

Νεαρά αστέρια και πλανήτες κοντά στον Ήλιο μας.

Ο σχηματισμός αστεριών στην γαλαξιακή γειτονιά μας.

Τα δύο βασικά ερωτήματα σχετικά με τον σχηματισμό των αστεριών στην τοπική μας περιοχή στον Γαλαξία είναι 1) Ποια είναι η προέλευση της μάζας των αστεριών και 2) Ποιες είναι οι φυσικές διεργασίες που ελέγχουν τον ρυθμό με τον οποίο η αέρια μεσοαστρική ύλη (gaseous interstellar medium, ISM) μετατρέπεται, σε σημαντικό βαθμό, σε αστρική μάζα.

Οι θεμελιώδεις φυσικές ιδιότητες των άστρων που πρέπει να περιλαμβάνονται σε κάθε σεβαστή θεωρία αστρικής προέλευσης είναι η χημική σύσταση, η λαμπρότητα, η θερμοκρασία, το μέγεθος και η μάζα. Η χημική σύσταση υπολογίζεται με την γνωστή μας σύσταση της μεσοαστρικής ύλης (ISM) από την οποία προέρχονται τα αστέρια. Η θεωρία της αστρικής δομής και εξέλιξης μας δίνει την λαμπρότητα, την θερμοκρασία, το μέγεθος και την μάζα ενός αστεριού, όταν γνωρίζουμε την αρχική μάζα και χημική σύστασή του. Η αστρική μάζα είναι μια θεμελιώδης αστρική ιδιότητα για την οποία δεν έχουμε φυσική εξήγηση, και θα πρέπει να μας την δώσει το ιστορικό της αστρογέννησης. Οι ρυθμοί αστρογέννησης (star formation rates, SFR) κυμαίνονται ανάμεσα αλλά και μέσα στους γαλαξίες, και στα διαφορετικά τοπικά μοριακά νέφη.

Η προέλευση της αστρικής μάζας.

Η συνιστώσα αρχικής μάζας (stellar initial mass function, IMF).

Βάσει της θεωρίας της αστρικής δομής και εξέλιξης το ιστορικό ενός άστρου καθορίζεται μόνο από 2 παραμέτρους, την αρχική μάζα του και την χημική του σύσταση. Η διασπορά των αστρικών μαζών κατά την δημιουργία τους (πόσα αστέρια ποιας μάζας θα δημιουργηθούν) ή αλλιώς η IMF των άστρων έχει έτσι σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη των αστρικών συστημάτων. Λόγω απουσίας μιας γενικής θεωρίας, αυτή πρέπει να καθοριστεί εμπειρικά. Οι μελέτες του αστρικού πληθυσμού της γειτονιάς μας, από αστέρια O,B ως αστέρια στο όριο της σύντηξης (M), μας δίνουν την κορύφωση της IMF ανάμεσα σε 0,1 και 0,5 ηλιακές μάζες, με χαρακτηριστική αστρική μάζα 0,25 ηλιακές. Τα παραπάνω αποτελέσματα ταιριάζουν καλά με τις μετρήσεις στο τραπέζιο του Ωρίωνα, μια περιοχή αστρογέννησης, και στα αντίθετως γερασμένα και με προέλευση από διαφορετικές γαλαξιακές περιοχές αστέρια πεδίου της γειτονιάς μας. Έτσι πιστεύουμε ότι η IMF είναι καθολική για τον γαλαξιακό μας δίσκο στον χώρο, αλλά και στον χρόνο.

Μια άλλη αστρική ιδιότητα που πρέπει να λαμβάνεται υπ όψιν είναι η δημιουργία πολλαπλών αστεριών. Πολλά αστέρια του Γαλαξία μας ανήκουν σε διπλά και πολλαπλά συστήματα. Όμως για τα μικρά αστέρια (νάνοι τύπου M) που είναι στην κορυφή της IMF (αποτελούν το 75% των αστεριών) έχουμε μόλις 20 % διπλά, αντίθετα με το 80% στα O,B τεράστια αστέρια. Έτσι το τυπικό αστέρι που θα δημιουργηθεί είναι ένας μονός νάνος M.

Η συνιστώσα μάζας του πυκνού πυρήνα ύλης (dense core mass function, CMF).

Οι μελέτες της ψυχρής μεσοαστρικής ύλης στις υπέρυθρες και στα μικροκύματα μας δείχνουν ότι τα αστέρια σχηματίζονται σε πυκνούς μοριακούς σχηματισμούς, συμπυκνώματα και πυρήνες σε ψυχρά μοριακά νέφη. Οι φυσικές συνθήκες (μάζα, μέγεθος, θερμοκρασία, πυκνότητα, πίεση, κινηματική και σύσταση των πυκνών πυρήνων) μπορούν να ερμηνευτούν ως οι αρχικές συνθήκες για την θεωρία της αστρογέννησης.

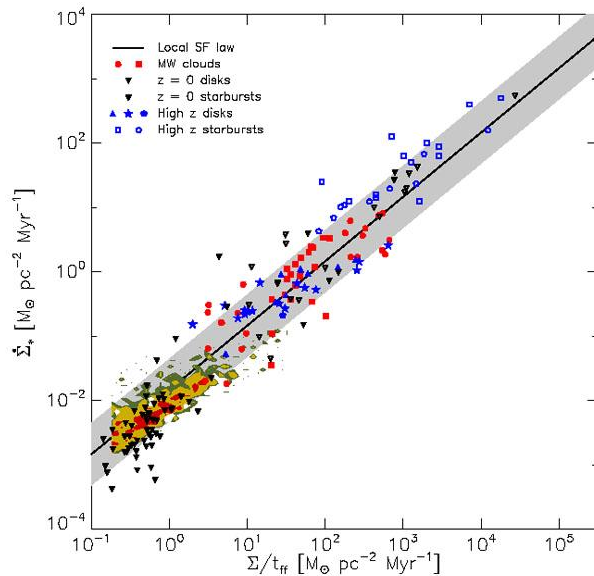
Έχουμε πλήθος πληροφοριών για τέτοιες περιοχές σε απόσταση 150 pc. Η CMF είναι εξίσου σημαντική με την IMF, μας δείχνει όμως κορύφωση σε μεγαλύτερες μάζες (1-2 ηλιακές), κάτι που σημαίνει ότι η IMF προκύπτει από την CMF με μια αποτελεσματικότητα της τάξεως του 25%-35% (το ποσοστό μετατροπής της ύλης ενός πυκνού πυρήνα σε αστέρια). Οι πυκνοί πυρήνες εμφανίζονται σαν άμεσοι προ γεννήτορες των αστεριών.

Βάσει των παραπάνω, το ερώτημα της προέλευσης της αστρικής μάζας και της IMF μετατρέπεται σε ερώτημα της προέλευσης της CMF και της μάζας των πυκνών πυρήνων. Η τελευταία συνδέεται με τον κατακερματισμό των μοριακών νεφών και την εξέλιξη των δομών των νεφών. Η χαρακτηριστική μάζα της CMF αντιπροσωπεύει την χαρακτηριστική κλίμακα μάζας του κατακερματισμού ενός νέφους. Αν οι πυρήνες στην κορύφωση της CMF έχουν μάζες συγκρίσιμες με το όριο Bonnor- Ebert (κρίσιμη μάζα για βαρυτική κατάρρευση), θα δημιουργηθούν μεμονωμένα αστέρια κοντά στην κορυφή της IMF (τύπου M για τον Γαλαξία μας), ενώ μεγαλύτερες μάζες θα δώσουν αστρικά σμήνη με ποικιλία αστρικών μαζών.

Ο ρυθμός αστρογέννησης (star formation rate, SFR)

Τα 2 μοριακά νέφη, το Pipe Nebula και το Ophiuchi cloud, βρίσκονται στην ίδια περίπου απόσταση (125 pc) στην ίδια γαλαξιακή περιοχή, και έχουν παρόμοια μάζα (10000 ηλιακές) και μέγεθος (15-20 pc). Όμως παρουσιάζουν εντελώς διαφορετικό ρυθμό αστρογέννησης.

Ο ρυθμός αστρογέννησης είναι μια πολύ σημαντική συνιστώσα για την μελέτη της εξέλιξης των γαλαξιών, μιας και μας παρουσιάζει τον ρυθμό κατανάλωσης του, διαθέσιμου προς σχηματισμού των αστεριών, αερίου. Τα παραπάνω νεφελώματα μας δείχνουν την σημασία της πυκνότητας στήλης του αερίου. Έχουμε πάνω από 300 YSO (young stellar objects, νεαρά αστρικά αντικείμενα) στο νέφος του Οφιούχου, ενώ μόλις 21 στο νεφέλωμα της Πίπας. Η διαφορά του ρυθμού αστρογέννησης είναι 15πλάσια. Στην κοντινή μας περιοχή παρατηρούμε μεγάλες διακυμάνσεις της SFR ανεξάρτητα από την μάζα του νεφελώματος. Η SFR είναι άμεσα συνδεδεμένη με την ύλη υψηλής εξάλειψης (high extinction) φωτός, που δηλώνει μεγάλη πυκνότητα στήλης. Βρέθηκε ότι στα σκοτεινά νέφη το 90% των πρωταστέρων καλύπτονται από ύλη μεγάλης αδιαφάνειας (opacity). Η γραμμική σχέση ανάμεσα στην πυκνή αέρια ύλη και την SFR απεικονίζεται στις παρατηρήσεις στο μακρινό υπέρυθρο (FIR).



Η σχέση αυτή μας δείχνει ότι η SFR εξαρτάται από την ποσότητα πυκνού αερίου στις περιοχές αστρογέννησης (κάτι που χαρακτηρίζει και τους γαλαξίες αστρογέννησης). Όπως αναφέραμε νωρίτερα, η εξέλιξη της εσωτερικής δομής του πυκνού αερίου καθορίζει την CMF και την αστρική IMF.

Συμπεράσματα και επισημάνσεις.

Παρουσιάσαμε 2 από τα πιο σημαντικά μεγέθη της σύγχρονης θεωρίας σχηματισμού αστεριών. Θα επεκταθούμε λίγο στις μικρές ομάδες αστεριών με παρόμοια κίνηση (moving groups).

Τα αστέρια σχηματίζονται (στα πυκνά νέφη) με αποτελεσματικότητα 30% στους πυκνούς πυρήνες (dense cores) και 10% στις υπόλοιπες περιοχές. Αφού μόνο το 1- 10% των τεράστιων μοριακών νεφελωμάτων (GMC) είναι σε μορφή πυκνών πυρήνων, η καθολική SFR των νεφελωμάτων αυτών είναι στο 1-2%. Έτσι σχηματίζονται ομάδες αστεριών που δεν είναι βαρυτικά δεμένες, αφού σχεδόν όλο το αέριο μένει ανεκμετάλλευτο στην αστρογέννηση. Η αρχική ταχύτητα των αστεριών ξεπερνάει την ταχύτητα διαφυγής του πολύ αραιού αστρικού σμήνους. Για να μην συμβεί αυτό, θα πρέπει να έχουμε SFR ίση με 50%! Τα αστρικά σμήνη με μεγάλη αστρική μάζα και συνοχή φτάνουν να έχουν SFR 20-30%. Αυτό σημαίνει ότι μόνο τα πολύ μεγάλης μάζας σμήνη επιβιώνουν για δεκαετομύρια έτη.

1) Οι κοντινές μας νεαρές κινούμενες ομάδες (YMG, Young moving groups).

TW Hya, ένα κλασικό αστέρι T Tauri χωρίς καθορισμένο τόπο σχηματισμού.

Η αναγνώριση και έρευνα των κοντινών YMG (χαλαρές συγκεντρώσεις αστεριών σε απόσταση μέχρι 100 pc και ηλικίας μέχρι 100 εκ. έτη) είχε ως κομβικό σημείο το παραπάνω αστέρι, που δεν φαίνεται να προέρχεται από κάποιο συγκεκριμένο σκοτεινό νεφέλωμα. Τα χαρακτηριστικά της αναγνώρισης των T-Tauri είναι η εξάλειψη του λιθίου και η υπέρβαση (πάνω από το αστικό φάσμα) στις μεσαίες υπέρυθρες (mid infrared excess), που προέρχεται

από την σκόνη γύρω τους. Αυτό σε συνδυασμό με την ανακάλυψη (CO) σημαίνει ότι ο σχηματισμός πλανητών ολοκληρώθηκε πρόσφατα σε αυτό το αστέρι. Το αστέρι αυτό σχηματίζει μια ομάδα με άλλα 5 μέλη. Η απόστασή τους είναι στα 50 pc και σχηματίζουν την TWA (TW Hyα Association), την πιο κοντινή μας περιοχή πρόσφατης αστρογέννησης, ηλικίας 8 εκ. ετών.

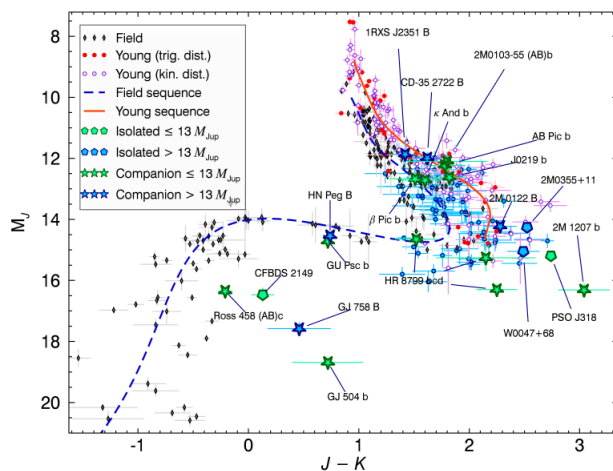
Τα οφέλη της μελέτης των κοντινών YMG.

Η κατανόηση της αρχικής αστρικής εξέλιξης.

Οι ομάδες αυτές αποτελούν πεδία δοκιμών αστροφυσικών θεωριών για τα αστέρια προ κ. ακολουθίας και τεχνικών εκτίμησης ηλικιών και αναγνώρισης αστρικών συναθροίσεων, με την χρήση ισόχρονων (καμπυλών στο H/R), κινηματικών ανιχνεύσεων και εξάλειψης λιθίου (το λίθιο καταστρέφεται στο εσωτερικό των αστεριών αν η θερμοκρασία ξεπεράσει τους 2,6 εκ. βαθμούς και ανιχνεύεται μόνο στα αρχικά στάδια της αστρικής εξέλιξης). Οι ισόχρονες και η εξάλειψη λιθίου κυριαρχούνε σαν μετρήσεις της κινηματικής ανίχνευσης.

Η έρευνα των πρωτοπλανητικών δίσκων.

Μπορούμε να ανιχνεύσουμε με μεγάλη ανάλυση (στα υποχιλιοστόμετρα) πλούσιους σε μόρια πρωτοπλανητικούς δίσκους σε κοντινά νεαρά αστέρια, όπως και δίσκους σκόνης και θραυσμάτων (debris). Αυτό μας βοηθάει στον εντοπισμό και στην κατανόηση της διαδικασίας δημιουργίας των πλανητών.



Αστέρια F,G,K (φασματικών τύπων) ως μέλη των SKG.

Οι αστρικές κινηματικές ομάδες (SKG, stellar kinematic groups), τα υπερσμήνη (SC, super cluster) και οι κινούμενες ομάδες (MG, moving groups) είναι ομάδες αστεριών με σχετική κινηματική που μπορεί να έχουν κοινή προέλευση. Οι νεαρότερες SKG είναι οι Hyades SC (600 Myr), U Major MG, Sirius SC, (300 Myr), Pleiades MG (20-150 Myr), IC 2391 SC (35-55 Myr), Castor MG (200 Myr). Ο διαχωρισμός των νεαρότερων αστεριών από τα παλαιότερα του πεδίου πετυχαίνεται με την ανίχνευση λιθίου και το επίπεδο χρωμοσφαιρικής και στεμματικής αστρικής δραστηριότητας. Η ανάλυση της χημικής σύστασης αποτελεί μια ισχυρή βοήθεια στην αναγνώριση των μελών των παραπάνω αστρικών ομάδων. Για 61 FGK μέλη των Υάδων SC βρήκαμε τα 28 να έχουν όμοια αφθονία των στοιχείων της μελέτης μας, κάτι συγκρίσιμο με την ισόχρονη της ομάδας. Το ίδιο ισχύει για 29 από τα 44 FGK αστέρια της MG της Μεγάλης Άρκτου, και για 19 FGK στην MG του Κάστορα.

Καινούργια μέλη μικρής μάζας στην ομάδα Sco-Cen OB Association.

Τα κοντινά αστέρια με ηλικία μέχρι 20 εκ. έτη αποτελούν ιδανικά πεδία έρευνας της τελικής φάσης σχηματισμού των αστεριών και πλανητών. Σε αυτήν την φάση ο πλούσιος σε αέριο πρωτοπλανητικός δίσκος, που τροφοδοτεί τον σχηματισμό των γιγάντιων αερίων πλανητών και την συσσώρευση ύλης στο αστέρι, εξαλείφεται και στην θέση του δημιουργείται ένας φτωχός σε αέριο, με πολύ σκόνη, δίσκος θραυσμάτων (debris disk). Η παραπάνω ομάδα αποτελεί την κοντινότερη περιοχή πρόσφατης δημιουργίας αστεριών μεγάλης μάζας και τον κυρίαρχο πληθυσμό αστεριών προ κυρίας ακολουθίας στην γειτονιά μας. Αποτελείται από 3 υποομάδες, Upper Sco (U Sco, 145pc), Upper Cen- Lupus (UCL, 140 pc), Lower Cen-Crux (LCC, 120pc). Οι ηλικίες τους είναι αντίστοιχα 10, 16 και 17 εκ. έτη. Η μελέτη μας επικεντρώθηκε σε 2 αστέρια M5 στο LCC και στο UCL. Σε αυτά τα αστέρια παρατηρούμε την ύπαρξη δίσκων αερίου, που θα έπρεπε να έχουν εξαλειφτεί στην ηλικία τους. Μάλλον τα αστέρια μικρής μάζας διατηρούνε τους δίσκους τους περισσότερο χρόνο.

Μοντέλα αστρικής εξέλιξης των νεαρών αστεριών, πρόοδος και όρια.

Τα μοντέλα αστρικής εξέλιξης είναι βασικά για την κατανόηση της εξάρτησης των αστροφυσικών φαινομένων από τον χρόνο. Η θεωρία μας προσφέρει τις ηλικίες των αστρικών συστημάτων, που είναι καθοριστικές για νεαρούς πληθυσμούς, όπου συμβαίνουν μια ποικιλία από διαδικασίες που μας οδηγούν άμεσα σε παρατηρήσιμες ιδιότητες των γηραιότερων αστεριών. Οι ηλικίες των μοντέλων των νεαρών συστημάτων μας παρουσιάζουν την εξέλιξη των πρωτοπλανητικών δίσκων, τα χρονοδιαγράμματα σχηματισμού μεγάλων αερίων πλανητών και της εξέλιξης της αστρικής στροφορμής (αύξηση περιόδου περιστροφής), αλλά και την εξέλιξη της αστρικής μαγνητικής δραστηριότητας στον χρόνο. Ακόμα, οι ηλικίες των νεαρών άστρων μας παρέχουν πληροφορίες σχετικά με τον σχηματισμό και την θερμική εξέλιξη των άστρων και των υπό-αστρικών αντικειμένων.

Διαγράμματα χρώματος- λαμπρότητας

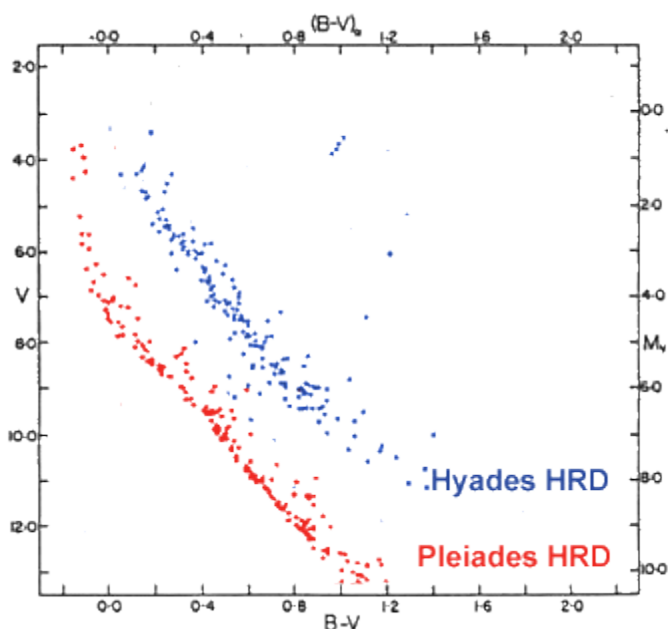
Τα διαγράμματα αυτά μας παρέχουν εκτεταμένες πληροφορίες για την αστρική εξέλιξη σε ένα εύρος θερμοκρασιών και λαμπρότητας. Χονδρικά τα χωρίζουμε σε 3 κατηγορίες, αστρικών πληθυσμών μέχρι 20 εκ. ετών, 20-100 εκ. ετών και γηραιότερους.

Για την πρώτη κατηγορία, υπάρχει μεγάλη διασπορά λαμπρότητας για σταθερό (ίδιο) χρώμα στα διαγράμματα, που δεν ανταποκρίνεται σε μεμονωμένα μοντέλα ισόχρονων. Μάλλον η μικρή διασπορά μερικών εκ. ετών κρύβει εντατικές διαδικασίες αστρικής εξέλιξης, ή κάτι λείπει στην φυσική που χρησιμοποιούμε στα μοντέλα μας. Μπορεί να οφείλεται και σε άλλους μηχανισμούς, όπως η έξαρση αστρικών κηλίδων ή επεισοδιακή συσσώρευση ύλης από το αστέρι.

Μετά τα 20 εκ. έτη, η παραπάνω διασπορά λαμπρότητας μειώνεται και οι ισόχρονες από τα μεμονωμένα μοντέλα προσφέρουν πιο ακριβή δεδομένα. Μπορεί σε αυτή την φάση απλά να μην έχει τόση σημασία η ηλικιακή διαφορά μερικών εκ. ετών των αστεριών, ή οι μηχανισμοί όπως οι παραπάνω να μην έχουν σημαντική επίδραση στην αστρική λαμπρότητα. Για παράδειγμα, δεν αναμένεται επίδραση επεισοδιακής συσσώρευσης μετά

τα 20 εκ. έτη αστρικής ηλικίας. Εναλλακτικά, μπορεί να είναι συνδυασμός και των 2 παραπάνω αιτιών. Στις ηλικίες κάτω από τα 100 εκ. έτη υπάρχει σημαντική ασυμφωνία ανάμεσα στις ηλικίες των νεαρών αστρικών πληθυσμών που υπολογίζουμε από τα μικρά, λιγότερο θερμά αστέρια, με αυτές που υπολογίζουμε από τα θερμότερα μέσης μάζας αστέρια που μπήκαν στην κ. ακολουθία (με τις ηλικίες που υπολογίζουμε να μικραίνουν όσο ελαττώνεται η αστρική μάζα). Έτσι κάτι λείπει από τα μοντέλα μας.

Για ηλικίες μεγαλύτερες από τα 100 εκ. έτη, τα περισσότερα αστέρια βρίσκονται στην κ. ακολουθία. Οι Πλειάδες αποτελούν αντιπροσωπευτικό σμήνος άστρων ηλικίας 100 εκ. ετών. Για πολύ καιρό μας δυσκόλευαν, επειδή οι ψυχρότεροι νάνοι K εμφανίζονταν σημαντικά πιο μπλε από ότι προέβλεπαν τα μοντέλα και οι εμπειρικές παρατηρήσεις. Τα τελευταία μοντέλα πέτυχαν μεγάλη ταύτιση με τις παρατηρήσεις στο κοντινό υπέρυθρο και την ισχυρή απορρόφηση του (TiO). Τα ατμοσφαιρικά μοντέλα των άστρων αναβαθμίστηκαν με την χρήση πρόσφατων μετρήσεων των αφθονιών των στοιχείων στον Ήλιο μας. Οι χαμηλότερες αφθονίες του (O) μειώνουν την απορρόφηση του μορίου του νερού στο κοντινό υπέρυθρο, κάτι που πλέον το υπολογίζουμε.



Θεμελιώδεις αστρικές ιδιότητες

Οι παρατηρήσεις αστεριών- προτύπων (touch stone stars) μας επιτρέπουν να ελέγχουμε την θεωρία της αστρικής εξέλιξης σε θεμελιώδες επίπεδο μέσω της παροχής άμεσης μέτρησης της αστρικής μάζας, της ακτίνας, της θερμοκρασίας και της λαμπρότητας. Τα δυναμικά συστήματα (διπλά αστέρια) μας παρέχουν ακριβείς μετρήσεις της αστρικής μάζας, η οποία καθορίζει την εξέλιξη του αστέρα. Είδαμε ότι τα μοντέλα για τα νεαρά άστρα συστηματικά μας δίνουν μάζες μικρότερες από τις σωστές για την ανάλογη θερμοκρασία και λαμπρότητα. Φαίνεται ακόμα να υπερτιμούμε τις μάζες των κυρίων αστεριών και να υποτιμούμε αυτές των συνοδών τους στα διπλά συστήματα. Τα μοντέλα έχουν καλύτερη ακρίβεια για μάζες πάνω από 1 ηλιακή (5% σφάλμα) παρά για μικρότερες (20% σφάλμα). Στα διπλά αστέρια όμως η εξέλιξη στα πρώτα εκ. έτη διαφέρει από ότι στα μονά (λόγω παλιρροϊκής θέρμανσης).

Πρόοδος και θεμελιώδεις περιορισμοί

Υπάρχουν 2 φαινόμενα που πρέπει να υπολογίζουμε στα μοντέλα αστρικής εξέλιξης.

Τα μαγνητικά πεδία

Μπορούν να αναχαιτίσουν ροές συναγωγής μεγάλης κλίμακας, μειώνοντας την συνολική εκπομπή ενέργειας σε ένα νεαρό αστέρι. Έτσι μπορεί να παγιδευτεί ενέργεια σε αυτό, καθυστερώντας την συστολή του (το αστέρι σε αυτήν την αρχική του φάση ισορροπεί ακόμα μέσω της απελευθέρωσης βαρυτικής ενέργειας κατά την συστολή του). Τα νεαρά αστέρια με ισχυρότερο μαγνητικό πεδίο είναι έτσι ψυχρότερα και μεγαλύτερα σε δεδομένη ηλικία από άλλα με λιγότερο μαγνητισμό, αλλά η ακτίνα στα νεαρά αστέρια δεν είναι τόσο καλά καθορισμένη όπως στα αστέρια κ. ακολουθίας. Απλά τα <μαγνητικά> νεαρά αστέρια βιώνουν μια πιο βαθμιδωτή συστολή.

Η ελάττωση της θερμοκρασίας σε νεαρά αστέρια λόγω μαγνητικών φαινομένων οδηγεί στην καθυστέρηση της εξάλειψης του Λιθίου (συμβαίνει όταν το αστέρι αναπτύσσει θερμοκρασία πάνω από 2,6 εκ. βαθμούς και σε διάστημα μόλις λίγων εκ. ετών). Υπολογίζουμε ότι ένα τέτοιο αστέρι θα φτάσει την απαραίτητη θερμοκρασία καύσης Λιθίου σε 2,5 εκ. έτη, άρα αρκετά καθυστερημένα.

Οι αστρικές κηλίδες

Μια εναλλακτική πηγή αναχαίτισης της αστρικής συναγωγής είναι οι φωτοσφαιρικές κηλίδες που φράζουν τον δρόμο στις εκροές ενέργειας, αλλάζοντας την δομή του αστεριού. Οι επίδρασή τους στο διάγραμμα είναι διακριτή. Μέσω της καθολικής συναγωγής στο αστέρι παρουσιάζεται μια τάση προς πιο κόκκινα χρώματα, λόγω χαμηλότερης θερμοκρασίας. Οι κηλίδες φέρνουν θερμοκρασιακές διαφοροποιήσεις στην αστρική επιφάνεια, και μεταθέτουν τα αστέρια είτε προς το μπλε είτε προς το κόκκινο. Αφού οι κηλίδες μπλοκάρουν την εκροή ενέργειας, μπορούν να επιβραδύνουν την συστολή του αστέρα όπως τα μαγνητικά πεδία. Η διασπορά στα διάγραμμα και στις αφθονίες Λιθίου μπορεί να οφείλεται στις κηλίδες.

Η επίδραση των κηλίδων στις εκτιμήσεις αστρικής μάζας και ηλικίας για αστέρια προ κ. ακολουθίας.

Στις τελευταίες δοκιμές των αστρικών μοντέλων σημειώθηκαν σημαντικές διαφορές ανάμεσα στις θεωρητικές προβλέψεις των ιδιοτήτων άστρων μικρής μάζας και των ανάλογων μετρήσεων μεγάλης ακρίβειας, όπως οι αναλύσεις διπλών αστέρων και οι συμβολομετρικές μετρήσεις. Μια τέτοια ασυμφωνία είναι το πρόβλημα της ακτίνας, με τα νεαρά μικρής μάζας αστέρια να παρουσιάζουν 5-10% μεγαλύτερη ακτίνα από την προβλεπόμενη βάσει της θεωρίας. Μια άλλη ασυμφωνία είναι στην παρατηρήσιμη ποσότητα λιθίου σε νεαρά σμήνη όπως οι Πλειάδες, που δείχνουν υπέρβαση της διασποράς της αφθονίας του λιθίου κατά μια τάξη μεγέθους σε σχέση με την θεωρία. Τα πιο πλούσια σε λίθιο αστέρια των Πλειάδων είναι αυτά με την ταχύτερη περιστροφή, το αντίθετο με την θεωρητική πρόβλεψη. Θα δείξουμε ότι αν ένας μηχανισμός αυξήσει την ακτίνα ταχέως περιστρεφόμενων αστεριών μικρής μάζας πριν μπουνε στην κ. ακολουθία, τότε ο ρυθμός καταστροφής του λιθίου θα υποβαθμιστεί, κάτι που εξηγεί το πρόβλημα της αυξημένης ακτίνας και αυτό της σχέσης περιστροφής- αφθονίας λιθίου.

Οι αστρικές κηλίδες

Οι αστρικές κηλίδες αποτελούν την ορατή έκφραση των συγκεντρώσεων μαγνητικών πεδίων κοντά στην επιφάνεια ενός αστεριού. Οι κηλίδες αναστέλλουν την μεταφορά ενέργειας μέσω συναγωγής, και μεταβάλλουν τις συνθήκες πίεσης στην φωτόσφαιρα, κάτι που μπορεί να επηρεάσει την καθολική δομή της. Οι κηλίδες ήταν για καιρό ύποπτες για επίδραση στην λαμπρότητα, θερμοκρασία και ακτίνα του αστεριού, αλλά μόνο σε λίγες περιπτώσεις εξετάστηκε η επίδρασή τους σε αστέρια προ κ. ακολουθίας.

Τα νεαρά και <ενεργά> αστέρια φέρουν συνήθως τις περισσότερες κηλίδες, και η μελέτη των κηλίδων θα μας προσφέρει την καλύτερη κατανόηση της αρχικής αστρικής εξέλιξης. Ενσωματώσαμε σε μοντέλα αστρικής εξέλιξης τις κηλίδες ώστε αυτά να εκθέσουν 2 σχετικές φυσικές διαδικασίες. 1) την αναδόμηση της ροής στο αστρικό εσωτερικό, μέσω της μεταβολής του βαθμού ακτινοβολίας και 2) την μεταβολή συνθηκών δέσμευσης στην επιφάνεια, μέσω υπολογισμού της πίεσης στις περιοχές χωρίς κηλίδες. Τα αστέρια που χρησιμοποιήσαμε είναι μικρής (0,1-0,8 ηλιακές μάζες) και ηλιακής (0,8- 1,2 ηλιακές μάζες) μάζας με ποικιλία κάλυψης από κηλίδες (μέχρι κάλυψη 50%).

Η επίδραση στην αστρική ακτίνα και στην αφθονία λιθίου

Βρήκαμε ότι μια εκτεταμένη κάλυψη της αστρικής επιφάνειας από κηλίδες έχει ως αποτέλεσμα μια αύξηση της ακτίνας σε όλες τις ηλικίες, που εξελίσσεται από την προ κ. ακολουθίας φάση και διαρκεί στην κ. ακολουθία. Για όλο το δείγμα μας οι ανωμαλίες της ακτίνας κορυφώνονται στο 8- 12% στην προ κ. ακολουθία φάση, με εξάρτηση από την αστρική μάζα, με τα αστέρια ολικής συναγωγής (μικρής μάζας) να επηρεάζονται κατά 4% και τα αστέρια ηλιακής μάζας κατά 10%.

Το λίθιο καίγεται στους 2,6 εκ. βαθμούς και εξαντλείται από τις επιφάνειες των αστέρων κατά την προ κ. ακολουθίας φάση, μέχρι να διαμορφωθεί ένας ουσιαστικός αστρικός πυρήνας ακτινοβολίας. Η μάζα και η χημική σύσταση (μεταλλικότητα) καθορίζουν σε ένα αστέρι την καταστροφή του λιθίου κατά την κ. ακολουθία, και δεν θα έπρεπε να υπάρχει διασπορά στην αφθονία του λιθίου (σε άστρα ίδιας θερμοκρασίας) μέσα στα αστρικά σμήνη, κάτι που παρατηρούμε στις Πλειάδες. Φαίνεται ότι αστέρια ίδιας μάζας έχουν διαφορετική ακτίνα στην προ κ. ακολουθίας φάση, και τα πιο πλούσια σε λίθιο είναι αυτά με την ταχύτερη περιστροφή, κάτι που σημαίνει ότι η διασπορά των ακτίνων οφείλεται σε φυσική διαδικασία που έχει ως αίτιο την περιστροφή, με κύριο υποψήφιο τις κηλίδες.

Τα δεδομένα λιθίου και ακτίνων των αστεριών μας δείχνουν ότι εμφανίζεται ένα εύρος ακτίνων σε ορισμένη αστρική μάζα σε ανοιχτά σμήνη κατά την προ κ. ακολουθίας φάση και στην κ. ακολουθία, που οφείλεται σε μαγνητική δραστηριότητα.

Συνέπειες για τεκμηριωμένες μάζες και ηλικίες

Τα αστέρια με πολλές κηλίδες είναι συστηματικά γηραιότερα και μεγαλύτερης μάζας από ότι τα μετράμε. Το συμπέρασμα αυτό προκύπτει από τις αντίστοιχες ισόχρονες και τις θέσεις τους στο διάγραμμα.

Για να εκτιμήσουμε το μέγεθος αυτού του φαινομένου, επιστρέφουμε στην αφθονία λιθίου στις Πλειάδες. Αν η αιτία της διασποράς της αφθονίας του λιθίου είναι πραγματικά οι κηλίδες στην προ κ. ακολουθία φάση, τότε η ισχύουσα αφθονία λιθίου κάθε αστέρα μας δείχνει το μέγεθος κάλυψης από κηλίδες του στην προ κ. ακολουθία φάση του. Έτσι ανακαλύπτουμε αυτό το μέγεθος για τις Πλειάδες. Με τις ισόχρονες μπορούμε να υπολογίσουμε τις μάζες και ηλικίες βάσει της διασποράς της αφθονίας του λιθίου. Συμπεραίνουμε ότι πολλές νεαρές συγκεντρώσεις αστέρων μπορεί να είναι γηραιότερες από ότι υπολογίζουμε, με το σφάλμα να αυξάνεται προς τις μικρότερες αστρικές μάζες.

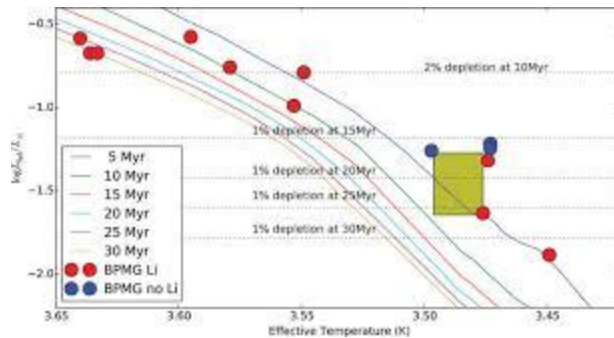
Συμπεράσματα

Βρήκαμε ότι η επίδραση των κηλίδων στα αστρικά μοντέλα είναι η αύξηση των αστρικών ακτίνων και η μείωση των θερμοκρασιών και λαμπροτήτων, σε εξαρτώμενο από την μάζα βαθμό. Η αύξηση της ακτίνας μέσω των κηλίδων μπορεί να εξηγήσει την παρατηρήσιμη αυξημένη ακτίνα μερικών άστρων μικρής μάζας, και μπορεί να υπολογιστεί για την υποβαθμισμένη εξάλειψη του λιθίου σε γρήγορα περιστρεφόμενους αστέρες κατά την προ κ. ακολουθίας φάση. Αυτά τα δεδομένα μας δείχνουν ότι αστέρια ίδιας μάζας μπορεί να έχουν διαφορετικές ακτίνες στις ηλικίες 3- 10 εκ. έτη.

Τα όρια εξάλειψης του λιθίου στα νεαρά αστέρια, οι ασυμφωνίες στα μοντέλα αστεριών προ κ. ακολουθίας.

Η εκτίμηση της ηλικίας των νεαρών άστρων είναι σημαντική επειδή μας δίνει την βάση για την κατανόηση της δημιουργίας και εξέλιξης των νεαρών αστεριών και των πλανητών. Ειδικά ο ακριβής καθορισμός των ηλικιών των κοντινών νεαρών ομάδων αστεριών έχει μεγάλη αξία, επειδή οι ηλικίες τους είναι σημαντικές για την δημιουργία πλανητών σε εύρος 10- 100 εκ. έτη.

Οι ηλικίες των κοντινών κινούμενων ομάδων (near young moving groups, NYMG) μπορούν να εκτιμηθούν με την σύγκριση ποικίλων δεικτών αστρικής δραστηριότητας έναντι αυτών των μελών ανοιχτών σμηνών με καλά καθορισμένες ηλικίες. Οι Πλειάδες (100 εκ. ετών) και οι Υάδες (650 εκ. ετών) είναι 2 τέτοια σμήνη. Επειδή αυτή η μέθοδος σύμπτωσης ηλικιών είναι βασικά μια σχετική ταξινόμηση, οι αβεβαιότητες εξαρτώνται από τα διαθέσιμα σμήνη σύγκρισης. Η αφθονία του λιθίου στις αστρικές επιφάνειες μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά ως χρονόμετρο επειδή η καύση του λιθίου είναι γρήγορη, γίνεται σε θερμοκρασίες πάνω από 2,6 εκ. βαθμούς και είναι ευαίσθητη στην εσωτερική αστρική δομή. Σε δεδομένη ηλικία 8- 10 εκ. ετών το λίθιο (γραμμή λ6708) εξαφανίζεται ως φασματική γραμμή από τους νάνους M, δηλαδή έχουμε το λεγόμενο όριο εξάλειψης λιθίου (lithium depletion boundary, LDB). Επειδή τα νεαρά αστέρια στην LDB είναι ακόμα πλήρως συναγωγής, η ακριβής θέση τους στο διάγραμμα θερμοκρασίας/ λαμπρότητας μπορεί να μας δώσει άμεσα την μάζα (και ηλικία) τους, βάσει των ανάλογων μοντέλων. Οι ηλικίες των αστεριών στα ανοιχτά σμήνη (βάσει των LDB) είναι κατά 50% μεγαλύτερες από αυτές των αστεριών της άνω κ. ακολουθίας (αστέρια μεγάλης μάζας) και τις χρησιμοποιούμε για αστέρια σε NYMG. Όμως για πολλά NYMG η εκτίμηση βάσει της LDB είναι ασύμφωνη με τα μοντέλα. Για ένα δεδομένο μοντέλο προ κ. ακολουθίας αστεριών υπάρχει σημαντική ασυνέπεια ανάμεσα στην παρατηρήσιμη και την θεωρητική αστρική λαμπρότητα των LDB. Πολλές διεργασίες στα νεαρά αστέρια όπως η συσσώρευση ύλης από τον δίσκο, τα μαγνητικά πεδία και οι κηλίδες μπορούν να επηρεάσουν την εξάλειψη λιθίου στις επιφάνειές τους. Η αυξημένη συσσώρευση ύλης έχει ως αποτέλεσμα την μικρότερη αστρική ακτίνα σε σχέση με αστέρια χωρίς συσσώρευση, που οδηγεί σε θερμότερες θερμοκρασίες αστρικού πυρήνα. Έτσι η εξάλειψη λιθίου πραγματοποιείται ταχύτερα (μικρότερη ηλικία LDB). Αντίθετα, οι κηλίδες επηρεάζουν την πίεση και θερμοκρασία του αστεριού, εμποδίζοντας την συναγωγή. Αν αυτό το φαινόμενο είναι σημαντικό, τότε όλες οι ηλικίες LDB είναι νεαρότερες από ότι (θεωρητικά) θα έπρεπε. Ομοίως, η παρουσία ισχυρών μαγνητικών πεδίων κατά την εξέλιξη αστεριών μικρής μάζας στην προ κ. ακολουθία φάση τα κάνουν να εμφανίζονται λαμπρότερα από την δεδομένη ηλικία τους.



Η ηλικία του NYMG β Pictoris βάσει της LDB.

Η ηλικία της παραπάνω αστρικής ομάδας έχει εκτιμηθεί στα 12 εκ. έτη, βάσει συνδυασμών μεθόδων χρονολόγησης. Βλέπουμε ότι υπάρχει διακύμανση των ηλικιών της LDB, που οφείλεται στην ευαισθησία της εξάλειψης του λιθίου στην θερμοκρασία. Ένα ακόμα συμπέρασμα είναι ότι η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται καλύτερα στα μέλη διπλών και πολλαπλών άστρων από ότι στα ανοιχτά σμήνη. Αυτά συμβαίνει επειδή τα μέλη τους έχουν εκτεθεί σε μεγαλύτερη ποικιλία εξελικτικών περιβαλλόντων από ότι 2 μεμονωμένα διπλά αστέρια.

Συμπεράσματα

Οι μεγαλύτερες ηλικίες (>20 εκ. ετών) για την ομάδα β Pictoris εκτιμήθηκαν βάσει ποικίλων αναλύσεων LDB και έχουν γίνει γενικά αποδεκτές. Αυτό συμβαίνει επειδή η εκτίμηση ηλικίας βάσει της LDB βασίζεται σε απλούστερη φυσική, και πολλές ερευνητικές ομάδες έχουν βρει παρόμοια αποτελέσματα στην παραπάνω αστρική ομάδα με αυτήν την μέθοδο. Όμως υπάρχουν σημαντικές ασυμφωνίες στην λαμπρότητα της ομάδας β Pictoris και την εκτιμώμενη ηλικία βάσει της LDB.

2) Πρωτοπλανητικά συστήματα

Μεταβλητότητα νεαρών καφέ νάνων και γιγάντιων εξωπλανητών που οφείλεται σε νέφη των ατμοσφαιρών τους.

Πλέον έχουμε απεικονίσει στο υπέρυθρο αρκετούς νεαρούς εξωπλανήτες. Οι αρχικές παρατηρήσεις των άμεσα απεικονισμένων πλανητών μας έκρυβαν εκπλήξεις. Ενώ αναμέναμε να έχουν παρόμοιες ατμοσφαιρικές ιδιότητες με τον καλά μελετημένο πληθυσμό των καφέ νάνων, επειδή έχουν συγκρίσιμες θερμοκρασίες, οι νεαροί εξωπλανήτες εμφανίζονται πολύ πιο κόκκινοι στο κοντινό υπέρυθρο από τους καφέ νάνους ίδιας θερμοκρασίας. Αυτή η διαφορετικότητα εξηγείται με την παρουσία νεφών με σκόνη σε χαμηλότερες θερμοκρασίες, αποτέλεσμα της μικρότερης επιφανειακής βαρύτητας αυτών των αντικειμένων (αεριώδεις εκτεταμένοι πλανήτες με συνήθως μικρότερο ειδικό βάρος από του Δία). Όπως οι καφέ νάνοι, οι νεαροί εξωπλανήτες αναμένονται να περιστρέφονται σε διάστημα ωρών μέχρι μερικών ημερών. Έτσι για την μελέτη των ατμοσφαιρών τους μας είναι σημαντική η μεταβλητότητά τους στον χρόνο (η λαμπρότητα ως συνιστώσα της φάσης), που είναι ευαίσθητη στην χωρική διασπορά των συμπυκνωμάτων όπως περιστρέφεται ένας πλανήτης.

Η μεταβλητότητα που οφείλεται στα νέφη είναι ανιχνεύσιμη αν έχουμε 1) σχετικά μικρές περιόδους περιστροφής και 2) επιφανειακές ανομοιογένειες. Είναι γνωστό ότι οι καφέ

νάνοι του πεδίου έχουν μικρές περιόδους περιστροφής. Οι νάνοι T περιστρέφονται γρηγορότερα από τους M. Με την παραδοχή ότι έχουν μέγεθος 1 ακτίνας Δία (μια λογική παραδοχή, λόγω του εκφυλισμού των ηλεκτρονίων στον πυρήνα τους, με αποτέλεσμα να έχουν αρκετά μεγάλη πυκνότητα) η μέγιστη περίοδο για νάνους L,T είναι 12 ώρες. Δεν υπάρχει ανάλογη μελέτη για νεαρούς καφέ νάνους, αλλά λόγω της διατήρησης της στροφορμής (επιτάχυνση της περιστροφής λόγω συρρίκνωσης του νεαρού νάνου) πρέπει να έχουν μεγαλύτερες περιόδους. Ο β Pictoris b είναι ο πλανήτης με την ταχύτερη περιστροφή που γνωρίζουμε, με 1,6 ακτίνες Δία περιστρέφεται σε 8,1 ώρες. Έτσι γνωρίζουμε ότι έστω και ένας εξωπλανήτης περιστρέφεται επίσης γρήγορα. Για τα αστέρια φασματικού τύπου >L2 η αναμενόμενη πηγή επιφανειακής ανομοιογένειας έχει την μορφή μπαλωμάτων στην κάλυψη από τα νέφη ή ακόμα πολλά μεμονωμένα νέφη, ειδικά στην μετάβαση ανάμεσα σε τύπο L και T. Τα μοντέλα προβλέπουν καθαρές επιφάνειες στον προχωρημένο τύπο T και πλήρης νεφοκάλυψη στον αρχικό (μικρά νούμερα) τύπο L. Οι νάνοι τύπου M παρουσιάζουν μεταβλητότητα που κυριαρχείται από άλλους μηχανισμούς (προσαύξηση από τον δίσκο ή μαγνητικά φαινόμενα όπως οι κηλίδες). Αντίθετα, οι νάνοι L,T είναι πολύ ψυχροί για την εμφάνιση σημαντικών μαγνητικών φαινομένων.

Μεταβλητότητα σε καφέ νάνους

Στους καφέ νάνους έχουμε παρατηρήσει μεταβλητότητα που εξελίσσεται σε ημερήσια ή εβδομαδιαία κλίμακα, κάτι που αναλογεί στην εξέλιξη της δομής των επιφανειακών νεφών. Ενώ το εύρος της μεταβλητότητας αυξάνεται στην μετάβαση από L σε T, την παρατηρούμε σε όλο το εύρος των φασματικών τύπων L, T.

Μεταβλητότητα σε αντικείμενα πλανητικής μάζας.

Οι άμεσα παρατηρήσιμοι γιγάντιοι (μέχρι 25 μάζες του Δία) πλανήτες και οι νεαροί καφέ νάνοι πολύ μικρής μάζας αποτελούν πολύ καλύτερους στόχους για την εξακρίβωση μεταβλητότητας από τους νάνους L,T του πεδίου. Οι τελευταίοι έχουν πολλές φορές αβέβαιες αποστάσεις και ηλικίες, επειδή εκφυλίζονται με την πάροδο του χρόνου (ένας μεγάλης ηλικίας μεγαλύτερης μάζας νάνος δεν ξεχωρίζει από έναν μικρής μάζας νεαρότερο). Οι εξωπλανήτες (10- 200 εκ. ετών) έχουν καλά καθορισμένη ηλικία και απόσταση (γνωστή από την απόσταση του άστρου τους, τα περισσότερα έχουν μετρηθεί από το τηλεσκόπιο Ίππαρχος και τώρα από το GAIA). Για νεαρά ανεξάρτητα τέτοια αντικείμενα βρίσκουμε την απόσταση από το σμήνος τους. Οι καλά καθορισμένες ηλικίες και αποστάσεις σημαίνουν και καλά καθορισμένες απόλυτες λαμπρότητες, με αποτέλεσμα την βελτίωση των αστρικών μοντέλων.

Η βασική φυσική διαφορά ανάμεσα στους καφέ νάνους του πεδίου και τα νεαρά υπό αστρικά αντικείμενα (με μάζα κάτω από 25 φορές του Δία) είναι η χαμηλότερη επιφανειακή βαρύτητα των νεαρών αντικειμένων σχετικά με τα παλαιότερα. Η επιφανειακή βαρύτητα έχει σημαντικό ρόλο στην μετάβαση ανάμεσα στους φασματικούς τύπους L και T. Η μετάβαση εμφανίζεται σε χαμηλότερες θερμοκρασίες για μικρής βαρύτητας εξωπλανήτες από ότι για μεγαλύτερης βαρύτητας καφέ νάνους. Η επιφανειακή βαρύτητα επηρεάζει τις ιδιότητες των νεφών, έτσι η μελέτη της σχετικής μεταβλητότητας αποτελεί άμεση μελέτη της επιφανειακής βαρύτητας.

Η εξέλιξη της στροφορμής σε νεαρά αστέρια ηλιακού τύπου

Κατά την αρχική τους εξέλιξη, τα αστέρια όμοιου τύπου με τον Ήλιο βιώνουν μια σημαντική μεταβολή της διασποράς της στροφορμής (AM, angular momentum) προς την αλληλεπίδραση με το περιβάλλον τους. Όσο το αστέρι συσσωρεύει ύλη από τον

περιβάλλοντα δίσκο, η αποβολή στροφορμής γίνεται από τους πίδακες και την συσσώρευση. Μόλις το αστέρι περιστρέφεται ελεύθερα (χωρίς αλληλεπίδραση με τον δίσκο) το κυρίως μέρος της AM αποβάλλεται από την αστρική επιφάνεια μέσω των αστρικών ανέμων κατά μήκος των μαγνητικών γραμμών, ενώ το υπόλοιπο αναδιανέμεται στην ζώνη ακτινοβολίας μέσω υδροδυναμικών ασταθειών.

Στην μελέτη μας συμπεριλάβαμε μόνο αστέρια σμηνών, ώστε να είναι γνωστή η ηλικία τους, και μάζας 0,9- 1,1 ηλιακές. Περιλάβαμε και τον Ήλιο, ώστε να έχουμε ένα δείγμα της μακροχρόνιας εξέλιξης της περιστροφής για τέτοια αστέρια.

Η εξέλιξη της επιφανειακής περιστροφής.

Ακολουθούμε τη εξέλιξη στα αστέρια από την φάση που έχουν συρρικνωθεί αρκετά, ώστε να έχουν δομική συνοχή (η ταχύτητα περιστροφής της επιφάνειας να είναι μικρότερη από το όριο διάλυσης του σώματος). Υπολογίσαμε την απώλεια στροφορμής στην φάση που τα αστέρια έχουν αποδεσμευτεί από τους δίσκους τους. Ανάμεσα στην φάση αποδέσμευσης και την ηλικία μηδέν στην κ. ακολουθία (zero- age main sequence, ZAMS) τα αστέρια συστέλλονται, και αυτή η διαδικασία κυριαρχεί στην εξέλιξη της στροφορμής στην αστρική επιφάνεια για τα πρώτα 10 εκ. έτη. Μπαίνοντας στην φάση ZAMS τα αστέρια παύουν να συστέλλονται και οι ταχύτητες των επιφανειών τους φτάνουν ένα μέγιστο, πριν η ροπή κυριαρχήσει και επιβραδύνει την περιστροφή των αστεριών.

Η φάση της επιβράδυνσης ενεργοποιείται από την εσωτερική μεταφορά της στροφορμής. Η ανακατανομή της στροφορμής εξαρτάται από τον βαθμό περιστροφής και την εξέλιξη της ισχύς του μαγνητικού πεδίου.

Μετά την φάση ZAMS η ταχύτητα περιστροφής της επιφάνειας κυριαρχείται από την ροπή που δημιουργεί ο αστρικός άνεμος, που αποτελεί τον μηχανισμό εσωτερικής μεταφοράς της στροφορμής. Οι επιδράσεις της εσωτερικής αυτής μεταφοράς στην περιστροφή της επιφάνειας εκφράζονται από αυτήν την ροπή, που σταδιακά κυριαρχεί πλήρως στην εξέλιξη της περιόδου περιστροφής. Αλλά κατά την προ κ. ακολουθίας φάση η γρήγορη περιστροφή και η συρρίκνωση έχουν ως αποτέλεσμα της επιτάχυνση της περιστροφής, αντισταθμίζοντας την ροπή.

Το αν ο πυρήνας ακτινοβολίας και τα εξωτερικά στρώματα του αστεριού περιστρέφονται σύγχρονα εξαρτάται από την στροφορμή του αστεριού. Τα αστέρια με γρήγορη περιστροφή σχεδόν πάντα περιστρέφονται ως συμπαγή σώματα μέχρι να φτάσουν στην φάση ZAMS, ενώ στα άστρα πιο αργής περιστροφής ο πυρήνας είναι τελείως αποδεσμευμένος από το υπόλοιπο αστέρι, και μπορεί να περιστρέφεται μέχρι και 10 φορές ταχύτερα από την επιφάνεια φτάνοντας στην φάση ZAMS. Αυτό εξηγείται από 2 παράγοντες. Η αποτελεσματικότητα της εσωτερικής μεταφοράς της στροφορμής εξαρτάται από την ταχύτητα της περιστροφής του άστρου, και η ροπή είναι πιο ισχυρή (ανάλογα προς την στροφορμή) όταν το αστρικό δυναμό δεν βρίσκεται σε κορεσμένη κατάσταση. Έτσι τα αστέρια με αργή περιστροφή βρίσκονται κάτω από το όριο κορεσμού και οι επιφανειές τους βιώνουν ισχυρή επιβράδυνση, ενώ οι πυρήνες τους επιταχύνονται ελεύθερα. Μπορούμε να δοκιμάσουμε αυτούς τους παράγοντες εξετάζοντας την μέγιστη περιστροφή κατά την φάση ZAMS συγκριτικά με την εσωτερική ταχύτητα. Στα αργά και με μέτρια ταχύτητα περιστρεφόμενα αστέρια αυτό το μέγιστο σημειώνεται μερικές δεκάδες εκ. έτη νωρίτερα από ότι στα αστέρια με γρήγορη περιστροφή. Αυτό συμβαίνει μέσω σωρευτικών επιπτώσεων της ασθενούς σύνδεσης πυρήνα- υπόλοιπου άστρου και της ισχυρής ροπής. Παράλληλα, η επιτάχυνση του πυρήνα είναι παρόμοια στα άστρα με αργή και γρήγορη περιστροφή, που σημαίνει ότι η μέση περιστροφή του άστρου εξαρτάται από την περιστροφή του πυρήνα.

Η εξέλιξη των επιφανειακών μαγνητικών πεδίων σε νεαρά αστέρια ηλιακού τύπου.

Τα αστέρια ηλιακού τύπου παρουσιάζουν μεγάλες αλλαγές στους ρυθμούς περιστροφής τους, όταν περνάνε από την προ κ. ακολουθίας φάση στην κύρια ακολουθία. Στην αρχική τους φάση εξέλιξης αλληλεπιδρούν ισχυρά με τους δίσκους τους, κάτι που κυριαρχεί στον ρυθμό περιστροφής τους. Μετά από λίγα εκ. έτη, ενώ τα αστέρια αποδεσμεύονται από τους δίσκους και συνεχίζουν να συρρικνώνονται, με αποτέλεσμα την επιτάχυνση της περιστροφής. Σε μεγαλύτερη χρονική κλίμακα τα αστέρια παρουσιάζουν απώλεια στροφορμής μέσω του μαγνητισμένου αστρικού ανέμου, με αποτέλεσμα να επιβραδυνθεί η περιστροφή τους. Επειδή τα μαγνητικά πεδία στα αστέρια δημιουργούνται μέσω του φαινομένου του δυναμό, οι μεγάλες αλλαγές στην ταχύτητα περιστροφής τα επηρεάζουν έντονα.

Η μελέτη μας επικεντρώθηκε σε μέλη γνωστών ομάδων και σμηνών αστεριών με εύρος ηλικίας από 20 ως 600 εκ. έτη, διάστημα στο οποίο εμφανίζονται οι μεγαλύτερες μεταβολές στο μαγνητικό πεδίο. Εξαιρέσαμε τα αστέρια T Ταύρου (ακόμα αλληλεπιδρούν με τους δίσκους τους) και γηραιότερα αστέρια, και επικεντρωθήκαμε σε αστέρια με 0,7- 1 ηλιακές μάζες.

Παρατηρήσαμε μια σημαντική ελάττωση του μαγνητικού πεδίου, ανάλογη με την αστρική ηλικία, που ξεκινάει από την αρχική φάση στην κ. ακολουθία. Η εξέλιξη των μαγνητικών ιδιοτήτων από την φάση προ κ. ακολουθίας ως την αρχή της κ. ακολουθίας (ZAMS) έχει ως μηχανισμό τις δομικές μεταβολές του αστεριού. Η μετάβαση από την πλήρη συναγωγή σε πυρήνα μερικής ακτινοβολίας στην προ κ. ακολουθία φάση του άστρου έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία πολύπλοκων μη αξονικά συμμετρικών πεδίων στην φάση ZAMS, ενώ η επιβράδυνση της περιστροφής στην κ. ακολουθία έχει ως επακόλουθο την ελάττωση του μαγνητικού πεδίου σε μεγάλες χρονικές κλίμακες.

Η δομή και εξέλιξη των πρωτοπλανητικών δίσκων, μια άποψη στις υπέρυθρες και στα μικροκύματα

Οι πρωτοπλανητικοί δίσκοι είναι περίπλοκα συστήματα που εξελίσσονται μέσω φυσικών μηχανισμών, όπως η συσσώρευση ύλης στο αστέρι, η ανάπτυξη κόκκων και δημιουργία σκόνης, οι δυναμικές αλληλεπιδράσεις, η φωτόλυση, και η ίδια η δημιουργία πλανητών. Όμως ακόμα δεν γνωρίζουμε καλά πόσο σημαντικός παράγοντας είναι κάθε ένα από τα παραπάνω στην εξέλιξη των δίσκων.

Στο υπέρυθρο

Το χρονοδιάγραμμα της ύπαρξης του πρωτοπλανητικού δίσκου αποτελεί την καλύτερη οριοθέτηση της θεωρίας για την δημιουργία των πλανητών, μιας και μας παρέχει σημαντικές πληροφορίες για τον διαθέσιμο χρόνο για την ολοκλήρωσή της. Για τους βραχώδεις πλανήτες ο σχηματισμός μπορεί να συνεχίσει και μετά την εξάλειψη του αερίου από τον δίσκο. Για τους γιγάντιους αεριώδεις πλανήτες όμως, η διάλυση του αρχικού (πλούσιου σε αέριο) δίσκου θέτει ένα όριο στο χρονοδιάγραμμα σχηματισμού τους. Αφού χρειάζεται μόνο πολύ μικρό ποσοστό καυτής σκόνης (χονδρικά συνολική μάζα όση αυτή

ενός αστεροειδή και σε θερμοκρασία 1000 βαθμούς Κ) για την δημιουργία υπέρβασης στο κοντινό υπέρυθρο (NIR excess) πάνω από την εκπομπή της αστρικής φωτόσφαιρας, οι παρατηρήσεις σε αυτό το μήκος κύματος είναι χρήσιμες για τον εντοπισμό ενός εσωτερικού δίσκου συσσώρευσης (ακτίνας 0,1 AU). Υπέρβαση σε ένα μήκος κύματος σημαίνει πιο έντονη παρουσία των συγκεκριμένων φασματικών γραμμών από ότι προβλέπουν τα μοντέλα για τον φασματικό τύπο του άστρου. Στην πράξη υπάρχει πολύ στενή σχέση ανάμεσα στην υπέρβαση στο κοντινό υπέρυθρο και την συσσώρευση, με εξαίρεση τους δίσκους σε μετάβαση που παρουσιάζουν χάσματα στα οποία έχει εξαντληθεί εντελώς η ύλη.

Από τις παρατηρήσεις υπέρβασης στο κοντινό υπέρυθρο σε σμήνη διαφορετικών ηλικιών γνωρίζουμε ότι το 80% των αστεριών με ηλικία 1 εκ. έτη έχουν εσωτερικό δίσκο συσσώρευσης, και το παραπάνω ποσοστό πέφτει κοντά στο 0 στην ηλικία των 10 εκ. ετών. Έτσι συμπεραίνουμε μια μέση ηλικία ζωής του κυρίως εσωτερικού δίσκου στα 2-3 εκ. έτη με μεγάλη διασπορά ηλικίας, από λιγότερο του 1 εκ. έτη μέχρι και 10 εκ. έτη. Σε αστέρια που δεν παρατηρούμε τέτοια υπέρβαση δεν παρατηρούμε επίσης υπέρβαση στο μεσαίο υπέρυθρο (MIR), πάλι με εξαίρεση των δίσκων μετάβασης με <καθαρές> εσωτερικές οπές. Αυτό μας δείχνει ότι γενικά, όταν παύσει η συσσώρευση και διαλύεται ο εσωτερικός δίσκος, όλος ο δίσκος αποσυντίθεται σχετικά γρήγορα, σε συμφωνία με το μοντέλο της φωτόλυσης (photo evaporation).

Σε όλα τα σμήνη ισχύει ότι η αναλογία του δίσκου μειώνεται όσο μεγαλώνει η μάζα του αστεριού, κάτι που σημαίνει ότι ο δίσκος διαλύεται ταχύτερα στα μεγάλα αστέρια. Αυτό μπορεί να συμβαίνει μέσω συνδυασμού εντονότερης συσσώρευσης στο άστρο (συσσωρεύει πιο γρήγορα υλικό από τον δίσκο) και μεγαλύτερης κλίμακας φωτόλυσης. Η διάρκεια ζωής του δίσκου αποτελεί επίσης μια συνιστώσα της ποικιλομορφίας. Στα νεαρά σμήνη η συχνότητα ύπαρξης δίσκου αγγίζει το 100% για τα μεμονωμένα αστέρια, ενώ για τα διπλά με μέτρια μεταξύ τους απόσταση (5- 50 AU) αυτό το ποσοστό μειώνεται δραματικά. Αυτό είναι εύκολο να εξηγηθεί, μιας και σε αυτά τα συστήματα το ένα αστέρι εισβάλλει στον εξωτερικό δίσκο του άλλου, μειώνοντας δραστικά την διαθέσιμη για συσσώρευση ύλη. Στους φασματικούς (πολύ κοντινούς μεταξύ τους με χώρισμα >1 AU) και μεγάλου χωρίσματος (>100 AU) διπλούς φαίνεται να μην υπάρχει επίδραση στο χρονοδιάγραμμα του δίσκου.

Η δομή και η εξέλιξη του δίσκου

Οι παρατηρήσεις στο IR χρησιμεύουν επίσης για την εύρεση των δομών στους δίσκους. Οι πιο πολλοί πρωτοπλανητικοί δίσκοι (80%) είναι πλήρης δίσκοι (full disk, χωρίς κενά) που εκτείνονται μέσα στην ακτίνα θερμοκρασίας εξάχνωσης της σκόνης και παρατηρούνται σε όλο το φάσμα των υπέρυθρων. Έτσι έχουν όλα πολύ όμοια φασματική κατανομή της ενέργειας (SED, spectral energy distribution). Το υπόλοιπο 20% τους είναι οι δίσκοι μετάβασης, με μεγάλο εύρος δομών και SED. Οι πρωτοπλανητικοί δίσκοι αποτελούνται από μια σειρά δακτυλίων με διαφορετικές θερμοκρασίες. Κάθε δακτύλιος κυριαρχεί στην εκπομπή διαφορετικού μήκος κύματος. Όσο πιο κοντά είναι στο αστέρι, τόσο πιο μεγάλη είναι η θερμοκρασία του δακτυλίου, και μικρότερο το μήκος κύματος. Έτσι η παρουσία εσωτερικού χάσματος (τρύπας) σε έναν δίσκο σημαίνει περιορισμένο επίπεδο υπέρβασης NIR. Αν το χάσμα είναι απόλυτα κενό, δεν ανιχνεύεται καμία υπέρβαση ακτινοβολίας πάνω από την αστρική φωτόσφαιρα. Αν υπάρχει υπόλειμμα στο χάσμα, τότε ανιχνεύουμε μια ελάχιστη υπέρβαση, αλλά η NIR SED θα παραμείνει κάτω από την τυπική τιμή ενός συμπαγούς δίσκου. Ομοίως, αν ο δίσκος περιέχει ένα αρκετά πλατύ χάσμα, η SED θα δείξει ένα βαθούλωμα στο μήκος κύματος που αντιστοιχεί στην θερμοκρασία της <ελλείπουσας> από εκεί σκόνης. Ακόμα, οι περισσότεροι νεαροί πρωτοπλανητικοί δίσκοι λάμπουν απορροφώντας και επανεκπέμποντας αρκετά περισσότερο φως από έναν επίπεδο δίσκο.

Όσο ο δίσκος εξελίσσεται και η σκόνη αναπτύσσεται και επικάθεται στο μεσαίο επίπεδο ο εξωτερικός δίσκος γίνεται πιο επίπεδος, που σημαίνει ασθενέστερη εκπομπή μεσαίου και μακρινού υπέρυθρου σε σχέση με έναν ολικής λάμπσης δίσκο. Τέλος, όσο ο αρχικός δίσκος διαμελίζεται, γίνεται αόρατος σε όλες τις υπέρυθρες, με αποτέλεσμα τον περιορισμό των υπερβάσεων στο υπέρυθρο.

Στην πράξη, τα πιο πολλά νεαρά σμήνη και οι περιοχές αστρογέννησης περιέχουν 2 κατηγορίες δίσκων. Τους κανονικούς πλήρες δίσκους και τους δίσκους μετάβασης. Η τελευταία κατηγορία περιέχει αντικείμενα με εσωτερικά χάσματα και τρύπες. Η αναλογία αυτών των δίσκων αποτελεί μια συνιστώσα της ηλικίας, με περισσότερους δίσκους μετάβασης σε μεγαλύτερες ηλικίες για τις περιοχές αστρογέννησης και τα σμήνη.

Τα αποτελέσματα των προ ALMA μετρήσεων στα υποχιλιοστόμετρα

Τα υποχιλιοστόμετρα (sub millimeter) είναι μήκη κύματος ευαίσθητα στις θεμελιώδεις ιδιότητες των δίσκων όπως η συνολική μάζα αερίου και σκόνης, και ο διασπορές μεγέθους των κόκκων σκόνης. Έχουν μεγάλη σύνδεση με τα δεδομένα από τις υπέρυθρες. Το βασικό συστατικό του πλανητικού δίσκου, το (H₂), εκπέμπει ελάχιστα σε αυτές τις θερμοκρασίες και πυκνότητες. Βάσει παραδοχών όπως η ικανότητα δημιουργίας πλανητών διαφορετικής σύστασης, μας δίνεται μια αναλογία μάζας αερίου/ σκόνης 100/1. Το αμέσως μετά το (H₂) συχνότερο μόριο στους δίσκους είναι το (CO) και τα ισοτοπόλογά του, (13CO) και (C18O), που μας δίνουν την δυνατότητα εκτίμησης της ποσότητας αερίου στους δίσκους. Ενώ η μάζα του δίσκου είναι παρόμοια με αυτήν του αστέρα, η λαμπρότητά του είναι μόλις το 0,5% του αστέρα, όμως με τεράστιες διακυμάνσεις, μέχρι 2 τάξεις μεγέθους. Αυτό μας δείχνει διαφορές στις μάζες των δίσκων και στα μεγέθη των κόκκων σκόνης. Η κατανόηση της εξέλιξης των δίσκων προϋποθέτει μετρήσεις και στο υπέρυθρο και στα υποχιλιοστόμετρα.

Με την χρήση της συμβολομετρίας και των τεχνικών σύνθεσης εικόνων μπορούμε να αναλύσουμε τους κοντινούς μας πρωτοπλανητικούς δίσκους. Μας παρέχονται άμεσες πληροφορίες του προφίλ επιφανειακής πυκνότητας, που είναι σημαντικές για τις θεωρίες δημιουργίας των πλανητών.

Τα πρώτα αποτελέσματα του ALMA

Παρατηρούμε δακτυλίους σε περιαστρικούς δίσκους κατηγορίας 1 (> 1 εκ. έτη), που σημαίνουν αυξημένη δημιουργία πλανητών μέσω της συσσώρευσης σε πλανητικό πυρήνα. Μια άλλη ανακάλυψη είναι η ύπαρξη δομών στους δίσκους μετάβασης. Οι ασυμμετρίες στους εξωτερικούς δίσκους εξηγούνται ως δύνες μεγάλης κλίμακας ή παγίδες σκόνης, που έχουν σημαντικό ρόλο στην δημιουργία πλανητοειδών ή πλανητών σε μεγάλη ακτίνα από το αστέρι. Ακόμα υπάρχουν σπειροειδείς δομές άγνωστης προέλευσης και ροές συσσώρευσης αερίου που συνδέουν τις εσωτερικές περιοχές των δίσκων με τις εξωτερικές. Αυτές είναι σύμφωνες με μοντέλα υδροδυναμικής προσομοίωσης πολλαπλών πλανητών που να βρίσκονται εμβαπτισμένοι σε έναν πρωταρχικό δίσκο.

Η μετάβαση από αρχικό δίσκο σε δίσκο θραυσμάτων (debris disk)

Οι περιοχές αστρογέννησης περιλαμβάνουν πολλούς τύπους νεαρών αστρικών αντικειμένων. Είναι οι γεμάτοι δίσκοι, οι δίσκοι με εσωτερικές τρύπες και χάσματα, οι αραιοί στο οπτικό φάσμα δίσκοι, και τα αστέρια χωρίς δίσκους. Οι οπτικά αραιοί δίσκοι θεωρούνται συχνά το τελικό στάδιο στην εξέλιξη των δίσκων, αφού είναι πλούσιοι σε (δευτερογενές) αέριο με την περισσότερη σκόνη τους να έχει εξαλειφθεί. Με το ALMA είδαμε ότι τα προ κ. ακολουθίας αστέρια τύπου T-Tauri με υπέρβαση στο υπέρυθρο, έχουν

<0,3 ηλιακές μάζες σε σκόνη προς συσσώρευση και καθόλου αέριο. Έτσι θεωρούνται νέοι δίσκοι συντριμμίων (2^{15} γενιάς) και όχι εξελιγμένοι αρχικοί δίσκοι.

Η εξέλιξη των δίσκων και ο σχηματισμός πλανητών

Συνήθως υποθέτουμε ότι οι πλήρες δίσκοι αποτελούν την αφετηρία της εξέλιξης των δίσκων και ότι τα συστήματα με τρύπες και χάσματα είναι πιο εξελιγμένα. Όμως διακρίνουμε τουλάχιστον 2 διαφορετικές οδούς εξέλιξης. Μερικοί δίσκοι εξελίσσονται χάσματα και εσωτερικές τρύπες ενώ περιέχουν ακόμα πολύ μάζα και συνεχίζεται η συσσώρευση υλικού, ενώ άλλοι χάνουν την περισσότερη ύλη τους διατηρώντας την συνοχή τους για εκατομμύρια χρόνια, μέχρι που εξαλείφονται από μέσα προς τα έξω, σε σύντομο χρονοδιάγραμμα (κυρίως μέσω της φωτόλυσης). Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει τους πιο γνωστούς δίσκους μετάβασης. Γενικά πρόκειται για αστέρια πρότερου (early) τύπου K ως A με αρκετή ύλη στους δίσκους για τον σχηματισμό ηλιακού συστήματος και μεγάλες εσωτερικές τρύπες, όμοιες με το μέγεθος του ηλιακού μας συστήματος. Αυτά τα αντικείμενα όμως δεν αποτελούν τυπικά νεαρά αστέρια στα γειτονικά μας μοριακά νέφη ή ακόμα και τυπικούς δίσκους μετάβασης. Αντίθετα, αντιπροσωπεύουν μια μειονότητα της τάξης του 20% του πληθυσμού δίσκων σε μετάβαση, και μόλις το 5% του γενικού πληθυσμού των δίσκων. Αποτελούν την μειονότητα των δίσκων που παράγουν έναν ή περισσότερους γιγάντιους πλανήτες. Από την άλλη, οι τυπικοί δίσκοι σε ένα νεαρό (2-3 εκ. ετών) αστρικό σμήνος φαίνεται να είναι μικρής συσσώρευσης ύλης κλασικοί T-Tauri με κανονική SED, αλλά όχι αρκετή μάζα για τον σχηματισμό γιγάντιων πλανητών. Αυτά τα συστήματα θεωρούνται εξελιγμένα με την έννοια ότι έχουν ήδη απολέσει την περισσότερη από την αρχική μάζα του δίσκου και υπόκεινται σε σημαντική αύξηση μεγέθους των κόκκων της σκόνης τους. Βάσει του ότι οι βραχώδεις πλανήτες είναι κοινός τύπος στον Γαλαξία μας, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι αυτοί οι τυπικοί δίσκοι είναι αυτοί που σχηματίζουν τα πιο συνήθη πλανητικά συστήματα, με βραχώδεις και χωρίς γίγαντες αεριώδεις πλανήτες.

Η εξέλιξη των πρωτοπλανητικών δίσκων, μονά και διπλά αστέρια

Ο σχηματισμός των γιγάντιων αεριώδεις πλανητών απαιτεί σημαντική ποσότητα αερίου και σκόνης στο περιαστρικό περιβάλλον ενός νεαρού T-Tauri. Ο μέσος χρόνος ζωής του πρωτοπλανητικού δίσκου υπολογίζεται βάσει ποσοστού των νεαρών αστεριών που παρουσιάζουν τέτοιους δίσκους. Σε 10 εκ. έτη το ποσοστό από αρχικό > 80% μηδενίζεται. Μετά από 2- 3 εκ. έτη ζωής του αστεριού παρατηρούμε την διάλυση του δίσκου. Το γεγονός ότι πολλά αστέρια είναι διπλά επηρεάζει τα παραπάνω αποτελέσματα, γιατί 1) στα διπλά συστήματα επηρεάζεται έντονα η εξέλιξη του δίσκου και 2) ένας μεγάλος αριθμός διπλών δεν έχει ακόμα αναλυθεί, και μπερδεύεται με τον πληθυσμό των μονών αστεριών.

Οι παρατηρήσεις στα υποχιλιοστόμετρα μας δείχνουν ότι τα διπλά αστέρια έχουν πολύ λιγότερη συνολική μάζα σκόνης. Αυτό εξηγείται με την δυναμική αλληλεπίδραση του δίσκου με τον συνοδό αστέρα. Σε μεγάλο διαχωρισμού διπλά έχουμε το φαινόμενο της περικοπής του εξωτερικού δίσκου στο $\frac{1}{2}$ με $\frac{1}{5}$ της απόστασης των αστεριών. Αυτό σημαίνει μικρότερη διάρκεια ζωής του δίσκου (0,9- 1,3 εκ. έτη). Αυτό επηρεάζει και τον σχηματισμό των πλανητών. Τα διπλά αστέρια με διαχωρισμό μικρότερο των 100 AU είναι πιθανότερο να μην φιλοξενήσουν αεριώδεις πλανήτες με μικρότερη μάζα από αυτήν του Δια από ότι τα διπλά με μεγαλύτερο διαχωρισμό ή τα μονά αστέρια. Οι πλανήτες με αυτή την μάζα θεωρείται ότι σχηματίζονται αργά, σε αντίθεση με τους γιγάντιους αεριώδεις που

συχνά παρατηρούμε να φιλοξενούνται σε στενά διπλά συστήματα με μικρή διάρκεια ζωής του δίσκου.

Η εξέλιξη των δίσκων γύρω από μονά αστέρια

Η συχνότητα παρουσίας δίσκων σε μονά αστέρια παραμένει κοντά στο 100% για ηλικίες 2-3 εκ. έτη και μειώνεται γρήγορα μέχρι τα 6 εκ. έτη. Αυτή η μεταβολή αποτελεί ένδειξη δημιουργίας πλανητών.

Συμπεράσματα

Είναι δύσκολο να ξεχωρίσουμε τα μονά αστέρια στις περισσότερες περιοχές αστρογέννησης. Οι στενοί διπλοί παρουσιάζουν διαφορετικά, μικρότερα χρονοδιαγράμματα των δίσκων τους. Οι μεγάλοι διαχωρισμού όμως μπερδεύονται με τα μονά αστέρια. Το ποσοστό μονών αστεριών που έχουν δίσκο παραμένει σταθερό μέχρι την ηλικία των 2-3 εκ. ετών, αλλά μετά μειώνεται γρήγορα μέσω εξέλιξης των δίσκων λόγω της φωτόλυσης και του σχηματισμού πλανητών.

Κοιλότητες με αέριο μέσα σε κοιλότητες σκόνης στους δίσκους

Οι πλανήτες σχηματίζονται σε δίσκους από σκόνη και αέριο γύρω από τα νεαρά αστέρια. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι λεγόμενοι δίσκοι μετάβασης (transitional disks), στους οποίους έχουν αδειάσει οι κοιλότητες σκόνης. Αυτοί οι δίσκοι αναμένονται να αποτελούν την ενδιάμεση φάση της εξέλιξης των δίσκων και του σχηματισμού των πλανητών. Τους εντοπίζουμε από το χαρακτηριστικό ελάχιστο στο μεσαίο υπέρυθρο στην SED (διασπορά φασματικής ενέργειας) τους, λόγω της απουσίας της καυτής σκόνης. Για την εμφάνιση των κοιλοτήτων σκόνης μπορεί να ευθύνονται αρκετοί μηχανισμοί. Η αύξηση του μεγέθους των κόκκων, η φωτόλυση (μέσω του αστρικού ανέμου), η σάρωση-καθάρισμα μέσω πλανητών και οι αστάθειες στις άκρες των <νεκρών> ζωνών του δίσκου. Τα τελευταία 2 σενάρια περιλαμβάνουν παγίδευση των κόκκων μεγέθους χιλιοστών σε δακτυλιοειδείς ή άμορφες δομές. Η παγίδευση της σκόνης μπορεί να συμβεί σε τοπική κρούση πίεσης (pressure bump) ή στις εξωτερικές περιοχές των δίσκων μέσω της αλληλεπίδρασης ανάμεσα σε σκόνη και αέριο. Οι κοιλότητες μας εξηγούν τις δομές που παρατηρούμε στους δίσκους μετάβασης.

Για την διάκριση ανάμεσα στους παραπάνω μηχανισμούς πρέπει να γνωρίζουμε την διασπορά της σκόνης και του αερίου μέσα στην κοιλότητα σκόνης. Στην περίπτωση της αύξησης των κόκκων, και οι κόκκοι χιλιοστών και το αέριο θα παραμείνουν όπως σε έναν πλήρη δίσκο. Η φωτόλυση θα <καθαρίσει> το αέριο και την σκόνη ταυτόχρονα από μέσα προς τα έξω. Οι νεκρές ζώνες θα αφαιρέσουν σκόνη μόνο μέσω παγίδευσης, και η πυκνότητα του αερίου θα παραμείνει ίδια μέσα στην κοιλότητα. Αντίθετα, ένας συνοδός (πλανήτης) θα ελάττωνε την πυκνότητα του αερίου στην κοιλότητα. Η δομή της πυκνότητας του αερίου φαίνεται από τις γραμμές του (CO) στα υποχιλιοστάμετρα.

Η διαφορά στην ελάττωση της πυκνότητας του αερίου και της σκόνης μέσα στην κοιλότητα μας δείχνει άμεσα την ύπαρξη συνοδού που έχει καθαρίσει την τροχιά του και παγίδευσε την σκόνη χιλιοστών στις άκρες, δημιουργώντας έναν δίσκο στο συνεχές φάσμα χιλιοστών. Τα ισοτόπια του (CO) μας δείχνουν την εκπομπή του αερίου στην κοιλότητα, αλλά και την ύπαρξη δίσκου αερίου. Η ακτίνα της κοιλότητας αερίου είναι σε

κάθε περίπτωση μικρότερη από αυτή της κοιλότητας σκόνης. Αυτό είναι σύμφωνο με το σενάριο <καθαρίσματος> της τροχιάς από πλανήτη και την παγίδευση σκόνης εξωτερικά της τροχιάς του πλανήτη.

Συσσώρευση, δίσκος και μαγνητική δραστηριότητα στην ομάδα TW Hy

Η συσσώρευση, οι εκροές και οι μαγνητικές δραστηριότητες είναι οι βασικές λειτουργίες της εξέλιξης των νεαρών άστρων. Όλα αυτά τα φαινόμενα σχετίζονται με έναν μηχανισμό ανατροφοδότησης στον οποίο η δραστηριότητα της χρωμόσφαιρας και του στέμματος επηρεάζει την εξέλιξη του δίσκου και του σχηματισμού των πλανητών, ενώ η συσσώρευση μάζας από τον δίσκο δρα ως παράγοντας θέρμανσης της αστρικής ατμόσφαιρας. Σε απόσταση 50 pc, η ομάδα TW Hy (TWA) προσφέρεται για την μελέτη του σχηματισμού άστρων μικρής μάζας. Η ηλικία της (8 εκ. έτη) την κάνει να είναι στην κρίσιμη εξελικτική φάση όπου ο δίσκος εξαλείφεται και οι διαδικασίες συσσώρευσης/ εκροής παύουν.

Η χημεία των κοντινών μας δίσκων

Γύρω από κάθε νεαρό αστέρι φαίνεται να βρίσκονται δίσκοι, πλούσιοι σε αέριο και σκόνη. Η δημιουργία πλανητών σε αυτούς εξαρτάται από την μάζα της σκόνης και του αερίου τους. Το βασικό συστατικό των δίσκων, το ψυχρό (H_2), είναι πρακτικά μη ανιχνεύσιμο. Μια προσέγγιση που χρησιμοποιούμε είναι το συνεχές φάσμα της εκπομπής της σκόνης, με την παραδοχή μιας σταθερής αναλογίας αερίου/ σκόνης. Φαίνεται να υπάρχει αρκετή ύλη στους δίσκους για την δημιουργία πλανητικών συστημάτων όμοιων με το ηλιακό σύστημα. Ακόμα και στα μικρότερα αστέρια υπάρχει αρκετή ύλη για την δημιουργία πολλών πλανητών γήινης μάζας, κάτι που επιβεβαιώνεται με την ανακάλυψη βραχώδεις πλανητών σε νάνους τύπου M. Η γραμμή εκπομπής του (CO) αποτελεί πιο άμεσο ανιχνευτή της μάζας του αερίου σε έναν δίσκο, επειδή η αναλογία σκόνης/ αερίου μπορεί να διαταραχτεί από την φωτόλυση και τις <κρυμμένες> κοιλότητες σκόνης. Όμως και αυτή η μέθοδος έχει μόνο μερική ακρίβεια.

Η χημική σύσταση των πλανητών εξαρτάται βασικά από την σύσταση των κόκκων της σκόνης του δίσκου και των πτητικών υλικών του δίσκου, και πως αυτές οι αναλογίες κυμαίνονται ανάλογα την απόσταση από το αστέρι. Σημαντικός παράγοντας για τον σχηματισμό των πλανητών αποτελεί ο διαχωρισμός των πτητικών σε αέρια φάση και πάγο, που καθορίζεται από την ισορροπία της προσρόφησης (το πάγωμα του αερίου σε στερεό, adsorption) και το αντίθετο (εκρόφηση, το λιώσιμο πάγου σε αέριο, desorption). Αποκαλούμε την μέση ακτίνα του δίσκου από το αστέρι, όπου η προσρόφηση επικρατεί της εκρόφησης, γραμμή χιονιού (snow line). Λόγω της εκθετικής εξάρτησης του βαθμού εκρόφησης από την θερμοκρασία, η μετάβαση ανάμεσα στις 2 καταστάσεις της ύλης αναμένεται να είναι απότομη, με αποτέλεσμα την ύπαρξη λεπτής μόνο διαχωριστικής γραμμής. Ο γραμμής χιονιού μπορούν να εμπλουτίσουν τον σχηματισμό πλανητών αποτελεσματικά μέσω συνδυασμού αύξησης της πυκνότητας επιφανειών των κόκκων της σκόνης, γρήγορης αύξησης μεγέθους των κόκκων, παγίδευσης κόκκων και αύξησης του κολλώδους της σκόνης. Η τοποθεσία της γραμμής χιονιού ρυθμίζει την σύσταση των

πλανητών. Θεωρούμε ως γενική γραμμή χιονιού αυτή του (CO), επειδή παγώνει σε χαμηλή θερμοκρασία, μακριά από το αστέρι, και μπορεί να αναλυθεί από το ALMA.

Για να ανακαλύψουμε την προέλευση του νερού στην Γη χρησιμοποιούμε τις μετρήσεις της αναλογίας του δευτερίου σε αυτό, κάτι που προσπαθούμε να ανάγουμε σε τρίτη μέθοδο (μετά από την αναλογία αερίου/ σκόνης και το (CO)) μέτρησης της μάζας του δίσκου.

Οι γραμμές χιονιού των δίσκων.

Οι τοποθεσίες τους εξαρτώνται από την πτητικότητα των συστατικών (π.χ. αν το περισσότερο άζωτο είναι σε μορφή (N₂) ή (NH₃)). Πρόκειται για μία ισορροπία ανάμεσα στο πάγωμα, στον θερμικό ή μη θερμικό ρυθμό εκρόφησης σε διαφορετικές τοποθεσίες του δίσκου (ένας συνδυασμός της πυκνότητας, της θερμοκρασίας και της ακτινοβολίας) και της δυναμικής του δίσκου. Έτσι είναι δύσκολο να προβλέψουμε τις ακριβείς θέσεις των γραμμών χιονιού θεωρητικά. Η γραμμή χιονιού του (CO) βρίσκεται στην ακτίνα του δίσκου όπου η θερμοκρασία πέφτει κάτω από τους 20K. Στους δίσκους των T Tauri και Herbig AE αυτή βρίσκεται σε ακτίνα 20- 150 AU από το αστέρι.

Η μεγάλη ποσότητα (CO) στον δίσκο μας εμποδίζει να ανιχνεύσουμε την γραμμή χιονιού αυτού του μορίου. Έτσι χρησιμοποιούμε μόρια- ανιχνευτές του παγώματος του (CO), τα μόρια (N₂H⁺), (H₂CO), (DCO⁺). Το πρώτο μόριο θεωρείται καλός ανιχνευτής του παγώματος του (CO) επειδή το μονοξείδιο του άνθρακα σε αέρια μορφή επιβραδύνει τον σχηματισμό του (N₂H⁺) και επιταχύνει την καταστροφή του. Η αντίθετη αναλογία των 2 μορίων σε αέρια φάση παρατηρείται σε περιβάλλοντα πρωτοπλανητικών δίσκων. Η εκπομπή του (N₂H⁺) παρατηρήθηκε με το ALMA σε έναν εσωτερικό δακτύλιο στις 30 AU στο αστέρι τύπου T Tauri, TW Hya, δείχνοντάς μας έτσι την γραμμή χιονιού του (CO). Αυτή καθορίστηκε με την χρήση λεπτομερής ανάλυσης της πυκνότητας του δίσκου και της δομής της θερμοκρασίας του στην τοποθεσία του δίσκου με θερμοκρασία 17 K, μερικούς βαθμούς χαμηλότερα από ότι αναμέναμε. Αυτό μπορεί να αντικατοπτρίζει έναν συνδυασμό ανακρίβειας του μοντέλου μας και υπέρβασης της εξάλειψης του (CO) μέσω χημικής μετατροπής του (CO) σε άλλα μόρια σε αυτόν τον σχετικά γηραιό δίσκο.

Σε ένα άλλο αστέρι (HD163296) η γραμμή χιονιού βρέθηκε να είναι 10 AU πιο κοντά στο αστέρι και η θερμοκρασία παγώματος του (CO) να είναι στους 25K. Αυτό οφείλεται σε δυναμική του δίσκου ή στην παρουσία πλούσιου σε νερό πάγου. Το (CO) ενώνεται πιο εύκολα με μόρια νερού παρά με άλλο μόριο (CO), και μια μικρή ποσότητα νερού μπορεί να επηρεάσει την θερμοκρασία παγώματός του. Οι δίσκοι των 2 παραπάνω αστεριών μας έδειξαν ότι δεν μπορούμε να θεωρήσουμε μια μόνο απόσταση και θερμοκρασία για την γραμμή παγώματος του (CO).

Η αναλογία του δευτερίου

Η αναλογία του δευτερίου χρησιμοποιείται ευρέως για τον καθορισμό των θερμικών ιδιοτήτων των τοποθεσιών σχηματισμού πτητικότητας. Τα μόρια εμπλουτίζονται σε δευτέριο σε χαμηλές θερμοκρασίες. Σε αυτό βασίζεται και η θεωρία ότι η μεγάλη αναλογία δευτερίου στο γήινο νερό δείχνει προέλευση από αστεροειδείς ή κομήτες, που σχηματίστηκαν στις πιο ψυχρές μακρινές περιοχές του ηλιακού συστήματος.

Μέχρι τώρα έχουμε ανακαλύψει μόνο 2 είδη μορίων του δευτερίου σε δίσκους, το (DCO⁺) και το (DCN). Η παρουσία του (DCN) σε σύγκριση με το (DCO⁺) στον δίσκο του TW Hya μας δείχνει ότι η αναλογία του δευτερίου αυξάνεται με την ακτίνα του δίσκου.

Ο χάρτης της εκπομπής του (DCO+) παρουσιάζει κενό ή ελάττωση προς τον κεντρικό θερμό δίσκο. Συγκρίνοντας με άλλα αστέρια, βλέπουμε ότι δεν υπάρχει απλή σχέση ανάμεσα στην αναλογία του δευτερίου και την ακτίνα του δίσκου.

Συμπεράσματα

Η χημεία του δίσκου του TW Hya δεν φαίνεται να είναι αντιπροσωπευτική, λόγω προχωρημένης ηλικίας. Άλλοι νεαρότεροι δίσκοι είναι πιο πλούσιοι σε αέρια, και η χημεία ενός δίσκου εξαρτάται από την ηλικία του. Το αν οι διαφορές στους δίσκους οφείλονται σε διαφορετικές αρχικές συνθήκες, διαφορές θερμοκρασιών μέσα στους δίσκους, πυκνότητες και ένταση ακτινοβολίας ή απλά διαφορετικές φάσεις εξέλιξης της χημείας, μας είναι ακόμα άγνωστο.

Περιαστρική ύλη που εκπέμπει ακτίνες X σε νεαρά αστέρια.

Η χημική σύσταση των περιαστρικών δίσκων είναι μία από τις πιο σημαντικές ιδιότητές τους. Ελέγχει πολλά από τα φαινόμενα μεταφοράς ύλης μέσα στον δίσκο όπως η συσσώρευση, η μεταφορά μέσω στροφορμής και ο σχηματισμός πλανητών. Η μεσοαστρική ύλη αποτελείται κυρίως από αέριο, μόνο το 1% είναι σκόνη. Οι πρωτοπλανητικοί δίσκοι έχουν παρόμοια αναλογία. Έτσι αυτή η αναλογία αποτελεί παραδοχή για αυτούς.

Μια μέθοδος ανίχνευσης του αερίου στους δίσκους είναι η απορρόφηση της ακτινοβολίας X. Αυτή είναι ανεξάρτητη από τους χημικούς δεσμούς, γιατί αφορά τα ηλεκτρόνια της εσωτερικής στοιβάδας ενώ οι μοριακοί δεσμοί χρησιμοποιούν τις εξωτερικές στοιβάδες.

Ο δίσκος θραυσμάτων γύρω από τον AU Mic

Το νεαρό (23 εκ. ετών) αυτό αστέρι νάνος M1 βρίσκεται σε απόσταση 10 pc. Έχει έναν δίσκο θραυσμάτων (debris) που τον βλέπουμε στην κόψη του και εκτείνεται για 150 AU. Η μικρή του απόσταση μας επιτρέπει να μετρήσουμε την απορρόφηση του δίσκου χωρίς την παρενόχληση της μεσοαστρικής απορρόφησης. Λόγω μικρής ηλικίας και απόστασης αποτελεί λαμπρή πηγή ακτίνων X. Συμπεραίνουμε ότι ο δίσκος πρέπει να περιέχει περισσότερη σκόνη από αέριο, 0,01 ηλιακές μάζες. Η σκόνη πρέπει να έχει σχηματίσει μεγάλους κόκκους.

Ο πρωτοπλανητικός δίσκος του CTTS AATau

Ο κλασικός αυτός T Ταυιέχει έναν αεριώδη πρωτοπλανητικό δίσκο. Είναι νεαρής ηλικίας αστέρι (2 εκ. ετών) και ο δίσκος του έχει κλίση 75 μοίρες σε εμάς. Έτσι τον περισσότερο χρόνο δεν μας καλύπτει το αστέρι. Η εσωτερική περιοχή του δίσκου όμως είναι παραμορφωμένη και περιοδικά του προκαλεί εκλείψεις. Τα δεδομένα των ακτίνων X μας δείχνουν ότι αυτή η περιοχή είναι πλούσια σε αέριο. Η αναλογία σκόνης/ αερίου είναι όμοια με την μεσοαστρική.

Το RW Aur, ένα σύστημα CTTS στην αμυδρή του φάση.

Το σύστημα αυτό περιέχει 2 CTTS, με περίπου μία ηλιακή μάζα το καθένα. Το σύστημα <σκοτεινίασε> κατά 2- 3 mag στο τέλος του 2014. Βρέθηκε ότι αυτό οφείλεται σε κόκκους σκόνης μεγαλύτερους από 1 μm. Το συμπέρασμα είναι ότι η αναλογία σκόνης/ αερίου είναι μικρότερη της μεσοαστρικής.

Συμπεράσματα

Με την βοήθεια των παρατηρήσεων στις ακτίνες X βρήκαμε σε 3 νεαρά αστέρια μεγαλύτερη, ίση και μικρότερη αναλογία σκόνης/ αερίου από την μεσοαστρική. Ο δίσκος θραυσμάτων του AU Mic περιέχει περισσότερη σκόνη από αέριο, ο πρωτοπλανητικός δίσκος του CTTSAA έχει την ίδια περίπου αναλογία με την μεσοαστρική ύλη και το υλικό γύρω από το διπλό σύστημα Tau RW Aur περιέχει μεγάλους κόκκους και μικρότερη αναλογία σκόνης από την μεσοαστρική ύλη.

Η φωτόλυση (photo evaporation) και η διασπορά των δίσκων

Οι μηχανισμοί εξάλειψης των δίσκων είναι πολλοί. Στο ηλιακό μας σύστημα το αέριο έχει εξαντληθεί σε μεγάλο βαθμό και έμεινε μόνο το 10% της αρχικής μάζας του δίσκου. Η αναλογία συνολικής μάζας σε στερεή ύλη στους πλανήτες και πλανητοειδείς είναι μεγάλη (0,0001 ηλιακές μάζες) σε σύγκριση με την συνολική αέρια ύλη (0,001 ηλ. μάζες), η οποία βρίσκεται σχεδόν αποκλειστικά μέσα στους αέριους πλανήτες. Οι πρωτοπλανητικοί δίσκοι στις περιοχές αστρογέννησης παρουσιάζουν ενδείξεις διασποράς της σκόνης. Τα αστέρια που έχουν δίσκο γίνονται λιγότερα σε χρονοδιάγραμμα 3- 5 εκ. έτη. Η δημιουργία πλανητών στους δίσκους αποτελεί κανόνα για τα αστέρια μικρής και μεσαίας μάζας. Οι μετρήσεις των μαζών των δίσκων σκόνης, συγκρινόμενες με την ελάχιστη μάζα που χρειάζεται για την δημιουργία ενός συστήματος σαν το δικό μας ηλιακό, μας δείχνουν ότι η σκόνη στους δίσκους καταναλώνεται πολύ γρήγορα για την δημιουργία πλανητών. Η διασπορά των αέριων δίσκων φαίνεται να πραγματοποιείται επίσης γρήγορα μετά την δημιουργία του αστεριού και του δίσκου του.

Οι δίσκοι αποτελούνται αρχικά από μεσοαστρική ύλη με το αέριο να κυριαρχεί στην συνολική μάζα, και η πρώτη φάση εξέλιξής τους τελειώνει με την διασπορά του αερίου. Οι μελέτες των νεαρών κοντινών μας δίσκων έδειξαν ότι η εκπομπή του (CO) διακρίνεται μόνο σε αντικείμενα με ηλικία μικρότερη των 10 εκ. ετών. Τα ανώτερα όρια αέριας μάζας των δίσκων καθορίστηκαν μετά από παρατηρήσεις σε πιο εξελιγμένους δίσκους <0,1 μάζα Δία σε ακτίνα ως 40 AU για ηλικίες 5- 30 εκ. έτη και < 1 μάζα Δία σε ακτίνα 100 AU και ηλικία 4- 6 εκ. έτη. Οι παρατηρήσεις είναι σύμφωνες με τους χρόνους διασποράς του αερίου, που είναι το λιγότερο ίσοι με αυτούς της διασποράς της σκόνης. Η παρουσία κελυφών αερίου γύρω από τους εξωπλανήτες και οι μικρές κλίσεις των τροχιών των εσωτερικών πλανητών μας δείχνουν ότι το αέριο συνεχίζει να υπάρχει μετά την εποχή της δημιουργίας των πλανητών. Στην πράξη, η μετανάστευση σε έναν δίσκο αερίου μπορεί να διαμορφώσει τις θέσεις των πλανητικών συστημάτων. Έτσι συμπεραίνουμε ότι η διάρκεια ζωής του αεριώδεις δίσκου είναι μέχρι 10 εκ. έτη.

Η παχύρρευστη συσσώρευση (viscous accretion) στο αστέρι και η φωτόλυση μέσω μεγάλης ενέργειας φωτονίων αστρικής προέλευσης είναι οι επικρατέστεροι μηχανισμοί για την απομάκρυνση της ύλης από τους δίσκους. Το ιξώδες (viscous) εξαλείφει και την σκόνη και το αέριο μέσω απώλειας της στροφορμής (κάνει την ύλη να πέσει στο αστέρι ή να δημιουργήσει πλανήτες). Η γωνιακή τάση, αν είναι αποτελεσματική, μπορεί να απομακρύνει μεγάλους κόκκους και στερεά σώματα κατά την εξέλιξη του δίσκου. Όταν ολοκληρωθεί η δημιουργία πλανητών, η περισσότερη στερεή ύλη θα βρίσκεται μέσα στους πλανήτες. Ένα μεγάλο μέρος του αερίου, κυρίως στον εξωτερικό δίσκο, θα απομακρυνθεί μέσω φωτόλυσης, μέσω της οποίας το αστέρι θερμαίνει το αέριο, προκαλώντας θερμικούς

αστρικούς ανέμους από την επιφάνεια του δίσκου. Αυτό συμβαίνει όταν η θερμική πίεση και η στροφορμή ξεπερνάνε την βαρυτική έλξη, με αποτέλεσμα το αέριο να θερμαίνεται σε θερμοκρασίες (ταχύτητες) διαφυγής. Από την πυκνότητα και την θερμοκρασία του ανέμου εξαρτάται ο ρυθμός απώλειας της μάζας. Ανάλογα το μήκος κύματος των φωτονίων (κοντινό- μακρινό υπεριώδες, μαλακές- σκληρές ακτίνες X) ποικίλει η θέρμανση και η ικανότητα διείσδυσης στο αέριο. Έχει σημασία και η χημεία του δίσκου. Ιδίως οι μακρινές υπεριώδεις και οι σκληρές ακτίνες X είναι αποτελεσματικές στην φωτόλυση και διάλυση του δίσκου.

Η φωτόλυση μέσω μακρινού υπεριώδους (FUV)

Η θέρμανση μέσω FUV εξαρτάται από την εξέλιξη των πολύ μικρών κόκκων και των πολυκυκλικών αρωματικών υδρογονανθράκων (PAH) στον δίσκο. Το αέριο θερμαίνεται άμεσα από την FUV μέσω συγκρούσεων των ηλεκτρονίων μεγάλης ενέργειας που παράγονται λόγω φωτοηλεκτρικής εκτίναξης (ejection) από τους μικρούς κόκκους. Όσο η πυκνότητα της επιφάνειας του δίσκου μειώνεται και οι κόκκοι συγκρούονται, πήζουν και τεμαχίζονται μέσα στον δίσκο, αναμένεται να επηρεαστεί η ποσότητα των μικρών κόκκων. Αν αυτή μειωθεί, ο ρυθμός θέρμανσης και η θερμοκρασία θα είναι χαμηλότεροι, αλλά από την άλλη η αδιαφάνεια στην FUV θα μειωθεί. Η μεγαλύτερη διεισδυτικότητα της FUV θα έχει ως αποτέλεσμα την μεγαλύτερη πυκνότητα ροής. Αφού ο ρυθμός φωτόλυσης εξαρτάται από την πυκνότητα και την θερμοκρασία, η επίδραση μιας μειωμένης ή αυξημένης αφθονίας των μικρών κόκκων στην απώλεια μάζας του δίσκου δεν φαίνεται άμεσα.

Εφόσον η διασπορά του μεγέθους των κόκκων μεταβάλλεται σημαντικά με τον χρόνο, τα χρονοδιαγράμματα της φωτόλυσης αυτών των μοντέλων είναι συγκρίσιμα με μοντέλα χωρίς εξέλιξη της σκόνης. Ένα ενδιαφέρον συμπέρασμα του συνδυασμού της εξέλιξης της σκόνης με την φωτόλυση είναι ότι η αναλογία αερίου/ σκόνης στον δίσκο αλλάζει όσο ο δίσκος εξελίσσεται και διαμελίζεται. Η περισσότερη σκόνη παραμένει στον δίσκο όσο το αέριο απομακρύνεται. Αυτό συμβαίνει επειδή 1) Οι πυκνότητες του αερίου στο ρεύμα από την φωτόλυση είναι πολύ μικρές για να αναγκάσει ακόμη και τους μικρότερους κόκκους να συγκρουστούν σε συνδυασμό με το αέριο και 2) Η απώλεια μάζας μέσω της φωτόλυσης είναι συγκρίσιμη με την απώλεια μέσω συσσώρευσης. Η μεγάλη αναλογία σκόνης/ αερίου είναι απαραίτητη για πολλούς μηχανισμούς σχηματισμού πλανητών.

Οι δίσκοι γύρω από κοντινά νεαρά αστέρια

Η θεωρία της διασποράς των δίσκων είναι πλέον καλά κατανοητή. Αν ο ρυθμός απώλειας μάζας του δίσκου είναι μεγάλος (10^{στη-9} με 10^{στη-10} ηλιακές μάζες το έτος), τότε η φωτόλυση έχει την ισχύ για να γίνει αιτία της δημιουργίας των πλανητών. Αν οι απώλειες είναι μικρότερες (10^{στη -11} - 10^{στη-10} ηλ. μάζες το έτος) τότε ο σχηματισμός των πλανητών δεν οφείλεται στην φωτόλυση, όμως η δυναμική και το σχήμα του πλανητικού συστήματος επηρεάζονται από την παρουσία ή όχι του αερίου στα τελευταία στάδια σχηματισμού πλανητών.

Τέλος, οι εκλάμψεις ακτίνων X δεν επηρεάζουν τους δίσκους, αλλά οι μακροχρόνιες διακυμάνσεις (πάνω από 100 έτη, που είναι το μέσο χρονοδιάγραμμα θέρμανσης ή ψύξης του δίσκου) μπορεί να επηρεάσουν τον χρόνο διασποράς.

3) Δίσκοι θραυσμάτων (debris disks)

Η αναλογία δίσκων θραυσμάτων των νάνων M σε κοντινές νεαρές ομάδες κοινής κίνησης (moving groups, MG)

Η συχνότητα των παρατηρήσιμων δίσκων θραυσμάτων εξαρτάται από την ηλικία και τον φασματικό τύπο του αστεριού. Γενικά είναι συχνότεροι γύρω από νεαρά μεγάλης μάζας αστέρια. Από την ηλικία των 10 εκ. ετών ως αυτή των 100 εκ. ετών παρουσιάζεται μια ελάττωση από 40% στο 10% της παρουσίας τους στα αστέρια FGK. Μόνο 4 MG βρέθηκαν να έχουν δίσκους θραυσμάτων σε αστέρια τους. Το συνολικό ποσοστό αναλογίας των αστεριών αυτών αποτελεί το 6% (9 στα 151) των MG και 11% αν οι δίσκοι μετάβασης είναι τελικά και αυτοί δίσκοι θραυσμάτων.

Για αστέρια ηλικίας <40 εκ. ετών βρήκαμε στο 8% δίσκους θραυσμάτων και σε 38 μεγαλύτερης των 40 εκ. ετών ηλικίας δεν ανιχνεύτηκαν τέτοιοι δίσκοι. Για τους νάνους τύπου M το ποσοστό μετά τα 40 εκ. έτη είναι στο 6%. Εκτός από το ότι οι νάνοι είναι δύσκολα παρατηρήσιμοι λόγω μικρής λαμπρότητας, οι δίσκοι τους φαίνεται να έχουν μικρότερα χρονοδιαγράμματα εξέλιξης από ότι στα μεγαλύτερα αστέρια.

Αποτελούν οι δίσκοι θραυσμάτων 2 διαφορετικών θερμοκρασιών σημάδι άμεσης απεικόνισης πλανητών?

Οι δίσκοι θραυσμάτων αποτελούν σημάδι επιτυχημένου σχηματισμού πλανητών. Η γωνιακή δομή των περισσότερων ζωνών με πλανητοειδείς μας είναι άγνωστη. Μπορεί να βρίσκονται σε πολλαπλά δακτυλίδια του δίσκου, ανάλογα με την ζώνη των αστεροειδών και την ζώνη Kuiper στο ηλιακό μας σύστημα, αλλά μπορεί και να επεκτείνονται σημαντικά με παρόμοιο τρόπο με τους αεριώδεις πρωτοπλανητικούς δίσκους (το στάδιο πριν τον δίσκο θραυσμάτων). Η υψηλή ανάλυση στις υπέρυθρες πετυχαίνεται σπάνια στις παρατηρήσεις μας, έτσι είναι δύσκολο να συμπεράνουμε την δομή μέσω της συνήθους μεθόδου, την παρατήρηση υπέρβασης στο υπέρυθρο. Η κύρια δυσκολία είναι ότι η θερμοκρασία ισορροπίας ενός κόκκου σκόνης εξαρτάται από την απόστασή του από το αστέρι και το μέγεθός του, καθώς και τις οπτικές ιδιότητές του (π.χ. αντανακλαστικότητα). Έτσι η ακτίνα ενός μη αναλυμένου δίσκου θραυσμάτων δεν μπορεί να καθοριστεί ξεκάθαρα από την θερμοκρασία της παρατηρήσιμης εκπομπής.

Οι διασπορές φασματικής ενέργειας (spectral energy distribution, SED) μερικών δίσκων θραυσμάτων μας δείχνουν εκπομπή σκόνης 2 διαφορετικών θερμοκρασιών, που ίσως να σημαίνουν ότι υπάρχουν 2 διαφορετικές ζώνες σκόνης σε ένα εύρος ακτίνων από το άστρο. Ένα ερώτημα είναι αν ανάμεσα στις ζώνες υπάρχουν πλανήτες (που έχουν καθαρίσει την περιοχή τους από την σκόνη).

Σημαίνουν οι 2 διαφορετικές θερμοκρασίες ότι υπάρχουν 2 ζώνες?

Υποθέτοντας ότι το ελάχιστο μέγεθος των κόκκων καθορίζεται από την πίεση της ακτινοβολίας του αστεριού, οι διαφορετικές θερμοκρασίες στους 2 δίσκους γύρω από αστέρια τύπου A προέρχονται από πολλαπλές ζώνες. Σε μερικούς δίσκους έχει επιβεβαιωθεί η παρουσία δίσκων 2 θερμοκρασιών μέσω παρατηρήσεων υψηλής ανάλυσης, και περιλαμβάνουν αστέρια τύπου A αλλά και όμοια με τον Ήλιο μας.

Η εξέλιξη των πολλαπλών ζωνών

Μια πιθανή προέλευση των δίσκων 2 θερμοκρασιών μπορεί να είναι η αναμενόμενη εξέλιξη μέσω συγκρούσεων. Για παράδειγμα, αν προκύψουν δίσκοι 2 θερμοκρασιών από μια ενιαία ζώνη και δεν αλλάξει σημαντικά η σύσταση της ύλης, δεν αναμένεται σημαντική εξέλιξη της αναλογίας της θερμοκρασίας και της λαμπρότητας ανάμεσα στις ζώνες. Αυτή η ομοιότητα αναμένεται και αν οι θερμές ζώνες αποτελούνται από υλικό της εξωτερικής ζώνης, σκεδασμένο από πλανήτες. Τότε η λαμπρότητα της εσωτερικής ζώνης συνδέεται λογικά με αυτήν της εξωτερικής. Από την άλλη, αν οι δίσκοι 2 θερμοκρασιών προέρχονται από δύο ανεξάρτητες ζώνες (όπως στο ηλιακό μας σύστημα) αυτές αναμένεται να εξελιχθούν, μέσω συγκρούσεων, σε διαφορετικό βαθμό. Ο βαθμός εξέλιξης μέσω συγκρούσεων σε έναν δίσκο εξαρτάται αυστηρά από την ακτίνα της τροχιάς των σωμάτων, και η λαμπρότητα μιας ζώνης θα αρχίσει να φθίνει όταν αρχίσουν να συγκρούονται τα μεγαλύτερα σώματα, κάτι που γίνεται πιο καθυστερημένα στην εξωτερική ζώνη. Για αυτό σε 2 ζώνες με ίδια αρχική λαμπρότητα πρέπει η εσωτερική να φθίνει γρηγορότερα, και αν όλα τα άλλα χαρακτηριστικά τους εξελίσσονται το ίδιο και στις 2 ζώνες, μακροχρόνια η διαφορά λαμπρότητας ανάμεσα στις 2 ζώνες καθορίζεται από την διαφορά των ακτίνων των τροχιών τους.

Το βασικό μας συμπέρασμα είναι ότι οι περισσότεροι δίσκοι θραυσμάτων με 2 θερμοκρασίες περιέχουν 2 ζώνες. Τα μοντέλα των συγκρούσεων μας δείχνουν ότι αυτές μπορεί να είναι ανεξάρτητες με κανονική εξέλιξη μέσω των συγκρούσεων. Σε άλλα συστήματα η εσωτερική ζώνη μπορεί να συνδέεται με την εξωτερική μέσω προς τα μέσα σκέδασης υλικού από πλανήτες. Ακόμα δεν μπορούμε να καθορίσουμε τα πλάτη αυτών των ζωνών.

Το μοντέλο για τον γιγάντιο δίσκο γύρω από τον υπό-αστρικό συνοδό J1407b

Οι εκτεταμένες από μήνες ως έτη εκλείψεις των αστεριών μαρτυρούν την ύπαρξη μακρόβιων σκοτεινών δακτυλιδιών γύρω από αυτούς. Το αστέρι J1407 είναι 16 εκ. ετών, με μάζα 0,9 ηλιακές και τύπου K, στα 133 pc. Συνδέεται με την ομάδα Sco-Cen OB. Το αστέρι παρουσίασε μια έκλειψη διάρκειας 56 ημερών το 2007 με σκίαση 95%. Μια πρόταση είναι αυτή να προκλήθηκε από ένα μεγάλο σύστημα δακτυλιδιών γύρω από έναν μέχρι σήμερα άορατο συνοδό, τον J1407b. Η καμπύλη φωτός μιας πηγής με πεπερασμένο μέγεθος γωνίας (δηλαδή ο αστρικός δίσκος του κυρίως άστρου) πίσω από ένα σύστημα δακτυλιδιών με κλίση δεν είναι συμμετρική στο χρόνο. Για κάθε όριο του δίσκου, η κλίση της καμπύλης φωτός εξαρτάται από το μέγεθος του αστεριού και την γωνία μεταξύ της τοπικής εφαπτόμενης της άκρης του δίσκου και της κατεύθυνσης της κίνησης. Δομές δακτυλιδιών με διάμετρο μικρότερη της αστρικής εξαλείφονται οπτικά από τον αστρικό δίσκο.

Οι δακτύλιοι πρέπει να θεωρούνται εναλλακτικά διάφανοι και μη. Ο αριθμός των άκρων των δακτυλιδιών στην καμπύλη φωτός εκτιμάται από τον αριθμό των διακυμάνσεων σε αυτήν. Σε όλες τις λύσεις του μοντέλου υπάρχουν καθαρά χάσματα από την παρουσία πλανητών. Το σύστημα δακτυλιδιών του J1407 είναι μεγαλύτερο από το όριο Roche του για τον συνοδό του. Η μέγιστη εκτιμώμενη μάζα του συνοδού είναι 23,8 φορές του Δία και η μέγιστη περίοδος 13,3 έτη. Παρατηρούμε ένα χάσμα του δίσκου με μεγέθους 59- 63 εκ. χιλιόμετρα.

Θερμοί δίσκοι θραυσμάτων με την επισκόπηση WISE και το HST

Οι περιαστρικοί δίσκοι είναι οι κυριότερες ενδείξεις για την ύπαρξη πλανητικού συστήματος. Οι πλανήτες και οι πλανητοειδείς (αστεροειδείς, κομήτες) σχηματίζονται λίγο μετά την δημιουργία του αστεριού. Ο αρχικός δίσκος από αέριο και σκόνη που μέσα του δημιουργείται το αστέρι, εξαλείφεται μετά από 5- 10 εκ. έτη μέσω της συσσώρευσης στο αστέρι, τον σχηματισμό γιγάντιων πλανητών, τους πίδακες έκλυσης υλικού και την φωτόλυση. Τότε εμφανίζεται ένας δίσκος θραυσμάτων που περιέχει κόκκους σκόνης με προέλευση τις συγκρούσεις ανάμεσα στους πλανητοειδείς και την εξάτμιση των κομητών που πλησιάζουν το αστέρι. Αυτοί οι κόκκοι σύντομα εκδιώκονται από τον δίσκο λόγω πίεσης της αστρικής ακτινοβολίας και του αστρικού ανέμου, έτσι πρέπει ο πληθυσμός τους να ανανεώνεται μέσω των συγκρούσεων, ώστε να δικαιολογείται η χρονική περίοδος ύπαρξης του δίσκου θραυσμάτων. Άρα η ύπαρξη ενός τέτοιου δίσκου σημαίνει την παρουσία πλανητικού συστήματος.

Οι δίσκοι αυτοί μας προδίδουν την παρουσία πλανητών που δεν θα μπορούσαμε να δούμε. Η βαρυτική επίδρασή τους δημιουργεί κενά (χάσματα) στους δίσκους. Το αστέρι Fomalhaut έχει ένα δίσκο θραυσμάτων με 133 AU εσωτερική ακτίνα, 25 AU πλάτος, απότομες εσωτερικές άκρες και ένα κέντρο με απόκλιση 15 AU από το αστέρι- όλα αυτά αποτελούν ενδείξεις πλανητών. Ένας πλανήτης του έχει απεικονιστεί με το HST. Πολλά από τα αστέρια όπου έχουν απεικονιστεί άμεσα εξωπλανήτες έχουν δίσκο θραυσμάτων. Το νεαρό της ηλικίας αυτών των δίσκων σημαίνει την ύπαρξη νεαρών λαμπρών (ακόμα πολύ θερμών) πλανητών που είναι πιθανό να απεικονισθούν άμεσα.

Οι δίσκοι θραυσμάτων σε κοντινές νεαρές κινούμενες ομάδες (YMO, young moving groups) με την συστοιχία ALMA

Το ανακάτεμα των δίσκων θραυσμάτων

Οι πλανητοειδείς στους πρωτοπλανητικούς δίσκους έχουν τροχιές μικρής εκκεντρικότητας και κλίσης λόγω του φαινομένου της απόσβεσης του αερίου. Για αυτό οι συγκρούσεις ανάμεσά τους συμβαίνουν με σχετικά μικρές ταχύτητες που έχουν ως αποτέλεσμα την συγχώνευσή τους σε μεγαλύτερα σώματα, ακόμα και μετά την ελάττωση του διαθέσιμου αερίου. Για να συμβούν καταστροφικές συγκρούσεις, που να έχουν ως αποτέλεσμα την ικανή παραγωγή σκόνης, πρέπει να διαταραχθούν (ανακατευτούν) οι κινήσεις των πλανητοειδών. Η θεωρία του αυτό- ανακατέματος (self- stirring) προβλέπει ότι σώματα με το μέγεθος του Πλούτωνα που είναι εμβαπτισμένα στον εξωτερικό δίσκο μπορούν να κινήσουν μια ριπή συγκρούσεων μέσω διαταραχής των τροχιών κοντινών τους πλανητοειδών. Επειδή οι μεγάλοι πλανητοειδείς σχηματίζονται πιο αργά στις εξωτερικές περιοχές των δίσκων, η ριπή συγκρούσεων (collisional cascade) πυροδοτείται πρώτα στον εσωτερικό δίσκο και αργότερα η ενεργή παραγωγή σκόνης μετατίθεται προς τα έξω. Όσο εξελίσσεται ο δίσκος, οι πλανητοειδείς στο εσωτερικό του συνθλίβονται, με αποτέλεσμα η παραγωγή σκόνης εκεί να μειώνεται σταδιακά. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της πυκνότητας της σκόνης προς τα έξω στον δίσκο, με το μέγιστο της πυκνότητας σε σκόνη να

εμφανίζεται στην περιοχή που σχηματίστηκαν μόλις τα σώματα μεγέθους του Πλούτωνα. Αυτό είναι πολύ διαφορετικό με τα προφίλ επιφανειακής πυκνότητας που παρατηρούμε σε πρωτοπλανητικούς δίσκους. Ο ρυθμός της προς τα έξω διάδοσης της διαταραχής εξαρτάται από την επιφανειακή πυκνότητα του δίσκου. Σε έναν αρχικά πυκνό, μεγαλύτερης μάζας δίσκο η εξωτερική διασπορά είναι μεγαλύτερη.

Μπορεί επίσης ένας γιγάντιος πλανήτης ή ένας αστρικός συνοδός να επηρεάσει την κίνηση των πλανητοειδών μέσω κοσμικής διατάραξης (secular perturbations). Αν το σώμα που φέρνει την διαταραχή βρίσκεται πιο κοντά στο αστέρι από την ζώνη των πλανητοειδών, τότε ενεργοποιείται επίσης ένας μηχανισμός από μέσα προς τα έξω διατάραξης του δίσκου με χρονοδιάγραμμα ακόμη και μικρότερο από αυτό του αυτό- ανακατέματος.

Οι υπογραφές των αλληλεπιδράσεων δίσκων- πλανητών

Οι κόκκοι σκόνης των θραυσμάτων και οι πλανητοειδείς που τους παράγουν είναι από τα μικρότερα σώματα ενός πλανητικού συστήματος. Όσο εξελίσσεται το σύστημα, οι πλανήτες και ο δίσκος πλανητοειδών μπορούν να αλληλεπιδράσουν ποικίλλα. Τα διαφορετικά είδη βαρυτικής διατάραξης μπορούν να προκαλέσουν ποικίλλα σημάδια στον δίσκο, όπως σπείρες, χάσματα ή συμπυκνώσεις. Οι κοσμικές διαταραχές από έναν μη ευθυγραμμισμένο ή εκκεντρικής τροχιάς πλανήτη μπορούν να προκαλέσουν παραμορφώσεις (warps) ή σπείρες στον δίσκο. Αυτές οι δομές διαδίδονται μέσα στον δίσκο με την βαρυτική επιρροή να εκτείνεται σε όλο και πιο εξωτερικές περιοχές του. Αναγκάζοντας τους μακρινούς πλανητοειδείς να ακολουθήσουν δια τέμνουσες τροχιές μπορεί αυτές να αποτελούν τα αίτια των συχνότερων συγκρούσεων που εμφανίζονται με μεγαλύτερες ταχύτητες, με τελικό αποτέλεσμα την ριπή μέσω συγκρούσεων. Μετά από ένα χρονικό διάστημα, οι κοσμικές διαταραχές από έναν έκκεντρο τροχιάς πλανήτη θα κάνουν όλον τον δίσκο έκκεντρο.

Οι σημαντικές διαταραχές εμφανίζονται όταν οι δυναμικές συχνότητες, τυπικά της βασικής κίνησης, αποτελούν απλό ακέραιο του λόγου μεταξύ τους. Αυτές μπορεί να οδηγήσουν ή σε σταθεροποίηση ή σε αποσταθεροποίηση των τροχιών. Ως συνέπεια, η περιοχή κοντά στην τροχιά του πλανήτη γίνεται χαοτική και οι κόκκοι σκόνης εκεί είναι βραχύβιοι. Για αυτό η χαοτική ζώνη είναι κενή και σχηματίζεται ένα χάσμα. Στο ηλιακό μας σύστημα, το χάσμα Kirkwood στην ζώνη των αστεροειδών σχηματίστηκε λόγω των διαταραχών από την παρουσία του Δία. Μπορεί να προκύψουν περιοχές με υπερπληθυσμό όπως οι Τρωατικοί αστεροειδείς (1-1 βαρυτική σχέση τροχιάς με τον Δία) ή τους Πλουτίνο (3-2 σχέση με τον Ποσειδώνα). Σε έναν δίσκο θραυσμάτων προτείνονται δύο διαφορετικοί μηχανισμοί μετανάστευσης σωμάτων για την δημιουργία των συμπυκνώσεων στην διασπορά της σκόνης. Η μετανάστευση ενός πλανήτη προς τα έξω μπορεί να παγιδέψει πλανητοειδείς στις εξωτερικές περιοχές. Η διάβρωση αυτών των πλανητοειδών θα φέρει την αύξηση της σκόνης. Οι μικρότεροι κόκκοι θα δραπετεύσουν από αυτές τις περιοχές μέσω της πίεσης της ακτινοβολίας. Τα μεγάλα όμως σώματα παραμένουν παγιδευμένα στην εξωτερική αυτή περιοχή και την εμπλουτίζουν, κάτι που φαίνεται στα υποχιλιοστόμετρα και στα χιλιοστόμετρα (μήκη κύματος). Εναλλακτικά, σε αυτούς τους λεπτούς δίσκους θραυσμάτων οι κόκκοι σκόνης παράγονται από μια εξωτερική ζώνη πλανητοειδών, και μπορούν να εισχωρήσουν στο εσωτερικό του δίσκου με σπειροειδής κίνηση, μέσω της επίδρασης ενός εσωτερικού πλανήτη.

Οι παρατηρήσεις του ALMA στον δίσκο του Fomalhaut μας δείχνουν ότι η σκόνη μεγέθους χιλιοστόμετρων συγκεντρώνεται σε έναν πολύ στενό κάθετο λεπτό δακτύλιο, που η

εσωτερική και η εξωτερική του άκρη είναι πολύ <κολοβή> (truncated). Αυτή η μορφολογία του δίσκου μπορεί να εξηγηθεί με την παρουσία δύο πλανητών- βοσκών (shepherding planets, όπως κάποιοι δορυφόροι ανάμεσα στους δακτυλίους του Κρόνου) που βρίσκονται στο εσωτερικό και στο εξωτερικό άκρο, που πρέπει να έχουν μικρότερες μάζες από 3 Γήινες. Ανάλογα παραδείγματα αστεριών με σημάδια στους δίσκους θραυσμάτων τους υπάρχουν πολλά (Vega, εEri, HD107146), με δομές συμπυκνωμάτων και χάσματα.

Οι παρατηρήσιμες ασυμμετρίες των δίσκων και οι δομές τους μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον εντοπισμό των πλανητών των νεαρών άστρων και την κατανόηση του ιστορικού σχηματισμού των πλανητών.

Αέριο σε νεαρούς δίσκους θραυσμάτων

Οι δίσκοι θραυσμάτων αναμένεται να είναι φτωχοί σε αέριο, με αναλογία αερίου/ σκόνης πολύ χαμηλότερη από αυτή των πρωτοπλανητικών δίσκων (που έχουν περίπου την αναλογία του αρχικού νεφελώματος). Μόνο σε 8 δίσκους θραυσμάτων έχουμε ανακαλύψει αέριο. Ανήκουν σε ομάδες ίδιας κίνησης και σχεδόν όλοι είναι αστέρια τύπου A. Η προέλευση του αερίου σε αυτούς τους δίσκους είναι αβέβαιη. Στις περισσότερες περιπτώσεις το αέριο μπορεί να είναι δευτερογενές, δηλαδή όπως οι κόκκοι σκόνης να ανανεώνεται και το αέριο συνέχεια μέσω διάβρωσης των μεγαλύτερων σωμάτων. Οι συγκρούσεις ανάμεσα πλανητοειδών με πάγο στην επιφάνειά τους, η εξάτμιση των κομητών ή των κόκκων σκόνης με πάγο που κινήθηκαν προς το άστρο και η απορρόφηση φωτονίων που προκαλείται σε στερεά, όλα αυτά μπορούν να οδηγήσουν στην απελευθέρωση αερίων. Όμως λόγω της μικρής ηλικίας του δίσκου δεν μπορούμε να αποκλείσουμε ότι κάποιοι από αυτούς τους δίσκους είναι υβριδικόι, με την έννοια ότι διατήρησαν ένα μέρος από το αρχικό τους αέριο, ενώ η σκόνη έχει δευτερογενείς προέλευση.

Η χαρτογράφηση της σκόνης και του αερίου στον δίσκο του βPic μας δείχνει ότι η χωρική διασπορά των δυο αυτών συστατικών είναι παρόμοια. Η μικρή διάρκεια ζωής του (CO), που ανιχνεύτηκε στον δίσκο, αυξάνει τις πιθανότητες το αέριο να είναι δευτερογενές. Το (CO) δεν μοιράζεται τις ίδιες περιοχές του δίσκου με τους κόκκους χιλιοστομέτρων και κατά επέκταση τους πλανητοειδείς, αλλά υπάρχει ένας εσωτερικός καθαρός από σκόνη δίσκος αερίου. Ακόμα, το (CO) συνολικά στον δίσκο είναι χιλιάδες φορές περισσότερο από ότι στο ίδιο το αστέρι. Αυτό δεν μπορεί να εξηγηθεί με το σενάριο της δευτερογενούς προέλευσης, ο δίσκος πρέπει να έχει αποθέματα του αρχικού αερίου. Έτσι πρόκειται για τον πρώτο διαπιστευμένο υβριδικό δίσκο. Η φάση του πλούσιου σε αέριο δίσκου μπορεί να είναι σημαντικά μεγαλύτερη σε αυτό το αστέρι, κάτι που επηρεάζει το χρονοδιάγραμμα δημιουργίας των πλανητών.

Οι κοσμικές ακτίνες και η προέλευση των πτητικών υλών στους πρωτοπλανητικούς δίσκους

Οι παρατηρήσεις των κομητών του ηλιακού μας συστήματος μας προσφέρουν μια ανομοιογενείς βάση δεδομένων, με κομήτες διαφορετικών κατηγοριών (οικογένεια του Δία, νέφος του Oort) και από παρατηρήσεις που έγιναν σε διαφορετικά στιγμιότυπα πριν και μετά το αφήλιο ενός κομήτη. Το νερό είναι το κυρίαρχο συστατικό τους (80%) και ακολουθούν τα (CO), (CO₂), (CH₃OH), (CH₄), (NH₃), (H₂CO), κατά σειρά της αφθονίας τους.

Υπάρχει διαφορά δυο τάξεων μεγέθους ανάμεσα στους κομήτες για την αναλογία νερού/ (CO) και μιας για τις αφθονίες των υπόλοιπων μορίων. Η αιτία μπορεί να είναι οι διαφορετικοί οδοί εξέλιξης, τα ιστορικά εξέλιξης, οι τοποθεσίες εξέλιξης ή οι διαφορετικές φάσεις της τροχιάς των κομητών κατά την λήψη των δεδομένων. Χωρίς την παρουσία σημαντικών πηγών ιονισμού στους δίσκους δεν μπορούμε να αναμένουμε να σχηματίσει το πρωταρχικό υλικό τα πολύπλοκα μόρια που παρατηρούμε στους κομήτες. Για αυτό προτείνουμε την κοσμική ακτινοβολία ως παράγοντα σημαντικής πηγής ιονισμού στις περιοχές όπου σχηματίζονται κομήτες.

Οι κοσμικές ακτίνες διεισδύουν βαθιά (πέρα από 1 AU) στους πρωτοπλανητικούς δίσκους των τυπικών T- Tauri αστεριών, ανάλογα την επιφανειακή πυκνότητα. Σε αυτές τις περιοχές αναμένουμε να σχηματίζονται οι πλανητοειδείς από μικρούς κόκκους σκόνης, με ή χωρίς πάγο. Η σύσταση του πάγου που σχηματίζεται κατά την φάση του πρωτοπλανητικού δίσκου μπορεί να επηρεαστεί πολύ από την κοσμική ακτινοβολία ως παράγοντα χημικής εξέλιξης (cosmic ray driven chemistry). Αυτή περιλαμβάνει διαδικασίες δευτερεύοντος ιονισμού που μπορεί να ενισχυθεί κατά μια τάξη μεγέθους αν η κοσμική ακτινοβολία προκαλέσει ένα πεδίο υπεριώδης ακτινοβολίας.

Προτείνουμε ένα πιθανό σενάριο σχηματισμού των καλυμμάτων πάγου στις επιφάνειες των κόκκων. 1) Τα πρώτα καλύμματα δημιουργούνται κατά την φάση του μοριακού νέφους, διάρκειας μερικών εκ. ετών. Σε αυτή την φάση, οι χημικές αντιδράσεις στην επιφάνεια των κόκκων ήδη οδήγησε στον σχηματισμό πολύπλοκων οργανικών μορίων όπως η μεθανόλη. 2) Αυτοί οι πάγοι δημιουργούνται κατά τον σχηματισμό του συστήματος δίσκου- αστέρι, που διαρκεί λιγότερο από 1 εκ. έτη. 3) Κατά την φάση του πρωτοπλανητικού δίσκου σχηματίζεται ένα δεύτερο κάλυμμα πάγου. Το χρονοδιάγραμμα της εξέλιξης σε αυτή την φάση είναι μέχρι λίγα εκ. έτη. Αυτά τα καλύμματα πάγου σχηματίζονται σε στρώματα των οποίων η σύσταση εξαρτάται αυστηρά από την απόσταση των κόκκων από το πρώτο-αστέρι και την ισχύ του τοπικού πεδίου ιονισμού. Αυτό προκαλεί και μια αλλαγή στην διασπορά των μεγεθών των κόκκων, που με την σειρά της επηρεάζει το προφίλ θερμοκρασίας του δίσκου.

Δακτύλιοι C₂H (αμμωνίας) στους μοριακούς δίσκους γύρω από τα TW Hya και V4046 Sgr

Μπορέσαμε να εντοπίσουμε το μόριο της αμμωνίας στους πλούσιους σε μόρια δίσκους γύρω από τα παραπάνω αστέρια. Τα αστέρια αυτά είναι κλασικοί T Tauri που συσσωρεύουν ακόμα υλικό που σχηματίζει δίσκους, με ακτίνα 45 AU στο πρώτο αστέρι και 70 AU στο δεύτερο διπλό αστέρι με μεγαλύτερο δίσκο. Υποθέτουμε ότι η εκπομπή της αμμωνίας ανιχνεύει την ακτινοβολία στα λεπτά στρώματα του εξωτερικού δίσκου, που προέρχεται από τα φωτόνια υψηλής ενέργειας που εκπέμπει το αστέρι. Το (C₂H) είναι μόριο που παράγεται από την διάσπαση πολύπλοκων υδρογονανθράκων και οργανικών μορίων, προδίδοντας έτσι το πεδίο ακτίνων UV και X. Η αφθονία της αμμωνίας αυξάνεται μετά το όριο του χιονιού, σε αραιές περιοχές των δίσκων. Η ύπαρξη δακτυλίου αμμωνίας ανιχνεύει την μερικώς αποτελεσματική καταστροφή των κόκκων σκόνης και την διάλυση των υδρογονανθράκων, κυρίως του (C₂H₂), που προέρχεται από το λιώσιμο του πάγου στους κόκκους.

Ο δίσκος θραυσμάτων (debris) γύρω από το HD76582.

Η παρουσία ενός ψυχρού δίσκου σκόνης γύρω από το παραπάνω αστέρι κυρίας ακολουθίας και μέσης ηλικίας αποτελεί ένδειξη για την ύπαρξη πλανητικού συστήματος. Οι δίσκοι θραυσμάτων (από θραύσματα λόγω συγκρούσεων αστεροειδών και κομητών) αποτελούνται από δακτυλίους παγωμένων και βραχώδεις σωμάτων με μεγέθη από κόκκους σκόνης ως πλανητοειδείς διαμέτρου λίγων χιλιομέτρων. Είναι παρόμοιοι με την ζώνη Edgeworth- Kuiper στο ηλιακό μας σύστημα. Η κατανόηση αυτών των δομών είναι βασική για να έχουμε την πλήρη εικόνα του σχηματισμού και της εξέλιξης των πλανητικών συστημάτων.

Τυπικά ανακαλύπτουμε αυτούς τους δίσκους μέσω της υπέρβασης (excess) στο υπέρυθρο πάνω από τις τιμές στο μοντέλο της αστρικής ατμόσφαιρας (κοντινό υπέρυθρο ως υπό-χιλιοστόμετρα). Έχουμε ανακαλύψει τέτοιους δίσκους στο 20% των αστεριών της κυρίας ακολουθίας. Μας περιορίζει η δυσκολία της ανάλυσης των δίσκων, ανάλογα την κλίση τους προς εμάς. Το αστέρι που αναφέρουμε βρίσκεται στα 46 pc από εμάς και είναι κατηγορίας F0 IV. Διακρίνουμε μεγάλη διασπορά των μεγεθών των κόκκων της σκόνης και ο δίσκος φαίνεται εκτεταμένος.

Με την επισκόπηση WISE All- Sky Survey ανακαλύψαμε υπερβάσεις στο υπέρυθρο σε 237 αστέρια μέχρι 75 pc απόσταση. Ο απόλυτος αριθμός των δίσκων θραυσμάτων σε αυτά περιορίστηκε στο 25%. Υπέρβαση μετρήσαμε στο 22% των αστεριών τύπου A και μόλις 1,8 % για τα αστέρια FGK, κάτι όμως που επηρεάζεται από την ευαισθησία των οργάνων μας.

Ο διαμελισμός του δίσκου στον HD141569A

Το παραπάνω διπλό αστέρι έχει ηλικία 5 εκ. έτη και είναι τύπου B9,5V/A0Ve στα 116 pc απόσταση. Με μάζα 2 ηλιακές το σύστημα φαίνεται να βιώνει την εξέλιξη από πρωτοπλανητικό σε δίσκο θραυσμάτων. Ο δίσκος θραυσμάτων του συστήματος φαίνεται να είναι πολύ πολύπλοκος, με δομή διπλού δίσκου, ένα μεγάλο χάσμα στις 125 AU ακτίνα και δομές σπειρών και αψίδων. Η σκόνη φαίνεται να είναι δευτερογενούς προέλευσης, δηλαδή από συγκρούσεις σωμάτων με χρονοδιάγραμμα των συγκρούσεων στα 10 χιλ. έτη, 100 φορές μικρότερο διάστημα από την ηλικία του αστεριού. Επίσης έχουμε ανακαλύψει (CO) γύρω από το αστέρι, μάζας 135 φορές αυτή της Γης. Ο δίσκος του αερίου εκτείνεται από τις 20 AU ως τις 250AU. Το (12CO) εμφανίζεται πιο παχύ από το (13CO), κάτι που παραπέμπει σε θερμοκρασίες 45 K στις 100 AU από το αστέρι, κάτι τυπικό για αστέρια τύπου A.

Το παραπάνω αστέρι έχει έναν υβριδικό δίσκο. Έναν με πολύ αέριο, μάλλον πρωταρχικό, και έναν πολύ εξελιγμένο δίσκο θραυσμάτων από σκόνη. Ο σύνδεσμος ανάμεσα στις ιδιότητες του αερίου και της σκόνης σε τέτοιου είδους συστήματα θα μας βοηθήσει στην κατανόηση της εξέλιξης και του διαμελισμού των δίσκων, βασικό επεισόδιο στον σχηματισμό των πλανητικών συστημάτων.

Η φωτόλυση (photo evaporation) που προκαλείται από ακτινοβολία X σε πρωτοπλανητικούς δίσκους αστεριών μικρής μάζας

Τα αστέρια μικρής μάζας τύπου M αποτελούν τους καλύτερους στόχους για την ανακάλυψη δυνητικών κατοικήσιμων εξωπλανητών, λόγω της μικρής τους λαμπρότητας και της εγγύτητας της κατοικήσιμης ζώνης στα αστέρια. Βρήκαμε ότι οι αεριώδεις γίγαντες πλανήτες σπανίζουν σε αυτά τα αστέρια, έναντι των βραχώδους πλανητών. Αυτό μπορεί να οφείλεται στο μεγάλης έντασης πεδίο ακτινοβολίας υψηλής ενέργειας στα μικρής μάζας αστέρια, στο στάδιο προ κ. ακολουθίας. Ένα μεγάλο μέρος της μάζας του πρωτοπλανητικού δίσκου χάνεται λόγω θέρμανσης (φωτόλυσης) μέσω της ακτινοβολίας υψηλής ενέργειας από το αστέρι. Οι ακτίνες X είναι η αιτία του διαμελισμού και των χημικών αντιδράσεων του δίσκου, επηρεάζοντας τα χρονοδιαγράμματα και τις συνθήκες σχηματισμού των πλανητών.

Η μεταβλητότητα στο μεσαίο υπέρυθρο και η συσσώρευση των πρωτοαστέρων του σμήνος NGC 2264

Τα νεαρά αστέρια είναι μεταβλητής λαμπρότητας. Η μεταβλητότητα δείχνει ένα δυναμικό αστρικό περιβάλλον όπου ο εσωτερικός δίσκος τρέφει ακόμα το αστέρι με υλικό, και τα κρουστικά κύματα προκαλούν ποικίλα φαινόμενα στις υπεριώδεις και στο οπτικό φάσμα. Το ίδιο πρέπει να συμβαίνει στα πρωτοαστέρια, με μικρότερες αστρικές μάζες και περισσότερη συσσώρευση από τον δίσκο. Όμως τα πρωτοαστέρια είναι καλυμμένα στην σκόνη και δεν μπορούμε να δούμε το ορατό και υπεριώδες στον εσωτερικό δίσκο, αλλά το μεσαίο υπέρυθρο, όπως στην μελέτη μας. Ένα σημαντικό στοιχείο στην μελέτη του σχηματισμού των αστεριών είναι η κατανόηση της συσσώρευσης της ύλης. Η μεταβλητή συσσώρευση είναι σημαντική για μια πιθανή λύση του προβλήματος της μεταβλητότητας στην λαμπρότητα που παρατηρούμε.

Στον Ωρίωνα, βρέθηκε ότι το 70% των αστεριών με δίσκο παρουσιάζουν μεταβλητότητα στο μεσαίο υπέρυθρο. Η μεταβλητότητα αυτή κυμαίνεται με το περιεχόμενο ενός σμήνος σε αστέρια class I, που χρησιμοποιείται επίσης για την εκτίμηση της ηλικίας του σμήνος. Το νεαρό μας σμήνος με 1000 μέλη και άλλα τόσα υποψήφια έχει ηλικία 2-4 εκ. έτη και απέχει 760 pc. Η μεταβλητότητα στα αστέρια class I είναι 0,2mag και στα class II μόνο 0,1mag.

4) Εξωπλανήτες

Η άμεση απεικόνιση των εξωπλανητών

Έχουμε ανακαλύψει πάνω από 3000 εξωπλανήτες και αποκτήσαμε τις πρώτες πληροφορίες για τις ατμόσφαιρες εξωπλανητών και τις εσωτερικές δομές τους. Πετύχαμε την άμεση απεικόνιση πλανητών με μάζα μεγαλύτερης του Δία και τον ακριβή υπολογισμό των τροχιών τους, την ανακάλυψη υπέρ- γαιών σε κατοικήσιμες ζώνες και την ανακάλυψη πλανητών με μάζα όση της Γης. Οι 5 βασικές μέθοδοι, η γωνιακή ταχύτητα, η διάβαση, οι μικρό- φακοί, η άμεση απεικόνιση και η αστρομετρία αλληλοσυμπληρώνονται και

συνδυάζονται για την κατανόηση άλλων ιδιοτήτων των πλανητών όπως η πυκνότητα (με την γωνιακή ταχύτητα και την διάβαση) και εσωτερική εντροπία (γωνιακή ταχύτητα και απεικόνιση). Η γωνιακή ταχύτητα, οι μικρο- φακοί, η διάβαση και η αστρομετρία επιτρέπουν την μελέτη της εσωτερικής περιοχής των συστημάτων των εξωπλανητών (5- 10 AU). Μόνο η άμεση απεικόνιση επιτρέπει την ανακάλυψη πλανητών μακριά από το αστέρι. Επίσης μπορεί να μας δώσει αναλύσεις των ιδιοτήτων της ατμόσφαιρας ενός πλανήτη. Οι ατμόσφαιρες ανακαλύπτονται ευκολότερα σε νεαρούς πλανήτες και μας δείχνουν χαρακτηριστικά μικρής βαρύτητας και την παρουσία νεφών, και μη ισορροπημένες χημικές διαδικασίες. Ακόμη μας προσφέρει την μελέτη των πλανητών στην τοποθεσία που δημιουργήθηκαν στον δίσκο και μας επιτρέπει την μελέτη της αλληλεπίδρασης δίσκου/ πλανήτη.

A) Η φυσική των απεικονισμένων πλανητών.

Μόλις ένας εξωπλανήτης ανακαλυφθεί και επιβεβαιωθεί με άμεση απεικόνιση (συνήθως με τεστ ιδίας και παραλλακτικής κίνησης), καθορίζεται η μάζα του από εξελικτικά μοντέλα. Η απεικόνιση μετράει μόνο την φωτομετρία και λαμπρότητα, όχι την μάζα. Ένα πρόβλημα είναι ότι τα μοντέλα δεν έχουν προσαρμοστεί καλά για νεαρές ηλικίες. Επιπλέον για την ηλικία ενός συστήματος οι προβλέψεις εξαρτώνται κατά πολύ από τον μηχανισμό σχηματισμού και την φάση συσσώρευσης αερίου, που θα διαμορφώσουν την πλανητική ατμόσφαιρα. Οι περισσότεροι απεικονισμένοι εξωπλανήτες είναι νεαροί με πολύ σκόνη στην ατμόσφαιρα, σε αστέρια M,L. Έχουμε διαπιστώσει την παρουσία μεθανίου σε κάποιους. Οι συνθήκες μικρής βαρύτητας επιτρέπουν την ανάπτυξη σύννεφων που προκαλούν φωτομετρική μεταβλητότητα.

B) Τα ιστορικά της μάζας και της συσσώρευσης

Όπως είπαμε η απεικόνιση δεν μετράει την μάζα των εξωπλανητών, αλλά την λαμπρότητα. Τα μοντέλα σχηματισμού πλανητών που ονομάζονται καυτού, θερμού και ψυχρού αερίου αντίστοιχα, περιγράφουν διαφορετικές φάσεις κρουστικών κυμάτων (shocks) της συσσώρευσης του αερίου κατά τον σχηματισμό της πλανητικής ατμόσφαιρας, καταλήγοντας σε λαμπρότητες που έχουν εύρος μερικά mag για τους νεαρούς γίγαντες πλανήτες. Εδώ είναι πολύ σημαντικός για τον καθορισμό της μάζας ο συνδυασμός της απεικόνισης με την γωνιακή ταχύτητα.

Γ) Η τροχιά και η δομή

Το τρίτο ερώτημα είναι για την δομή του συστήματος εξωπλανητών. Στην περίπτωση πολλαπλών πλανητών η μακρόχρονη αστρομετρία ανακαλύπτει τις τροχιές και πιστοποιεί την δυναμική του συστήματος. Οι τοποθεσίες των πλανητών μπορούν να συγκριθούν με χωρική ανάλυση της σκόνης και την δομή του συστήματος.

Δ) Εμφάνιση και σχηματισμός

Η κυρίαρχη θεωρία σχηματισμού πλανητών είναι η συσσώρευση σε στερεό πυρήνα 10 με 15 μαζών Γης και η ταχεία συσσώρευση αερίου σε αυτόν. Ενώ οι συνθήκες και τα χρονοδιαγράμματα ευνοούν την συσσώρευση σωμάτων στον εσωτερικό δίσκο (μέχρι 10 AU), η βαρυτική αστάθεια και οι βαρυτικές αναταράξεις μπορεί να οδηγήσουν στην δημιουργία μεγάλης μάζας πλανητών και πιο μακριά από το αστέρι σε νεαρή φάση του δίσκου. Οι πλανήτες μπορούν να μεταναστεύσουν προς τα μέσα ή προς τα έξω μέσω αλληλεπίδρασης δίσκου- πλανήτη ή πλανήτη- πλανήτη.

Τι μας λένε οι νεαροί καφέ νάνοι για τους εξωπλανήτες?

Ο καθορισμός της ηλικίας με φασματοσκοπία στο κοντινό υπέρυθρο

Με δεδομένο τον εκφυλισμό της μάζας, ηλικίας και λαμπρότητας για τα υπό-αστρικά αντικείμενα (πλανήτες και καφέ νάνοι), ο καθορισμός της ηλικίας είναι βασικός για την εκτίμηση των βασικών ιδιοτήτων τους. Για νεαρά αστέρια μικρής μάζας, η ανακάλυψη λιθίου και / ή της θέσης πάνω από το όριο μηδενικής ηλικίας στην κύρια ακολουθία (zero age main sequence) στο διάγραμμα H/R αποτελούν τις βασικές μεθόδους μέτρησης ηλικίας. Καμία από αυτές δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην εκτίμηση της ηλικίας καφέ νάνων ή άμεσα απεικονισμένων πλανητών για 2 λόγους. Πρώτον, οι περισσότεροι καφέ νάνοι (μάζας μικρότερη από 65 φορές την μάζα του Δία) και όλοι οι πλανήτες δεν αναπτύσσουν ικανή θερμοκρασία για την καταστροφή του λιθίου (2,6 εκ. βαθμοί). Δεύτερον, οι νεαροί ψυχροί καφέ νάνοι είναι αμυδρότεροι από ότι αναμέναμε, με παρόμοιες λαμπρότητες με τους μεγαλύτερης ηλικίας καφέ νάνους.

Σε αντίθεση με τους περισσότερους από τους άμεσα απεικονισμένους πλανήτες, οι καφέ νάνοι επιτρέπουν την λεπτομερή ανάλυση του φάσματός τους.

Τα μοντέλα ατμοσφαιρών και τα μοντέλα εξέλιξης αυτών των σωμάτων

Δεν μπορούμε να καθορίσουμε ηλικίες και μάζες πλανητών μόνο από το φάσμα τους. Για τους λίγους πλανήτες που γνωρίζουμε και είναι μέλη νεαρών αστρικών ομάδων κοινής κίνησης μπορούμε να εκτιμήσουμε τις μάζες με την χρήση του μοντέλου των ισόχρονων για την ηλικία μιας ομάδας. Τα μοντέλα εξέλιξης δεν έχουν επαληθευτεί μέσω παρατηρήσεων σε τόσες νεαρές ηλικίες. Πράγματι, σε μεγαλύτερες ηλικίες (500 εκ. - 1 δις έτη) ανακαλύπτουμε συστηματικά λάθη στις λαμπρότητες και μάζες που προβλέπουν τα μοντέλα, σε βαθμό 2% για την λαμπρότητα και 25% για την μάζα.

Η θερμοκρασία ενός ψυχρού νάνου μπορεί να υπολογιστεί με την χρήση εξελικτικών μοντέλων, δεδομένου των μετρήσεων λαμπρότητας και εκτιμώμενης ηλικίας. Γνωρίζουμε τώρα ότι οι νεαροί νάνοι τύπου L,T του πεδίου εμφανίζονται 200- 300K ψυχρότεροι από τους γηραιότερους, ενώ οι τύπου M λίγο θερμότεροι.

Πως καθορίζονται οι θερμοκρασίες συνδυάζοντας τα ατμοσφαιρικά μοντέλα με τα εξελικτικά? Τα ατμοσφαιρικά μοντέλα των νάνων L υπερεκτιμούν τις θερμοκρασίες τους. Αν υπολογίσουμε την θερμοκρασία ενός πλανήτη από τα ατμοσφαιρικά μοντέλα θα προκύψει μια υπερβολικά μικρή ακτίνα του πλανήτη (λιγότερη από 1 φορές του Δία) ώστε να συμφωνεί με την λαμπρότητα (αποτέλεσμα αναλογίας ακτίνας/θερμοκρασίας). Η απόκλιση μεγαλώνει στην εκτίμηση θερμοκρασίας με την χρήση ατμοσφαιρικών και εξελικτικών μοντέλων για νεαρά και μικρής μάζας αντικείμενα. Με την προσθήκη παραμέτρων όπως τα σύννεφα στις ατμόσφαιρες και την μη ομογενείς χημική σύσταση βελτιώνεται το αποτέλεσμα. Ο συνδυασμός των προβλημάτων που έχουν να κάνουν με τα ατμοσφαιρικά μοντέλα και η απόκλιση των φασμάτων που έχουμε στην διάθεσή μας για αυτά τα αντικείμενα καθιστούν αναξιόπιστη μέθοδο την εκτίμηση της θερμοκρασίας με την χρήση προσαρμογής ατμοσφαιρικών μοντέλων σε φάσματα μεσαίου υπέρυθρου.

Συμπεράσματα

.Η απόκλιση στα φάσματα αποτελεί κανόνα σε νεαρά υπό- αστρικά αντικείμενα, ακόμα και με παρόμοια μάζα, ηλικία ή/ και θέση στο διάγραμμαH/R.

.Τα αντικείμενα αυτά έχουν ψυχρότερες θερμοκρασίες από τα μεγαλύτερης ηλικίας ίδιας φασματικής ομάδας αντικείμενα του πεδίου, και τα μεμονωμένα αλλά και αυτά που αποτελούν συνοδούς νεαρών αστεριών.

.Οι θερμοκρασίες βάσει ατμοσφαιρικών μοντέλων των νεαρών καφέ νάνων και των άμεσης απεικόνισης πλανητών είναι υπερεκτιμημένες.

Ένας νεαρός συνοδός πλανητικής μάζας στον κοντινό μας νάνο τύπου M VHSJ125601.92-125723.9 (συντεταγμένες)

Πρόσφατα ανακαλύψαμε τους νάνους τύπου L, ή μόνους ή ως συνοδούς αστεριών. Έχουν παρόμοιες φωτομετρικές και φασματικές ιδιότητες με τους όμοιους αλλά μεγαλύτερης ηλικίας του πεδίου. Μερικές από τις ιδιαιτερότητές τους έχουν να κάνουν με την μικρή επιφανειακή βαρύτητα και τα νέφη στην ατμόσφαιρα, όπως αναμένουμε για τα πρώτα εξελικτικά στάδια ενός τέτοιου αντικειμένου (> 100 εκ. έτη). Υπάρχει μεγάλη ομοιότητα ανάμεσα στους νάνους L και τους πλανήτες μεγάλης μάζας που απεικονίσαμε άμεσα. Έχουν παρόμοια στο κοντινό υπέρυθρο <χρώματα>, απόλυτες λαμπρότητες, θερμοκρασίες 1000-1500K και μάζες ως μερικές δεκάδες αυτή του Δία.

Η μη ανακάλυψη (εξάλειψη) του λιθίου μας δείχνει μια μάζα μεγαλύτερη από 0,06 ηλιακές και ένα εύρος ηλικίας 150- 300 εκ. έτη. Τα θεωρητικά μοντέλα προβλέπουν ότι αντικείμενα με επιφανειακή θερμοκρασία 2600K (τύπου M7,5) έχουν εξαντλήσει το λίθιο σε 150 εκ. έτη. Με την χρήση βολομετρικών διορθώσεων και σχετικών μοντέλων καθορίσαμε τις λαμπρότητες και μάζες του συστήματος. Για το πρωτεύον αντικείμενο καθορίσαμε την μάζα σε 73 μάζες Δία, στα όρια καφέ νάνου/ αστεριού, με θερμοκρασία 2640K. Για τον συνοδό η μάζα καθορίστηκε σε 11 φορές αυτή του Δία, κοντά στα όρια της σύντηξης του δευτερίου, με θερμοκρασία 880K.

Ο παραπάνω νάνος L είναι ένας από τους πολύ νεαρούς, ακραία κόκκινους του είδους του. Έχουμε καλά καθορισμένη την ηλικία του δεδομένου ότι θεωρείται μέλος της τοπικής ομάδας αστεριών, αλλά και λόγω της απουσίας του λιθίου από το βασικό αστέρι του συστήματος. Η θερμοκρασία των 880K βάσει μοντέλων δεν συμφωνεί με αυτές των ίδιου τύπου αντικειμένου του πεδίου, ούτε και με την απουσία μεθανίου από αυτόν τον νάνο L, ένα μόριο που αναμένεται να ανιχνεύεται σε αντικείμενο με θερμοκρασία μικρότερη από τους 1400K. Μπορεί η παρουσία νεφών με αρκετό ύψος στην ατμόσφαιρά του και η ανομοιογένεια στην χημική της σύσταση να επιτρέπουν την θέρμανση της ατμόσφαιρας στους 1500K. Η περίοδος περιφοράς του γύρω από το αστέρι είναι στα 3900 έτη.

Η εξάτμιση των πλανητών και η δυναμική των κρουστικών τοξοειδών κυμάτων πλανητικών / αστρικών ανέμων.

Η ακτινοβολία του αστεριού, ειδικά η ακραία υπεριώδης, μπορεί να εκδιώξει ύλη από την πλανητική ατμόσφαιρα, θερμαίνοντας τα ανώτερα στρώματά της. Με αυτήν την διαδικασία προκαλείται ένα εκτεταμένο κουκούλι αερίου που μετατρέπεται σε άνεμο. Τέτοιες ροές αερίου πιστεύουμε ότι εμφανίζονται στους καυτούς γιγάντιους πλανήτες. Ο λόγος της επιφανειακής βαρύτητας προς την θερμοκρασία μας δίνει την ισχύ του ανέμου. Αν ο λόγος αυτός είναι μεγάλος, η ατμόσφαιρα είναι πολύ ισχυρά δεμένη με τον πλανήτη μέσω της βαρύτητάς του και δεν αναπτύσσεται υδροδυναμικός άνεμος. Μπορούν να δημιουργηθούν μικρότερης ισχύς μη θερμικοί άνεμοι. Ακόμα, λαμβάνουμε υπόψη την σύσταση της ατμόσφαιρας.

Οι φυσικές διαδικασίες που μπορούν να επηρεάσουν την δομή του ανέμου και τον ρυθμό εκροής είναι το μαγνητικό πεδίο του πλανήτη, η χρονική εξάρτηση της υπεριώδης ακτινοβολίας του άστρου, η ατμοσφαιρική κυκλοφορία και η αλληλεπίδραση ανάμεσα στον αστρικό και τον πλανητικό άνεμο.

Στις προσομοιώσεις μας παρατηρούμε έναν ισχυρό θερμικό άνεμο να αναπτύσσεται από την πλευρά του πλανήτη με ημέρα (θερμότερη πλευρά). Ο άνεμος φτάνει σε υπερηχητικές ταχύτητες κοντά στην επιφάνεια του πλανήτη. Η ροή από τον πλανήτη δεν είναι τελείως γωνιακή. Η συγκλίνουσα ροή στην σκοτεινή πλευρά δεν ανακατευθύνει ομαλά το υλικό που εκρέει. Στις προσομοιώσεις μας βλέπουμε αέριο να πέφτει πίσω στον πλανήτη.

Όπως ο αστρικός άνεμος <σκουπίζει> τον πλανήτη στο πέρασμά του συναντάει τον πλανητικό άνεμο και ανάλογα την πίεση εμβολής μπορεί να σχηματιστεί ένα τοξοειδές κύμα. Αυτό μπορεί να προκαλέσει αστάθειες, που με την σειρά τους μπορεί να προκαλέσουν δύνες ή άλλες καθοδικές ροές. Το κύμα φαίνεται να σπάει σε μέρη. Στην περίπτωση του υπό-ηχητικού αστρικού ανέμου το τόξο αποτελείται από ένα κρουστικό κύμα αντιμέτωπο στον πλανητικό άνεμο. Στην περίπτωση του υπερηχητικού αστρικού ανέμου το τόξο αποτελείται από δύο κρουστικά κύματα με το ένα να εισρέει ανοδικά και το άλλο καθοδικά, και εδώ παρατηρούμε μεγαλύτερες δύνες σε μια ασταθής καθοδική ροή. Και στις δύο περιπτώσεις το κύμα είναι ασταθές.

Μπορούν τα πιο πλούσια σε σκόνη από τα αστέρια κυρίας ακολουθίας να μας πληροφορήσουν σχετικά με την διαδικασία σχηματισμού βραχώδη πλανητών?

Η καλύτερη προϋπόθεση για την ανακάλυψη βραχώδεις πλανητών σε ένα αστέρι είναι η ανακάλυψη και ανάλυση δίσκου θραυσμάτων. Η σκόνη σε απόσταση 1 AU θερμαίνεται από ένα όμοιο με τον Ήλιο μας αστέρι στους 300K. Εκπέμπει στο μεσαίο υπέρυθρο, με αποτέλεσμα να ψάχνουμε υπέρβαση εκπομπής υπέρυθρου στα 10- 20 μ m.

Δεν είναι απαραίτητο όλες οι υπερβάσεις υπέρυθρου να οδηγούν σε βραχώδεις πλανήτες. Η ασθενής υπέρβαση μπορεί να σημαίνει απλά σκόνη που προέρχεται από συγκρούσεις σε ανάλογες ζώνες με αυτήν των αστεροειδών στο ηλιακό μας σύστημα.

Βρήκαμε ότι στα αστέρια τύπου A και τέλος της κλίμακας του τύπου B, τα 10 από τα 14 αστέρια με υπέρβαση μεσαίου υπέρυθρου να έχουν θερμοκρασίες μελανού σώματος της σκόνης 200K. Όλα αυτά τα 10 αστέρια έχουν κυμαινόμενη λαμπρότητα στο υπέρυθρο, κάτι που προδίδει ζώνη ανάλογη αυτής των αστεροειδών. Ο συνδυασμός πολλών επισκοπήσεων

μας δείχνει ότι τουλάχιστον το 33% των αστεριών A με ηλικία 10-30 εκ. έτη έχουν ενεργή ζώνη πλανητοειδών στο εσωτερικό τους πλανητικό σύστημα.

Χωρίζουμε τους δίσκους θραυσμάτων σε 2 κατηγορίες. Αυτούς που προέρχονται από συγκρούσεις που είχαν ως αποτέλεσμα την μείωση των βραχώδεις αντικειμένων (μια ενεργή ζώνη ανάλογη αυτής των αστεροειδών) και αυτούς που χρειάστηκαν να συμβούν μεταβατικά φαινόμενα δημιουργίας σκόνης (παροδικές συγκρούσεις που περιλαμβάνουν μέχρι και πλανητικές συγκρούσεις) για τον σχηματισμό τους. Οι κατηγορίες αυτές έχουν την παραδοχή ότι οι δίσκοι θραυσμάτων προέρχονται από συγκρούσεις βραχώδεις σωμάτων σε μια ενεργή ζώνη. Αν η μάζα σκόνης που προέρχεται από την πρώτη κατηγορία δεν είναι ικανή για τον σχηματισμό πλανητών, χρειάζονται και οι παροδικές συγκρούσεις, και των μεγάλων σωμάτων.

Ακραία συστήματα δίσκων θραυσμάτων

Σε νεαρά αστέρια κυρίας ακολουθίας μεγάλης μάζας παρατηρούμε την ύπαρξη σκόνης στο εσωτερικό πλανητικό σύστημα κυρίως όταν αυτά είναι ηλικίας 10 εκ. ετών. Αντίθετα, η φάση αυτή εκτείνεται περισσότερο για αστέρια σαν τον Ήλιο μας σε 100 εκ. έτη. Η συχνότητα αστεριών με μεγάλη ποσότητα σκόνης είναι παρόμοια για τα μεγάλα αστέρια και για αυτά σαν τον Ήλιο μας.

Υπάρχουν 3 μοντέλα για την αναπαραγωγή της μεγάλης ποσότητας σκόνης και το χρονοδιάγραμμα εμφάνισής της. 1) Οι μεγάλες συγκρούσεις. Μετά την μεγάλη σύγκρουση 2 βραχώδεις πλανητικών εμβρύων απελευθερώνονται θραύσματα με ποικιλία μεγεθών. Κάθε μεγάλος βραχώδης πλανήτης βιώνει 6 κατά μέσο όρο μεγάλες συγκρούσεις πριν σχηματιστεί πλήρως. 2) Πλανητοειδείς υπολείμματα. Η μελέτη των ηλικιών του ^{40}Ar - ^{39}Ar από μετέωρα στην Σελήνη και σε βροχές μετεώρων μας πληροφορούν για την ροή συγκρούσεων πριν από 3,9- 4,1 δις έτη στο ηλιακό μας σύστημα. Όμως οι μετεωρίτες μας δείχνουν και ένα μέγιστο συγκρούσεων πριν από 4,5 δις έτη. Η ηλικία του Ηλίου τότε ήταν 10- 100 εκ. έτη. Οι συγκρούσεις αυτές μπορεί να προήλθαν από απομεινάρια πλανητοειδών με πολύ έκκεντρη τροχιά, με τον πληθυσμό τους να μειώνεται γρήγορα κατά 90%, μέχρι το αστέρι (στην περίπτωσή μας ο Ήλιος) να φτάσει την ηλικία των 100 εκ. ετών. Η σκόνη σε αυτή την φάση είναι το αποτέλεσμα αυτών των συγκρούσεων. 3) Η δυναμική αστάθεια. Πρόκειται για μια φάση στην οποία αστάθειες στο εξωτερικό πλανητικό σύστημα προκαλούν την πτώση πλανητοειδών. Αυτός ο βομβαρδισμός (late heavy bombardment) έγινε 600 εκ. έτη μετά την δημιουργία του Ηλίου, βάσει των κρατήρων που ανακαλύπτουμε στα βραχώδεις αντικείμενα του ηλιακού συστήματος. Το μοντέλο αυτό προϋποθέτει την ύπαρξη γιγάντιων πλανητών και ζώνης με πλανητοειδή (τυπικά στο εξωτερικό πλανητικό σύστημα) που βιώνουν δραματικές αναδιαμορφώσεις. Δεν είναι απαραίτητη η παρουσία πλανητών όμοιων με τη Γη.

Υπάρχουν ισχυρές αποδείξεις ότι αυτά τα γεγονότα μεταβατικής δημιουργίας σκόνης εμφανίζονται στο εσωτερικό των πλανητικών συστημάτων και άλλων αστεριών.

Ένα πιθανό ιστορικό της δυναμικής του συστήματος του Fomalhaut.

Ο Fomalhaut (α Psa) είναι ένα αστέρι τύπου A3V ηλικίας 440 εκ. ετών σε απόσταση 7,7 pc. Έχει γύρω του έναν έκκεντρο δακτύλιο σκόνης, που φανερώνει την ύπαρξη ενός μεγάλης μάζας σώματος, που περιφέρεται μέσα στον δακτύλιο σε εκκεντρική τροχιά, και διαμορφώνει δυναμικά το σχήμα της. Η άμεση απεικόνιση του πλανήτη Fomalhaut b επιβεβαίωσε τα παραπάνω. Όμως η τροχιά του είναι τόσο έκκεντρη, ώστε να τέμνει τον δακτύλιο. Επιπλέον είναι κοντά σε <ψαλιδοειδής> ευθυγράμμιση με τον δακτύλιο. Επειδή η τόσο έκκεντρη τροχιά του θα έπρεπε να έχει ως αποτέλεσμα την μη <ψαλιδοειδής> ευθυγράμμιση, ο πλανήτης αυτός δεν μπορεί να ευθύνεται για την διαμόρφωση του σχήματος του δίσκου. Η καλύτερη λύση αυτού του παράδοξου είναι να υποθέσουμε την ύπαρξη ενός σώματος που ονομάζουμε Fomalhaut c και έχει μεγαλύτερη μάζα από τον b (όμοια με αυτήν του Κρόνου), που είναι δυναμικά κυρίαρχος και διαμορφώνει το σχήμα της ζώνης. Οι παρατηρήσεις μας πληροφορούν ότι η μάζα του b δεν ξεπερνάει αυτή της Γης ή μιας υπέρ- γαίας. Βάσει αυτών όμως η τροχιές των b, c θα πρέπει να τέμνονται, κάτι που δηλώνει αστάθεια του συστήματος.

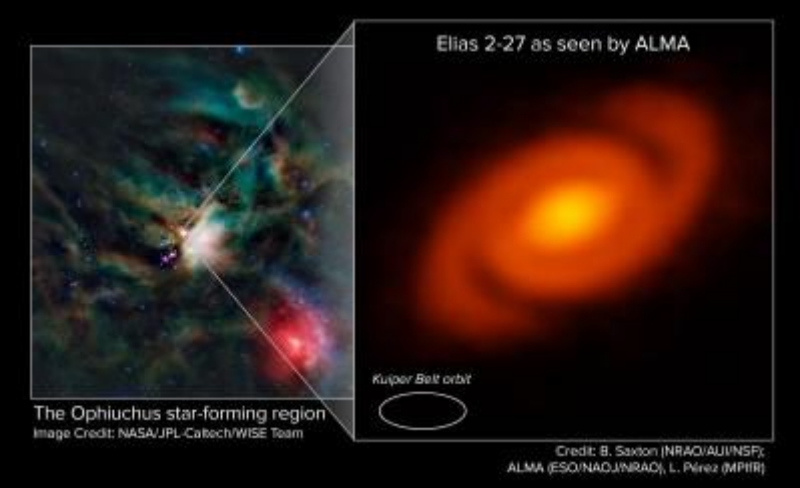
Η μελέτη του συστήματος μας αποκαλύπτει μια ισχυρή διαδικασία μέσω της οποίας τροχιές σαν αυτή του Fom b προέρχονται φυσιολογικά από αλληλεπιδράσεις ανάμεσα σε εκκεντρικής τροχιάς σώματα που διαταράσσουν το σύστημα, όπως υποθέτουμε για τον Fom c στο εξωτερικό μέρος του δακτυλίου και ένα σώμα πολύ μικρότερης μάζας, ένας βραχώδης πλανήτης ή ένας πλανητοειδής. Επιπλέον αυτή η διαδικασία σχετίζεται με μια καθυστέρηση στον σχηματισμό αντικειμένων όπως ο Fom b , που μπορεί να είναι μεγαλύτερη των 100 εκ. ετών αν το σώμα μεγάλης μάζας που διαταράσσει το σύστημα είναι μάζας του Ποσειδώνα ως της μάζας του Κρόνου. Αυτό μας προσφέρει μια εξήγηση και για το σχήμα της εξωτερικής ζώνης αλλά και για την ισχύουσα δυναμική κατάσταση του Fom b. Ακόμα, μπορεί να δώσει λύση στο αίνιγμα της παρουσίας ασυνήθιστα μεγάλης ποσότητας σκόνης σε σημαντικό αριθμό αστεριών με ηλικία >100 εκ. έτη. Τέλος, η παραμόρφωση του σχήματος της ζώνης δεν μπορεί να προέρχεται από του συνοδούς αστέρες (ο Fomalhaut είναι τριπλό σύστημα). Λόγω της απόστασής τους το χρονοδιάγραμμα παραμόρφωσης της ζώνης από αυτούς είναι δις ετών, πολύ μεγαλύτερο από την ηλικία του αστεριού.

Εκρηκτικά φαινόμενα μέσω πτώσεων σωμάτων που εξατμίζονται στην αστρική ατμόσφαιρα

Οι υπολογισμοί μας δείχνουν ότι τα FEB (falling evaporating bodies) είναι συνήθη στην αστρική/ ηλιακή χρωμόσφαιρα. Έχουν τον χαρακτήρα μετεώρου και μπορούν να οδηγήσουν στην ασυνήθιστα μεγάλη αφθονία ατόμων όπως των (Fe),(Si). Μπορεί όμως και να καταστραφούν (FEB πυρήνες κομητών) στο στέμμα, αλλά αυτό γίνεται όταν συγκρουστούν με άλλα σώματα που περιφέρονται του Ηλίου. Στα νεαρά κοντινά μας αστέρια πρέπει να ανιχνεύσουμε σε τέτοια συμβάντα την παραγωγή καυτού πλάσματος (10 εκ. βαθμοί K), ισχυρά κρουστικά κύματα, λοβούς πλάσματος και τις μεγάλες αφθονίες των μετάλλων που αναφέραμε.

Στον Οφιούχο, σε απόσταση 453 έτη φωτός βρίσκεται η περιοχή αστρογέννησης Rho με το νεαρό αστέρι Elias 2-27. Με την συστοιχία ραδιοτηλεσκοπίων ALMA απεικονίστηκε μια σπειροειδής μορφή στον δίσκο αερίων και σκόνης γύρω από το αστέρι. Έχουμε ξαναδεί τέτοιες δομές σε άλλα νεαρά αστέρια, αλλά με την παρουσία πλανητών. Στο παραπάνω αστέρι δεν έχουν δημιουργηθεί ακόμα πλανήτες, και φαίνεται ότι οι σπείρες βοηθάνε στην δημιουργία τους. Αν το υλικό ήταν ομογενές μοιρασμένο στον δίσκο η δημιουργία πλανητών θα ήταν πολύ αργή και δεν θα ολοκληρωνόταν, αλλά θα έπεφτε όλη η ύλη στο αστέρι σε διάστημα λίγων χιλιάδων ετών. Οι σπείρες ως κύματα πυκνότητας της ύλης επιτρέπουν την δημιουργία μεγάλων σωμάτων από τους κόκκους σκόνης και το αέριο.

star-forming-spiral-Elias-2-27-detail-e1475418553919.jpg	
Περιγραφή:	
Μέγεθος αρχείου:	46.94 KB
Διαβάστηκε:	0 φορές



The Ophiuchus star-forming region
Image Credit: NASA/JPL-Caltech/WISE Team

Elias 2-27 as seen by ALMA

Kuiper Belt orbit

Credit: B. Saxton (NRAO/AUI/NSF), ALMA (ESO/NAOJ/NRAO), L. Pérez (MPIR)

