

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η μελέτη της διαδικασίας σχηματισμού αστεριών (star formation) με την χρήση της μοριακής αστρονομίας περιέχει μερικά σημαντικά πεδία έρευνας. Οι προαστρικοί πυρήνες (prestellar cores), καυτοί πυρήνες (hot cores, hot corinos), οι πρωτοπλανητικοί δίσκοι (protoplanetary disks) και οι περιοχές φωτοδιάσπασης (photodissociation regions) αποτελούν αυτά τα πεδία. Αυτά τα πεδία συνδέονται με πυκνά μοριακά νεφελώματα πολλών κλιμακίων, όπως τα γιγάντια μοριακά νέφη (GMC, giant molecular clouds) μέχρι τμήματα των νεφών, νήματα και συμπυκνώματα. Η κατανόηση της μοριακής αστρονομίας προϋποθέτει την γνώση διεργασιών όπως την μοριακή διέγερση (excitation), τις χημικές αντιδράσεις στο αέριο και στις επιφάνειες των κόκκων σκόνης, τον ιονισμό μέσω κοσμικής ακτινοβολίας και την επίδραση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στα μόρια.

Μερικές από τις παραπάνω διεργασίες είναι πιο κατάλληλες για περιοχές δημιουργίας αστεριών μικρής μάζας (LMSFR, low mass star formation regions) ενώ άλλες σε περιοχές δημιουργίας αστεριών μεγάλης μάζας (HMSFR, high mass star formation regions). Οι διαδικασίες δημιουργίας αστεριών μικρής μάζας (ως 2 ηλιακές μάζες) είναι καλά κατανοητή. Αντίθετα, τα τελευταία χρόνια συμπληρώνουμε τα κενά στην κατανόηση της δημιουργίας αστεριών μεγάλης μάζας (>10 ηλιακές μάζες).

Βασικά οι περιοχές αστρογέννησης βρίσκονται στους δίσκους των γαλαξιών. Όμως παρατηρούμε στον Γαλαξία μας ότι ο ρυθμός δημιουργίας αστεριών αλλάζει από περιοχή σε περιοχή. Η αστρογέννηση έχει χαμηλότερο ρυθμό στα νεφελώματα του Ταύρου παρά στις περιοχές W3, W49 στον Ωρίωνα. Το ίδιο παρατηρούμε και σε γειτονικούς μας γαλαξίες.

Τα αστέρια δημιουργούνται σε νεφελώματα, από 10 ως και ένα εκατομμύριο σε ένα επεισόδιο αστρογέννησης, σε σχετική μικρή περιοχή. Τα σμήνη αστεριών μεγάλης μάζας (OB association) αρχικά καταλαμβάνουν χώρο μόλις μερικές δεκάδες πάρσεκ. Αργότερα διαστέλλονται σε μέγεθος εκατοντάδων πάρσεκ. Τα μεγάλης μάζας αστέρια τύπου O,B εξελίσσονται σε μόλις μερικές δεκάδες εκατομμύρια έτη. Διαλύουν στην περιοχή τους το νεφέλωμα μέσα στο οποίο δημιουργήθηκαν, μέσω της πίεσης ακτινοβολίας, των στροβιλισμών, συσσώρευσης αερίου και βαρυτικής επίδρασης. Επιβραδύνουν την δημιουργία αστεριών μικρής μάζας στην περιοχή τους. Αυτές οι διεργασίες μαζί με τις εκρήξεις σουπερνόβα συμπυκνώνουν το αέριο ενός νεφελώματος πυροδοτώντας αστρογέννηση σε δεύτερη φάση.

Η δημιουργία αστεριών μικρής μάζας εξελίσσεται με την συμπύκνωση του διάχυτου μεσογαλαξίου αερίου (diffuse interstellar medium, ISM) σε πυκνό μοριακό νέφος και την βαρυτική κατάρρευση τμήματος του νέφους σε πρωτοαστέρι με πρωτοπλανητικό κέλυφος και δίσκο προσάυξης. Ακολουθεί η θερμοπυρηνική ανάφλεξη (σύντηξη), η μακρόχρονη παραμονή στην κύρια ακολουθία (σύντηξη του Υδρογόνου σε Ήλιο στον αστρικό πυρήνα), η φάση του ερυθρού γίγαντα και η εξέλιξη σε πλανητικό νεφέλωμα.

Δημιουργία αστεριών μικρής μάζας

Διάχυτα και μοριακά νεφελώματα

Τα διάχυτα ατομικά νεφελώματα έχουν μικρή πυκνότητα, αλλά σημαντικά μεγαλύτερη από την μέση πυκνότητα του μεσοαστρικού χώρου. Τυπικά έχουν θερμοκρασία 100K και μέγεθος 0,5 πάρσεκ, με μάζα 3 ηλιακές. Περιέχουν μικρή ποσότητα μοριακού αερίου.

Τα μοριακά νεφελώματα είναι πολύ πιο πυκνά και πιο ψυχρά (10K). Τα γιγάντια μοριακά νεφελώματα (GMC, Giant molecular clouds) περιέχουν το 80% της μάζας του μοριακού αερίου του Γαλαξία μας. Η τυπική κατανάλωση αερίου και σκόνης σε δημιουργία αστεριών περιορίζεται στο 5% σε κάθε επεισόδιο αστρογέννησης, λόγω αστικών ανέμων, στροβιλισμών και κρουστικών μετώπων που εμποδίζουν την κατάρρευση τμημάτων ενός νεφελώματος σε πρωταστέρι. Σε αυτά οι καλά προφυλαγμένοι κόκκοι σκόνης στο εσωτερικό τους (από αστρική ακτινοβολία στο υπεριώδες και κοσμική ακτινοβολία) μπορούν να αναπτύξουν την δημιουργία μορίων στις επιφάνειές τους. Ιδιαίτερα σημαντική είναι και η ανάπτυξη πάγου στις επιφάνειες των κόκκων σκόνης.

Πυκνοί προαστρικοί πυρήνες

Οι πιο πυκνές περιοχές μεγέθους 0,1 πάρσεκ μπορούν να καταρρεύσουν βαρυτικά ξεπερνώντας την αντίθετη δύναμη του στροβιλισμού. Σε μια τέτοια κατάρρευση σχηματίζεται ένα πρωταστέρι με έναν δίσκο προσαύξησης ακτίνας δέκα χιλιάδων αστρονομικών μονάδων. Ο δίσκος διαστέλλεται, με τις μαγνητικές δυνάμεις να αντιμάχονται την διατήρηση της στροφορμής κατά την συνεχή συσσώρευση ύλης. Αναπτύσσονται πίδακες κάθετα στο επίπεδο του δίσκου και ένας άνεμος σωματιδίων από τον δίσκο (disk wind).

Ενώ στο νεφέλωμα σχηματίζονται απλά μόρια, στους ψυχρούς προαστρικούς πυρήνες εμφανίζονται πολύπλοκες ενώσεις του Άνθρακα και πάγος, όπως πάγος του νερού και του διοξειδίου του Άνθρακα. Αυτά τα μόρια δεν μπορούν να σχηματιστούν με εναλλακτικούς τρόπους στο αέριο των νεφελωμάτων. Το κυρίαρχο μόριο ένωσης του Άνθρακα CO εξαλείφεται όταν αυξηθεί πολύ η πυκνότητα του προαστρικού πυρήνα. Ευνοείται η ανάπτυξη πολύπλοκων οργανικών μορίων (COM).

Ψυχρά κελύφη πρωταστέρων και πίδακες

Οι πρωταστρικοί πυρήνες εκπέμπουν στο υπέρυθρο και σε μεγαλύτερα μήκη κύματος. Όταν ο πυρήνας έρθει σε υδροστατική ισορροπία πλέον το αντικείμενο είναι ένα πρωταστέρι. Η μάζα του αυξάνεται από την συσσώρευση ύλης από το κέλυφος, μέσω του δίσκου προσαύξησης. Αυτή η διαδικασία ολοκληρώνεται σε 100.000 έτη. Σε αδιαφανή πρωταστρικά κελύφη και πολύ κοντά σε πρωταστέρια μικρής μάζας, εμφανίζονται μικρές (<100 AU) θερμές και πυκνές περιοχές που ονομάζονται hot corinos. Αυτές φιλοξενούν COMs με τουλάχιστον 6 άτομα. Ενώ ο δίσκος προσαύξησης έχει διάρκεια ζωής μερικά εκατομμύρια έτη, τα hot corinos περιορίζονται στην αρχική φάση εμφάνισης του δίσκου.

Οι πίδακες ενός πρωτοπλανητικού δίσκου ανιχνεύονται μέσω γραμμών εκπομπής των SiO, SO, CO. Η εκροή από τους πίδακες δημιουργεί στροβιλισμούς στην περιαστρική ύλη,

περιορίζοντας την ύλη που θα συσσωρεύσει ο δίσκος προσαύξησης. Από την άλλη, μπορεί να δημιουργήσουν κρουστικά κύματα που θα συμβάλλουν στην συμπύκνωση και κατάρρευση αερίου σε πρωτοαστέρα.

Πρωτοπλανητικοί δίσκοι

Η εκπομπή ακτινών Χ και υπεριώδης ακτινοβολίας από το πρωτοαστέρι αποτρέπει την δημιουργία και διατήρηση μορίων στο εσωτερικό του πρωτοπλανητικού δίσκου. Πιο βαθιά στον δίσκο η σκόνη προστατεύεται. Εκεί δημιουργούνται οι πρωτοπλανήτες και οι πλανήτες. Οι εκροές ύλης από τους πίδακες δημιουργούν ισχυρά κρουστικά κύματα στον δίσκο και στο κέλυφος. Στις περιοχές όπου διεισδύουν οι πίδακες εμφανίζονται πυκνοί μικροί κόμβοι ύλης (Herbig-Haro objects). Το κέλυφος διαλύεται και το πρωτοαστέρι με τον δίσκο γίνονται ορατά. Αυτή η φάση ονομάζεται αστέρι T- Tauri για αστέρια ως 2 ηλιακές μάζες και Herbig AeBe για αστέρια 2-8 ηλιακές μάζες. Η ηλικία του πρωτοαστέρα είναι τώρα 2-3 εκατομμύρια έτη, και το αστέρι μπαίνει στην κύρια ακολουθία (θερμοπυρηνική σύντηξη Υδρογόνου σε Ήλιο στον πυρήνα) μέσα σε 10 εκατομμύρια έτη.

Ο δίσκος διαχωρίζεται σε περιοχές ανάλογα τις συνθήκες που επικρατούν τοπικά. Μετά από ένα χωρικό όριο μπορεί να δημιουργηθεί πάγος στους κόκκους σκόνης. Εκεί αναπτύσσεται μια πιο πολύπλοκη χημεία.

Δημιουργία αστεριών μεγάλης μάζας

Τα αστέρια μεγάλης μάζας (>8 ηλιακές μάζες) είναι πολύ λαμπρά και κυριαρχούν σε έναν γαλαξία που παρουσιάζει σημαντική αστρογέννηση. Είναι όμως αρκετά σπάνια και πολύ βραχύβια. Έτσι στατιστικά βρίσκονται μακριά από τον παρατηρητή και συνήθως είναι ακόμα ενσωματωμένα στο μοριακό τους νεφέλωμα. Η δημιουργία τους διαφέρει σημαντικά από αυτή των αστεριών μικρής (<2 ηλιακές μάζες) και μεσαίας μάζας (2-8 ηλιακές μάζες). Η δημιουργία ενός αστεριού μεγάλης μάζας ολοκληρώνεται σε μερικές εκατοντάδες χιλιάδες έτη (10 εκατομμύρια έτη για μικρής μάζας αστέρι). Μπαίνει στην κύρια ακολουθία (θερμοπυρηνική σύντηξη) ενώ ακόμη συσσωρεύει ύλη από το περιβάλλον του.

Τα πρωτοαστέρια μεγάλης μάζας (HMPO, high mass protostellar object) παρουσιάζουν μεγάλη λαμπρότητα (100 φορές την ηλιακή) και ισχυρή θερμική εκπομπή από τη σκόνη γύρω τους. Η αύξηση της θερμοκρασίας του περιεστωτικού κελύφους έχει ως αποτέλεσμα να εξατμίζεται ο πάγος στους κόκκους σκόνης πυροδοτώντας μια φάση ανάμειξης του αερίου με τα μόρια στον πάγο. Έτσι στην φάση του καυτού μοριακού πυρήνα (HMC), πριν από την θερμοπυρηνική σύντηξη, έχουμε πιο πλούσια χημική σύσταση του αερίου. Με την έναρξη της σύντηξης η ισχυρή ακτινοβολία του αστέρα μεγάλης μάζας διασπάει και ιονίζει την ύλη γύρω του. Αυτό απεικονίζεται στο ιονισμένο ατομικό Υδρογόνο HII.

Καυτοί πυρήνες (Hot cores)

Οι καυτοί μοριακοί πυρήνες συνδέονται στενά με αστέρια μεγάλης μάζας. Είναι συμπαγείς (0,1 πάρσεκ), θερμοί (100K) και πυκνοί. Παρατηρούμε ενώσεις του Αζώτου (HCN, CH₃CN),

του Οξυγόνου (H_2CO) και του θείου (SO , SO_2) να είναι κοινός τόπος αυτών των περιβαλλόντων. Επίσης παρατηρούμε COM.

Πυκνές περιοχές HII

Στα αστέρια μεγάλης μάζας μπορεί να αρχίσει η θερμοπυρηνική σύντηξη πριν την ολοκλήρωση της συσσώρευσης ύλης. Η επιφανειακή τους θερμοκρασία αρκεί ώστε να ionίζουν το περιβάλλον τους. Έτσι δημιουργείται μια περιοχή ionισμένου Υδρογόνου ενώ συνεχίζεται η συσσώρευση ύλης στο αστέρι. Η περιοχή HII συμπιέζεται κοντά στην αστρική επιφάνεια, με αποτέλεσμα να γίνει πολύ πυκνή (Hypercompact, HCHII). Με την πάροδο του χρόνου η ισορροπία αυτή διαταράσσεται. Ο ρυθμός εισροής ύλης στο αστέρι μειώνεται ενώ η ακτινοβολία του αστεριού ενισχύεται. Η περιοχή ionισμένου Υδρογόνου διαστέλλεται και χαρακτηρίζεται πλέον Ultracompact (UCHII). Η διαστολή παύει όταν υπάρξει ισορροπία ανάμεσα στην HII και την ύλη μετά από αυτήν. Οι περιοχές HII δεν έχουν ομοιομορφία. Πολλές παρουσιάζουν μία πυκνή ζώνη κρούσης με την μεσοαστρική ύλη και μια διάχυτη ουρά, κάτι που παραπέμπει σε αστέρι που κινείται με μεγάλη ταχύτητα στο μοριακό νεφέλωμα. Τα αστέρια μεγάλης μάζας κινούνται προς το κέντρο των αστρικών σημηνών.

Περιοχές φωτοδιάσπασης (photodissociation regions, PDR)

Αυτές οι περιοχές χαρακτηρίζονται από ένα πυκνό κέλυφος που δέχεται μια ροή αστρικών ανέμων. Μπορεί να είναι ένα νέφος αντανάκλασης αν ο αστρικός άνεμος δεν είναι πολύ ισχυρός ή τα όρια μιας περιοχής HII σε ισχυρό αστρικό άνεμο. Πολλές φυσικές και χημικές ιδιότητες των PDR μοιάζουν με αυτές της ατομικής (μη μοριακής) μεσοαστρικής ύλης. Όμως οι PDR παραπέμπουν σε περιοχές πυκνού αερίου κοντά σε αστέρια μεγάλης μάζας. Βρίσκονται ανάμεσα στις περιοχές HII και την ουδέτερη περιβάλλουσα ύλη. Ο βαθμός ionισμού ελαττώνεται από κοντά στο 100% στις HII σε σχεδόν 0 στην περιβάλλουσα ύλη, όπου επικρατεί η αδιαφάνεια λόγω πυκνής σκόνης. Στις PDR παρατηρούμε άτομα όπως CI, CII, OI, SII και μόρια όπως H_2 , PAHs, CO, CN, HCN, HCO^+ .

Μοριακή αστροφυσική

Διέγερση των μορίων και χημικές αντιδράσεις στο αέριο και στις επιφάνειες των κόκκων σκόνης

Η παρατήρηση μορίων σε ένα αέριο στην αστρονομία εξαρτάται από την ακτινοβολία εκπομπής και απορρόφησης του αερίου. Η εκπομπή ενός αερίου εξαρτάται από μεγέθη όπως η θερμοκρασία, η πυκνότητα, η υπεριώδης ακτινοβολία του πεδίου και ο ionισμός μέσω κοσμικής ακτινοβολίας. Αυτές οι ιδιότητες καθορίζουν και τις χημικές αντιδράσεις σε ένα αέριο.

Το μοριακό αέριο στον μεσοαστρικό αλλά και περιαστρικό χώρο δεν βρίσκεται σε θερμοδυναμική ισορροπία (thermodynamic equilibrium, LTE). Μετά από ένα όριο πυκνότητας οι συγκρούσεις των σωματιδίων κυριαρχούν της ορατής εκπομπής μέσω αυτοδιέγερσης. Η θερμοκρασία διέγερσης σε ένα αέριο εξαρτάται από την πυκνότητά του. Όταν παρατηρούμε γραμμές εκπομπής σε ένα αέριο, μπορούμε να συμπεράνουμε την πυκνότητά του σε σωματίδια και την κινητική του θερμοκρασία.

Οι χημικές αντιδράσεις στο περιεσπαστικό αέριο κυριαρχούνται από την κινητική ενέργεια. Τα είδη και ο ρυθμός των αντιδράσεων δείχνουν την σύσταση του αερίου σε ένα μοριακό νεφέλωμα. Οι χημικές αντιδράσεις στις επιφάνειες των κόκκων σκόνης και οι αντιδράσεις σκόνης-αερίου λειτουργούν συμπληρωματικά κοντά σε νεοσύστατα αστέρια. Όταν ένα μόριο PAH απορροφήσει ένα φωτόνιο υπέρυθρης ακτινοβολίας, θερμαίνεται στους 1000K για ένα δευτερόλεπτο. Μετά εκπέμπει υπέρυθρη ακτινοβολία για μια περίοδο που κυμαίνεται από 1 ημέρα ως ένα έτος, ανάλογα την απόστασή του από το αστέρι, μέχρι να επανέλθει στην θερμοκρασία των 10K. Κατά την διάρκεια αυτής της διεργασίας μπορεί να ιονιστεί ή να διασπαστεί σε μικρότερους Υδρογονάνθρακες.

Παρατηρησιακά δεδομένα

Οι χάρτες με τις διαφορές ταχύτητας μας βοηθάνε να διαχωρίσουμε τα συστατικά ενός αερίου. Το αέριο στα μοριακά νέφη παρουσιάζει πολύπλοκη κίνηση κοντά σε νεογέννητα αστέρια. Θέλουμε να εντοπίσουμε διαφορές της κίνηση που απεικονίζονται στις γραμμές εκπομπής και απορρόφησης του αερίου. Η ταχύτητα της περιστροφής του Γαλαξία είναι στην περιοχή μας 250 km/s. Η κάθετη κίνηση του ήλιου στο γαλαξιακό επίπεδο έχει ταχύτητα 16 km/s. Έτσι πρέπει να υπολογιστεί η μετατόπιση στο ερυθρό ή στο κυανό που οφείλεται σε αυτές τις κινήσεις του ήλιου και της Γης σε σχέση με τα αντικείμενα παρατήρησης. Αυτή η επίδραση είναι σημαντική ως σχετική ταχύτητα αν το αέριο (νεφέλωμα) μας προσεγγίζει ή απομακρύνεται από εμάς. Οι περισσότερες κινήσεις αερίου ανιχνεύονται ανάμεσα στην γραμμή θέασης και το επίπεδο του Γαλαξία. Το σημαντικό είναι ότι αν μετρήσουμε εκπομπές διαφορετικών ατόμων/ μορίων με την ίδια απόκλιση ταχύτητας, λογικά όλες προέρχονται από την ίδια περιοχή.

Η πυκνότητα στήλης (column density) αποτελεί ένα σημαντικό μέγεθος στις μετρήσεις μας. Οι μετρήσεις για αυτό το μέγεθος επηρεάζονται από την ομοιόμορφη πυκνότητα μιας υποτιθέμενης στήλης αερίου. Πολλές φορές η διακριτική ικανότητα του τηλεσκοπίου δεν μπορεί να αναλύσει το αντικείμενο μελέτης. Η διάσταση ενός hot core είναι τυπικά μικρότερη από την ανάλυση ενός μέσου πιάτου ραδιοτηλεσκοπίου. Χρησιμοποιούμε το μοριακό Υδρογόνο ως μέτρο σύγκρισης των χημικών στοιχείων και μορίων στα μοριακά νεφελώματα, αφού είναι με διαφορά το μόριο με την μεγαλύτερη αναλογία.

ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΑΣΤΕΡΙΩΝ ΜΙΚΡΗΣ ΜΑΖΑΣ

Τα νεαρά αστέρια (YSO, young stellar objects) μικρής μάζας χωρίζονται σε κατηγορίες εξέλιξης. Η class 0 περιλαμβάνει τα πρωτοαστέρια που βρίσκονται βαθειά μέσα στα μοριακά νεφελώματα. Η class 1 περιλαμβάνει τα πρωτοαστέρια που έχουν κέλυφος διαχωρισμένο από το νεφέλωμα και δίσκο προσαύξησης. Στην class 2 τα πρωτοαστέρια έχουν διαλύσει το κέλυφος μέσω των αστρικών ανέμων και των πιδάκων τους, ενώ συνεχίζουν να συσσωρεύουν ύλη από τον δίσκο προσαύξησης. Τα πολύπλοκα οργανικά μόρια μας βοηθάνε να μελετήσουμε το περιβάλλον ενός πρωτοαστέρα.

Το ψυχρό και πυκνό τμήμα του νεφελώματος που καταρρέει βαρυντικά θερμαίνεται, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται πολύπλοκα οργανικά μόρια (COM) πριν την ανάφλεξη της

πυρηνικής σύντηξης. Η διατήρηση αυτών των μορίων εξαρτάται από τις συνθήκες στον πρωτοπλανητικό δίσκο. Φαίνεται να δημιουργούνται σε πάγο στους κόκκους σκόνης. Είδη όπως τα CH_4 , H_2O , NH_3 αντιδρούν με αποτέλεσμα την δημιουργία πιο πολύπλοκων μορίων όπως τα CH_2CO , CH_3CHO , CH_3OCH , HC_3N , HNCO , CH_3OH . Σε περιοχές του πρωτοπλανητικού δίσκου όπου η θερμοκρασία ξεπερνάει τους 100K τα μεγαλύτερα μόρια διαλύονται, δημιουργώντας μια δεύτερη γενιά απλών μορίων.

Οι σχέσεις ανάμεσα σε 2 είδη COM μας δείχνουν τις συνθήκες του περιβάλλοντος. Ιδίως αν το ένα είναι αποτέλεσμα αντίδρασης του άλλου. Η πυκνότητα στήλης και η θερμοκρασία αποτελούν σημαντικά μεγέθη και μπορούν να μετρηθούν με αυτόν τον τρόπο. Για παράδειγμα, το CH_3OH συνδέεται με τα CH_2CO , CH_3CHO . Το CH_3CHO συνδέεται στενά με το CH_3OH και σχηματίζεται σε πάγο στους κόκκους σκόνης. Οι συνθήκες δημιουργίας ενός είδους μορίου COM μπορεί να είναι καταστροφικές για άλλο. Η σκόνη εμφανίζεται (ανιχνεύεται) το αργότερο στην φάση πρωτοαστέρα class 2.

IRAS 16293 στον Οφιούχο

Σε απόσταση 120 pc βρίσκεται το μοριακό νεφέλωμα L1689N με την πλούσια σε COM περιοχή αστρογέννησης IRAS 16293. Η περιοχή αστρογέννησης περιέχει πυκνό θερμό αέριο και σκόνη, και πολλά νεαρά αστέρια μικρής μάζας. Το νεφέλωμα ανήκει στο σύστημα αστρογέννησης ρ του Οφιούχου, που βρίσκεται αρκετά πάνω από το επίπεδο του γαλαξιακού δίσκου. Σε αυτό διακρίνουμε 3 σκοτεινά νέφη, τα L1688, L1709, L1689. Το κεντρικό L1688 απέχει 140 pc από τη Γη και παρουσιάζει έντονη αστρογέννηση. Το L1689 παρουσιάζει μικρότερη αστρογέννηση από το L1688, ενώ έχουν παρόμοιες συνθήκες.

Παρατηρούμε μια ανεξιχνίαστη σύνδεση ανάμεσα στα πυκνά <νήματα> (filaments) στα μοριακά νέφη και τους προγεννήτορες των αστεριών μικρής μάζας, τους προαστρικούς πυρήνες. Αυτοί συνήθως προεξέχουν από το νεφέλωμα ως νήματα. Φαίνεται τα αστέρια να γεννιούνται σε πολλαπλά συστήματα. Τα χαρακτηριστικά ενός τέτοιου συστήματος, όπως είναι οι μάζες των αστεριών και η μεταξύ τους απόσταση, καθορίζουν αν τελικά θα εξελιχτούν ως μεμονωμένα αστέρια, διπλό ή πολλαπλό αστρικό σύστημα.

Ο (πρωτοαστρικός) πυρήνας σχηματισμού αστέρα μικρής μάζας IRAS 16293-2422 αποτελεί κλασσικό παράδειγμα πρωτοαστέρα Class 0. Έχει συσσωρεύσει λιγότερο από την μισή από την συνολική μάζα που θα αποκτήσει. Ο πυρήνας του (το υλικό που συσσωρεύει το πρωτοαστέρι) έχει μέγεθος χιλιάδων αστρονομικών μονάδων. Φαίνεται να σχηματίζονται 2 αστέρια με διαχωρισμό 600 αστρονομικές μονάδες, με ένα κοινό συμπαγή δίσκο γύρω τους. Η ηλικία του συστήματος δεν ξεπερνάει το 10.000 έτη. Διακρίνουμε 3 ξεχωριστούς πρωτοαστρικούς πυρήνες (A1, A2, B).

Τα αστέρια μικρής μάζας μπορούν να θερμάνουν το υλικό γύρω τους μόνο σε περιορισμένη ακτίνα. Πέρα από αυτήν σχηματίζεται πάγος στους κόκκους σκόνης και δημιουργούνται τα COMs. Οι πρωτοαστρικοί πυρήνες ξεχωρίζουν σαν θερμές πηγές μέσα σε αυτή την ύλη.

Μελετώντας το αέριο κοντά και ανάμεσα στα πρωτοαστέρια A, B οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι τα αστέρια βασικά δημιουργούνται σε διπλά και πολλαπλά συστήματα. Η απόσταση ανάμεσα στο A και το B πρωτοαστέρι είναι 600 AU, και βρίσκονται

ενσωματωμένα σε ένα κοινό κέλυφος 10.000 AU. Χαρακτηριστικά μόρια που διακρίνουμε εκεί είναι τα CO, H₂CO, HCN, CS, SiO, C₂H, αλλά και HCO₂CH₃, CH₃OCH₃, C₂H₅CN. Υπάρχει μια γέφυρα από αέριο και σκόνη ανάμεσα στα δύο αντικείμενα. Το A παρουσιάζει εκροή αερίου, που δείχνει την ύπαρξη θερμού και πυκνού αερίου, αλλά αυτή η εκροή δεν συνδέεται με την γέφυρα.

Το αέριο στην γέφυρα (ανιχνεύουμε ψυχρό C₁₇O) είναι σε κατάσταση ηρεμίας και πολύ μικρότερης ταχύτητας από το αέριο της παραπάνω εκροής. Μάλλον πρόκειται για υπόλειμμα του νήματος ύλης όπου σχηματίστηκε το κέλυφος των πρωτοαστέρων A,B. Το B δεν παρουσιάζει εκροή αερίου, άρα βρίσκεται σε προγενέστερο στάδιο εξέλιξης. Οι δίσκοι προσαύξησης των δύο πρωτοαστέρων έχουν διαφορετικό προσανατολισμό.

Στο κέλυφος ανιχνεύουμε 3 διαφορετικά περιβάλλοντα. Το πρώτο είναι θερμό, πυκνό και με στροβιλισμούς, πλούσιο σε μόρια με βάση το Πυρίτιο και το Θείο, ένα hot corino. Το δεύτερο είναι αρκετά πυκνό και σε κατάσταση ηρεμίας, με μόρια όπως τα CS, HCO⁺, H₂CO. Το τρίτο είναι η εξωτερική πιο ψυχρή περιοχή του κελύφους που φιλοξενεί CN, C₂H, C₃H₂.

Η σημαντική διαφορά ανάμεσα σε περιοχές κοντά σε πρωτοαστέρια μικρής μάζας με αυτές σε πρωτοαστέρια μεγάλης μάζας είναι ότι η σκόνη και το αέριο εκτίθενται για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα σε συνθήκες χαμηλής θερμοκρασίας και μεγάλης πυκνότητας. Αυτό επιτρέπει τον διαχωρισμό των χημικών αντιδράσεων του αερίου από αυτές των κόκκων σκόνης. Δημιουργούνται μόρια όπως τα D₂CO, ND₂H, ND₃, CHD₂OH, CD₃OH και άφθονο H₂O. Τα μόρια του Δευτερίου είναι πιο σταθερά από αυτά του Υδρογόνου. Οι αντιδράσεις σε επιφάνειες από ψυχρούς κόκκους σκόνης ευνοούν την παραγωγή τους.

Το μόριο DCO⁺ αποτελεί δείκτη της περιοχής διεπαφής ανάμεσα στον δίσκο προσαύξησης του πρωτοαστέρα και του κελύφους. Οι συνθήκες δημιουργίας αυτού του μορίου είναι ιδιαίτερα ευαίσθητες στην θερμοκρασία. Η επίδραση της σκίασης από τον δίσκο στο κέλυφος καθορίζει τις χημικές αντιδράσεις σε εκείνη την περιοχή. Η περιοχή που σκιάζεται προστατεύεται από την υπεριώδη ακτινοβολία και έχει χαμηλότερη θερμοκρασία. Αυτό το φαινόμενο εξηγεί την ανομοιογένεια του DCO⁺ στην διεπαφή του δίσκου με το κέλυφος.

Οι δίσκοι προσαύξησης αποτελούν μακρόχρονη δεξαμενή για τα μόρια που δημιουργούνται σε αυτούς. Η περιστροφή ενός δίσκου κάνει ελεγχόμενη τη ροή ύλης σε αυτόν, με αποτέλεσμα το περιβάλλον του να είναι αρκετά σταθερό. Σε συνθήκες με θερμοκρασία κάτω από 20K το μοριακό Άζωτο παγώνει στους κόκκους σκόνης. Ενώ μόρια όπως τα CN, HCN, HNC, NO σχηματίζονται σε αντιδράσεις και στο αέριο αλλά και στις επιφάνειες των κόκκων, τα μόρια N₂H⁺, N₂D⁺ απαιτούνε την παρουσία μοριακού Άζωτου στο αέριο. Τα παράγωγα του CO εμφανίζονται σε ακόμα χαμηλότερη θερμοκρασία (10K). Έτσι υπάρχει μια ακολουθία, HDO⁺ < HCO⁺ < N₂H < N₂D σε εύρος θερμοκρασίας 10K-30K.

Μέσα σε ένα κέλυφος μεγέθους 1000AU με έναν τυπικό δίσκο μεγέθους 100AU υπάρχει ένα διακριτό χώρισμα (centrifugal barrier). Αυτό βρίσκεται περίπου στην μισή ακτίνα του κελύφους, όπου η κινητική ενέργεια της ύλης που πέφτει μέσα στον δίσκο μετατρέπεται σε ενέργεια περιστροφής (rotation energy). Ο δίσκος δημιουργείται στο εσωτερικό μέρος μετά το χώρισμα. Στις 2 περιοχές διακρίνουμε διαφορές στην αφθονία των μορίων. Η εμφάνιση ενός κρουστικού μετώπου στο όριο δικαιολογεί την ενισχυμένη εμφάνιση του SO.

Το IRAS 16293-4-2422 μας δίνει την ευκαιρία να μελετήσουμε τα μόρια που σχετίζονται με την δημιουργία αστεριών μικρής μάζας. Παρατηρούμε τα αποτελέσματα των χημικών αντιδράσεων από το πυκνό νήμα στο μοριακό νεφέλωμα στον πρωτοαστρικό πυρήνα με το κέλυφος γύρω του, τον δίσκο προσαύξησης και τα warm/ hot corinos. Τα COM μας βοηθάνε να καθορίσουμε την δομή και το μέγεθος του δίσκου και του κελύφους. Επίσης μπορούμε να συμπεράνουμε την θερμοκρασία της σκόνης και του αερίου, από τις αντιδράσεις που είναι ευαίσθητες στην θερμοκρασία.

Το NGC1333 στον Περσέα

Στο μοριακό νεφέλωμα του Περσέα έχουμε ανακαλύψει 94 πρωτοαστέρια Class 0,1,2. Είναι σχεδόν άορατο στο οπτικό φάσμα, εκτός από τις 2 πυκνές περιοχές του, τα μικρότερα νεφελώματα IC348, NGC1333. Η τελευταία βρίσκεται στην δυτική πλευρά του νεφελώματος και φωτίζεται από ένα αστέρι τύπου B8. Αποτελεί νεφέλωμα αντανάκλασης και φιλοξενεί ήδη ένα σμήνος αστεριών. Η μάζα του είναι 450 φορές αυτή του ήλιου. Παρουσιάζει σημαντική εισροή ύλης, όπως φαίνεται από την ερυθρολίση του HCO⁺ στο αέριο που εισρέει, και έχει μέγεθος 0,4 πάρσεκ.

Στο NGC1333 δημιουργείται αστρική μάζα όση του ήλιου μας κάθε έτος κατά μέσο όρο (πολλά μικρότερης μάζας ή ένα μεγαλύτερης μάζας αστέρια). Ήδη φιλοξενεί εκατοντάδες νεαρά αστέρια. Η απόστασή του από τη Γη είναι 300- 350 πάρσεκ, λίγο πιο κοντά από το νεφέλωμα του Ωρίωνα. Έτσι πετυχαίνουμε την ανάλυση των κελυφών και των δίσκων προσαύξησης των πρωτοαστέρων μικρής μάζας. Εντοπίσαμε 40 πρωτοαστέρια μικρής μάζας και 100 προ κυρίας ακολουθίας πρωτοαστέρια με δίσκο προσαύξησης.

Αντίθετα με την νοτιοανατολική πλευρά του νεφελώματος του Περσέα, το NGC1333 και οι γειτονικές του περιοχές L1448, L1455 φιλοξενούν πολύ νεαρούς αστρικούς πληθυσμούς. Η κατανομή του 13CO στο NGC1333 μας δείχνει ένα πλήθος αντικειμένων Herbig-Haro(HH). Πρόκειται για περιοχές του νεφελώματος που δέχτηκαν κρουστικά κύματα από τους πίδακες των πρωτοαστέρων, με ηλικία μικρότερη από ένα εκατομμύριο έτη.

Σε μία περιοχή δημιουργίας αστεριών μικρής μάζας ξεχωρίζουν αρχικά τα hot corinos (>100K). Παρουσιάζουν πλούσια ποικιλία εκπομπών COMs (CH₃OH, CH₃CHO, HCOOCH₃). Αποτελούν τα ανάλογα αντικείμενα με τα hot cores στα αστέρια μεγάλης μάζας. Πιο εσωτερικά διακρίνουμε τα κελύφη των πρωτοαστέρων. Στην πολύ θερμή εσωτερική περιοχή τα COMs απουσιάζουν, εμφανίζονται σε απόσταση 2000 AU από το κέντρο του πρωτοαστέρα. Αυτή η περιοχή χαρακτηρίζεται από αντιδράσεις τύπου warm carbon chain chemistries (WCCCs). Τις εντοπίζουμε από μόρια όπως τα CCH, C₄H.

Μία εκδοχή της δημιουργίας των COM σε hot corinos και περιοχές WCCCs είναι η εξάχνωση του πάγου των κόκκων σκόνης, κάτι που συμβαίνει πιο εκτεταμένα στα αστέρια μεγάλης μάζας. Μια δεύτερη εκδοχή είναι η επανένωση μη κορεσμένων μορίων στους κόκκους σκόνης σε θερμοκρασία 30K- 100K. Τα μόρια είχαν αρχικά διαλυθεί μέσω υπεριώδης ακτινοβολίας ή μερικού παγώματος.

Οι πηγές IRAS2 και IRAS4 είναι πολλαπλές. Η πρώτη έχει 2 μέλη, A και B. Στο A ανιχνεύτηκαν πολλές γραμμές εκπομπής από τον δίσκο και το εσωτερικό κέλυφος. Παρατηρούνται εκροές

SiO, CO. Η αναλογία των SO₂, CS, με το SO μας δείχνει την εξέλιξη του πρωτοαστέρα. Η πηγή IRAS 4 αποτελείται από τα A1, A2 και B. Το A είναι ένα σύστημα με 2 πρωτοαστέρια σε κοντινή μεταξύ τους απόσταση. Παρατηρούμε ένα μείζερ (maser) H₂O που αναλογεί στον δίσκο συσσώρευσης.

Το CH₃OH (αιθανόλη) παρουσιάζει μεγάλη αφθονία στο παραπάνω νεφέλωμα. Αποτελεί πρόδρομο των HCOOCH₃, C₂H₅OH που παρουσιάζουν αναλογία σε σχέση με την αιθανόλη 3% και 1,5% αντίστοιχα.

Με την δημιουργία ενός πρωτοαστέρα η θερμοκρασία του περιβάλλοντός του αυξάνεται. Τα COMs σχηματίζονται πιο αποτελεσματικά. Το ατομικό Υδρογόνο που ήταν δεσμευμένο σε κόκκους σκόνης εξαερώνεται και συμβάλει, πλέον σε αέρια κατάσταση, ώστε τα μικρότερα ακόρεστα μόρια να αλληλεπιδράσουν σχηματίζοντας μεγαλύτερα κορεσμένα COMs. Αυτό συμβαίνει στις επιφάνειες των κόκκων σκόνης, HCO+CH₃O: HCOOCH₃.

Αν ο χρόνος της βαρυτικής κατάρρευσης της ύλης στο πρωτοαστέρι έχει την ταχύτητα της ελεύθερης πτώσης, τότε αυτή η φάση κατάρρευσης πριν την ανάφλεξη του πρωτοαστέρα είναι συντομότερη του χημικού χρονοδιαγράμματος. Σε αυτήν την περίπτωση πολλά από τα άτομα Άνθρακα δεσμεύονται σε κόκκους πριν σχηματίσουν CO. Η κατάσταση αυτή αλλάζει όταν το αστέρι θερμάνει τους κόκκους. Τότε αναπτύσσονται μόρια της αλυσίδας του Άνθρακα.

Οι αναλογίες ειδών μορίων στις περιοχές IRAS2, IRAS4 στο NGC1333 απεικονίζουν την διαφορά των συνθηκών ανάμεσα στις περιοχές δημιουργίας COM και WCCC κοντά στα πρωτοαστέρια μικρής μάζας.

Το IRAS15398 στην Αλεπού

Μία από τις μεγαλύτερες και πιο κοντινές περιοχές αστρογέννησης αστερών μικρής μάζας είναι το σύμπλεγμα IRAS15398. Βρίσκεται σε απόσταση 155 πάρσεκ και έχει εκτιμώμενη έκταση 50 πάρσεκ. Είναι ενσωματωμένο στο κέλυφος από το άνω σμήνος αστερών OB του Σκορπιού (Upper Scorpius OB cluster, USco). Έτσι δέχεται κρουστικά κύματα που συμπιέζουν το αέριο σε αυτό, πυροδοτώντας πολλαπλή αστρογέννηση. Μαζί με το σύμπλεγμα του Οφιούχου συνδέονται με την ζώνη του Gould, που περιέχει σμήνη με αστέρια μεγάλης μάζας.

Τα 2 αυτά συμπλέγματα βρίσκονται μέσα στην μία από τις γιγάντιες <φούσκες> καυτού ιονισμένου αερίου που εκτείνονται κάθετα στο γαλαξιακό επίπεδο, από το κέντρο του Γαλαξία στην άλω. Αυτές εκπέμπουν στις ακτίνες Χ. Το σύμπλεγμα της Αλεπούς περιλαμβάνει 9 μοριακά νέφη, το καθένα με διαφορετική δραστηριότητα αστρογέννησης. Για παράδειγμα, το Lupus 3 παρουσιάζει πυκνή συγκέντρωση αστεριών T- Tauri. Τα 7,8,9 βρίσκονται σε κατάσταση ηρεμίας. Τα 1-4 είναι τα πιο ενεργά, ενώ στα 5,6 παρατηρούμε επίσης πληθυσμούς YSO (Young Stellar Objects). Το 1 είναι το πιο ευδιάκριτο χάρη στην πυκνή σκόνη του. Η μάζα του εκτιμάται στις 10.000 ηλιακές.

Τρεις βασικές δομές σε ένα μοριακό νέφος συνδέονται πάντα με πρόσφατη αστρογέννηση. Αυτές είναι οι περιστρεφόμενοι πρωτοπλανητικοί δίσκοι, τα πρωτοαστρικά κελύφη και οι διπολικές εκροές μοριακού αερίου. Οι τρεις αυτές δομές έχουν διακριτή χημεία. Η

επίδραση των κρουστικών κυμάτων και της θέρμανσης από τα πρωτοαστέρια μεταβάλλει την χημεία σε βάθος χρόνου (απόψυξη του πάγου στους κόκκους σκόνης). Το IRAS15398 αποτελεί πηγή χημείας αλυσίδας Άνθρακα (WCCC) αλλά και κρουστικών μετώπων λόγω πολικών εκροών ύλης. Το Lupus 1 κυριαρχείται από ένα πρωτοαστέρι Class 0. Φαίνεται να παρουσιάζει έξαρση δραστηριότητας τα τελευταία 100- 1000 έτη, με αποτέλεσμα να θερμάνει την σκόνη και το αέριο στο κέλυφος γύρω του.

Η απώλεια μάζας των πρωτοαστέρων οφείλεται στην ανάπτυξη φυγόκεντρων δυνάμεων λόγω μαγνητικής επίδρασης. Σχετίζεται με την συσσώρευση ύλης στο πρωτοαστέρι και την διατήρηση της στροφορμής. Η εισροή ύλης δεν απεικονίζεται άμεσα, αλλά την διαπιστώνουμε από τις γραμμές εκπομπής που παρουσιάζουν ερυθρολίσηση (απομακρύνονται από εμάς) σε σχέση με τις μετατοπισμένες προς το κυανό γραμμές στο εσωτερικό ενός πρωτοαστέρα. Στις εκροές ύλης του IRAS 15398 παρατηρούμε δύο λοβούς (στην εκπομπή του 13CO). Η απουσία HCO+ δείχνει την ανάπτυξη κρουστικών μετώπων μέσω της συσσώρευσης ύλης.

Τα δύο βασικά ισοτοπόλογα του CO εμφανίζονται στην εκροή ύλης και στους λοβούς. Η εκπομπή του C18O κορυφώνεται κοντά στο πρωτοαστέρι, καταστρέφοντας το N2H+ στην περιοχή. Σε περιοχές με ασθενέστερη εκπομπή του CO ανιχνεύεται η εκπομπή του N2H+.

Υιοθετούμε την θερμοκρασία των 100K για τους δύο λοβούς εκροής. Εκτείνονται σε μήκος 3700AU με μέγιστο πλάτος 700AU. Η μάζα του πρωτοαστέρα εκτιμάται στις μόλις 0,4 ηλιακές, άρα πρόκειται για πολύ νεαρό αντικείμενο, ακόμη και για την κατηγορία Class 0. Βάσει των ταχυτήτων εκροής της ύλης υπολογίζουμε την ηλικία των λοβών στα 500 έτη. Η κατάσταση σχετικής ηρεμίας του πρωτοαστέρα για την πολύ μικρή του ηλικία δείχνει την έλλειψη ύλης προς εισροή.

Η εισροή ύλης στα πρωτοαστέρια δεν είναι σταθερή. Αυτό έχει ως συνέπεια την μεταβολή της λαμπρότητας (εκπομπής), άρα και την μετατόπιση της γραμμής του χιονιού στον πρωτοπλανητικό δίσκο. Αυτό αποτυπώνεται στην παρουσία μορίων ή στο πάγωμά τους στις επιφάνειες των κόκκων σκόνης, όπως το μόριο του νερού.

Η κατανομή συγκεκριμένων μορίων στο IRAS 15398 μας δείχνει τις διάφορες περιοχές του, και τις συνθήκες που επικρατούν εκεί. Στην ύλη που εκρέει από το πρωτοαστέρι παρατηρούμε ανάπτυξη χημείας κρουστικών μετώπων. Επίσης τα διάφορα είδη μορίων μας επιτρέπουν να διαχωρίσουμε τον δίσκο προσαύξησης από το κέλυφος του πρωτοαστέρα.

ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΑΣΤΕΡΩΝ ΜΕΓΑΛΗΣ ΜΑΖΑΣ (HIGH MASS STAR FORMATION, HMSFR)

Από τις 10.000 γνωστές μας περιοχές μεγάλης μάζας σε νεφελώματα στον Γαλαξία μας, το 92% πληροί τις συνθήκες μάζας- μεγέθους για την δημιουργία αστεριών μεγάλης μάζας. Σχεδόν σε όλες αυτές παρατηρούμε αστρογέννηση. Στο 15% του δείγματος παρατηρούμε πυκνές περιοχές HII. Για την ανίχνευση κρουστικών μετώπων χρησιμοποιούμε την εκπομπή του SiO. Το πυρίτιο είναι σημαντικό υλικό για την δημιουργία κόκκων σκόνης. Στα

πρωτοαστέρια μικρής μάζας αυτό το μόριο συνδέεται με εκροή ύλης και πίδακες, και η αφθονία του ελαττώνεται στην διάρκεια του χρόνου. Αυτό φαίνεται να μην συμβαίνει στα πρωτοαστέρια μεγάλης μάζας. Υπάρχουν μόρια όπως το HN13C , που είναι πολύ ευαίσθητα στην θερμοκρασία της σκόνης. Αυτά μας δείχνουν τις πυκνές ψυχρές περιοχές. Ενώ η σκόνη σε αυτές έχει θερμοκρασία 25K, το αέριο είναι 10K με 20K θερμότερο. Η εκπομπή του CH_3CH_2 μας πληροφορεί για την πιθανή ύπαρξη ενσωματωμένων στο νεφέλωμα πρωτοαστέρων πολύ νεαρής ηλικίας. Σε συνδυασμό με την δημιουργία του SiO μας δείχνει τον σχηματισμό αστέρων μεγάλης μάζας σε αυτές τις πυκνές περιοχές.

Τα πρωτοαστέρια μεγάλης μάζας παρουσιάζουν λαμπρότητα > 10.000 φορές αυτή του ήλιου, και αρχική μάζα στην κύρια ακολουθία > 8 ηλιακές μάζες. Ο χρόνος ελεύθερης πτώσης σε ένα συμπύκνωμα σε ένα νεφέλωμα (free falling time) εξαρτάται από την πυκνότητά του. Όσο πιο πυκνό είναι τόσο πιο εύκολα καταρρέει βαρυτικά. Για την δημιουργία αστέρων μεγάλης μάζας η θεωρία είναι πιο σύνθετη.

Υπάρχουν οι εκδοχές μονολιθικής κατάρρευσης πυρήνα με στροβιλισμό, σύγκρουση πρωτοαστέρων σε πυκνά περιβάλλοντα (ένωση σε μεγάλης μάζας πρωτοαστέρα) και ανταγωνιστικής συσσώρευσης ύλης στα αστρικά σμήνη (συσσώρευση σε βάρος ανάπτυξης άλλων αστέρων). Οι προσομοιώσεις μας δείχνουν ότι σε ομαλή κατανομή πυκνότητας είναι πιο πιθανή η δημιουργία πολλών αστέρων μικρής μάζας. Το προφίλ της πυκνότητας σε ένα συμπύκνωμα και ο στροβιλισμός καθορίζουν την δημιουργία ή όχι αστέρων μεγάλης μάζας.

Τα μεγάλα μόρια διαφοροποιούνται σημαντικά στους πυρήνες κατάρρευσης από τις γύρω περιοχές, κάτι που δεν αποτυπώνεται έντονα στα πιο απλά μόρια. Αυτό αποτελεί έναν δείκτη πυκνότητας της ύλης. Η εμφάνιση των CH_3OH και CH_3CN στις πηγές μεγάλης μάζας παρατηρείται και σε περιοχές δημιουργίας αστέρων μικρής μάζας. Δεν υπάρχει χημική σύνδεση ανάμεσα σε αυτά τα 2 μόρια. Η ταυτόχρονη εμφάνισή τους πρέπει να εξαρτάται από την θερμοκρασία, να πρόκειται για προϊόντα εξαέρωσης πάγου κόκκων σκόνης.

Ο στροβιλισμός και η ανάδευση του πυκνού αερίου του νεφελώματος με την σκόνη προσδιορίζουν την μέγιστη μάζα που μπορεί να αποκτήσει ένα αστέρι.

Η περιοχή Sagittarius (Sgr) B2

Πρόκειται για την περιοχή στον Γαλαξία μας με την πιο έντονη δημιουργία αστέρων μεγάλης μάζας. Η λαμπρότητά της φτάνει τα δέκα εκατομμύρια φορές αυτή του ήλιου μας. Είναι ένα σύμπλεγμα γιγάντιων μοριακών νεφελωμάτων (Giant molecular clouds, GMC) σε απόσταση 8 χιλιάδες πάρσεκ από τη Γη. Απέχει μόλις 100 πάρσεκ από το κέντρο του Γαλαξία μας. Η διάμετρός της είναι 40 πάρσεκ και η μάζα της 10 εκατομμύρια ηλιακές. Χαρακτηρίζεται σαν μικρή περιοχή έντονης αστρογέννησης (mini starburst region, όπως οι γαλαξίες έντονης αστρογέννησης). Έχουμε εντοπίσει 70 αστέρια μεγάλης μάζας και αποδείξεις δημιουργίας περισσότερων. Σε αυτό συνηγορούν η μεθανόλη (CH_3OH), οι water masers, οι περιοχές HII και 200 συμπαγείς πηγές εκπομπής στα χιλιοστόμετρα. Οι χάρτες της διασποράς της εκπομπής του SiO μας δείχνουν στροβιλισμούς σε μεγάλη κλίμακα, που σημαίνουν αστρογέννηση αλλά και κρουστικά μέτωπα από συγκρούσεις νεφελωμάτων. Η εγγύτητα στην κεντρική μαύρη τρύπα του Γαλαξία μας (SgrA*) έχει ως

αποτέλεσμα το σύμπλεγμα να δέχεται 100 φορές περισσότερη υπεριώδεις ακτινοβολία και 3 φορές περισσότερες κοσμικές ακτίνες από την δική μας περιοχή στον Γαλαξία.

Η περιοχή Sgr B2 χωρίζεται σε 3 δομές. Η πρώτη περιλαμβάνει τα πρώτο- σμήνη μεγάλης μάζας N, M, S με θερμοκρασία αερίου 200K. Η δεύτερη είναι ένα λιγότερο πυκνό κέλυφος με θερμοκρασία 100K που εκτείνεται γύρω από αυτές και η τρίτη είναι μια εκτεταμένη άλω που φτάνει ως τα 40 πάρσεκ γύρω από τους πυκνούς πυρήνες αστρογέννησης. Στις 3 εσωτερικές δομές Sgr B2 N, M, S βρίσκονται υπέρπυκνες περιοχές HII που συνδέονται με δημιουργία αστερών μεγάλης μάζας. Δεκάδες είδη μορίων έχουν ανιχνευτεί σε αυτές, μαζί με μεγάλο πληθυσμό πρωτοαστέρων μεγάλης μάζας.

Ο πυκνός μοριακός πυρήνας Sgr B2 N περιέχει αρκετές περιοχές HII. Η συνεχής εκπομπή του στα χιλιοστόμετρα δείχνει θερμική εκπομπή της σκόνης. Παρατηρήθηκε στην εκπομπή των SiO, SO₂ διπολική εκροή μικρής ηλικίας (1000 ετών) με μεγάλη μάζα (2000 ηλιακές μάζες). Το ένα τρίτο από όλα τα πολύπλοκα οργανικά μόρια (COM) που έχουμε ανιχνεύσει στην μεσοαστρική ύλη βρέθηκαν στο Sgr B2 N. Αρκετά COMs βρέθηκαν στο ψυχρότερο και λιγότερο πυκνό κέλυφος.

Όσο τα περιβάλλον είναι αρκετά ψυχρό, στην πολύ αρχική φάση της αστρογέννησης, τα μόρια παγώνουν πάνω στους κόκκους σκόνης. Με την αύξηση της θερμοκρασίας παρατηρείται εκρόφιση (desorption) των μορίων. Αυτή είναι θερμική αν αυξηθεί αρκετά η θερμοκρασία των κόκκων σκόνης ή μέσω υπεριώδης ακτινοβολίας ή κοσμικών ακτίνων. Επίσης τα κρουστικά μέτωπα μπορούν να απομακρύνουν τα παγωμένα μόρια από τους κόκκους σκόνης. Να προσθέσουμε και τις ακτίνες X λόγω εγγύτητας στην κεντρική μαύρη τρύπα του Γαλαξία. Αυτοί οι μηχανισμοί συμβάλλουν στην δημιουργία των COMs.

Ο αυξημένος ιονισμός που επικρατεί σε αυτή την τόσο κοντινή στο κέντρο του Γαλαξία περιοχή έχει ως αποτέλεσμα σε αυτό το σύμπλεγμα να παρατηρούμε την πλούσια δημιουργία COMs.

Στο σύμπλεγμα γιγάντιων μοριακών νεφελωμάτων Westerhout 43

Αυτό το σύμπλεγμα βρίσκεται στη βάση του βραχίονα Scutum- Centaurus με την κεντρική περιοχή του Γαλαξία μας, σε απόσταση 6000 πάρσεκ. Το μέγεθός του πλησιάζει τα 200 πάρσεκ. Παρατηρούμε έντονη αστρογέννηση και στροβιλισμούς στο εσωτερικό του. Λόγω των συγκρούσεων των νεφελωμάτων σε αυτό, παρατηρούμε συμπύκνωση του αερίου και ρυθμό αστρογέννησης που καλύπτει το 5- 10% της συνολικής αστρογέννησης στον Γαλαξία μας. Ξεχωρίζουν η θερμική εκπομπή από τα αστέρια, οι πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες και η καυτή από την ακτινοβολία των αστερών μεγάλης μάζας σκόνη. Οι παρατηρήσεις του CO μας δείχνουν 3 διακριτές δομές στο σύμπλεγμα. Ο έντονος στροβιλισμός οφείλεται σε ένα ρεύμα αερίου από τον βραχίονα Scutum και τις συγκρούσεις ανάμεσα στα νεφελώματα.

Οι 3 δομές αυτές είναι η W43 Main, W43 South και η G30,5. Οι 2 πρώτες είναι περιοχές αστρογέννησης με μεγάλη συγκέντρωση και μέγεθος 10 πάρσεκ. Η τελευταία είναι μια πιο εκτεταμένη περιοχή με 5 τόπους αστρογέννησης. Στην πρώτη έχουμε 50 πηγές υποψήφιας για πολύ νεαρά σμήνη αστεριών (proto clusters). Η W43 Main είναι και η πιο ενεργή

περιοχή αστρογέννησης σε όλο το W43. Στο W43 South παρατηρούμε πολλαπλές πηγές που αντιστοιχούν σε αστέρια OB.

Ο σχηματισμός αστερών μεγάλης μάζας (πάνω από 8 ηλιακές μάζες και 10.000 φορές την λαμπρότητα του ήλιου) έχει ως χαρακτηριστικό τον υψηλό ρυθμό συσσώρευσης ύλης και την ισχυρή ακτινοβολία του αστεριού, ακόμα και πριν μπει στην κύρια ακολουθία (θερμοπυρηνική σύντηξη). Το αέριο γύρω από το αστέρι δέχεται την πίεση της ακτινοβολίας και τον ιονισμό μέσω της υπεριώδους ακτινοβολίας. Η αρχική φάση ιονισμού αντικατοπτρίζεται στις περιοχές υπέρπυκνου ιονισμένου Υδρογόνου (Hypercompact ionized hydrogen regions, HCHII). Αυτού του είδους πηγές εκπέμπουν γραμμές επανασύνδεσης στα ραδιοκύματα (radio recombination lines, RRL). Τα μεγάλα πλάτη αυτών των γραμμών δεν δικαιολογούνται μόνο με τον θερμικό και λόγω πίεσης στροβιλισμό του αερίου, αλλά δείχνουν ότι το αέριο εκτελεί κινήσεις μεγάλης κλίμακας (εισροή αερίου, διαστολή και περιστροφή).

Η περιοχή G24 A1 είναι ένα διαστελλόμενο κέλυφος ιονισμένου αερίου με πάχος 1000 AU. Διαστέλλεται με ταχύτητα 16 km/s και φιλοξενεί ένα νεαρό αστέρι τύπου O9,5. Αυτή η περιοχή HCHII διαστέλλεται αλλά και κινείται προς την δομή SW. Στα όριά της η θερμοκρασία ελαττώνεται απότομα κατά χιλιάδες βαθμούς. Ανιχνεύουμε δείκτες αερίου σε κρουστικά μέτωπα μεγάλης πυκνότητας (SO₂ και CH₃CN) που μας δείχνουν μια διαβάθμιση από νοτιοδυτικά προς βορειοανατολικά, παράλληλη στην ροή ιονισμού.

Στην περιοχή HCHII G24 παρατηρούνται αρκετές μικρότερες περιοχές –πυρήνες σκόνης (A1, A1b, A1c, A2, A2b) που αναλογούν σε πρωτοαστέρια από 7 ως 22 ηλιακές μάζες. Στην A1 παρατηρούμε την εκροή ύλης από το πρωτοαστέρι, 20 ηλιακών μαζών. Παρατηρούμε το σύστημα δίσκος προσαύξησης μεγέθους 1500 AU - πίδακες. Η μάζα του δίσκου αποτελεί το 10% της μάζας του πρωτοαστέρα.

Όταν το πρωτοαστέρι φτάσει να συσσωρεύσει πάνω από 10 ηλιακές μάζες αέριο και σκόνη, δημιουργείται η περιοχή ιονισμένου Υδρογόνου HII γύρω του. Η αλληλεπίδραση της περιοχής HCHII με το γύρω της μοριακό αέριο (του νεφελώματος) ανιχνεύεται με masers νερού και μεθανόλης. Η τελευταία δείχνει περιοχές χαμηλότερης ταχύτητας από ότι οι masers νερού. Απεικονίζει την διαστολή του αερίου γύρω από την περιοχή ιονισμένου Υδρογόνου. Οι masers νερού απεικονίζουν τα κρουστικά μέτωπα που προκαλούνται από τις εκροές ύλης του πρωτοαστέρα.

Το ουδέτερο αέριο γύρω από την περιοχή HCHII στο A1 περιέχει πολλά COM (CH₃OH, CH₃CN, CH₃CH₂CN) που υποδηλώνουν αυξημένη θερμοκρασία λόγω των κοντινών κρουστικών μετώπων από την διαστολή της ιονισμένης περιοχής.

H δομή G34.26+ 0.15 υπέρπυκνου ιονισμένου Υδρογόνου (UCHII) στον Αετό

Αντίθετα με ότι συμβαίνει στα αστέρια μικρής μάζας, η θερμοπυρηνική σύντηξη στα πρωτοαστέρια μεγάλης μάζας αρχίζει πριν την ολοκλήρωση της συσσώρευσης ύλης. Έτσι δημιουργείται η περιοχή ιονισμένου αερίου γύρω από το πρωτοαστέρι ενώ αυτό συσσωρεύει ακόμα υλικό. Αυτή η σφαίρα ιονισμένου αερίου διαστέλλεται ως το όριο της ακτίνας Stromgren.

Η περιοχή δημιουργίας αστέρων μεγάλης μάζας παρουσιάζει εισροή αερίου από το νεφέλωμα με ρυθμό 1 ηλιακής μάζας τα 1000 έτη, όπως προκύπτει από τις γραμμές εκπομπής και απορρόφησης της αμμωνίας. Υπάρχουν 3 διακριτές πηγές όπου εισρέει το αέριο, οι A,B,C στον υπέρπυκνο καυτό πυρήνα (UCHC). Στο SiO απεικονίζονται οι εκροές ύλης.

Η περιοχή UCHII-C παρουσιάζει ένα παραβολικό σχήμα, που παραπέμπει σε δομή κεφαλής και ουράς. Αυτό δικαιολογείται από την κίνηση του υπερηχητικού ανέμου των νεαρών αστεριών μέσα στο μοριακό νέφος, που δημιουργούν ένα κρουστικό μέτωπο. Η παρατήρηση των maser μας δείχνει ότι υπάρχουν 4 πρωτοαστέρια (YSO) που παρουσιάζουν εκροή ύλης. Το καθένα παρουσιάζει maser νερού, και βρίσκονται στο τρίγωνο των πηγών A,B,C. Αυτά τα masers νερού παρατηρούνται σε βάθος δεκαετίας, αντίθετα με masers σε YSO μικρής μάζας που εμφανίζονται και εξαφανίζονται σε χρόνο μικρότερο από ένα έτος.

Αν ο χρόνος διάρκειας αυτών των ενεργών maser είναι 100.000 έτη, τότε πρόκειται για πρωτοαστέρια που γεννήθηκαν σε κοντινή απόσταση μεταξύ τους και με μικρό εύρος χρόνου. Σε μεγαλύτερη κλίμακα παρατηρήθηκε μια συνολική εκροή από την εκπομπή των μορίων ^{13}CO , SiO.

Οι τρεις περιοχές UCHII στο G34.26 παρατηρούνται εδώ και 30 έτη. Μας δείχνουν εισροή αερίου από το κέλυφος μοριακού Υδρογόνου, εκροές από τα πρωτοαστέρια, διαστελλόμενο ιονισμένο αέριο και δημιουργία μορίων σε καυτούς μοριακούς πυρήνες. Τέτοια μόρια παρατηρούμε και στην διεπαφή της περιοχής C ανάμεσα στο ιονισμένο και το μοριακό αέριο.

ΟΙ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΠΟΥ ΚΑΘΟΡΙΖΟΝΤΑΙ ΑΠΟ ΤΗΝ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ (PDR, PHOTON DOMINATED REGIONS)

Είδαμε ότι αναπτύσσονται μόρια από την αλληλεπίδραση των περιοχών ιονισμένου Υδρογόνου με τους καυτούς πυρήνες. Αυτές οι περιοχές PDR βρίσκονται ανάμεσα στο ιονισμένο αέριο από ένα αστέρι μεγάλης μάζας (τύπου O,B) και το ουδέτερο αέριο από το μοριακό νεφέλωμα. Ο βαθμός ιονισμού εξαρτάται από την ισχύ της εκπομπής υπεριώδους ακτινοβολίας. Χαρακτηριστικές γραμμές εκπομπής ατόμων των περιοχών PDR είναι οι CII, CI, OI, SiII. Μόρια- ανιχνευτές των PDR είναι τα HCO^+ , HOC^+ , C_2H , H^{13}CN , H^{15}CN , HN^{13}C . Τα CN , C^{18}O , H^{13}CO^+ μας δείχνουν την πυκνότητα της σκόνης σε αυτές τις περιοχές.

Η σκόνη εκπέμπει στο υπέρυθρο μετά την απορρόφηση της υπεριώδους αστρικής ακτινοβολίας. Η ισχυρή εκπομπή της δείχνει αστέρια τύπου O. Οι κόκκοι σκόνης επηρεάζονται επίσης από την κοσμική ακτινοβολία.

Τα μόρια HCO και H^{13}CO^+ στο ψυχρό αέριο έχουν μικρή διασπορά σχετικής αναλογίας. Στις περιοχές PDR καταστρέφεται το H^{13}CO^+ σε ^{13}CO και H, ενώ δημιουργείται HCO . Η δημιουργία αυτού του μορίου εξαρτάται από την δημιουργία συνθηκών PDR. Σε αυτές τις περιοχές δημιουργούνται απλοί υδρογονάνθρακες όπως CH_2^+ , CH_3^+ . Το C_3H_2 που

παρατηρείται σε περιοχές PDR έχει αφθονία που δεν δικαιολογείται μόνο από τις αλληλεπιδράσεις του αερίου. Πρέπει να δημιουργείται και στους κόκκους σκόνης.

Η ράβδος του Ωρίωνα στο M42

Οι περιοχές PDR εκπέμπουν την περισσότερη υπέρυθη ακτινοβολία των γαλαξιών αστρογέννησης. Οι κόκκοι σκόνης που απορρόφησαν την αστρική υπεριώδης ακτινοβολία εκπέμπουν στο υπέρυθρο. Όπου η πυκνότητα του αερίου και της σκόνης δεν επιτρέπουν να κυριαρχήσει η υπεριώδης ακτινοβολία, αναπτύσσεται πάχος στους κόκκους σκόνης. Εκεί αναπτύσσεται μια πιο <αργή> χημεία μέσω της κοσμικής ακτινοβολίας. Η παρατήρηση των περιοχών PDR μας δείχνει τον ρυθμό αστρογέννησης στον Γαλαξία μας. Η πίεση ακτινοβολίας των περιοχών PDR μαζί με τους αστρικούς ανέμους των αστεριών μεγάλης μάζας και τις εκρήξεις σουπερνόβα συμπιέζουν τα νεφελώματα δημιουργώντας τις συνθήκες νέας αστρογέννησης.

Η ράβδος του Ωρίωνα παρουσιάζει ισχυρή ροή υπεριώδης ακτινοβολίας. Πρόκειται για την διεπαφή ανάμεσα στην διαστελλόμενη φούσκα ιονισμένου Υδρογόνου (HII) γύρω από το αστρικό σμήνος του τραπέζιου και το γιγάντιο μοριακό νεφέλωμα Orion A . Παρατηρούμε να εισχωρεί το καυτό ιονισμένο Υδρογόνο στο μοριακό νεφέλωμα, αλλά και να απομακρύνεται από την ράβδο. Αυτό δείχνει συμπύκνωση λόγω κρουστικού μετώπου αλλά και κατάλυση (ablation) στην διεπαφή.

Στην επιφάνεια της ράβδου, όπου η περιοχή HII συναντάει το ψυχρό μοριακό αέριο, μόνο η υπέρυθη ακτινοβολία διεισδύει στην ύλη. Διασπά το μοριακό Υδρογόνο σε ατομικό αλλά δεν μπορεί να το ιονίσει. Μπορεί όμως να ιονίσει χημικά στοιχεία όπως τον Άνθρακα και το Πυρίτιο. Η θερμοκρασία του αερίου στην περιοχή ελαττώνεται από τους 10.000K στους 1000K και πιο εσωτερικά του μοριακού αερίου στους 100K, που σημαίνει θερμοκρασία 75K στους κόκκους σκόνης.

Οι διαβαθμίσεις της θερμοκρασίας, της ισχύς της υπεριώδης ακτινοβολίας και της πυκνότητας του αερίου δημιουργούν στρώματα με διαφορετικά χημικά χαρακτηριστικά. Ο βαθμός ιονισμού καθορίζει και την επίδραση των μαγνητικών πεδίων. Στην ράβδο η επίδραση της αστρικής ακτινοβολίας κυριαρχεί ενάντια στην κοσμική ακτινοβολία. Ο ιονισμός από την κοσμική ακτινοβολία έχει ως δείκτη την αυξημένη αναλογία του C+.

Η διείσδυση της ράβδου στο μοριακό αέριο δημιουργεί ανομοιογένειες που μπορεί αθροιστικά να εξελιχτούν σε βαρυτικές καταρρεύσεις ανοίγοντας έναν νέο κύκλο αστρογέννησης. Οι άμεσες ανομοιογένειες που δημιουργούνται είναι μικρής κλίμακας και δεν επαρκούν για βαρυτική κατάρρευση.

Ένα ερώτημα παραμένει η σχετική απουσία των μορίων με Θείο. Ανιχνεύουμε μόλις το 1% της προσδοκώμενης αναλογίας του Θείου στα μοριακά νεφελώματα. Το S αναμένεται να είναι δεσμευμένο σε μόρια όπως το SO που βρίσκονται βαθιά στο εσωτερικό των μοριακών νεφελωμάτων, όπου προστατεύονται από την υπεριώδης ακτινοβολία. Σε χαμηλές θερμοκρασίες και μεγάλη πυκνότητα το H₂S παγώνει στους κόκκους σκόνη. Στα όρια της ράβδου ανιχνεύουμε SH+.

Η ράβδος του Ωρίωνα αποτελεί πρότυπο περιοχής PDR με ισχυρή ροή υπεριώδης ακτινοβολίας.

Το νεφέλωμα της κεφαλής του Ίππου στον Ωρίωνα

Πρόκειται για ένα από τα πιο κοντινά μας (400 πάρσεκ) σκοτεινά νεφελώματα, με πλούσια ποικιλία COM. Η σκόνη του έχει θερμοκρασία 20-30K, επιτρέποντας στα μόρια να παγώσουν στις επιφάνειες των κόκκων σκόνης. Η πυκνότητα του αερίου και της σκόνης προστατεύει το εσωτερικό του από την υπεριώδη ακτινοβολία των νεαρών αστεριών μεγάλης μάζας στον ευρύτερη περιοχή.

Παρατηρούμε το νεφέλωμα σχεδόν στην κόψη του. Φωτίζεται από ένα αστέρι τύπου O9,5V. Παρατηρούμε πολύπλοκα οργανικά μόρια με επτά άτομα. Η υπεριώδης στο εσωτερικό του έχει ισχύ ροής 60 φορές αυτή της μεσοαστρική ύλης, 1000 φορές μικρότερη από αυτή στην ράβδο του Ωρίωνα. Δύο σημαντικά μόρια που μας επιτρέπουν να διαχωρίσουμε τις περιοχές είναι το HCO στο πυκνό νεφέλωμα και το ιονισμένο DCO+ για την περιοχή PDR.

Η θερμοκρασία του αερίου στις εξωτερικές περιοχές φτάνει τους 100K, ενώ στο εσωτερικό δεν ξεπερνάει τους 20K. Η θερμή σκόνη <φωτίζει> την κεφαλή του αλόγου στο υπέρυθρο. Η μετάβαση του πάγου πολύπλοκων μορίων στην αέρια φάση δεν οφείλεται στην θέρμανση των κόκκων, αλλά σε άλλους μηχανισμούς.

Από τα πιο ιδιαίτερα μόρια που ανιχνεύσαμε στο νεφέλωμα είναι τα H₂CO, CH₃OH. Αυτά μας δείχνουν την ύπαρξη πιο πολύπλοκων COM σε συνθήκες θερμού αερίου, όπως τα προβιοτικά. Τα βρίσκουμε σε πολλά διαφορετικά περιβάλλοντα, όπως σε καυτούς πυρήνες στα νεφελώματα αλλά και περιοχές κρουστικών μετώπων, ακόμα και στην μεσοαστρική ύλη. Το πρώτο δημιουργείται στην αέρια φάση και σε πάγο στις επιφάνειες των κόκκων σκόνης, ενώ το δεύτερο (μεθανόλη) βασικά στους κόκκους σκόνης.

Στην αέρια φάση του νεφελώματος ανιχνεύτηκαν 4 μόρια με Άζωτο (CH₃CN, CH₃NC, HC₃N, C₃N). Η αναλογία του CH₃CN στο νεφέλωμα της κεφαλής του Ίππου είναι 30 φορές ενισχυμένη στις περιοχές PDR (υπό την επίδραση αστρικής ακτινοβολίας) από ότι στον σκοτεινό πυρήνα.

Σε ένα πυκνό αέριο, με 10.000 σωματίδια το κυβικό εκατοστόμετρο, η αναλογία σωματιδίων αερίου/ σκόνης είναι 1/100. Σε μια περιοχή PDR η υπεριώδης ακτινοβολία δημιουργεί μια εξωτερική ζώνη θερμής σκόνης που εκπέμπει στο υπέρυθρο. Μέσα από αυτή τη ζώνη και σε βάθος όπου φτάνει η αστρική ακτινοβολία η σκόνη έχει χαμηλότερη θερμοκρασία από το αέριο, επειδή αποβάλλει πιο εύκολα την θερμότητα. Στο παραπάνω νεφέλωμα στην περιοχή PDR η σκόνη έχει 20K και το αέριο 60K, ενώ στον σκοτεινό πυρήνα έχουν 12K και 20K αντίστοιχα.

Τα άτομα Θείου προσκολλάνε στους κόκκους σκόνης σε θερμοκρασία 22K. Τότε ενώνονται με το Υδρογόνο σε μόρια όπως το H₂S. Η αστρική αλλά και η κοσμική ακτινοβολία διασπάνε εύκολα το H₂S, με αποτέλεσμα η αναλογία του στον πάγο στους κόκκους σκόνης να είναι 10 φορές μικρότερη από αυτή του νερού (H₂O). Στα εξωτερικά στρώματα του νεφελώματος το S+ είναι η κυρίαρχη μορφή Θείου (SO+, NS+).

Στο νεφέλωμα της κεφαλής του Ίππου μπορούμε να συγκρίνουμε την χημεία περιοχών χαμηλής και υψηλής ροής υπεριώδης ακτινοβολίας.

ΕΞΩΓΑΛΑΞΙΑΚΕΣ ΠΗΓΕΣ

Η ανίχνευση μορίων σε εξωγαλαξιακές πηγές είναι πιο εφικτή στα νέφη του Μαγγελάνου, στον γαλαξία της Ανδρομέδας και ως την τοπική γαλαξιακή ομάδα. Όμως αυτό το δείγμα γαλαξιών δεν είναι αντιπροσωπευτικό για το σύμπαν. Οι γαλαξίες σχετικά μικρής μάζας σε αυτό παρουσιάζουν μια αμυδρή εκπομπή του CO σε σχέση με μακρινότερους μεγάλης μάζας γαλαξίες, όπου μας δείχνει περιοχές έντονης αστρογέννησης.

Από τις παρατηρήσεις στον Γαλαξία μας συμπεραίνουμε την ισχυρή σύνδεση ανάμεσα στο μοριακό αέριο και την αστρογέννηση. Παρατηρούμε διαφορά του ρυθμού αστρογέννησης (κατανάλωση του αερίου σε δημιουργία αστεριών) από γαλαξία σε γαλαξία, ανάλογα τον τύπο του, και ανάμεσα σε περιοχές του ίδιου γαλαξία. Το CO μας χρησιμεύει ως δείκτης του H₂ που εκπέμπει ελάχιστα.

Στους 3 κοντινούς μας σπειροειδείς γαλαξίες ανιχνεύσαμε 200 γιγάντια μοριακά νέφη. Η τυπική μάζα τους είναι 10.000- 10 εκατομμύρια ηλιακές και μέγεθος δεκάδες πάρσεκ. Κυριαρχούνται από υπερηχητικούς στροβιλισμούς.

Οι γαλαξίες NGC2835 και NGC5068 είναι σπειροειδείς μικρής μάζας με μικρή ένταση εκπομπής του CO και χαμηλό ρυθμό αστρογέννησης. Ο NGC 3351 έχει ανεπτυγμένη ράβδο με κυρίαρχο μοριακό δίσκο στην κεντρική του περιοχή και έναν εξωτερικό μοριακό δακτύλιο. Και οι 2 αυτές περιοχές παρουσιάζουν αστρογέννηση. Ο M51 παρουσιάζει έντονη αστρογέννηση στον δίσκο και στην κεντρική του περιοχή. Ο γαλαξίας της Ανδρομέδας έχει μεγάλη αστρική μάζα αλλά διανύει περίοδο ηρεμίας ως προς την αστρογέννηση. Το ζευγάρι γαλαξιών κεραίες (Antenna galaxies) παρουσιάζει διαφορετικό μοριακό προφίλ. Οι γαλαξίες με ανεπτυγμένη ράβδο παρουσιάζουν πιο έντονη ροή εκπομπής του CO.

Οι γαλαξίες έχουν μεγάλο εύρος πυκνότητας και διασποράς ταχυτήτων, άρα και πίεσης μέσω στροβιλισμών. Η μεγάλη κινητική ενέργεια υποβαθμίζει τον ρυθμό αστρογέννησης επειδή δεν μπορεί εύκολα να κυριαρχήσει τοπικά η βαρύτητα.

ST16 και N113 στο μεγάλο Μαγγελανικό νέφος

Το μεγάλο Μαγγελανικό νέφος έχει το 1/100 της μάζας και το 1/10 της διαμέτρου του Γαλαξία μας. Έχει μια κεντρική ράβδο και παραμορφωμένους βραχίονες, λόγω των παλιρροιακών δυνάμεων του Γαλαξία μας αλλά και του μικρού Μαγγελανικού νέφους. Θα συσσωρευτεί στον Γαλαξία μας σε μερικά δις έτη. Η μεταλλικότητα σε αυτό είναι πολύ χαμηλότερη από ότι στον Γαλαξία μας, με αποτέλεσμα η χημεία που αναπτύσσεται να είναι διαφορετική.

Έχουμε εντοπίσει πάγο σε κόκκους σκόνης κοντά σε YSO (νεογέννητα αστέρια) στο μεγάλο Μαγγελανικό νέφος. Σε σχέση με τον Γαλαξία μας η αφθονία σε μόρια όπως τα CH₃OH,

H₂CO, H₂NCO είναι υποβαθμισμένη. Η χαμηλή αυτή αναλογία των μορίων διαφέρει για κάθε μόριο.

Η πηγή υπερύθρου ST16 είναι ένας καυτός πυρήνας με ένα μεγάλης μάζας YSO. Βρίσκεται κοντά στην περιοχή αστρογέννησης N119, μία μεγάλη περιοχή ιονισμένου Υδρογόνου που καταλαμβάνει 23 τετραγωνικά πάρσεκ. Μέσα της βρίσκεται το ανοιχτό σμήνος NGC1910. Στο N119 διακρίνουμε ένα εσωτερικό θερμό αέριο με θερμοκρασία 150K και ένα εξωτερικό με θερμοκρασία 50K. Το ST16 έχει 100 ηλιακές μάζες. Η θερμοκρασία της σκόνης σε αυτό είναι στους 60K.

Η αναλογία του HCO⁺ είναι παρόμοια με αυτή στον Γαλαξία μας ενώ το H₂CO υπολείπεται κατά μια τάξη μεγέθους. Το ίδιο συμβαίνει και για τις ενώσεις του Θείου και του Πυριτίου, ενώ το SO₂ υπολείπεται κατά 4 τάξεις μεγέθους σε σχέση με τον Γαλαξία μας. Η αναλογίες 32S/34S και 32S/33S μας δείχνουν ότι το 34S και το 33S παρουσιάζει μεγαλύτερη αφθονία από ότι στον δικό μας Γαλαξία. Σε μερικά μόρια η χαμηλή αναλογία δικαιολογείται από την έλλειψη ικανού ρυθμού εκπομπής υπεριώδους ακτινοβολίας, αφού η αστρογέννηση είναι αρκετά περιορισμένη. Έτσι πολλά μόρια παραμένουν παγωμένα στους κόκκους σκόνης.

Στο ST16 παρατηρούμε έναν περιστρεφόμενο πρωτοαστέρα με εκροή αερίου. Το πρωτοαστέρι μεγάλης μάζας είναι πολύ νεαρό και δεν έχει ιονίσει ακόμα την ύλη γύρω του. Οι διπολικές εκροές αερίου απεικονίζονται στα μόρια C₂H, CN. Αυτά τα μόρια που μας δείχνουν τις περιοχές υπεριώδους αστρικής ακτινοβολίας, που προέρχεται από το πρωτοαστέρι.

Η περιοχή N113 περιέχει ένα μεγάλης μάζας (100.000 ηλιακές) με πλούσια εκπομπή γιγάντιο μοριακό νέφος (GMC). Τα μόρια HCO⁺, HCN μας δείχνουν την μεγάλη του πυκνότητα. Η σκόνη και το αέριο στην κεντρική του περιοχή είναι συμπιεσμένα χάρη σε ένα σύμπλεγμα φουσκών ιονισμένου αερίου. Αυτές εκπέμπουν στο H α , με πηγή αστέρια μεγάλης μάζας νεαρών αστρικών σμηνών. Διακρίνουμε συμπυκνώματα μεγέθους πάρσεκ και πυρήνες 0,1-0,2 πάρσεκ. Η επίδραση των αστρικών ανέμων συμβάλλει στην δημιουργία συνθηκών για έντονη αστρογέννηση.

Η μικρή αναλογία των COM οφείλονται στην χαμηλή μεταλλικότητα του Μαγγελανικού νέφους. Λιγότερη σκόνη σημαίνει λιγότερο ατομικό Υδρογόνο να ενώνεται στους κόκκους της σε μοριακό. Έτσι η χημεία πυκνού αερίου (η ένωση του μοριακού Υδρογόνου με άλλα χημικά στοιχεία σε αέρια φάση με το ξεπάγωμα της σκόνης) είναι υποβαθμισμένη. Η αναλογία σκόνης/ αερίου είναι η μισή από ότι στον δικό μας Γαλαξία. Πιο λίγη σκόνη σημαίνει μεγαλύτερη ικανότητα διεύθυνσης της υπεριώδους αστρικής ακτινοβολίας στα σκοτεινά νέφη, με αποτέλεσμα την καταστροφή των πολύπλοκων μορίων. Επίσης, λιγότερη αναλογία των C,N,O,S σημαίνει λιγότερα πολύπλοκα μόρια.

Ανακαλύπτουμε COM που ξεπάγωσαν από τους κόκκους σκόνης μέσω κρουστικών κυμάτων και όχι θερμικής επίδρασης. Γενικά οι χημικές διεργασίες είναι παρόμοιες με αυτές στον Γαλαξία μας, αλλά στην πιο υποβαθμισμένη τους μορφή.

Ο γαλαξίας αστρογέννησης NGC253

Αυτός ο γαλαξίας βρίσκεται σε απόσταση 3,5 Mpc. Η διάμετρος του είναι 70.000 έτη φωτός, τα 2/3 του δικού μας Γαλαξία και φιλοξενεί σπείρες και μια ράβδο. Η μεγάλη συγκέντρωση σκόνης δείχνει έντονη αστρογέννηση. Η κεντρική μαύρη τρύπα του έχει σημαντική δραστηριότητα, όπως παρατηρούμε από τις εκπομπές στις ακτίνες X και γ. Σε αυτόν τον γαλαξία σχηματίζονται υπέρ σμήνη αστεριών (Super star clusters, SSC), όπου μπορεί να δημιουργηθούν σφαιρωτά σμήνη. Η κορύφωση της αστρογέννησης σε αυτόν συνέβη πριν από 10μ εκατομμύρια έτη. Σήμερα ο ρυθμός της υπολογίζεται σε 2 ηλιακές μάζες το έτος.

Έχουμε ανακαλύψει 14 SSC σε αυτόν τον γαλαξία. Οι ισχυρές εκροές αερίων από τα νεαρά σμήνη επηρεάζουν την αστρογέννηση έξω από αυτά. Αυτά τα σμήνη βρίσκονται μέσα σε 3 δομές πυκνού αερίου. Οι γραμμές των CS, H13CN μας δείχνουν την ταχύτητα του αερίου, και ανήκουν σε αέριο που βρίσκεται μέσα στα αστρικά σμήνη. Σε μερικά, όπως το SSC 4a, παρατηρούμε μεγάλης μάζας αστρικά σμήνη να έχουν ως δορυφόρους μικρότερα. Το μέγεθος των σμηνών μας επιτρέπει να υπολογίσουμε τις μάζες τους. Από την ύλη που φαίνεται να εκρέει στο SSC 4a μόλις το 20% έχει ταχύτητα διαφυγής. Έτσι υπάρχει μια ανατροφοδότηση του σμήνους.

Τα υπέρ σμήνη έχουν μάζες πάνω από 100.000 ηλιακές και φιλοξενούν πολλά αστέρια τύπου O. Έτσι εκτός από την πίεση της ακτινοβολίας των αστεριών και τους ισχυρούς αστρικούς ανέμους δημιουργείται και ένας μηχανισμός πίεσης από τις εκρήξεις σουπερνόβα. Τα 3 υπέρ σμήνη 4a, 5a και 14 είναι πολύ νεαρά, ακόμη δεν έχουν σημειωθεί εκρήξεις σουπερνόβα σε αυτά και η μεγάλη τους πυκνότητα δεν επιτρέπει να ιονίσουν το αέριο μέσω της υπεριώδους ακτινοβολίας τους. Αυτή βασικά απορροφάται από τους κόκκους σκόνης. Η σκόνη θερμαίνεται σε εκατοντάδες βαθμούς K και εκπέμπει στο υπέρυθρο. Έτσι η σκόνη δημιουργεί μια πίεση ακτινοβολίας υπέρυθρου.

Η ανάπτυξη χημείας με ενώσεις του Θείου αποτελεί δείκτη ηλικίας για τα υπέρ σμήνη. Η αναλογία CS/H₂ κυμαίνεται μεταξύ 10⁸ και 10¹⁰ σε πυκνό αέριο, και εξαρτάται από την ηλικία, την αναλογία του Οξυγόνου και την θερμοκρασία του αερίου. Η κορύφωση πετυχαίνεται σε ηλικία 10.000 ετών και με θερμοκρασία 100K. Στα υπέρ σμήνη του παραπάνω γαλαξία η θερμοκρασία είναι 300K και η ηλικία 100.000 έτη. Στο SSC14 ανακαλύψαμε 19 είδη μορίων μέσω των γραμμών εκπομπής τους. Αντίθετα, στο SSC 7 ξεχωρίζουν μόνο τα μόρια CO, HCN, HCO⁺, CS.

Οι περιοχές PDR φαίνεται να κυριαρχούν έναντι στις XDR (ακτίνες X) στον γαλαξία NGC 253. Η θέρμανση του αερίου μέσω κρουστικών μετώπων είναι σημαντική σε αυτόν τον γαλαξία.

