι εφικτή, αλλά ούτε η αστρική περιστροφή δεν επαρκεί για την μεταφορά στροφορμής σε τέτοιο βαθμό, ώστε να αναπτυχθούν πλανητικά νεφελώματα με πολύπλοκες δομές από <μονά> αστέρια. Τα αστέρια με πλανήτες ή καφέ νάνους μπορεί να αναπτύξουν ελλειπτικά πλανητικά νεφελώματα, αλλά όχι πιο πολύπλοκες δομές. Φαίνεται η παρουσία συνοδού αστέρα να αποτελεί την μοναδική εξήγηση για τα πλανητικά νεφελώματα με πολύπλοκη δομή.

3. Διπλοί στενής τροχιάς σε πλανητικά νεφελώματα- οι ενδείξεις ύπαρξης συνοδού

Σε μερικά πλανητικά νεφελώματα υπάρχουν αστέρια που δεν είναι λευκοί νάνοι (εμφανίζονται κόκκινα ή πολύ λαμπρά), άρα δεν θα μπορούσαν να ιονίσουν το νεφέλωμα. Αυτά τα αστέρια αποτελούν τους συνοδούς σε πλανητικά νεφελώματα με διπλά αστρικά συστήματα. Τα περισσότερα από αυτά τα πλανητικά παρουσιάζουν διπολική μορφολογία, και μερικά παρουσιάζουν μεταβλητότητα στην λαμπρότητά τους. Η πιο χαρακτηριστική

μεταβλητότητα λαμπρότητας συμβαίνει όταν το ένα αστέρι περάσει μπροστά από το άλλο στην γραμμή θέας μας, ελαττώνοντας περιοδικά την λαμπρότητά του. Εκτός από την ευθυγράμμιση του επιπέδου των τροχιών των 2 αστέρων με τον παρατηρητή σημαντικά για να παρατηρηθεί το φαινόμενο της έκλειψης είναι οι ακτίνες των αστεριών και η μεταξύ τους απόσταση (των τροχιών τους γύρω από το κοινό κέντρο μάζας).

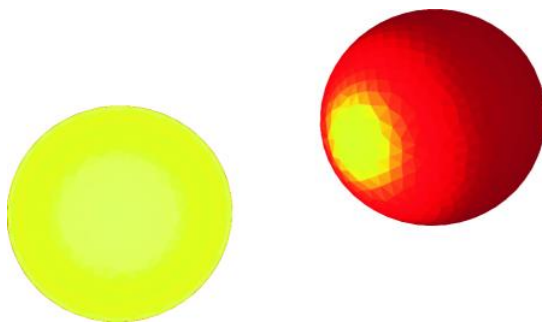


3.α Ελλειπτικά σχήματα αστεριών

Τα διπλά αστέρια σε στενά συστήματα παρουσιάζουν απόκλιση από το σφαιρικό σχήμα. Τα ημι-ανέπαφα και επαφής διπλά αστέρια παρουσιάζουν έντονα ελλειπτικά σχήματα. Αυτοί οι μεταβλητοί διπλοί αστέρες ονομάζονται ελλειψοειδείς μεταβλητοί (ellipsoidal variables). Παρουσιάζουν ιδιαίτερη καμπύλη φωτός με 2 ελάχιστα ανά περίοδο (ένα σε κάθε σύνοδο) με διαφορετικό βάθος. Αυτό το φαινόμενο συμβαίνει μόνο σε συστήματα όπου τουλάχιστον το ένα αστέρι να έχει πληρώσει τον λοβό του, άρα το σύστημα να έχει στενή τροχιά και να έχει εξελιχτεί μετά την φάση του κοινού κελύφους (post- CE).

3.β Η επίδραση της ακτινοβολίας του συνοδού (Irradiation)

Ένα φαινόμενο που ενισχύει την μεταβλητότητα σε στενούς διπλούς είναι η επίδραση της ακτινοβολίας του συνοδού. Το ημισφαίριο ενός αστεριού που βρίσκεται απέναντι από τον συνοδό αστέρα δέχεται ακτινοβολία από τον συνοδό (όπως συμβαίνει σε έναν πλανήτη κατά την ημέρα). Αυτά τα ημισφαίρια <με ημέρα> εμφανίζονται πιο λαμπρά από τα ημισφαίρια <με νύχτα>. Η προβολή αυτού του φαινομένου έχει ως αποτέλεσμα την περιοδική μεταβολή της λαμπρότητας. Παρατηρείται μόνο όταν η περιοχή <νύχτας> προβάλλεται προς τον παρατηρητή, άρα σε μικρή φάση της συνολικής τους τροχιάς γύρω από το κοινό κέντρο μάζας.



3.γ Φασματοσκοπία

Η φασματοσκοπία αποτελεί μια εναλλακτική μέθοδο παρατήρησης διπλών αστεριών στα πλανητικά νεφελώματα και εφαρμόζεται και σε συστήματα μεγαλύτερης περιόδου. Σε όλα τα πλανητικά νεφελώματα υπάρχει ένας λευκός νάνος, που ιονίζει το νεφέλωμα. Αυτός έχει επιφανειακή θερμοκρασία μερικές δεκάδες χιλιάδες βαθμούς. Έτσι η ανίχνευση φασματικών γραμμών που να αντιστοιχούν σε ψυχρότερο αστέρι μας δείχνουν τον συνοδό του. Συνήθως οι συνοδοί παρουσιάζουν μία υπέρβαση στο υπέρυθρο (infrared excess). Δεν μπορούμε όμως να

πάρουμε πληροφορίες για την τροχιά ενός αστέρα συνοδού με αυτή την μέθοδο.

3.8 Τι γνωρίζουμε από παρατηρήσεις στενών διπλών σε πλανητικά νεφελώματα

Στα περισσότερα από αυτά τα συστήματα γνωρίζουμε μόνο τις περιόδους των τροχιών των αστεριών, που κυμαίνονται από μερικές ώρες ως μερικές ημέρες. Η θεωρία προβλέπει πολλά διπλά συστήματα να περνούν την φάση του κοινού κελύφους στον κλάδο των ερυθρών γιγάντων. Ακόμα και με μάζα 0,3 ηλιακές φαίνεται ένας λευκός νάνος να μπορεί να σχηματίσει γύρω του πλανητικό νεφέλωμα. Σε όλα τα συστήματα που έχουμε ανακαλύψει το δευτερεύον αστέρι έχει μικρή μάζα (τύπου K, M). Φαίνεται τα συστήματα με δευτερεύον αστέρι με μεγαλύτερη μάζα να μην περνάνε την φάση του κοινού κελύφους. Μάλιστα εκτιμάμε ότι σε όλα τα συστήματα το πρωτεύον αστέρι είχε τουλάχιστον 5 φορές περισσότερη μάζα από τον συνοδό πριν την φάση του κοινού κελύφους. Έχουμε ανακαλύψει μερικές δεκάδες τέτοια συστήματα με 2 λευκός νάνους (DD) σε πλανητικά νεφελώματα. Όμως ο πραγματικός αριθμός τους πρέπει να είναι μεγαλύτερος.

Ένα μεγάλο ποσοστό των πλανητικών νεφελωμάτων παρουσιάζει κανονική διπολική μορφολογία. Παρατηρούμε ότι ο άξονας ενός πλανητικού νεφελώματος είναι κάθετος στο επίπεδο των τροχιών των 2 αστεριών, μια ισχυρή απόδειξη της επίδρασης του διπλού αστρικού συστήματος στην μορφολογία του πλανητικού νεφελώματος. Στα πλανητικά νεφελώματα με διπλούς στενής τροχιάς παρατηρείται χημικός εμπλουτισμός που οφείλεται σε ψυχρότερο και μεγαλύτερης μεταλλικότητας υλικό, που εμπλούτισε το νεφέλωμα σε δεύτερη φάση. Επίσης σε έναν σημαντικό πληθυσμό πλανητικών νεφελωμάτων αναπτύσσονται πίδακες, που οφείλονται στην μεταφορά ύλης ανάμεσα στα 2 αστέρια.



Abell 30, ένα πλανητικό νεφέλωμα αναγέννησης (born again PN).

Έχουμε ανακαλύψει σχετικά λίγα πλανητικά νεφελώματα με διπλά αστέρια (περίπου 60), κάτι που οφείλεται και στον χρόνο παρατήρησης που απαιτείται, αλλά και στον αυξημένο θόρυβο ενός πλανητικού νεφελώματος. Σε μία μελέτη σε σφαιρωτά σμήνη, με μάζα εκτροπής από την κύρια ακολουθία 0,8 ηλιακές, βρέθηκαν πλανητικά νεφελώματα που αναλογούν σε μεγαλύτερες αστρικές μάζες. Φαίνεται ο μηχανισμός του κοινού κελύφους να επιτάχυνε την αστρική εξέλιξη στον ασυμπτωτικό κλάδο.

4. Μεταφορά ύλης και χημική σύσταση των πλανητικών νεφελωμάτων

Τα περισσότερα αστέρια είναι μικρής και μεσαίας μάζας. Έτσι η ύλη που απελευθερώνεται στον ασυμπτωτικό κλάδο, και γενικά μέσω των πλανητικών νεφελωμάτων, είναι ιδιαίτερα σημαντική για τον χημικό εμπλουτισμό της μεσοαστρικής ύλης. Τα χημικά στοιχεία (He), (C), (N) και τα στοιχεία s-process της μεσοαστρικής ύλης προέρχονται βασικά από τα πλανητικά νεφελώματα. Έτσι τα τελευταία είναι σημαντικά για την δημιουργία εμπλουτισμένων αστεριών και πλανητών, αλλά και για την γαλαξιακή εξέλιξη.

Στα στενά διπλά αστέρια δεν υπάρχει ένδειξη ότι η μεταφορά ύλης συνεχίζεται και στην φάση του πλανητικού νεφελώματος. Οι πιο σημαντικές ενδείξεις μεταφοράς ύλης είναι οι πίδακες, που όμως προέρχονται από προηγούμενες φάσεις της εξέλιξης ενός συστήματος, όπως η φάση που ο δότης ήταν στον ασυμπτωτικό κλάδο ή κατά την φάση του κοινού κελύφους. Το Fleming 1 παρουσιάζει διπολικούς πίδακες μήκους 2,8 pc και κόμβους ύλης. Οι πιο εξωτερικοί κόμβοι εκτινάχτηκαν από το αστρικό σύστημα πριν από 16.000 έτη και οι πιο εσωτερικοί πριν από 6.000 έτη. Η εσωτερική περιοχή του πλανητικού νεφελώματος έχει ηλικία 5.000 έτη. Αυτό δείχνει ότι οι πίδακες προέρχονται από έναν δίσκο που υπήρχε πριν την δημιουργία του πλανητικού νεφελώματος. Η περίοδος περιφοράς του συστήματος είναι 1,2 ημέρες.



To Fleming 1

5. Διπλά αστέρια μακράς περιόδου σε πλανητικά νεφελώματα

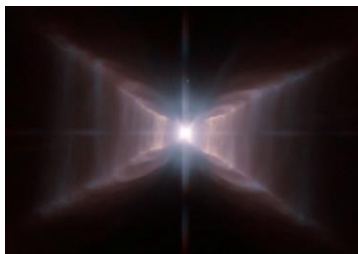
Υπάρχει η εκτίμηση ότι ένα διπλό αστρικό σύστημα με περίοδο περιφοράς γύρω από το κοινό κέντρο μάζας μεγαλύτερη από 1000 ημέρες δεν θα αποκτήσει κοινό κέλυφος. Έτσι δεν θα μειωθούν δραματικά οι τροχιές των 2 αστεριών σε περίοδο μόλις λίγων ημερών. Τα περισσότερα αστέρια τύπου F, G βρίσκονται σε διπλά συστήματα. Γενικά, στα διπλά αστρικά συστήματα μακράς περιόδου η μεταφορά ύλης ανάμεσα στα 2 αστέρια συμβαίνει με τους αστρικούς ανέμους (δεν μπορεί να γεμίσει ο λοβός Roche). Όμως και αυτή η διαδικασία μπορεί να επηρεάσει το σχήμα του πλανητικού νεφελώματος.

Από την διασπορά των περιόδων στους διπλούς με αστέρια 1 ηλιακής μάζας προκύπτει ότι το 24% μπορεί να αποκτήσει κοινό κέλυφος. Αν λάβουμε υπόψη το όριο των 1000 ημερών περιόδου, αυτό το ποσοστό μειώνεται στο 10%. Τα αστέρια μετά τον ασυμπτωτικό κλάδο (post-AGB stars) δεν έχουν ακόμη αρκετά μεγάλη επιφανειακή θερμοκρασία (δεν έχει αποκαλυφτεί ο πυρήνας τους) ώστε να ιονίσουν την ύλη γύρω τους. Η απώλεια μάζας μέσω πλήρωσης του λοβού ή μέσω αστρικού ανέμου έχει ως συνέπεια να εγκαταλείψουν πρόωρα τον ασυμπτωτικό κλάδο και να μείνουν με ένα λεπτό στρώμα ύλης γύρω από τον πυρήνα. Στο υπέρυθρο εντοπίζουμε έναν διπολικό δίσκο σκόνης γύρω από αυτά τα αστέρια. Τα αστέρια (πάντα μικρής και μεσαίας μάζας) με τροχιές γύρω από το κοινό κέντρο μάζας από 300- 3000 ημέρες, και με μάζες των συνοδών τους από 0,5 ως 1 ηλιακή, θα εξελιχθούν σε λευκούς νάνους, αλλά δεν έχουν αρκετό υλικό γύρω τους (στον δίσκο που αναπτύσσεται) ώστε να διαμορφώσουν πλανητικά νεφελώματα. Τέτοια περίπτωση είναι τα αστέρια Βαρίου (Barium stars). Πρόκειται για γίγαντες τύπου K, G που εμφανίζουν ενισχυμένο Άνθρακα και στοιχεία αργής απορρόφησης νετρονίων στο φάσμα. Φαίνεται να έχουν συνοδό λευκό νάνο και να εμπλουτίστηκαν από την μεταφορά μάζας όταν αυτός ήταν στον ασυμπτωτικό κλάδο. Έχουν τροχιές 200- 10000 ημέρες και αναλογία μαζών πάνω από 1,5 (το πρωτεύον αστέρι έχει 1,5 φορές περισσότερη μάζα από το αστέρι Βαρίου). Δεν σχηματίζουν πλανητικά νεφελώματα.

6. Αστέρια μετά τον ασυμπτωτικό κλάδο (Post-AGB) και προ-πλανητικά νεφελώματα (Pre-planetary

nebulae, PPN)

Σε μια σύντομη φάση εξέλιξης το αστέρι έχει εγκαταλείψει τον ασυμπτωτικό κλάδο αλλά ακόμα δεν έχει σχηματιστεί το πλανητικό νεφέλωμα. Η ύλη γύρω από το αστέρι δεν έχει ιονιστεί ακόμα, αλλά μόνο σκεδάζει (αντανακλάει) το φως από το κεντρικό αστέρι. Αυτή η φάση παρατηρείται σε κεντρικά αστέρια τύπου υπεργίγαντα F, G, που εξελίσσονται με σταθερή λαμπρότητα και αυξανόμενη επιφανειακή θερμοκρασία, δημιουργώντας την φάση του προ πλανητικού νεφελώματος. Αυτή διαρκεί μόλις 1000 έτη, άρα είναι πολύ σπάνιο να παρατηρηθεί.



To Red Rectangle

Τα προ-πλανητικά νεφελώματα παρουσιάζουν εντυπωσιακά σχήματα με διπολικές κυρίως μορφολογίες, χωρίς σφαιρικότητα, και με μεγάλη αυτό- απορρόφηση (self- extinction, το φως εγκλωβίζεται μέσα στο αντικείμενο, με αποτέλεσμα να είναι πολύ αμυδρό). Φαίνεται να δημιουργούνται σε μόλις μερικές εκατοντάδες έτη, ενώ οι αστρικοί παλμοί στον ασυμπτωτικό κλάδο συμβαίνουν τυπικά για 10.000 έτη. Πολλά από τα διπλά συστήματα που αποτελούν την αιτία των περίπλοκων δομών των προ πλανητικών νεφελωμάτων είναι μακράς σχετικά περιόδου, με αποτέλεσμα να μην ανιχνεύονται άμεσα και τα 2 αστέρια. Υπολογίζουμε ότι μόλις το 20% των πλανητικών νεφελωμάτων να φιλοξενεί στενά διπλά συστήματα, άρα είναι φυσικό να παρατηρούμε πολλά προ πλανητικά νεφελώματα με διπλούς μακράς περιόδου.

Τα αστέρια μετά την φάση του κοινού κελύφους έχουν επιταχυμένη εξέλιξη, δεν βρίσκονται πια σε θερμική ισορροπία (thermal equilibrium) και έχουν μικρότερα στρώματα Υδρογόνου από τα μεμονωμένα αστέρια μετά τον ασυμπτωτικό κλάδο. Αυτό ελαττώνει την πιθανότητα να παρατηρήσουμε προ-πλανητικό νεφέλωμα με στενό διπλό αστρικό σύστημα, που να απέκτησε κοινό κέλυφος.



To Fleming 1 To νεφέλωμα Minkowski's butterfly

7. Τα διπλά αστέρια και η λαμπρότητα των πλανητικών νεφελωμάτων

Τα φάσματα των πλανητικών νεφελωμάτων ξεχωρίζουν από τις λαμπρές γραμμές εκπομπής Υδρογόνου, Ηλίου και άλλων χημικών στοιχείων. Οι <απαγορευμένες> γραμμές του Οξυγόνου παρουσιάζονται πολύ ισχυρές (OIII λ5007). Τα πλανητικά νεφελώματα ανιχνεύονται σε μεγάλες αποστάσεις. Στον γαλαξία της Ανδρομέδας ανιχνεύτηκαν 4289 πλανητικά νεφελώματα! Η ανίχνευση πλανητικών νεφελωμάτων μας βοηθάει στην εκτίμηση του

πληθυσμού αστεριών μικρής και μεσαίας μάζας. Από τις παρατηρήσεις σε πολλούς γαλαξίες φαίνεται να υπάρχει ένα μέγιστο στην λαμπρότητα της γραμμής (OIII λ5007). Η λαμπρότητα των πλανητικών νεφελωμάτων εξαρτάται από την μάζα τους, άρα η συνιστώσα λαμπρότητας μας δείχνει την διασπορά αστρικής μάζας σε ένα σύνολο (σμήνος ή γαλαξία). Το ελάχιστο της συνιστώσας κυμαίνεται από γαλαξία σε γαλαξία, αλλά το μέγιστο είναι αμετάβλητο.

Η μέγιστη λαμπρότητα των πλανητικών νεφελωμάτων υπολογίζεται σε 600 ηλιακές λαμπρότητες, που αντιστοιχεί σε κεντρικά αστέρια (λευκούς νάνους) με 5.500 ηλιακές λαμπρότητες. Αυτό σημαίνει ότι οι λευκοί νάνοι έχουν μάζα τουλάχιστον 0,6 ηλιακές, άρα είχαν αρχική μάζα στην κύρια ακολουθία πάνω από 2 ηλιακές. Αυτά τα αστέρια δεν υπάρχουν πια σε παλαιούς αστρικούς πληθυσμούς, αλλά εμείς παρατηρούμε πλανητικά στο μέγιστο όριο λαμπρότητας σε ελλειπτικούς γαλαξίες. Θα έπρεπε αυτοί να έχουν αστρικό πληθυσμό ηλικίας κάτω από 1 δις έτη, κάτι αντίθετο με τα αποτελέσματα των παρατηρήσεων αυτών των γαλαξιών. Όμως η αλληλεπίδραση των διπλών αστεριών (μεταφορά μάζας) μπορεί να δημιουργήσει, σε δεύτερο χρόνο, μια γενιά αστεριών μεγαλύτερης μάζας στα πλανητικά νεφελώματα.

Η λαμπρότητα των πλανητικών νεφελωμάτων θα έπρεπε να εξελίσσεται με τον χρόνο. Με την πάροδο του χρόνου όλο και μικρότερης μάζας αστέρια εξελίσσονται σε έναν αστρικό πληθυσμό (τα μεγαλύτερης μάζας εκλείπουν), άρα και τα πλανητικά νεφελώματα που δημιουργούνται θα έπρεπε να είναι όλο και πιο αμυδρά. Μια δυσκολία στην χρησιμοποίηση των πλανητικών νεφελωμάτων ως κεριά λαμπρότητας είναι ότι τα περισσότερα έχουν ασύμμετρο σχήμα, περιέχουν πολύ σκόνη και παρουσιάζουν μεγάλη αυτό-απορρόφηση φωτός. Έτσι είναι δύσκολη η εκτίμηση της λαμπρότητάς τους.

Ο Ήλιος θα αναπτύξει θερμοκρασία ικανή ώστε να ionίσει την ύλη γύρω του 5000 έτη μετά το πέραςμά του από τον ασυμπτωτικό κλάδο. Το κέλυφος από την ύλη που θα έχει εκτινάξει θα έχει χάσει σε μεγάλο βαθμό την αδιαφάνειά του, με αποτέλεσμα το πλανητικό νεφέλωμα που θα δημιουργήσει να είναι αμυδρό. Φαίνεται να βρίσκεται στα όρια της κρίσιμης μάζας για την δημιουργία πλανητικού νεφελώματος από μεμονωμένο αστέρι.

Συμπεράσματα

Μεγάλο μέρος του πληθυσμού των πλανητικών νεφελωμάτων που παρατηρούμε στον Γαλαξία μας εξηγείται καλύτερα αν θεωρήσουμε ότι τα δημιουργούν οι διπλοί αστέρες. Η ανάπτυξη ορατού πλανητικού νεφελώματος εξαρτάται από το χρονοδιάγραμμα διαστολής της ύλης γύρω από το εξελιγμένο αστέρι, άρα την πυκνότητά της, και το χρονοδιάγραμμα (και ικανότητα) ionισμού της ύλης από το αστέρι, άρα την μάζα και λαμπρότητα του κεντρικού αστεριού. Πιστεύουμε ότι κάποια μεμονωμένα αστέρια μπορεί να πληρούν τις παραπάνω συνθήκες και να δημιουργήσουν πλανητικά νεφελώματα. Τα πολύπλοκα διπολικά σχήματα των πλανητικών νεφελωμάτων μάλλον δεν μπορούν να δημιουργούνται και από μεμονωμένα αστέρια με ασύμμετρη εκροή ύλης. Η φάση εξέλιξης μετά το κοινό κέλυφος περιλαμβάνει την δημιουργία πλανητικού νεφελώματος. Η ύλη που δημιουργεί το κοινό κέλυφος εκτινάσσεται στο επίπεδο της τροχιάς του συστήματος. Σε μερικά πλανητικά νεφελώματα παρατηρούμε προγενέστερους πίδακες, που δημιουργήθηκαν από μεταφορά ύλης πριν την φάση του κοινού κελύφους. Παρατηρούμε ότι για την δημιουργία κοινού κελύφους το πρωτεύον αστέρι πρέπει να είναι αρκετά μεγαλύτερης μάζας από το δευτερεύον. Κάποια από αυτά τα συστήματα αποτελούνται από 2 λευκούς νάνους. Τα πλανητικά νεφελώματα με διπλούς μακράς περιόδου μας δείχνουν ότι και αυτοί μπορούν να βιώσουν μεταφορά μεγάλης ποσότητας ύλης. Η πραγματική αναλογία των πλανητικών νεφελωμάτων με διπλά αστρικά συστήματα σε σχέση αυτών με μονά κεντρικά αστέρια δεν είναι γνωστή.



Πηγές

The importance of Binaries in the formation and evolution of planetary nebulae, Henri Boffin,

David Jones, Springer Verlag 2019

Roel Lefever, daily paper summaries, astrobites.org 2-2022

Kerrin Hensley, daily paper summaries, astrobites.org, 1-2017

Planetary nebulae seen with TESS, Aller, Lillo, Jones, Miranda, Forteza, 11-2019

Binary central stars of planetary nebulae identified with Kepler K2, Jacoby, Hillwig, Jones,

Martin, De Marco, Kronberger, Hurowitz, Crocker, Dey, Monthly notices of the Royal
astronomical Society, 10-2021

How much do binary stars shape planetary nebulae? John Voisey, Universe today

Stellar Structure and Evolution, Kippenhahn, Weigert, Weiss, Springer Verlag 2020

Ένα πιο αναλυτικό κείμενο φιλοξενεί η ιστοσελίδα μου www.astrotheory.gr