

# Μοριακή Αστρονομία

## 1) Η χρησιμότητα της μοριακής αστρονομίας.

Τα μόρια κυριαρχούν έναντι των ατόμων στις πιο ψυχρές, πυκνές περιοχές του σύμπαντος. Σε συνθήκες με θερμοκρασία αερίου λίγων χιλιάδων βαθμών και πυκνότητα μεγαλύτερη από 1 άτομο (H)/cm<sup>3</sup> μπορεί να εμφανιστούν μόρια. Ακόμα και στις ηλιακές κηλίδες (3200 K) έχουμε ίχνη μορίων. Σε συνθήκες πολύ μικρότερης κινητικής ενέργειας των ατόμων, τυπικά σε θερμοκρασία 100 Κέλβιν, και πυκνότητα 1000 άτομα (H)/cm<sup>3</sup>, το αέριο είναι σχεδόν αποκλειστικά μοριακό. Τα μεγάλα μοριακά νέφη (Giant Molecular Clouds, GMC), είναι περιοχές του Γαλαξία μας και άλλων γαλαξιών με σχεδόν αποκλειστικά μοριακό αέριο. Αυτές οι ψυχρές πυκνές περιοχές περιέχουν σημαντική μη αστρική ύλη. Μπορεί τα καυτά νέφη, όπως για παράδειγμα οι γαλαξιακοί πίδακες, να καταλαμβάνουν τεράστιες περιοχές, αλλά η μικρή τους πυκνότητα τα κάνει να υστερούν σε μάζα έναντι στα GMC.

Τα GMC είναι σημαντικά για να μπορέσουμε να περιγράψουμε την περιεκτικότητα ύλης ενός γαλαξία. Αλλά είναι επίσης σημαντικά για την κατανόηση της εξέλιξης ενός γαλαξία, αφού περιέχουν την μόνη ύλη (πυκνό, ψυχρό αέριο) που μπορεί να αποτελέσει το καύσιμο για την αστρογέννηση. Συγκρίνοντας την μάζα της ύλης αυτής με τα υπάρχοντα αστέρια μπορούμε να συμπεράνουμε σε πιο στάδιο εξέλιξης είναι ένας γαλαξίας.

Επίσης, η αλληλεπίδραση του ρεύματος ύλης (outflow) από ένα ενεργό γαλαξιακό πυρήνα με το ψυχρό αέριο του γαλαξία έχει μια χημική υπογραφή που μας δίνει λεπτομέρειες για το ρεύμα, και τον βαθμό απώλειας της μάζας του. Ακόμα, σε μικρότερες κλίμακες από ότι στα GMC, η κατάρρευση του υλικού σε έναν πυκνό πυρήνα δημιουργίας νέου αστέρα μπορεί να παρακολουθηθεί μέσω των γραμμών εκπομπής του εκεί μοριακού αερίου, ακόμα και σε χαμηλή θερμοκρασία των 10 K. Η χαμηλή θερμοκρασία αυτή διατηρείται κατά την διάρκεια πολλών τέτοιων καταρρέυσεων, λόγω της εκπομπής αυτών των μορίων και της συνεχής εκπομπής από τη σκόνη. Μετά το τέλος αυτής της κατάρρευσης το νέο αστέρι ερεθίζει με την ακτινοβολία του την κοντινή ύλη που δεν κατάρρευσε σε αυτό, δημιουργώντας νέα χημικά αποτυπώματα. Ο πλανητικός δίσκος, δηλαδή η περιοχή όπου θα δημιουργηθούν πλανήτες, είναι σχεδόν αποκλειστικά μοριακός. Επηρεάζεται από την μεγάλης έντασης και συνεχώς αυξανόμενη ακτινοβολία του άστρου και δημιουργεί έτσι νέα χαρακτηριστικά μόρια.

Αέριο και σκόνη.

Τα αέρια της μεσοαστρικής χημείας.

Το υλικό της δημιουργίας των χημικών ενώσεων είναι τα αέρια και η σκόνη. Τα αέρια στο σύμπαν είναι κυρίως υδρογόνο και ήλιον, με λίγες προσθήκες αερίων που δημιουργήθηκαν από τις θερμοπυρηνικές συντήξεις σε αστέρια και διοχετεύτηκαν στη μεσοαστρική ύλη με τις εκρήξεις Νόβα και σουπερνόβα, και τους αστρικούς ανέμους. Η ικανότητα του αερίου να δημιουργήσει μόρια με τον άνθρακα, το οξυγόνο, το άζωτο, το θείο και άλλα στοιχεία εξαρτάται από τον βαθμό εμπλουτισμού της ύλης με αυτά τα στοιχεία, σε σχέση με το υδρογόνο. Αυτός ο βαθμός αφθονίας των στοιχείων κυμαίνεται από γαλαξία σε γαλαξία, από περιοχή σε περιοχή σε έναν γαλαξία, και σε βάθος χρόνου στην ίδια περιοχή. Πολλές φορές χρησιμοποιούμε της αναλογίες που έχει ο Ήλιος σε αυτά τα στοιχεία (ηλιακή μεταλλικότητα).

Δεν διαφέρει μόνο η μεταλλικότητα των άλλων περιοχών σε σχέση με την ηλιακή, αλλά και η αναλογία κάθε στοιχείου ξεχωριστά. Για παράδειγμα, στο νεαρό σύμπαν οι σουπερνόβα διαφορετικών μαζών είχαν ως αποτέλεσμα τον διαφορετικό εμπλουτισμό σε άνθρακα, οξυγόνο και άζωτο κάθε φορά. Τα μοντέλα αστρικής εξέλιξης σε περιοχές με πολύ χαμηλής μεταλλικότητας αέριο δείχνουν να είναι υποβαθμισμένο το άζωτο, ενώ το οξυγόνο και το μαγνήσιο είναι ενισχυμένα, πάντα σε σχέση με τις ηλιακές αναλογίες. Μερικά αστέρια έχουν διαφορετικό κλάσμα (C)/(O) και εξελίσσονται λίγο διαφορετικά. Υπάρχουν ατμόσφαιρες άστρων πλούσιες σε άνθρακα και άλλες πλούσιες σε οξυγόνο.

## Η σκόνη

Έχουμε παρατηρήσει ότι η σκόνη είναι αναμειγμένη με αέρια σε όλους τους γαλαξίες. Την ξεχωρίζουμε από την ελάττωση (λόγο απορρόφησης) της υπεριώδους, ορατής και υπέρυθρης ακτινοβολίας, ή την ανίχνευση θερμικής ακτινοβολίας από την ζεστή σκόνη λόγω της επίδρασης της ακτινοβολίας των κοντινών αστέρων, ή από την ψυχρή σκόνη στα σκοτεινά νέφη. Η σκόνη είναι παρούσα σε κελύφη γύρω από τα σχετικά ψυχρά (σε μεταγενέστερο στάδιο εξέλιξης) αστέρια και απομεινάρια εκρήξεων Νόβα και σουπερνόβα. Αυτές είναι εξάλλου οι περιοχές όπου η σκόνη σχηματίζεται και μεγαλώνουν οι κόκκοι της. Οι κόκκοι είναι ασύμμετροι και οι μεγάλοι μπορεί να ευθυγραμμιστούν σε ένα μαγνητικό πεδίο. Οι μικροί κόκκοι είναι μοριακής φύσεως και μπορεί να περιέχουν πολυκυκλικούς αρωματικούς υδρογονάνθρακες (PAH).

Η ιδιότητα της σκόνης να ελαττώνει την υπεριώδη και την ορατή ακτινοβολία σε ένα αέριο προφυλάσσει το εσωτερικό υλικό από τις καταστροφικές για τα μόρια συνέπειες του αστρικού φωτός. Μερική από την απορροφημένη ακτινοβολία αποδεσμεύει φωτοηλεκτρόνια από τους κόκκους, τα οποία είναι μια πολύ χρήσιμη ενεργειακή πηγή για το αέριο. Η αστρική ακτινοβολία θερμαίνει τη σκόνη, που έτσι εκπέμπει στο υπέρυθρο. Ένας ακόμη σημαντικός ρόλος της σκόνης είναι ότι στην επιφάνειά της επιτρέπει την σύνθεση μορίων, δρώντας σαν καταλύτης, ιδίως για τον σχηματισμό μοριακού υδρογόνου. Σε σκοτεινές περιοχές επικάθεται πάγος στους κόκκους σκόνης, που απορροφάει υλικό από το αέριο, εμπλουτίζοντας την ύλη με νέα χημικά στοιχεία (νερό, διοξείδιο του άνθρακα, μονοξείδιο του άνθρακα,

μεθανόλη κ.α.). Και μέσα στον πάγο μπορεί να εξελιχτούν χημικές αντιδράσεις. Θερμικές και μη διεργασίες μπορούν να λειώσουν τον πάγο σε αέριο. Έτσι η σκόνη <κλέβει> ηλεκτρόνια από το αέριο επηρεάζοντας τον βαθμό ιονισμού του αερίου στα μεσοαστρικά νέφη.

Κάποια στοιχεία, όπως το πυρίτιο, είναι αποκλειστικά σε σκόνη. Ο μισός άνθρακας είναι σε μορφή σκόνης. Αυτά τα εγκλωβισμένα άτομα δεν είναι διαθέσιμα για χημικές ενώσεις στα αέρια, εκτός αν η σκόνη εκτεθεί σε μεγάλη θερμοκρασία.

Τέλος, η σχέση σκόνη/ αερίου κυμαίνεται στο σύμπαν. Έχει να κάνει με την αστρική εξέλιξη κάθε περιοχής, εξαρτώμενη από την μεταλλικότητα της ύλης. Η σχέση αερίου/ σκόνης εξαρτάται από την μεταλλικότητα των μεσοαστρικών μορίων.

## Μοριακή φασματοσκοπία.

### Φάσματα και διεγερση.

Ενώ τα περισσότερα ατομικά φάσματα καθορίζονται απλά από την μετάβαση των ηλεκτρονίων κάθε στοιχείου μεταξύ των ενεργειακών καταστάσεων, τα μοριακά φάσματα είναι πιο πολύπλοκα. Τα μόρια έχουν πρόσθετες ελευθερίες που σχετίζονται με την δόνηση και την περιστροφή. Κάθε ενεργειακή κατάσταση των ηλεκτρονίων ενός μορίου διαθέτει πολλαπλά επίπεδα δόνησης, και κάθε ένα από αυτά έχει μια κλίμακα σχετικών επιπέδων περιστροφής. Έτσι συναντάμε μεταβάσεις ηλεκτρονίων στα μόρια με ειδικά επίπεδα δόνησης και περιστροφής σε κάθε ενεργειακή κατάσταση των ηλεκτρονίων. Η εξίσωση της μοναδικής γραμμής μετάβασης ηλεκτρονίων στα άτομα αντικαθίσταται από μια ενότητα γραμμών για αντίστοιχες μεταβάσεις στα μόρια. Αυτές οι μεταβάσεις μας ξεγελούν πολλές φορές στο υπεριώδες φάσμα.

Τα μόρια έχουν και άλλες μεταβάσεις που δεν συναντάμε στα άτομα. Μπορούν να περάσουν μεταβάσεις ανάμεσα σε συγκεκριμένες καταστάσεις περιστροφής μιας κατάστασης δόνησης, οι λεγόμενες *ro-vibrational transitions*. Αυτές εμφανίζονται συνήθως στο μακρινό υπέρυθρο ή στα χιλιοστά και υποχιλιοστόμετρα.

Τα μόρια ανιχνεύονται στην μεσοαστρική υλη μέσω μεταβάσεων ηλεκτρονίων, μεταβάσεων *ro-vibrational* ή καθαρών μεταβάσεων περιστροφής. Οι με διαφορά περισσότερες ανιχνεύσεις έγιναν στα χιλιοστά και στα υποχιλιοστά, που σημαίνει καθαρή μετάβαση περιστροφής, σχεδόν πάντα από μόρια που βρίσκονται στην βασική κατάσταση ηλεκτρονίων και στο κατώτατο επίπεδο περιστροφής. Υπάρχουν και άλλοι τύποι μεταβάσεων (στα (OH), (NH<sub>3</sub>)). Γενικά, αν η δυνητική ενεργειακή καμπύλη ενός μορίου παρουσιάζει ελάχιστο, μπορούν να καθοριστούν οι ενέργειες των διακεκριμένων επιπέδων περιστροφής για μια ενεργειακή κατάσταση των ηλεκτρονίων με την χρήση της προσέγγισης Born-Oppenheimer, που επιτρέπει να χειριστούμε ξεχωριστά την κίνηση των ηλεκτρονίων από αυτή των ατόμων.

## Διατομικά μόρια.

Οι καταστάσεις των ηλεκτρονίων διαβαθμίζονται σχετικά με το σπιν τους και την τάξη μεγέθους της στροφορμής τους. Τα ομοπύρρηνα διατομικά είναι ή συμμετρικά ή αντισυμμετρικά και λαμβάνουμε υπόψη σε αυτά την ανταλλαγή των δύο πυρήνων. Οι εκθέτες + και - χρησιμοποιούνται για να υποδείξουν ότι η κατάσταση των ηλεκτρονίων αλλάζει ή δεν αλλάζει αντίστοιχα πρόσημο, όταν αντικατοπτρίζεται στην προέλευση. Η κίνηση του πυρήνα μπορεί να χωριστεί σε δόνηση και περιστροφή.

Στα μόρια που περιέχουν υδρογόνο, όταν το N (κβαντικός αριθμός περιστροφής στο υψηλότερο επίπεδο περιστροφής) είναι ζυγό, το άθροισμα των πυρηνικών σπιν πρέπει να είναι 0 και η κατάσταση αυτή ονομάζεται παρά - ενώ όταν το N είναι μόνο το άθροισμα των σπιν πρέπει να είναι 1 και η κατάσταση αυτή ονομάζεται ορθό - .Οι μεταβάσεις ανάμεσα σε παρά και ορθό απαγορεύονται. Στην κατάσταση ορθό οι δύο πυρήνες περιστρέφονται κατά την ίδια φορά, άρα τα σπιν τους είναι παράλληλα. Το ορθό - υδρογόνο έχει περισσότερη ενέργεια από το παρά - υδρογόνο με αντιπαράλληλο σπιν. (Σημείωση 1).

Στην ψυχρή μεσοαστρική ύλη ( $< 100$  K) οι περισσότερες παρατηρήσιμες μεταβάσεις γίνονται στην βασική κατάσταση των ηλεκτρονίων των μορίων και στο κατώτατο επίπεδο δόνησης. Για κάποια κοινά μεσοαστρικά μόρια (CO) η γωνιακή στροφορμή, η στροφορμή των ηλεκτρονίων και το σπιν των ηλεκτρονίων είναι ίδια. Σε άλλα είδη όπως το (OH) είναι σημαντική η αλληλεπίδραση μεταξύ του σπιν και της διαφορετικής στροφορμής.

Για να εμφανιστεί μια μετάβαση, πρέπει να μεταβληθεί η ηλεκτρική διπολική ισχύς όταν τα άτομα αλλάζουν τις μεταξύ τους σχετικές θέσεις. Αυτό συμβαίνει μόνο σε ετεροπύρρηνα διατομικά μόρια, γιατί τα ομοπύρρηνα έχουν συμμετρική διασπορά πρόσημο. Τα φάσματα δόνησης και περιστροφής των ομοπύρρηνων διατομικών λαμβάνονται μόνο όταν εμφανίζεται και ηλεκτρονική μετάβαση.

### Πολυατομικά μόρια.

Μπορούν να χωριστούν σε γραμμικά μόρια, συμμετρικά κορυφής (top) και αντισυμμετρικά κορυφής. Στα γραμμικά τα ενεργειακά επίπεδα τείνουν να είναι πιο κοντά μεταξύ τους (άρα το μήκος κύματος μεγαλώνει) όσο πιο βαρύ είναι το μόριο. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι για τα βαριά άτομα στα υποχιλιοστόμετρα βρίσκουμε πολλές διαφορετικές μεταβάσεις πολύ κοντά ή μια στην άλλη. Τα συμμετρικά κορυφής είναι μη γραμμικά πολυατομικά μόρια με δύο αξίες της αδράνειας (από τις 3 των χωρικών αξόνων) να είναι ίδιες. Σφαιρικά μόρια όπως το (CH<sub>4</sub>) έχουν ίδιες ροπές αδράνειας αλλά όχι την ίδια ισχύ διπολικότητας, που σημαίνει ότι οι μεταβάσεις μεταξύ επιπέδων περιστροφής στην κατωτάτη ενεργειακή στάθμη των ηλεκτρονίων είναι αδύναμη. Οι ιδιότητες βύθισης των συμμετρικών μορίων κορυφής είναι συχνά σημαντικές για την αστρονομική φασματοσκοπία. Τα μη συμμετρικά κορυφής περιστρέφονται μη γραμμικά, και όλες οι ροπές αδράνειας είναι διαφορετικές. Πολλές σημαντικές για την μεσοαστρική ύλη μεταβάσεις

μορίων έχουν φάσμα που δεν καλύπτεται από τις απλές περιγραφές και τους κανόνες που αναφέραμε.

Έχουμε 2 παραδείγματα. 1) Η αναστροφή του ( $\text{NH}_3$ ). Το κβαντομηχανικό φαινόμενο της σήραγγας επιτρέπει στο άτομο του αζώτου στην κορυφή της πυραμίδας του μορίου της αμμωνίας να περάσει μέσα από τη βάση της πυραμίδας στην άλλη πλευρά, αλλάζοντας την διεύθυνση της πυραμίδας. Η μετάβαση που προέρχεται από αυτήν την κίνηση είναι αντίστροφη στην βασική περιστροφή. 2) Οι γραμμές ραδιοκυμάτων του (OH). Αν το πλάτος μιας γραμμής απορρόφησης ή εκπομπής είναι μεγαλύτερο από τις υπέρλεπτες διασπάσεις μιας κατάστασης του σωματιδίου, τότε τα υπέρλεπτα επίπεδα θα μοιράζονται το ίδιο φωτόνιο και έτσι θα αλληλεπιδρούν. Αυτό ονομάζεται ακτινοβόλος χαλάρωση ανάμεσα σε δύο υπέρλεπτα επίπεδα.

**Μεταφορά ακτινοβολίας μέσα στο μεσοαστρικό μέσο (ύλη).**

Υπάρχουν οπτικά λεπτά μέσα και οπτικά χονδρά μέσα. Οπτικά λεπτό μέσο μπορεί να είναι ένα αραιό νεφέλωμα και οπτικά χονδρό ένα πυκνό μοριακό νέφος.

**Καθορίζοντας τα επίπεδα πληθυσμών.**

.Διέγερση και αποδιέγερση. Η διέγερση μπορεί να γίνει από ακτινοβολία ή από κρούση. Και στις δύο περιπτώσεις ένα ηλεκτρόνιο πηδάει από ένα χαμηλότερο ενεργειακό επίπεδο σε ένα υψηλότερο (συγκεκριμένες ενεργειακές θέσεις που μπορεί να καταλάβει). Η επιπλέον ενέργεια δίνεται από το μόριο/ άτομο της σύγκρουσης ή ένα φωτόνιο που έχει ενέργεια όση η ενεργειακή διαφορά των δύο επιπέδων. Σε ένα μοριακό νέφος οι συγκρούσεις συνήθως γίνονται με μόρια υδρογόνου ή ηλίου. Στην περίπτωση της ακτινοβόλου διέγερσης, όταν ένα άτομο διεγερθεί σε ανώτερο επίπεδο, μπορεί να πηδήξει πίσω στο κατώτερο, εκπέμποντας ακτινοβολία από το ανώτερο επίπεδο (αποδιέγερση). Οι δύο ενεργειακές καταστάσεις είναι αυτές στις οποίες το ηλεκτρόνιο είναι δεμένο με το άτομο, και το φωτόνιο που εκπέμφθηκε είναι συγκεκριμένης ενέργειας και μήκος κύματος (γραμμή εκπομπής). Η εκπομπή είναι αυθόρμητη. Αν κατά τη μετάβαση του ηλεκτρονίου από κατώτερο σε ανώτερο επίπεδο απορροφηθεί ένα φωτόνιο, έχουμε γραμμή απορρόφησης. Μπορεί να συμβεί και αποδιέγερση μέσω σύγκρουσης, που δεν παράγει ακτινοβολία. Οι πληθυσμοί σωματιδίων θερμαίνονται όταν υπερβαίνουν μια κρίσιμη πυκνότητα, που κυμαίνεται από μετάβαση σε μετάβαση. Μπορούμε να καθορίσουμε την κρίσιμη πυκνότητα ως το κλάσμα των μεταβάσεων προς ανώτερα επίπεδα από συγκρούσεις, που είναι ίσο με το κλάσμα των μεταβάσεων προς κατώτερο επίπεδο μέσω αυθόρμητης εκπομπής. Σε πυκνότητες κάτω από την κρίσιμη οι πληθυσμοί των ανώτερων επιπέδων δεν είναι πολλοί. Σε πυκνότητες κοντά στην κρίσιμη έχουμε την μέγιστη εκπομπή. Κάθε μετάβαση διαβάζεται ως αέριο-ανιχνευτής (όταν έχουμε πυκνότητα κοντά στην κρίσιμη για την συγκεκριμένη μετάβαση) και μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε διαφορετικά μόρια και μεταβάσεις για να χαρτογραφήσουμε διαφορετικές περιοχές ενός νέφους με μη ομοιόμορφη πυκνότητα.

.Ιονισμός και επανασύνδεση. Ο ιονισμός ενός ατόμου ή μορίου μπορεί να γίνει με απορρόφηση ακτινοβολίας ή μέσω συγκρούσεων με κοσμική ακτινοβολία ή άλλα ταχεία σωματίδια. Στην περίπτωση της ακτινοβολίας, το φάσμα απορρόφησης είναι συνεχές. Στο αντίθετο του ιονισμού, όταν ένα θετικό ιόν συλλαμβάνει ένα ηλεκτρόνιο, έχουμε επανασύνδεση. Στην επανασύνδεση  $(\text{H}3\text{O}^+) + e = (\text{H}2\text{O}) + (\text{H})$ , η ενέργεια που απελευθερώνεται όταν επανασυνδέονται το ιόν με το ηλεκτρόνιο είναι τόσο ισχυρή, ώστε το μόριο διαλύεται.

Μπορούν να εμφανιστούν μοριακές γραμμές εκπομπής ή απορρόφησης, ανάλογα την θερμοκρασία ερεθισμού της μετάβασης.

## 2) Τι ενεργοποιεί την κοσμική χημεία.

Με τον ορισμό <παράγοντα> περιγράφουμε τον φορέα που ενεργοποιεί τις χημικές αντιδράσεις. Ο παράγοντας αυτός μπορεί να δημιουργεί μονοπάτια γρήγορης αντίδρασης, να καταλύει τις αντιδράσεις ή να παρέχει μια πηγή ενέργειας που να θερμαίνει το αέριο. Ένα αέριο χαμηλής θερμοκρασίας και πυκνότητας δεν δημιουργεί από μόνο του εκτεταμένες χημικές αντιδράσεις, που θα επιτρέψουν την ύπαρξη χρήσιμων μορίων- ανιχνευτών. Η χημεία πρέπει να ενεργοποιηθεί, και οι διαθέσιμοι παράγοντες στην μεσοαστρική ύλη είναι το αστρικό φως, η κοσμική ακτινοβολία, η κατάλυση στην σκόνη και η δυναμική αερίων. Κάθε παράγοντας παράγει χαρακτηριστικές χημικές αντιδράσεις με χρήσιμα μόρια –ανιχνευτές. Οι τρεις πρώτοι παράγοντες δημιουργούν νέα αποτελεσματικά χημικά μονοπάτια, ενώ ο τέταρτος εισάγει ενέργεια στο αέριο επιτρέποντας έτσι τις χημικές αντιδράσεις.

Βέβαια, σε πολλές περιπτώσεις έχουμε τον συνδυασμό παραγόντων να δρουν μαζί, ενώ σε άλλες οι περιοχές κυριαρχούνται από έναν παράγοντα. Θα δούμε την χημεία από κάθε παράγοντα ξεχωριστά, που είναι ένα απλουστευμένο μη ρεαλιστικό σενάριο. Θα θεωρήσουμε ότι το αέριο αποτελείται από άτομα και μόρια υδρογόνου, ήλιον και άλλα στοιχεία, ως ουδέτερα άτομα με τις αναλογίες που παρατηρούμε στον Ήλιο μας.

Χημεία κινουμένη από ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία.

.Περιοχές κυριαρχούμενες από φωτόνια (Photon dominated region, PDR).

Η μεσοαστρική ακτινοβολία που δέχεται ένα μεσοαστρικό νέφος προέρχεται γενικά από εκπομπές αστέρων τύπου O, B. Η ισχύς της υπεριώδης ακτινοβολίας επηρεάζεται έντονα από την απορρόφηση από την σκόνη, με αποτέλεσμα η φωτοχημική δράση να περιορίζεται στα εξωτερικά στρώματα του νέφους.

Τα μεγαλύτερης ενέργειας φωτόνια που εκπέμπει ένα λαμπρό αστέρι περιορίζονται στην περιοχή (HII) γύρω από αυτό, και η ενεργειακή αποκοπή αντιστοιχεί στον βαθμό ιονισμού του ατομικού υδρογόνου (13,598 eV). Έτσι στο ουδέτερο υδρογόνο έξω από την περιοχή αυτή τα φωτόνια έχουν συνήθως ενέργειες μέχρι το όριο αυτό,

που είναι χαμηλότερο από το όριο ιονισμού του μοριακού υδρογόνου (15,4eV), των ατόμων ήλιου (24,587eV), των ατόμων οξυγόνου (13,618eV) και των ατόμων αζώτου (14,534eV). Γενικά, αυτά τα σχετικά άφθονα μόρια και άτομα δεν ιονίζονται και παραμένουν κυρίως ουδέτερα στα διάχυτα νέφη. Επειδή οι αντιδράσεις ανάμεσα σε αυτά τα ουδέτερα άτομα και μόρια είναι περιορισμένες στις κανονικές συνθήκες του μεσοαστρικού διαστήματος (100 Κέλβιν), η χημεία δεν ενεργοποιείται σε αυτά από το αστρικό φως. Όμως, ενώ η αστρική ακτινοβολία δεν μπορεί να ιονίσει το μοριακό υδρογόνο, μπορεί να διαχωρίσει τα μόρια μέσω μετάβασης ηλεκτρονίων ανάμεσα στα 2 πρώτα διεγερμένα ενεργειακά επίπεδα. Τα άτομα (H) που διαχωρίστηκαν από μόρια (H<sub>2</sub>) μέσω υπεριώδης ακτινοβολίας φέρουν ένα μικρό ποσοστό από την ενέργεια του υπεριώδους φωτονίου.

Άρα η αναλογία (H)/(H<sub>2</sub>) εξαρτάται από την τοπική ακτινοβολία και την αποτελεσματικότητα σχηματισμού (H<sub>2</sub>) στις επιφάνειες των κόκκων σκόνης. Η πρώτη μεγάλη χημική αλλαγή που συμβαίνει όταν ένα ουδέτερο νέφος δέχεται την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία είναι η μετατροπή του ατομικού σε κυρίως μοριακό υδρογόνο. Το βάθος της διεξόδου αυτής της διεργασίας εξαρτάται από την ένταση της ακτινοβολίας και την τοπική πυκνότητα του αερίου.

Και άλλα άτομα μπορούν να ιονιστούν από την τοπική αστρική ακτινοβολία, όπως ο άνθρακας (11,26eV) και το θείο (10,36eV), που είναι τα σημαντικότερα στην παραγωγή χημικών στοιχείων σε ζώνες που είναι πλούσιες σε (H<sub>2</sub>). Τα αλογόνα φθόριο και χλώριο έχουν διαφορετική τύχη. Το φθόριο (17,42eV) παραμένει ουδέτερο, ενώ το χλώριο (12,97eV) ιονίζεται. Άλλα σχετικά άφθονα στοιχεία, όπως το σίδηρο, το πυρίτιο και το μαγνήσιο μπορούν να ιονιστούν, αλλά παραμένουν κυρίως δεσμευμένα στους κόκκους σκόνης.

Σε περιοχές λοιπόν όπου το μοριακό υδρογόνο κυριαρχεί, ο άνθρακας σχηματίζει (CO), και όπου η επίδραση της υπεριώδης είναι αποτελεσματική, το (CO) είναι δείκτης της διαθέσιμης ποσότητας (C). Αυτό συμβαίνει συνήθως σε βάθος 2 mag σε νέφη που επηρεάζονται από το μεσοαστρικό πεδίο ακτινοβολίας και πιο βαθιά σε περιπτώσεις πιο έντονης ακτινοβολίας. Παρόμοια αντίδραση με άζωτο μας δίνει (CN). Μόρια (CH), (CN), (CO) έχουν εντοπιστεί ως μεσοαστρικά είδη. Ακόμα έχουμε παρατηρήσει μόρια (SO), (HF).

Ο φωτοιονισμός παράγει χαρακτηριστική, αλλά περιορισμένη χημεία. Σε μεγάλα βάθη στα νέφη, όταν το πεδίο ακτινοβολίας έχει εξασθενήσει πολύ, η κοσμική ακτινοβολία αναλαμβάνει δράση και οι χημικές αντιδράσεις είναι παρόμοιες με αυτές στα σκοτεινά νέφη.

Σε όλες τις PDR η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία είναι η κύρια πηγή θερμότητας και καθορίζει την τοπική θερμοκρασία. Σε ισχυρό πεδίο ακτινοβολίας και μεγάλη πυκνότητα έχουμε θερμοκρασίες 1000 Κέλβιν, ενώ σε διάχυτα νέφη η θερμοκρασία είναι 100 Κέλβιν. Σε περιοχές όπου το υδρογόνο είναι κυρίως μοριακό, αλλά δεν έχει εξελιχτεί σημαντικά η υπόλοιπη χημεία, σημαντικές γραμμές είναι για τις λαμπρές PDR το (OI) στα 63 μικρά και για τις λιγότερο λαμπρές το (CII) στα 158

μικρά. Γενικά οι σημαντικές γραμμές των PDR είναι η  $\gamma_0$  περιστροφική του ( $H_2$ ) και η περιστροφική του ( $CO$ ).

Οι PDR αναπτύσσονται κυρίως κοντά σε νέα μεγάλα αστέρια, όπου η ένταση της ακτινοβολίας είναι πολλές φορές ισχυρότερη από ότι στην μεσοαστρική ύλη. Και τα διάχυτα νέφη είναι PDR, από την μεσοαστρική ακτινοβολία. Αν δεν υπάρχει άλλος παράγοντας, οι χημικές αντιδράσεις σε αυτά είναι περιορισμένες.

.Περιοχές κυριαρχίας ακτίνων Χ (X-Ray Dominated Regions, XDR).

Οι ακτίνες Χ εκπέμπονται από διάφορα αντικείμενα, από ενεργούς γαλαξιακούς πυρήνες (AGN) μέχρι αστέρια μεγάλης μάζας. Οι ακτίνες Χ αποτελούν επίσης παράγοντα χημικών αντιδράσεων, όταν επιδρούν σε γειτονική ουδέτερη ύλη. Οι μαλακές ακτίνες Χ (ενέργεια φωτονίου μικρότερη του 1 keV) απορροφώνται κοντά στην πηγή εκπομπής τους, ενώ οι σκληρές –όπως αυτές που δημιουργούνται κοντά σε μαύρες τρύπες των AGN –έχουν μικρή απορροφητικότητα κοντά, με αποτέλεσμα να επηρεάζουν(διεισδύουν) την ύλη σε μεγαλύτερο βάθος.

Οι χημικές αντιδράσεις που παράγονται από τις ακτίνες Χ διαφέρουν μερικώς από αυτές στις PDR, επειδή οι ακτίνες Χ ιονίζουν όλη την ύλη (όλα τα στοιχεία). Πράγματι, έχει παρατηρηθεί εκπομπή ( $CO^+$ ) σε ισχυρές πηγές ακτίνων Χ. Ο ιονισμός γίνεται κυρίως μέσω δευτερευόντων ηλεκτρονίων που παράγονται από την διαδικασία Auger. Έτσι ιονίζεται το ατομικό και μοριακό ( $H$ ), με αποτέλεσμα να κυριαρχήσουν τα ιόντα ( $H^+$ ), ( $H_3^+$ ). Αυτά δημιουργούνται και από την κοσμική ακτινοβολία. Η μεταβολή του ( $H$ ) σε ( $H_2$ ) συμβαίνει σε πολύ μεγαλύτερο βάθος από ότι στα PDR. Σε περιπτώσεις μεγάλης πυκνότητας και ροής το ( $H_2$ ) παραμένει μειονότητα μέχρι το βάθος 1000 mag σε ένα νέφος. Η μεταβολή του ( $C^+$ )/( $C$ )/( $CO$ ) δεν υπάρχει στις XDR με την ίδια ροή ενέργειας. Σε περίπτωση ισχυρής ροής ακτίνων Χ η αφθονία του ( $CO$ ) μέχρι βάθος 1000 mag είναι υποβαθμισμένη. Σημαντικοί δείκτες (ψύκτες) των XDR είναι οι ( $OI$ ), ( $CI$ ), ( $SiII$ ), ( $FeII$ ) και ( $H_2$ ).

Αν οι ακτίνες Χ είναι τόσο μεγάλης έντασης ώστε ο ιονισμός να φτάσει σε υψηλά επίπεδα (ας πούμε, μερικά ποσοστά σχετικά με την πυκνότητα της ύλης σε άτομα υδρογόνου), τότε τα χημικά στοιχεία περιορίζονται, καθώς τα μόρια ιονίζονται και διαχωρίζονται. Έτσι υπάρχει ένα φυσικό όριο στις χημικές αντιδράσεις που βασίζονται στην ακτινοβολία Χ.

Χημεία από την κοσμική ακτινοβολία (Cosmic Ray Dominated Regions, CDR)

Η κοσμική ακτινοβολία είναι σημαντικός παράγοντας της μεσοαστρικής χημείας. Αυτά τα γρήγορα σωματίδια, κυρίως πυρήνες υδρογόνου και ηλίου, συγκρούονται και ιονίζουν άτομα και μόρια στο μεσοαστρικό αέριο. Επίσης θερμαίνουν το αέριο μέσω της κινητικής ενέργειας που μεταδίδουν στα ηλεκτρόνια που αποδεσμεύουν. Θεωρητικά, η πιο μεγάλης επίδρασης κοσμική ακτινοβολία είναι της τάξης ενέργειας των μερικών MeV. Η κοσμική ακτινοβολία της μικρής αυτής ισχύς είναι



δυστυχώς ελάχιστη κοντά στη Γη, λόγω του ηλιακού ανέμου. Έτσι είναι αβέβαιος ο βαθμός ιονισμού που έχει η μεσοαστρική κοσμική ακτινοβολία στον Γαλαξία μας.

Το σημαντικό αυτής της μικρής ισχύς ακτινοβολίας είναι ότι μπορεί να ιονίσει άτομα και μόρια που δεν επηρεάζονται από την υπεριώδη των αστεριών. Η κοσμική ακτινοβολία δεν επηρεάζεται από την απώλεια μερικών δεκάδων eV που δίνει στα αποδεσμευόμενα ηλεκτρόνια, έτσι δεν μειώνεται η επίδρασή της σε σχέση με το βάθος διείσδυσης στα νέφη, σε αντίθεση με την υπεριώδη. Η μεγάλη σημασία της είναι ότι δημιουργεί χημεία ιονίζοντας άτομα και μόρια σε περιοχές που είναι ανεπηρέαστες από αστρική ακτινοβολία. Η δημιουργία τριών ιόντων ( $H^+$ ,  $He^+$ ,  $H_2^+$ ) από την κοσμική ακτινοβολία αλλάζει την μεσοαστρική χημεία. Η χημεία των μορίων –ιόντων είναι πολύ γρήγορη, συμβαίνει σε σχεδόν κάθε σύγκρουση ενώ οι ουδέτερες αντιδράσεις υποβαθμίζονται σε χαμηλές θερμοκρασίες. Έτσι η κοσμική ακτινοβολία επιτρέπει την γρήγορη χημεία ακόμη και σε ψυχρά αέρια.

**Χημεία από την κοσμική ακτινοβολία στα ψυχρά σκοτεινά νέφη.**

Στα ψυχρά σκοτεινά νέφη, όπου το υδρογόνο είναι κυρίως μοριακό, το ( $H_2$ ) που προήλθε από αντίδραση σχεδόν πάντα έλκει ένα άλλο μόριο ( $H_2$ ) και αμέσως αποβάλλει ένα άτομο υδρογόνου, δημιουργώντας ένα νέο είδος, το ( $H_3^+$ ). Αυτό το είδος έχει ανακαλυφτεί σε διάφορες περιοχές στη μεσοαστρική ύλη επιβεβαιώνοντας την σημασία του ιονισμού από την κοσμική ακτινοβολία. Η ενέργεια με την οποία το πρωτόνιο ( $H^+$ ) είναι δεσμευμένο στο μόριο ( $H_2$ ) ώστε να σχηματίζει το μόριο ( $H_3^+$ ) είναι μικρή, στην πράξη μικρότερη από τους πιο πολλούς δεσμούς μεταξύ πρωτονίων και αλλά άτομα ή μόρια. Έτσι εμφανίζονται αντιδράσεις μεταφοράς πρωτονίων μεταξύ του ( $H_3^+$ ) και άλλων μορίων, που ανοίγουν νέες οδούς χημικών αντιδράσεων.

Η χημεία ιόντων μορίων είναι σημαντική στον σχηματισμό νέων μορίων, αλλά επίσης περιορίζει τις αφθονίες τους. Επειδή το ήλιον έχει μεγάλη τιμή ιονισμού (24,58 eV), το ιόν ( $He^+$ ) που παράγεται από την κοσμική ακτινοβολία τείνει να καταστρέψει τα μόρια μέσω μετάβασης φορτίου, ικανού να διαλύσει τα μόρια ( $CO + He^+ = C^+ + O + O + He$ ).

Αυτό μας δίνει μια πηγή ( $C^+$ ), που απελευθερώνει άνθρακα από το ( $CO$ ) για την δημιουργία άλλων ανθρακούχων ειδών. Αυτή η διαδικασία διάλυσης λόγω αλλαγής φορτίου με το ( $He^+$ ) εμφανίζεται σε όλα τα μόρια που σχηματίζονται στην μεσοαστρική χημεία ιόντων μορίων. Έτσι το ( $He^+$ ) θέτει όρια στην αφθονία ειδών που εμφανίζονται στις χημικές αντιδράσεις μέσω της κοσμικής ακτινοβολίας.

Όπως είδαμε, η κοσμική ακτινοβολία δημιουργεί χημικά στοιχεία με είδη που περιέχουν άνθρακα ή οξυγόνο μέσω αντιδράσεων μεταφοράς πρωτονίων με το ( $H_3^+$ ). Τι γίνεται με τις χημικές αντιδράσεις των άλλων στοιχείων? Ενώ περιμένουμε η χημεία του ( $N$ ) να είναι όμοια με αυτήν του οξυγόνου, η αντίδρασή του με το ( $He^+$ ) υποβαθμίζεται στις χαμηλές θερμοκρασίες, όπως και η αντίδραση του ( $N^+$ ) με το ( $H_2$ ). Έτσι το άζωτο δεν έχει όμοια συμπεριφορά με το οξυγόνο, όπως δεν έχει και το θείο.

Η κοσμική ακτινοβολία ανοίγει μια νέα πόρτα στην σύνθετη χημεία, δημιουργώντας τα πρώτα προϊόντα των χημικών αντιδράσεων του οξυγόνου και του άνθρακα, επειδή αυτά αλληλεπιδρούν με άτομα και ιόντα, σχηματίζοντας νέα μόρια.

Ανακεφαλαιώνοντας, οι χημικές αντιδράσεις μέσω κοσμικής ακτινοβολίας αρχίζουν με την παραγωγή ουδέτερων και ιονισμένων υδριδίων του οξυγόνου και του άνθρακα. Μετά, άλλα στοιχεία όπως το άζωτο και το θείο μπορούν να παράγουν μια σειρά ειδών, όλο και πιο πολύπλοκης χημείας. Τα μόρια δημιουργούνται και καταστρέφονται ώστε να συντεθούν νέα είδη. Από την άλλη, αντιδράσεις διάσπασης όπως με το (He<sup>+</sup>) τείνουν να ξανακάνουν την ύλη ατομική.

Η λίστα με τις πιθανές αντιδράσεις που περιέχουν την μεσοαστρική χημεία αέριας φάσης και την περιαστρική χημεία φτάνει τις χιλιάδες. Τα είδη με περισσότερα από μερικά βαριά άτομα έχουν ελάχιστη αφθονία. Αυτά χρειάζονται άλλον χημικό παράγοντα. Στην εικόνα που έχουμε για τις χημικές αντιδράσεις στα σκοτεινά νέφη είναι σαφές ότι όποτε το υδρογόνο ιονίζεται από την κοσμική ακτινοβολία σχηματίζεται ένα μόριο με οξυγόνο, άνθρακα, άζωτο ή θείο. Έτσι μπορούμε να υπολογίσουμε από τον βαθμό του ιονισμού μέσω της κοσμικής ακτινοβολίας τον χρόνο που χρειάζεται η μετάβαση των περισσότερων βαρέων ατόμων σε μόρια. Αυτός ο χρόνος είναι για τον Γαλαξία μας 1 εκατομμύρια έτη. Ποικίλλει ανάλογα την μεταλλικότητα της ύλης και την ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας.

### PDR με ιονισμό από κοσμική ακτινοβολία.

Παραπάνω αναλύσαμε τις χημικές αντιδράσεις που δημιουργούνται όταν ένα αέριο ερεθίζεται από την αστρική ακτινοβολία, χωρίς να δρα άλλος παράγοντας. Είδαμε ότι τα αποτελέσματα ήταν περιορισμένα μόνο στην εξωτερική περιοχή του νέφους. Στην πράξη, αυτή η υπόθεση είναι ξένη για τον Γαλαξία μας, όπου υπάρχει ένα αξιοσημείωτο υπόβαθρο κοσμικής ακτινοβολίας. Αυτό ισχύει επίσης για ενεργούς γαλαξίες και γαλαξίες αστρογέννησης. Μπορεί μερικοί νάνοι και κόκκινοι (γηραιοί) γαλαξίες να μην έχουν σημαντικό υπόβαθρο κοσμικής ακτινοβολίας, αλλά γενικά η τελευταία ως παράγοντας δρα μαζί με την αστρική ακτινοβολία. Είδαμε ότι η κοσμική ακτινοβολία (χωρίς την αστρική ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία) δημιουργεί αφθονία του (CO) στα ψυχρά νέφη.

Ο συνδυασμός των δύο αυτών παραγόντων κυριαρχεί στις άκρες των σκοτεινών νεφών και στα διάχυτα νέφη, με αποτέλεσμα την αφθονία των (H), (H<sub>2</sub>). Επίσης πρέπει να λάβουμε υπόψη τον ιονισμό του ατομικού (H) από την κοσμική ακτινοβολία. Επειδή η δυναμικές ιονισμού (H) και (O) είναι σχεδόν ταυτόσημες, εύκολα μπορεί να εμφανιστεί ανταλλαγή φορτίου μεταξύ (H<sup>+</sup>) και (O) σε θερμοκρασίες άνω των 100 Κέλβιν. (H<sup>+</sup>) + (O) = ((H)<sup>+</sup> (O<sup>+</sup>)). Μετά από σειρά αντιδράσεων προκύπτει (H<sub>2</sub>O). Εμφανίζεται μια εναλλακτική του (H<sub>3</sub><sup>+</sup>) χημική οδός. Κατά τα άλλα οι χημικές αντιδράσεις σε αυτές τις περιοχές είναι όμοιες με αυτές της κοσμικής ακτινοβολίας στα ψυχρά σκοτεινά νέφη. Αν όμως η ακτινοβολία είναι τόσο ισχυρή ώστε να διαλύει το υδρογόνο σε σχεδόν μόνο ατομικό, τα χημικά στοιχεία γίνονται πολύ σπάνια.

Χημεία και σκόνη.

.Επιφανειακές αντιδράσεις σε κόκκους άμμου σε διάχυτα νέφη.

Το πιο άφθονο μόριο στο σύμπαν είναι το (H<sub>2</sub>), και στον Γαλαξία μας σχηματίστηκε σχεδόν αποκλειστικά σε αντιδράσεις στις επιφάνειες των κόκκων σκόνης. Η επιφάνεια του κόκκου δρα ως καταλύτης, δεν χρησιμοποιείται άμεσα, αλλά είναι διαθέσιμη για απεριόριστο αριθμό χημικών αντιδράσεων. Η σκόνη παγιδεύει ένα άτομο(H) για αρκετό χρόνο, ώστε να φτάσει εκεί ένα δεύτερο άτομο (H) και να αντιδράσει μαζί του. Απελευθερώνεται ενέργεια 4,5eV ανά μόριο. Αυτή είναι η ενεργειακή διαφορά μεταξύ του (H<sub>2</sub>) και της μάλλον μικρής ενέργειας δεσμού μεταξύ του ατόμου (H) και της επιφάνειας της σκόνης. Αυτή η ενέργεια μοιράζεται, και αποθηκεύεται στην σκόνη ως θερμότητα, ως κινητική ενέργεια στο μόριο(H<sub>2</sub>)και ως ενέργεια δόνησης και περιστροφής του μορίου(H<sub>2</sub>).

Αυτές οι επιφανειακές αντιδράσεις έχουν αρχικά υποτεθεί να εμφανιστούν μέσω της παρατηρήσιμης αφθονίας του (H<sub>2</sub>), λόγω της απουσίας μηχανισμού αέριας φάσης που να είναι επαρκώς γρήγορος ώστε τα αποτελέσματα των αντιδράσεων να είναι μετρήσιμες. Ο μηχανισμός που αναφέραμε παραπάνω έχει επιβεβαιωθεί πειραματικά σε διάφορες επιφάνειες, διάφορες μορφές σκόνης, σε διαφορετικά εργαστήρια με ποίκιλες μεθόδους και υποστηρίζεται από λεπτομερείς κβαντομηχανικές μελέτες των αντιδράσεων. Η αποτελεσματικότητα της αντίδρασης και το ενεργειακό εύρος εξαρτώνται από την φύση της επιφάνειας και την θερμοκρασία της σκόνης. Όπως και να έχει, ο σχηματισμός(H<sub>2</sub>) φαίνεται να γίνεται γρήγορα (στον Γαλαξία μας το υδρογόνο είναι κυρίως μοριακό). Αυτό προϋποθέτει ότι όλα σχεδόν τα άτομα (H) που εγκλωβίζονται σε κόκκους να σχηματίζουν μόρια. Το νέο μόριο(H<sub>2</sub>)έχει τυπικά 2eVεσωτερικές κινήσεις και 1eVκινητική ενέργεια. Το υπόλοιπο ενέργειας μένει στον κόκκο και αποβάλλεται με την εκπομπή υπέρυθρης ακτινοβολίας.

Βέβαια, η δημιουργία του (H<sub>2</sub>) δεν γίνεται ανεμπόδιστα. ΣτιςPDR το (H<sub>2</sub>) μπορεί να καταστραφεί από υπεριώδης ακτινοβολία κοντά στα 100 nm. Σε μεγαλύτερα βάρη στο νέφος, όπου η υπεριώδης διεισδύει δυσκολότερα, το (H<sub>2</sub>) καταστρέφεται (μάλλον αργά) από την κοσμική ακτινοβολία. Η τελευταία με τον ιονισμό του (H<sub>2</sub>) το διαιρεί σε 2 (H). Σε συνθήκες του Γαλαξία μας, στα σκοτεινά νέφη όπου απουσιάζει το αστρικό φως, το υδρογόνο είναι σχεδόν αποκλειστικά μοριακό. Ακόμα και στα διάχυτα νέφη (PDR μέσα σε ηλεκτρομαγνητικό πεδίο), ένα σημαντικό μέρος του είναι μοριακό.

Για τις άλλες ενώσεις του υδρογόνου στην επιφάνεια της σκόνης δεν έχουμε πειραματικά δεδομένα, αλλά παρατηρήσεις μας δείχνουν το (N) να σχηματίζει εκεί (NH), (NH<sub>2</sub>), (NH<sub>3</sub>) σε διάχυτα νέφη. Δεν υπάρχουν όμως συμπεράσματα για αυτήν την αντίδραση, αφού τα άτομα και ιόντα (N) αντιδρούν με το (H) σε αντιδράσεις αέριας φάσης. Αν υποτεθεί ότι μια αποτελεσματική υδροδυναμική αντίδραση εμφανίζεται στην επιφάνεια της σκόνης, τότε μπορεί να δημιουργηθούν τέτοιες αντιδράσεις.

Οι αντιδράσεις των (O),(C) στην επιφάνεια των κόκκων σκόνης δεν περιλαμβάνονται στα χημικά μοντέλα των διάχυτων νεφών, λόγω ότι είναι διαθέσιμοι οδοί αέριας φάσης για αυτά τα άτομα. Όμως, αν υποθέσουμε ότι η ένωση με υδρογόνο εμφανίζεται αποτελεσματικά σε επιφάνειες κόκκων σκόνης, και τα προϊόντα αυτά ((H<sub>2</sub>O), (CH<sub>4</sub>)) μπαίνουν στην φάση αερίου, τότε τα μοντέλα χημείας αερίου/ σκόνης παράγουν μόρια που δεν είναι αντίθετα με τις παρατηρήσεις των διάχυτων νεφών. Έτσι, δεν υποστηρίζουμε ότι τα (N), (O), (C) ενώνονται με υδρογόνο στις επιφάνειες στα διάχυτα νέφη, μέχρι αυτό να αποδειχτεί πειραματικά.

### Πάγωμα, σχηματισμός πάγου και χρονοδιαγράμματα.

Ενώ είναι αβέβαιο αν στις επιφάνειες σκόνης ενώνονται άτομα οξυγόνο με υδρογόνο στα διάχυτα νέφη, η ανίχνευση στρωμάτων πάγου νερού σε ψυχρά μεσοαστρικά σκοτεινά νέφη μας δείχνει ότι αντιδράσεις στις επιφάνειες της σκόνης που περιλαμβάνουν οξυγόνο δημιουργούν νερό, και ότι ένα σημαντικό μέρος, αν όχι όλο το νερό, παραμένει παγωμένο στην σκόνη. Αντίθετα, οι αέριες χημικές αντιδράσεις στα ψυχρά νέφη είναι πολύ αργές για την δυνατότητα σχηματισμού στρωμάτων πάγου, που να περιέχει ικανοποιητική ποσότητα οξυγόνου, στην διάρκεια ζωής του νέφους.

Άλλα στοιχεία μπορεί απλά να κολλάνε στην επιφάνεια χωρίς να αντιδρούν. Το (CO) κολλάει αποτελεσματικά στις επιφάνειες σε θερμοκρασία κάτω από 25 Κέλβιν και αφθονεί στον πάγο στους κόκκους σκόνης. Κάποιο από αυτό σχηματίζει (CO<sub>2</sub>) ή άλλα μόρια. Σε πιο χαμηλές θερμοκρασίες (10-15 Κέλβιν) άλλα μόρια προερχόμενα από CRDR κολλάνε αποτελεσματικά, ενώ τα ελαφρύτερα (H<sub>2</sub>), (He) δεν κολλάνε σε αυτές τις θερμοκρασίες.

Έτσι ο πάγος στις επιφάνειες είναι ένα μείγμα που εξαρτάται από τις τοπικές συνθήκες. Η μεγάλη σχετική αφθονία των (CO<sub>2</sub>), (CH<sub>3</sub>OH), (H<sub>2</sub>CO) σε σχέση με το νερό στον πάγο μας δείχνει ότι υπάρχει μια δέσμευση του (CO) σε αυτά τα είδη, που υποκινείται από την κοσμική ακτινοβολία ή από φωτόνια παραγόμενα από αυτήν.

Σε πολλά σκοτεινά νέφη, ο πάγος περιέχει σημαντικές ποσότητες από (O),(C), (N), (S). Για παράδειγμα, σε πολλούς περιστασιακούς πυρήνες το 90% του άνθρακα είναι σε μορφή (CO) και (CO<sub>2</sub>) στον πάγο. Αν δεν υπάρχει διαδικασία να λειώσει τον πάγο σε αέριο, τότε το αέριο αποδυναμώνεται από τα στοιχεία εκτός των (H),(He) και η παραγωγή χημικών στοιχείων υποβαθμίζεται. Έτσι, αν δεν υπάρχει άλλη διαταραχή, η χημεία της αέριας φάσης έχει περιορισμένη χρονική διάρκεια, μέχρι που να εμφανιστεί το πάγωμα στους κόκκους σκόνης.

Το χρονοδιάγραμμα του παγώματος ποικίλει. Για το (CO) είναι στον Γαλαξία μας κατά μέσο όρο 1 εκατομμύρια έτη. Εξαρτάται από την πυκνότητα του νέφους και την κινητική θερμοκρασία του. Επίσης από το μέγεθος των κόκκων της σκόνης. Στον Γαλαξία μας ο χρόνος αυτός είναι συγκρίσιμος με τον χρόνο που χρειάζεται η κοσμική ακτινοβολία να παράγει χημεία. Έτσι ένα αξιόλογο ποσοστό των βαρέων

ατόμων σχηματίζουν μόρια. Το πάγωμα μπορεί να μετακινήσει ένα σημαντικό ποσοστό της ύλης από τα αέρια.

Ο πάγος μπορεί να αλλοιωθεί σε θερμοκρασία άνω των 100 Κέλβιν. Ας πούμε, κοντά σε ένα νεογέννητο άστρο. Όταν θερμανθούν οι κόκκοι, ο πάγος λιώνει και τα μόρια επιστρέφουν στην αέρια φάση. Υπάρχουν μηχανισμοί που μπορεί να γίνει αυτό και σε χαμηλές θερμοκρασίες, αλλά αυτοί οι μηχανισμοί επισκιάζονται από το πάγωμα. Έτσι, στους πυκνούς πυρήνες στα σκοτεινά νέφη μόνο ένα μικρό ποσοστό των βαρέων ατόμων παραμένει αέριο.

### Σύνθετη χημεία στους μεσοαστρικούς πάγους.

Μέσα στους πάγους κάποιων περιοχών εμφανίζονται πιο σύνθετες χημικές αντιδράσεις. Σε περιοχές κοντά σε πεδία δημιουργίας άστρων μεγάλης μάζας έχουν βρεθεί μικροί ( $<0,1 \text{ pc}$ ) πυρήνες νεφών που περιέχουν εντυπωσιακή χημική πολυπλοκότητα. Τα μόρια που έχουν ανιχνευτεί εκεί είναι σχετικά μεγάλα, συγκρινόμενα με αυτά στα σκοτεινά νέφη, και οι περιοχές αυτές είναι σχετικά πολύ πυκνές και θερμές. Αυτές οι μικρές, πυκνές και θερμές περιοχές λέγονται καυτοί πυρήνες (hot cores), και βρίσκονται όπου εξελίσσεται αστρογέννηση. Περιέχουν μια ποικιλία ειδών, μερικά από αυτά είναι τα εξής μεγάλα μόρια ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ), ( $(\text{CH}_3)_2(\text{CO})$ ), ( $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CN}$ ), ( $\text{HCOOCH}_3$ ), ( $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$ ). Η υψηλή αναλογία αυτών των μεγάλων μορίων δεν μπορεί να δικαιολογηθεί με μόνο χημικό παράγοντα την κοσμική ακτινοβολία. Έτσι πρέπει να δρα και άλλος παράγοντας. Γενικά υποθέτουμε ότι αυτά τα μεγάλα μόρια εμφανίζονται σε αντιδράσεις στερεής κατάστασης με τον πάγο που έχει σχηματιστεί στους κόκκους σκόνης κατά τη διάρκεια της ψύξης στην κατάρρευση ενός νέφους, και πριν εξατμιστούν λόγω θέρμανσης από την δημιουργία του αστέρα. Η χημεία στερεής κατάστασης συμβαίνει στους απλούς πάγους ( $\text{H}_2\text{O}$ ), ( $\text{CO}$ ), ( $\text{CO}_2$ ), ( $\text{CH}_4$ ) και σε άλλα είδη, από την κοσμική ακτινοβολία και την δευτερεύουσα ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, που προκλήθηκε από την κοσμική. Η εισερχόμενη ενέργεια δημιουργεί ρίζες και ιόντα στον πάγο, και αν αυτά είναι σταθερά, στον πάγο εμφανίζεται η δημιουργία νέων χημικών αντιδράσεων, με αποτέλεσμα να έχουμε εκεί πιο σύνθετα μόρια.

Εργαστηριακά έχουν εξεταστεί κάποιοι χημικοί οδοί, περιλαμβανομένων πολλών δυνητικών αντιδράσεων, υποστηρίζοντας την άποψη ότι η χημική πολυπλοκότητα μπορεί να εμφανιστεί με αυτόν τον τρόπο. Τα μοντέλα λένε ότι η ποσότητα και η ποικιλία των ειδών είναι συνεπής με τις χημικές αντιδράσεις που παρατηρούμε στις περιοχές γέννησης αστερών μεγάλης μάζας.

### Χημεία προκαλούμενη από δυναμική αερίων.

.Κρουστικά μέτωπα (Shocks)

Ένα κρουστικό μέτωπο εμφανίζεται όταν ένα εξωτερικό του νέφους περιστατικό-όπως η σύγκρουση με ένα άλλο μεσοαστρικό νέφος ή εισβολή μιας ταχέα διαστελλόμενης περιοχής (HII) σε ένα κοντινό νέφος από ψυχρό ουδέτερο αέριο-παράγει διαταράξεις ταχύτερες από την τοπική ταχύτητα του ήχου (αυτή έχει να

κάνει με την πυκνότητα του νέφους). Το συμπέρασμα είναι ότι η κινητική ενέργεια του όγκου μετατρέπεται σε εσωτερική θερμική ενέργεια. Έτσι το αέριο που δέχτηκε το κρουστικό κύμα συμπιέζεται και θερμαίνεται.

Στην απλούστερη εκδοχή, η ενεργειακή μετατροπή είναι πιο απότομη σε σχέση με τα άλλα χρονοδιαγράμματα του νέφους, με αποτέλεσμα η θερμοκρασία και η πίεση να κάνουν ένα αποτελεσματικά διακριτό άλμα. Αυτό ονομάζεται J shock. Το μετά το κρουστικό μέτωπο αέριο αρχίζει να ψύχεται μέσω ακτινοβολίας μέχρι ένα όριο, όμως πάντα πάνω από την αρχική του θερμοκρασία. Η θερμοκρασία που αναπτύσσεται είναι της τάξης των μερικών χιλιάδων βαθμών. Το χρονοδιάγραμμα ψύξης εξαρτάται από την χημική σύσταση του μετά του κρουστικού μετώπου αερίου, και είναι μέχρι χιλιάδες έτη για αραιά αέρια.

Συνήθως όμως, η δομή του κρουστικού κύματος θα επηρεαστεί από τη δράση του μαγνητικού πεδίου των ιόντων στο αέριο. Σε αυτήν την περίπτωση, τα ιόντα παρασύρονται μέσα στο κυρίως ουδέτερο αέριο, δίνοντας πολύ περισσότερη ενέργεια σε αυτό από ότι ένα απλό J shock. Αυτό το πιο σύνθετο κρουστικό μέτωπο ονομάζεται C shock. Για τον χαμηλό ιονισμό που αναμένουμε να έχει ένα μοριακό νέφος, και για ένα τυπικό μαγνητικό του πεδίο ύψους 1 micro gauss, τα κρουστικά μέτωπα με ταχύτητες μικρότερες των 40 km/s είναι πιθανά C shocks. Επειδή σε ένα τέτοιο κρουστικό μέτωπο η ενέργεια έχει υποστεί μεγαλύτερη φυσική διασπορά από ότι σε ένα J shock, οι θερμοκρασίες που προκύπτουν είναι γενικά χαμηλότερες, της τάξης των 1000 βαθμών για ένα τυπικό κρουστικό κύμα με ταχύτητα 30 km/s.

Τέτοια δυναμικά γεγονότα είναι συνηθισμένα στην μεσοαστρική ύλη και στην υλη γύρω από νεογέννητα αστέρια. Ανιχνεύονται φασματογραφικά μέσω αναγνώρισης ανώμαλου κβαντικού επιπέδου πληθυσμού σε άτομα και μόρια. Εξαρτωμένη από την ταχύτητα του κρουστικού μετώπου και τις τοπικές συνθήκες, η ενίσχυση της θερμοκρασίας μπορεί να είναι πολύ μεγάλη, και σε ακραίες περιπτώσεις το αέριο να ιονιστεί πλήρως, με αποτέλεσμα την διάλυση των μορίων. Ένα J shock θα διαλύσει τα μόρια σε ένα μοριακό νέφος πυκνότητας 10000 H<sub>2</sub>/cm<sup>-3</sup> αν κινηθεί με ταχύτητα 25 km/s, ενώ ένα C shock θα χρειαστεί 45km/s, λόγω ανάπτυξης μικρότερων θερμοκρασιών. Αυτές οι κρίσιμες ταχύτητες, όπου μπορεί το (H<sub>2</sub>) να διαλυθεί σε ατομικό μέσω συγκρούσεων είναι σημαντικές. Πάνω από αυτές το αέριο που δέχτηκε το κρουστικό μέτωπο περιέχει κυρίως ατομικό υδρογόνο, που είναι ικανό να καταστρέψει όλα τα είδη μορίων εκεί.

Οι ταχύτητες αυτές είναι επομένως τα όρια, πάνω από τα οποία οι χημική πολυπλοκότητα αρχίζει να μειώνεται. Αν η αύξηση θερμοκρασίας στο αέριο είναι μικρότερη, μερικών χιλιάδων βαθμών K, εμφανίζεται η χαρακτηριστική χημεία των κρουστικών μετώπων, όπως η παραγωγή νερού. Οι αντιδράσεις που είναι περιορισμένες σε χαμηλές θερμοκρασίες, 10 K, στα μεσοαστρικά νέφη με όριο ενεργοποίησης μερικές δεκάδες eV στην διαδρομή αντίδρασης, αποκτάνε γρήγορα θερμοκρασία 1000 K. Η δημιουργία νερού σε ένα μεσοαστρικό κρουστικό κύμα περιλαμβάνει δύο από τα πιο κύρια συστατικά του μεσοαστρικού αερίου, ενώ σε χαμηλές θερμοκρασίες η χημεία χρειάζεται για την παραγωγή νερού τα πιο σπάνια

ιόντα ( $H^+$ ) και ( $H^3$ ), που προκαλούνται από τον ιονισμό μέσω κοσμικής ακτινοβολίας. Έτσι, ενώ το νερό σε αέρια φάση στα σκοτεινά νέφη είναι περιορισμένο, στο αέριο που δέχτηκε κρουστικό μέτωπο μπορεί να κυριαρχήσει, και να δεσμεύσει το περισσότερο ( $O$ ) που δεν είναι ήδη δεσμευμένο σε ( $CO$ ).

Πολλές ουδέτερες- ουδέτερες αντιδράσεις και μερικές αντιδράσεις ιόν- μόριο παρεμποδίζονται από την ενεργοποίηση των ορίων ενέργειας που είναι σε ίδιο βαθμό με αυτά στο σύστημα οξυγόνου- υδρογόνου. Για παράδειγμα, το ατομικό θείο συμπεριφέρεται με παρόμοιο τρόπο με το οξυγόνο, έτσι ώστε η παρατήρηση πλούσιας σε θείο χημείας να είναι δείκτης κρουστικού μετώπου. Σε ψυχρό αέριο, η χημεία του άνθρακα δρα μέσω της αργής ένωσης του ( $C^+$ ) με ( $H_2$ ) ή την μεταφορά ενός πρωτονίου από το ( $H^3$ ) στο ( $C$ ).

Γενικά, σε χαμηλής ταχύτητας κρουστικά κύματα μπορούν τα άτομα να δράσουν απευθείας με το μοριακό υδρογόνο. Από τα μόρια αυτά (hydrides), που μπορεί να προχωρήσουν σε πιο πολλές αντιδράσεις, τα ( $H_2O$ ) και ( $H_2S$ ) αποτελούν άμεσες υπογραφές χαμηλής ταχύτητας κρουστικών κυμάτων.

### Διεπαφές.

Οι αυξημένες θερμοκρασίες στα αέρια που δέχτηκαν κρουστικό μέτωπο είναι σημαντικές στην παραγωγή αντιδράσεων, που είναι περιορισμένες σε ενεργειακά όρια δράσης στις χαμηλές θερμοκρασίες. Ακόμα, η αύξηση της θερμοκρασίας σε ένα ψυχρό μοριακό νέφος μπορεί και να επιτευχθεί με την πρόσμειξη καυτού αερίου. Τέτοιες περιπτώσεις έχουμε σε ταραγμένες διεπαφές, που σχηματίζονται όταν ένας αστρικός άνεμος διεισδύει στο μοριακό αέριο, σε έναν πυκνό πυρήνα που περιβάλλει το νέο άστρο.

Από χημική άποψη, αυτή η περίπτωση είναι διαφορετική από το κρουστικό μέτωπο, γιατί ο αστρικός άνεμος δεν είναι μόνο θερμός, αλλά και ιονισμένος. Έτσι το νέφος θερμαίνεται και ιονίζεται παράλληλα, ώστε να αποκτήσει χημεία ιόντων μορίων. Αυτή η διαδικασία συνεχίζεται ώσπου ο αστρικός άνεμος να διαβρώσει τελείως τον πυκνό πυρήνα μέσα στον οποίο σχηματίζεται το αστέρι, μια διαδικασία που χρειάζεται περίπου ένα εκατομμύριο έτη.

Είναι πιθανό να είχε σχηματιστεί πάγος στη σκόνη του νέφους. Τότε τα μόρια που ήταν στον πάγο θα εξατμιστούν και θα πάρουν μέρος στις αντιδράσεις των ιονισμένων μορίων.

### Ισότοπα στην μεσοαστρική χημεία.

Το δευτέριο υπάρχει στον γαλαξία μας σε αναλογία προς το υδρογόνο  $1,4 \times 10^{-5}$ . Αφελώς θα μπορούσαμε να συμπεράνουμε ότι η αναλογία μορίων που περιέχουν δευτέριο, όπως το ( $NH_2D$ ) θα ήταν ανάλογα μικρή σε σύγκριση με το ( $NH_3$ ), και ότι τα είδη με περισσότερα μέρη δευτερίου, όπως το ( $ND_3$ ) θα ήταν ακόμα πιο σπάνια. Στην πραγματικότητα υπάρχουν περιοχές όπου το δευτέριο είναι σε τάξεις μεγέθους περισσότερο από ότι περιμέναμε. Το φαινόμενο αυτό δεν περιορίζεται

μόνο στο δευτέριο. Το ισότοπο ( $^{13}\text{C}$ ) υπερισχύει του ( $^{12}\text{C}$ ) σε κάποιες περιπτώσεις. Αυτή η ενίσχυση σπάνιων ισωτόπων στα μόρια ονομάζεται κλασματοποίηση (fractionation) και δημιουργείται σε αντιδράσεις ανταλλαγής ισωτόπων στην χημεία ιονισμένων μορίων. Τα μόρια που διαφέρουν μόνο από το περιεχόμενο ισωτόπων ονομάζονται ισωτοπόλογα (isotopologues).

Στα σκοτεινά μεσοαστρικά νέφη το δευτέριο είναι κυρίως δεσμευμένο σε (HD)  $((\text{D}^+ + (\text{H}_2) = (\text{H}^+) + (\text{HD}))$  όπου το (D) σχηματίστηκε στην ανταλλαγή φορτίου  $(\text{D}) + (\text{H}^+) = (\text{D}^+) + (\text{H})$  και τα πρωτόνια είναι αποτέλεσμα ιονισμού από την κοσμική ακτινοβολία. Οι αντιδράσεις του (HD) με ιονισμένα μόρια που περιέχουν (H) μπορεί να ανταλλάξουν το (D) με το (H), επειδή το τελευταίο έχει ελάχιστα ισχυρότερο δεσμό με την κοσμική ακτινοβολία. Ενώ το δυνητικό κανάλι είναι ίδιο στις περιπτώσεις ( $\text{XD}^+$ ) και ( $\text{XH}^+$ ), το βασικό επίπεδο δόνησης του βαρύτερου ισωτόπου είναι χαμηλότερο στο δυνητικό κανάλι. Η ενεργειακή διαφορά είναι τυπικά ίση για θερμοκρασίες μερικές εκατοντάδες βαθμών K. Έτσι σε χαμηλότερες θερμοκρασίες η αντίδραση γίνεται προς την κατεύθυνση, όπου το (D) μεταφέρεται από το (HD) σε ( $\text{XD}^+$ ). Σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες συμβαίνει το αντίθετο, με αποτέλεσμα να μην έχουμε κλασματοποίηση. Βέβαια όλο το ( $\text{XD}^+$ ) μπορεί να υποκύψει σε πληθώρα αντιδράσεων, και να διανεμηθεί το δευτέριο ευρέως στις χημικές αντιδράσεις. Ένα είδος -κλειδί είναι το ( $\text{H}^+3$ ), που έχουμε εντοπίσει σε χημεία φάσης αερίου σκοτεινού νέφους. Το ισωτοπόλογο ( $\text{H}_2\text{D}^+$ ) είναι πιο σταθερό από το ( $\text{H}^+3$ ) σε ενεργειακή διαφορά μέχρι τους 178 K. Το ( $\text{H}_2\text{D}^+$ ) μπορεί να ενισχυθεί αν έχει απεμπλουτιστεί το (CO), που είναι ένας από τους μεγαλύτερους καταστροφείς του ( $\text{H}_2\text{D}^+$ ).

Τα σχετικά με το υδρογόνο ισωτοπόλογα της αμμωνίας ( $\text{NH}_3$ ) είναι τα ( $\text{NH}_2\text{D}$ ), ( $\text{NHD}_2$ ), ( $\text{ND}_3$ ). Η κλασματοποίηση του δευτερίου για αυτά τα είδη μπορεί να είναι πολύ υψηλή σε σκοτεινά νέφη. Παρόμοιες κλασματοποιήσεις μπορούν να γίνουν και για άλλα είδη, αλλά η σχετική διαφορά μάζας ανάμεσα στο (H) και το (D) είναι μεγαλύτερη από όλα τα άλλα ζευγάρια ισωτόπων. Έτσι η ενεργειακή διαφορά είναι μικρότερη στα άλλα ισωτοπόλογα. Για παράδειγμα, στους 35 K το ισότοπο μόριο ( $^{13}\text{CO}$ ) είναι πιο σταθερό από το ( $^{12}\text{CO}$ ).

Η ικανότητα σχηματισμού σχετικών με το υδρογόνο ισωτοπολόγων στην χαμηλής θερμοκρασίας μεσοαστρική χημεία ανεβάζει θεαματικά τον αριθμό μορίων που έχουμε ανακαλύψει σε αυτήν.

### 3) Φυσικές διαδικασίες σε διαφορετικά αστρονομικά περιβάλλοντα.

Οι παραπάνω παράγοντες χημικών αντιδράσεων δεν είναι το ίδιο αποτελεσματικοί σε όλες τις περιπτώσεις. Μπορεί να διαφέρουν από τόπο σε τόπο στην μεσοαστρική ύλη του γαλαξία, από γαλαξία σε γαλαξία, και ανά χρονική περίοδο. Για παράδειγμα, το τοπικό πεδίο υπεριώδους ακτινοβολίας ενός γαλαξία με υψηλή



αστρογέννηση είναι πολύ μεγαλύτερης έντασης από αυτό του Γαλαξία μας. Επίσης η κοσμική ακτινοβολία επιταχύνεται από μαγνητικό –υδραυλικά φαινόμενα, με αποτέλεσμα περιοχές με μεγάλη δυναμική δράση να έχουν πιο έντονη ροή κοσμικής ακτινοβολίας από πιο ήρεμες περιοχές. Ακόμα, η χημεία της σκόνης εξαρτάται από την αναλογία αερίου/ σκόνης και από την φύση των επιφανειών των κόκκων. Αυτοί οι παράμετροι μπορούν να διαφέρουν μέσα στον ίδιο γαλαξία και από γαλαξία σε γαλαξία. Τέλος, τα δυναμικά φαινόμενα αερίων που προκαλούν κρουστικά κύματα ή το ανακάτεμα αερίων έχουν ως κλειδί των παραμέτρων τους την ταχύτητα των διαταράξεων των αερίων και την έκταση του φαινομένου. Αυτά εξαρτώνται από τις τοπικές συνθήκες.

Η ποικιλία στην ένταση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.

.Περιοχές που κυριαρχούνται από τα φωτόνια.

Είδαμε ότι μια περιοχή PDR έχει ως χαρακτηριστικό την εκπομπή υπεριώδους και ορατής ακτινοβολίας από ένα μεγάλης μάζας αστέρι (ή ένα σμήνος), που διεισδύει σε ένα νέφος και απορροφάται από τη σκόνη και το αέριο.

Πρώτα, υπάρχει μια διεπαφή (H)/(H<sub>2</sub>), πίσω από την οποία το (H) είναι κυρίως μοριακό ενώ το υπόλοιπο νέφος είναι ατομικό. Σε αυτή τη ζώνη οι σημαντικότεροι ψύκτες/ ανιχνευτές είναι το (OI) και το (CII). Σε μεγαλύτερα βάθη εμφανίζεται μετάβαση (C<sup>+</sup>)/(C)/(CO), από εκεί και πέρα ένα σημαντικό μέρος του (C) είναι σε μορφή (CO). Σε αυτή τη ζώνη οι γραμμές του (CO) αποτελούν καλούς ανιχνευτές. Μετά από εκεί, αντιδράσεις ανταλλαγής μεταξύ ατόμων (O),(N) οδηγούν σε σχηματισμό (CN), (NH), (O<sub>2</sub>). Πιο βαθιά η επίδραση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας μειώνεται ραγδαία. Εδώ ο κύριος παράγοντας χημικών αντιδράσεων είναι η κοσμική ακτινοβολία, που δεν φθίνει με το βάθος σε ένα νέφος.

Για ένα σκοτεινό νέφος σε συνθήκες έντασης ακτινοβολίας του Γαλαξία μας η μετάβαση (H)/(H<sub>2</sub>) φτάνει τα 0,1 mag, αυτή σε (CO) τα 2mag. Αν η ένταση της ακτινοβολίας είναι πολύ μεγαλύτερη, όπως κοντά σε πολύ μεγάλα αστέρια ή μέσα σε γαλαξίες αστρογέννησης, η δομή είναι η ίδια, αλλά τα βάθη διείσδυσης μεγαλώνουν. Ομοίως η μετάβαση από άτομα και ιόντα (C) σε (CO) εμφανίζεται βαθύτερα στο νέφος. Αυτό συμβαίνει γιατί το εξωτερικό πεδίο ακτινοβολίας τείνει να διαλύσει τα μόρια των (H<sub>2</sub>), (CO) και να φωτοιονίσει τα άτομα (C). Επειδή οι αντιδράσεις σχηματισμού και επανασύνδεσης κυμαίνονται με το τετράγωνο της πυκνότητας, μια αύξηση της πυκνότητας μεταφέρει τις μεταβάσεις σε μικρότερα βάθη στα νέφη.

.Περιοχές κυριαρχίας ακτίνων Χ

Η μετάβαση (H)/(H<sub>2</sub>) σε XRD εξαρτάται από την πυκνότητα στο νέφος και την ενεργειακή ροή των ακτίνων Χ που το επηρεάζει. Σε μεγαλύτερες πυκνότητες παράγεται πιο γρήγορα το (H<sub>2</sub>), έτσι η μετάβαση (H)/(H<sub>2</sub>) κατευθύνεται προς την άκρη του νέφους όταν αυξάνεται η πυκνότητά του. Ρεύματα μεγαλύτερης έντασης

ακτίνων Χ διαλύουν το (H<sub>2</sub>) σε (H) πιο γρήγορα και μεταφέρουν την μετάβαση πιο βαθιά μέσα στο νέφος.

Αν χρησιμοποιήσουμε αναλογίες του Γαλαξία μας, τα λεπτομερή μοντέλα μας δείχνουν ότι για χαμηλές πυκνότητες 1000 άτομα /cm<sup>3</sup> και για μια εισροή ρεύματος ακτίνων Χ μεγέθους από 1000 ως 100 φορές την υπεριώδης του Γαλαξία μας, η μεταβολή μετατοπίζεται από βάθος 1000 mag σε 5 φορές μεγαλύτερο βάθος. Σε πιο υψηλές πυκνότητες, 300000/cm<sup>3</sup>, μια χαμηλή ροή Χ δεν μπορεί να διαλύσει το (H<sub>2</sub>) και το υδρογόνο παραμένει μοριακό. Μια πιο ισχυρή ροή πιέζει την μεταβολή (H)/(H<sub>2</sub>) στα 600 mag.

Όπως αναφέραμε, η μεταβολή (C<sup>+</sup>)/(C)/(CO) που παρατηρούμε στις PDR δεν μπορεί να γίνει στις XDR επειδή οι ακτίνες Χ διεισδύουν πιο εύκολα στο νέφος από τις υπεριώδεις. Έτσι τα (C<sup>+</sup>), (C) είναι άφθονα σε μεγάλα βάθη στα νέφη. Όταν η ροή ακτίνων Χ είναι μεγάλης έντασης, το (CO) είναι σχετικά λίγο μέχρι βάθος 1000 mag. Αυτό συμβαίνει και με χαμηλή ροή ακτίνων Χ, αλλά αν υπάρχει μεγάλη πυκνότητα στο νέφος, 100000 άτομα/cm<sup>3</sup>, η δημιουργία του (CO) κυριαρχεί, με αποτέλεσμα να είναι άφθονο σε όλο το νέφος.

Γενικά, η χημεία είναι πιο υποβαθμισμένη στις XDR σε σχέση με τις PDR. Έτσι οι σημαντικοί ανιχνευτές είναι άτομα και όχι μόρια. Είναι γραμμές απαγορευμένων στοιχείων (ιόντα που δεν υπάρχουν στις συνθήκες της Γης) και ιόντων όπως τα (CII) (158μm), (OI) (63,45 μm), (CI) (610 μm), (SIII) (18,7, 33,5 μm), (FeII) (1,64μm). Είδη μορίων των σκοτεινών νεφών όπως τα (HCN), (HNC), (CS), (HCO<sup>+</sup>), (C<sub>2</sub>H) σπανίζουν εκεί και δεν εντοπίζονται παρά μόνο σε βάθος 1000 mag. Αυτά τα μόρια γίνονται ανιχνεύσιμα σε μεγάλες πυκνότητες με χαμηλή ροή ακτίνων Χ.

### Υπολογίζοντας τον βαθμό ιονισμού από την κοσμική ακτινοβολία.

Η κοσμική ακτινοβολία είναι ιδιαίτερα σημαντική στο εσωτερικό των σκοτεινών νεφών, όπου η αστρική ακτινοβολία δεν φτάνει. Έτσι θα περιμέναμε ότι η αύξηση του ιονισμού από την εισερχόμενη κοσμική ακτινοβολία θα σήμαινε αύξηση των χημικών αντιδράσεων στο νέφος. Αυτό όμως δεν συμβαίνει γενικά. Αυξάνοντας τον ιονισμό μέσω της κοσμικής ακτινοβολίας αυξάνουμε βέβαια το βαθμό δημιουργίας πολλών μορίων, αλλά αυξάνουμε και τον βαθμό απώλειας μορίων μέσω άλλων χημικών διεργασιών. Η ισορροπία αυτή είναι λεπτή. Όπως και να έχει, αν αυξηθεί σημαντικά ο βαθμός ιονισμού από την κοσμική ακτινοβολία το (H<sub>2</sub>) καταστρέφεται σε τέτοιο βαθμό ώστε να μην μπορεί να αντισταθμιστεί. Και επειδή η χημεία σχεδόν όλων των ειδών εξαρτάται από την δημιουργία μοριακού υδρογόνου, όλη η χημεία περιορίζεται σημαντικά.

### Υπολογίζοντας την αναλογία σκόνης/ αερίου και την μεταλλικότητα.

Είδαμε ότι οι κόκκοι σκόνης επηρεάζουν τις χημικές αντιδράσεις στα μεσοαστρικά νέφη με πολλούς τρόπους. Απορροφάνε το αστρικό φως και προστατεύουν τα μόρια στις ψυχρές περιοχές από την φωτόλυση, και προσφέρουν το μέσο για να αποθηκευτεί πάχος σε πυκνότερες περιοχές του μεσοαστρικού διαστήματος. Η

χημεία στερεής κατάστασης σε αυτόν τον πάγο επιτρέπει την δημιουργία μορίων που δεν παράγονται με χημεία αέριας κατάστασης. Έτσι η σχέση σκόνης/ αερίου είναι σημαντική για την δημιουργία χημικών στοιχείων.

Υπολογίζουμε ότι οι κόκκοι σκόνης σε μακρινούς γαλαξίες είναι όμοια ενεργοί στις χημικές αντιδράσεις που πραγματοποιούνται στις επιφάνειές τους με αυτούς του Γαλαξία μας. Αυτό το συμπέρασμα όμως εξαρτάται από το μέγεθος των κόκκων. Αν, για παράδειγμα, οι κόκκοι είναι σημαντικά μικρότεροι, τότε για την ίδια αναλογία σκόνης/ αερίου θα προσφέρουν περισσότερη συνολικά επιφάνεια και θα είναι πιο ενεργοί στις χημικές αντιδράσεις από ότι στον Γαλαξία μας. Δεν έχουμε ένδειξη για κάτι τέτοιο, άρα θεωρούμε ότι οι κόκκοι είναι παρόμοιοι. Έτσι η καταλυτική δράση της σκόνης (στην επιφάνεια όπως ο σχηματισμός του  $H_2$ ), ή στην δημιουργία καλύμματος πάγου που παράγει μεγάλα μόρια όπως ( $CH_3COOH$ ), ( $C_2H_5OH$ ) εξαρτάται από την αναλογία σκόνης/ αερίου.

Επειδή η κόκκοι αποτελούνται από άτομα όπως άνθρακας, οξυγόνο, πυρίτιο, σίδηρο και άλλα, που συνθέτουν ένα μεγάλο μέρος της μεταλλικότητας του αερίου, ο βαθμός της ύλης σε σκόνη είναι συνήθως ανάλογος με την γενική μεταλλικότητα της περιοχής. Διακυμάνσεις της σχέσης σκόνης/ αερίου μπορεί να σημαίνουν ότι και η μεταλλικότητα κυμαίνεται.

Οι διακυμάνσεις στην μεταλλικότητα μπορούν να επηρεάσουν την παραγωγή χημικών στοιχείων με απροσδόκητους τρόπους. Μερικά μόρια ( $CO$ ), ( $H_2O$ ), ( $CS$ ), ( $SO$ ) είναι γραμμικοί ανιχνευτές μεταλλικότητας, άλλα ( $CN$ ), ( $OH$ ), ( $H_3O^+$ ), ( $HCN$ ), ( $HNC$ ), ( $HCO^+$ ) είναι ευαίσθητα στις διακυμάνσεις της μεταλλικότητας και μερικά ( $C_2$ ), ( $C_2H$ ), ( $H_2CO$ ) εμφανίζονται να είναι αντιστρόφως εξαρτώμενα από την μεταλλικότητα. Οι αιτίες αυτών των συμπεριφορών είναι καλά κατανοητές με όρους του ανταγωνισμού στις χημικές αντιδράσεις.

**Μετρώντας τις ταχύτητες των κρουστικών μετώπων στο μεσοαστρικό αέριο.**

Τα κρουστικά μέτωπα μετατρέπουν την κινητική ενέργεια σε θερμική ενέργεια. Αν η θερμοκρασία του αερίου ανεβεί από τυπικά χαμηλές τιμές του μοριακού νέφους (10K) σε περισσότερο από 1000K, γίνονται εφικτές μερικές αντιδράσεις που περιλαμβάνουν είδη με αφθονία. Το νερό και κάποια είδη με θείο αποτελούν υπογραφές των κρουστικών κυμάτων.

Όμως, όπως είδαμε, το εύρος ταχύτητας του κρουστικού μετώπου, όπου δημιουργούνται αυτά τα μόρια-ανιχνευτές, είναι περιορισμένο. Όταν η ταχύτητα αυτή και η θερμοκρασία του μετά το κρουστικό μέτωπο αέριο είναι αρκετά υψηλά, ώστε πολύ από το  $H_2$  να διαχωριστεί, τότε οι αντιδράσεις των καυτών ατόμων υδρογόνου με άλλα μόρια τα διαχωρίζουν γρήγορα. Τα κρουστικά κύματα με τέτοιες ταχύτητες ονομάζονται κρουστικά μέτωπα διαχωρισμού (dissociating shocks). Για μη μαγνητικά κρουστικά μέτωπα, το εύρος δημιουργίας τυπικών μορίων είναι 3- 25 km/s. Για τα μαγνητικά εκτείνεται μέχρι 45 km/s. Ακόμα και σε

ένα κρουστικό μέτωπο διαχώρισης μπορεί να εμφανιστούν χημικές αντιδράσεις πίσω από το κρουστικό μέτωπο, αν υπάρχει διαθέσιμο ( $H_2$ ).

Θερμοκρασίες 1000K του μετά το κρουστικό κύμα αερίου σημαίνουν γρήγορη μετατροπή των ατόμων οξυγόνου που δεν είναι δεσμευμένο σε (CO), πρώτα σε (OH) και μετά σε ( $H_2O$ ). Η αναλογία των 2 αυτών μορίων μπορεί να μας δώσει την πυκνότητα και το πεδίο ακτινοβολίας του αερίου που δέχτηκε το κρουστικό κύμα. Αν το (OH) είναι άφθονο σε σκοτεινά νέφη, αντιδράσεις των (O),(S),(C) με (OH) σχηματίζουν ( $O_2$ ), (CO) και (SO). Στις θερμοκρασίες αυτές αντιδράσεις του (C) σε σκοτεινά νέφη και (C+) σε διάχυτα νέφη σημαίνουν την δημιουργία ανθρακικών υδριδίων. Λίγο υψηλότερες θερμοκρασίες παράγουν αντιδράσεις των (S), (S+) με ( $H_2$ ), και δημιουργούν χημεία θείου στα σκοτεινά νέφη.

#### Παραδείγματα

.( $H_2O$ ). Όσο η ταχύτητα του κρουστικού κύματος είναι μεγαλύτερη από 10km/s, το νερό είναι ενισχυμένο και ειδικά σε κρουστικά μέτωπα τύπου (C) δεν διαχωρίζεται εύκολα (η συνήθης διαδικασία καταστροφής του, αντίδραση με άτομο υδρογόνου, έχει ενεργειακό φράγμα τους 9000K).

.(SiO), ( $CH_3OH$ ), (SO). Αυτά τα 3 είδη είναι ανάμεσα στα συνήθη των ενεργειακών εκροών. Ο σχηματισμός μεθανόλης στην αέρια φάση γίνεται κυρίως μέσω αντίδρασης του ( $CH_3+$ ) με ( $H_2O$ ). Έτσι η πληθώρα του σε μετά από κρουστικό μέτωπο περιβάλλοντα είναι απόδειξη αφθονίας του νερού. Τα (SiO), (SO) σε μεγάλη θερμοκρασία είναι πιο ενισχυμένα στους κόκκους της σκόνης από ότι στις αντιδράσεις αέριας φάσης. Έτσι αποτελούν έμμεσους ανιχνευτές περιβαλλόντων που έχουν δεχτεί κρουστικά μέτωπα.

#### Χρονοδιαγράμματα.

Αλλάζοντας τις φυσικές συνθήκες (ροή UV, ιονισμός κοσμικής ακτινοβολίας κ.λπ.) που καθορίζουν τους χημικούς παράγοντες αλλάζουμε την χημεία και τις αφθονίες των μορίων. Τα μόρια έχουν έναν ενεργό ρόλο στον έλεγχο μερικών παραμέτρων του αερίου, όπως την θέρμανση και την ψύξη του, και τον βαθμό ιονισμού του. Η βαρύτητα καθορίζει το χρονοδιάγραμμα της ελεύθερης πτώσης, και εξαρτάται μόνο από τη απόλυτη πυκνότητα και όχι την χημική δραστηριότητα στο αέριο. Το χημικό χρονοδιάγραμμα καθορίζει το πόσο γρήγορα ένα ατομικό αέριο γίνεται μοριακό, θεωρώντας εδώ ότι ο παράγοντας είναι η κοσμική ακτινοβολία. Το χρονοδιάγραμμα του παγώματος καθορίζει αν οι αφθονίες των μορίων αέριας φάσης είναι σημαντικά υποβαθμισμένες από σχηματισμό πάγου σε επιφάνειες κόκκων σκόνης. Το χρονοδιάγραμμα αποδέσμευσης καθορίζει πόσο γρήγορα τα μόρια αποδεσμεύονται από πάγο σε αέριο. Το χρονοδιάγραμμα ψύξης καθορίζει το πόσο γρήγορα η βαρυτική δυναμική ενέργεια ενός νέφους μπορεί να απομακρυνθεί δια ακτινοβολίας από τα μόρια, και το χρονοδιάγραμμα αμφιπολικής διάχυσης το πόσο γρήγορα μπορεί να απομακρυνθεί η μαγνητική υποστήριξη ενός νέφους.

Είδαμε ότι αυτά τα χρονοδιαγράμματα εξαρτώνται από την πυκνότητα, την μεταλλικότητα, τον ιονισμό της κοσμικής ακτινοβολίας και την ακτινοβολία του ρεύματος υπεριώδης ακτινοβολίας σε ένα νέφος. Αν τα χρονοδιαγράμματα δεν διαφέρουν πολύ μεταξύ τους, μπορεί να εμφανιστεί η γέννηση μικρής μάζας αστέρων. Αν για παράδειγμα, ο χρόνος ψύξης είναι πολύ μεγάλος σε σχέση με αυτόν της ελεύθερης πτώσης, η δυναμική βαρυτική ενέργεια ενός καταρρέοντα πυρήνα δεν μπορεί να απομακρυνθεί μέσω ακτινοβολίας αρκετά γρήγορα, και δεν θα έχουμε αστρογέννηση, λόγω μη επαρκούς ψύξης. Ομοίως, αν η αμφιπολική διάχυση είναι πολύ μεγάλης χρονικής διάρκειας, η μαγνητική υποστήριξη θα παραμείνει σημαντική και θα εμποδίσει την βαρυτική κατάρρευση. Αυτά ισχύουν για δημιουργία αστέρων μικρής μάζας. Η δημιουργία αστέρων μεγάλης μάζας έχει να κάνει γενικά με βίαια δυναμικά φαινόμενα.

#### 4) Μοριακοί ανιχνευτές στον Γαλαξία μας.

Η μελέτη της μεσοαστρικής ύλης στον Γαλαξία μας, μας δίνει την δυνατότητα να γνωρίσουμε με λεπτομέρεια την σύνθεσή της. Αυτό το πετυχαίνουμε μέσω της μελέτης των γραμμών απορρόφησης και εκπομπής των μορίων. Θα δούμε ότι η χημεία σε κάθε περιοχή κυριαρχείται από έναν από τους χημικούς παράγοντες. Η ευαισθησία της χημείας στους φυσικούς παράγοντες είναι σημαντική. Για τις πιο πολλές μοριακές περιοχές έχουμε συγκεκριμένα παραδείγματα, και μόρια-ανιχνευτές διάφορων φυσικών συνθηκών.

#### Διάχυτα νέφη.

Τα διάχυτα νέφη (απορρόφηση 1 mag, πυκνότητα 100/cm<sup>3</sup>, 100K) μας έδωσαν την πρώτη ιδέα της ύπαρξης μορίων στο μεσοαστρικό χώρο. Από τότε αποτελούν σημαντικά πεδία δοκιμής των θεωριών των χημικών αντιδράσεων της μεσοαστρικής ύλης. Έχουν επίσης σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη αυτών των χημικών αντιδράσεων. Στον μεσοαστρικό χώρο έχουμε ανακαλύψει πολλά μόρια, σε όλα σχεδόν τα μήκη κύματος. Αυτά τα νέφη είναι PDR, χαμηλής πυκνότητας και έντασης ακτινοβολίας. Οι κύριοι χημικοί παράγοντες είναι η αστρική υπεριώδης ακτινοβολία και οι κοσμικές ακτίνες.

Παράδειγμα. Μια καλά μελετημένη γραμμή θέασης μέσα από ένα διάχυτο αέριο είναι προς το ζ του Οφιούχου. Η ορατή ελάττωση σε αυτό είναι στο 1 mag, και έχουμε ανακαλύψει πολλά μόρια διάχυτων αερίων. Τα συμβατικά μοντέλα για την μέτρηση ατομικών και μοριακών αφθονιών είναι επιτυχημένα, όπως φαίνεται από τις μετρήσεις μέσω παρατήρησης, με εξαίρεση τα (CH<sup>+</sup>), (H<sub>3</sub><sup>+</sup>) και μερικά άλλα είδη. Αλλά αυτή η εικόνα δεν είναι πλήρης γιατί για την δημιουργία του (CH<sup>+</sup>) χρειάζεται η δυναμική αερίων ή άλλος παράγοντας.

Πολλές γραμμές θέασης μέσω διάχυτου αερίου περιλαμβάνουν παροδικές μικροδομές (σχετικά μικρές αυξήσεις της πυκνότητας). Αυτές τις ανακαλύπτουμε μέσω μελέτης ξεχωριστών γραμμών θέασης και βρίσκοντας διακυμάνσεις των

χρονοδιαγραμμάτων μιας δεκαετίας σε ατομικές γραμμές και γραμμές ιόντων. Αυτές οι παρατηρήσεις περιλαμβάνουν δομές του μεγέθους του ηλιακού συστήματος. Είναι πιο πυκνές από το αέριο υποβάθρου, υπέρ-πυκνές και έτσι παροδικές. Έχουμε ανακαλύψει σε αυτές (CH<sup>+</sup>), (CH), (CN), (H<sub>2</sub>CO), (C<sub>2</sub>). Οι επιπτώσεις των δυναμικών διαδικασιών που δημιουργούν αυτές τις δομές στη μεσοαστρική ύλη φαίνονται μέσω της μελέτης των μοριακών γραμμών. Μοντέλα διάχυτων νεφών με παροδικές δομές προτείνουν ότι τα μόρια (CH<sup>+</sup>), (HCO<sup>+</sup>) δημιουργούνται σε παροδικές δομές. Μπορεί επίσης να έχουν παρουσία τα (HS<sup>+</sup>), (CH<sub>2</sub><sup>+</sup>), (CH<sub>3</sub><sup>+</sup>), (H<sub>2</sub>O<sup>+</sup>), (H<sub>3</sub>O). Μερικά έχουν ανιχνευτεί από το διαστημικό τηλεσκόπιο Herschel. Τα μικρά μοριακά ιόντα είναι καλά δείγματα των παροδικών δομών και των δυναμικών παραγόντων που τις δημιούργησαν.

.Μοριακοί ανιχνευτές σε διάφορα μήκη κύματος.

.(H<sub>2</sub>) (στις UV). Οι πληθυσμοί επιπέδου περιστροφής (rotational level populations) καθορίζονται από την απορρόφηση υπεριώδης ακτινοβολίας σε θέαση προς καυτά αστέρια. Η σχέση (H<sub>2</sub>)/(H) σε ένα διάχυτο αέριο χαρακτηρίζει την πυκνότητα, την θερμοκρασία και το περιβάλλον πεδίο ακτινοβολίας UV. Οι πληθυσμοί (H<sub>2</sub>) μεγάλου J καθορίζονται από την υπεριώδη, από συγκρούσεις με ταχέα ηλεκτρόνια και από τον σχηματισμό (H<sub>2</sub>) σε επιφάνειες κόκκων σκόνης. Οι παρατηρήσεις του (H<sub>2</sub>) (J) μας κάνουν πιο συγκεκριμένες τις παραμέτρους που περιγράφουν αυτές τις διαδικασίες.

.(HD) (στις UV). Δείχνουν τον βαθμό ιονισμού από την κοσμική ακτινοβολία, όπου δεν είναι όλο το δευτέριο δεσμευμένο σε (HD), και σε ποιες περιοχές μας είναι γνωστό το πεδίο ακτινοβολίας.

.(CO)(UV), (C<sub>2</sub>) (στις IR). Οι πληθυσμοί επιπέδου περιστροφής αυτών των μορίων δείχνουν την θερμοκρασία. Χημικά μοντέλα δημιουργίας αυτών των μορίων δείχνουν την πυκνότητα και το πεδίο ακτινοβολίας.

.(CH<sup>+</sup>). (στο οπτικό). Η ανακάλυψή του είναι ένδειξη μη θερμικής διαδικασίας, όπως το κρουστικό μέτωπο ή αναταραχή σε διάχυτα νέφη στην γραμμή θέασης. Οι θερμοκρασίες των 1000K είναι απαραίτητες για την δημιουργία του.

.(OH<sup>+</sup>), (H<sub>2</sub>O<sup>+</sup>), (H<sub>3</sub>O<sup>+</sup>) (στα THz). Αυτά τα μόρια αποτελούν δείγματα νεφών με μικρή τιμή (H)/(H<sub>2</sub>). Δείχνουν τον βαθμό ιονισμού από την κοσμική ακτινοβολία και την πυκνότητα, και μπορεί να μας παρουσιάζουν τις παροδικές μικρό-δομές.

(NH), (NH<sub>2</sub>), (NH<sub>3</sub>) (στις UV και στα THz). Η χημεία με την οποία δημιουργούνται αυτά τα είδη στα διάχυτα νέφη είναι ασαφής, και μπορεί να είναι αποτέλεσμα χημικών αντιδράσεων των επιφανειών. Μπορούν να μας δείξουν τα όρια της ισχύς του πεδίου ακτινοβολίας.

.(HF) (στα THz) Είναι η κύρια αποθήκη του μεσοαστρικού (F). Είναι ένας χρήσιμος δείκτης διάχυτων νεφών με χαμηλή αναλογία (H<sub>2</sub>) (αλλιώς η γραμμή του (HF) γίνεται κορεσμένη).

HCl (στις UV), H<sub>2</sub>Cl<sup>+</sup> (στα THz). Είναι δείκτες πεδίου υπεριώδης ακτινοβολίας σε διάχυτα νέφη.

### Μοριακά νέφη και προαστρικοί πυρήνες.

Τα μοριακά νέφη είναι περιοχές στο εσωτερικό των οποίων το περισσότερο από το αστρικό φως έχει αποκλειστεί μέσω απορρόφησης από τη σκόνη, και (σε περίπτωση απουσίας ακραίων δυναμικών γεγονότων ή ροής κοσμικής ακτινοβολίας μεγάλης έντασης) το περισσότερο αέριο είναι μοριακό. Το υδρογόνο είναι κυρίως σε (H<sub>2</sub>), σχεδόν όλος ο διαθέσιμος άνθρακας σε (CO) και το επιπλέον οξυγόνο εμφανίζεται σε μια σειρά άλλων μορίων. Τα μοριακά νέφη σε ήρεμη κατάσταση είναι πιο ψυχρά και πυκνά (10K, 1000/ cm<sup>-3</sup>) από τα διάχυτα νέφη και η χημεία τους έχει ως κύριο παράγοντα την κοσμική ακτινοβολία παρά το αστρικό φως, που δεν μπορεί να διεισδύσει σε αυτά. Έχουν εμβαπτισμένες περιοχές μεγάλης πυκνότητας. Οι πυκνοί αυτοί κόμποι μπορούν να γίνουν βαρυτικά ασταθείς και να σημάνουν την αρχική φάση της αστρογέννησης. Οι κόκκοι σκόνης στα μοριακά νέφη αποκτούν καλύμματα πάγου. Αν παραμείνουν έτσι αρκετό χρόνο, θα αποκτήσουν μεγάλη ποικιλία ατόμων πέρα από το (H<sub>2</sub>), και το (He) θα αποθηκευτεί σε αυτούς τους πάγους.

.Παράδειγμα. Ένας καλά μελετημένος μοριακός πυρήνας είναι το Barnard68, ένα κοντινό (125 pc) και τώρα αδιαφανές στο ορατό αντικείμενο, όπου έχουν παρατηρηθεί πολλά μόρια εκτός από το (CO) και τα ισοτοπόλογά του, τα (CS), (HCO<sup>+</sup>), (HCN). Αν κάποιος υποθέσει μια γενική αναλογία αερίου/ σκόνης, τότε το προφίλ της πυκνότητας του αερίου σε αυτόν τον πυρήνα μοιάζει πολύ με ένα νέφος σε υδροστατική ισορροπία που ορίζεται από εξωτερικές πιέσεις (σφαίρα Bonnor-Ebert). Τελευταίες παρατηρήσεις του προφίλ της γραμμής της μετάβασης του (CS) (3-2) και της μετάβασης του (HCO<sup>+</sup>) (4-3) δείχνουν ότι μπορεί να μην είναι τελικά ούτε ισόθερμο ούτε σε υδροστατική ισορροπία πίεσης.

### Μοριακοί ανιχνευτές (όλα τα παρακάτω είναι στα υπό- χιλιοστόμετρα).

.Το (CO) και τα ισοτοπόλογά του. Με την απουσία UV ή θερμικού ερεθισμού, τα μόρια του υδρογόνου δεν δίνουν φασματοσκοπική υπογραφή. Τότε χρησιμοποιούμε τα μόρια του (CO) ως δείκτες εκτίμησης της μάζας των μοριακών νεφών, με την παραδοχή μιας σταθερής αναλογίας (H<sub>2</sub>)/(CO). Η γραμμή (CO) (1-0) είναι συνήθως οπτικά παχιά και αποτελεί έτσι έναν φτωχό ανιχνευτή. Όμως έχει βρεθεί θεωρητικά και παρατηρησιακά ότι η ολοκληρωμένη ένταση γραμμής (CO) (1-0) είναι χονδρικά ανάλογη της πυκνότητας στήλης (column density) του (H<sub>2</sub>), και ότι η κατά προσέγγιση σταθερά της αναλογίας στην ηλιακή γειτονιά εκφράζεται από τον αριθμό X. Αυτός ο αριθμός είναι ευαίσθητος στις τοπικές φυσικές παραμέτρους.

.Παρόμοιες σχέσεις μπορούν να προκύψουν χρησιμοποιώντας άλλες περιστροφικές μεταβάσεις του (CO) και άλλων ειδών. Τα ισοτοπόλογα του (CO) ((12C18O), (12C17O), (13C16O), (13C18O), (13C17O)) παρέχουν όλο και περισσότερα σπάνια

είδη που μπορούν να δώσουν οπτικά λεπτές (1-0) εκπομπές. Η γραμμή του (CO) (1-0) είναι ευανάγνωστη ακόμα και σε χαμηλές θερμοκρασίες (10K) σε μοριακά νέφη, και είναι αποτελεσματικός ανιχνευτής του μεσοαστρικού αερίου σε πυκνότητες  $1000 \text{ /cm}^{-3}$ , αλλά όχι σε μεγαλύτερες πυκνότητες.

### Ανιχνευτές δομών μέσα σε μοριακά νέφη.

Τα σκοτεινά νέφη έχουν πλούσια χημεία και πολλά από τα μόρια που έχουμε ανακαλύψει σε αυτά είναι πιο πολύτιμοι ανιχνευτές πυκνότερου αερίου από ότι ανιχνεύεται με την εκπομπή (CO) (1-0). Οι υψηλές αναλύσεις μας δείχνουν ότι πολλά σκοτεινά νέφη έχουν πολλές δομές μέσα τους. Αυτοί οι κόμποι μπορεί να σημαίνουν την αρχή αστρογέννησης, δηλαδή να είναι προαστρικοί πυρήνες. Διαφορετικοί ανιχνευτές δείχνουν διαφορετικούς πυρήνες. Το (CO) και τα ισοτοπόλογά του ανιχνεύουν το αέριο υποβάθρου στο οποίο είναι εμβαπτισμένη η πυκνή δομή. Μας δίνουν την πυκνότητα και την θερμοκρασία. Είναι και καλοί ανιχνευτές παραγόντων καταστροφής μορίων ,γιατί είδαμε ότι αντίθετα με τον πάγο ( $\text{H}_2\text{O}$ ), ο πάγος του (CO) έχει διακυμάνσεις αφθονίας, σε διαφορετικές γραμμές θέασης, μέχρι 10 μεγέθη.

.(HCO<sup>+</sup>) (1-0),(N<sub>2</sub>H<sup>+</sup>) (1-0). Σε ήρεμα νέφη, οι εκπομπές τους μας δείχνουν το εύρος των τιμών των πολύ πυκνών δομών και τον βαθμό ιονισμού στα νέφη. Το (N<sub>2</sub>H<sup>+</sup>) αυξάνεται όταν το (CO) παγώνει στους κόκκους. Έτσι η σχέση (HCO<sup>+</sup>) και (N<sub>2</sub>H<sup>+</sup>) είναι ευαίσθητη στην δημιουργία πάγου (CO).

.(HCO<sup>+</sup>) (3-2), (CS) (2-1). Τα προφίλ των γραμμών αυτής της μετάβασης είναι καλοί ανιχνευτές της κίνησης της ύλης που συμβαίνει λόγω βαρυτικής κατάρρευσης, και πιθανόν να οδηγεί σε αστρογέννηση. Η ερμηνεία του προφίλ των μοριακών γραμμών είναι πολύπλοκη, λόγω ότι οι φασματικές υπογραφές της κατάρρευσης είναι παρόμοιες με αυτές της περιστροφής και της ταλάντωσης. Ένα καλό παράδειγμα μοριακού νέφους όπου οι χάρτες παρουσίας των (HCO<sup>+</sup>), (CS) αποκαλύπτουν ένα πλήρες πρότυπο κόκκινου και μπλε ασύμμετρου προφίλ, είναι το Bok globule Barnard 68. Το (CS) (2-1) μπορεί επίσης να κάνει πιο συγκεκριμένη την πυκνότητα και την διαθέσιμη αφθονία σε θείο, μια σχεδόν άγνωστη ποσότητα σε σκοτεινά νέφη.

(HCN), (HNC), (NH<sub>3</sub>). Αυτά τα μόρια είναι καλοί ανιχνευτές μεγάλης πυκνότητας δομών. Το (HCN) είναι και καλός ανιχνευτής κατάρρευσης της ύλης, ειδικά για μεγάλης μάζας πυρήνες μέσα σε μοριακά νέφη, όπως έδειξαν παρατηρήσεις του SgrB2 (M) από το διαστημικό τηλεσκόπιο Herschel.

### Ανιχνευτές στερεής κατάστασης.

Τα σκοτεινά νέφη που είναι αποτελεσματικά αδιαπέραστα από το φως δείχνουν σημάδια στερεής ύλης σε μορφή μορίων πάγου των ( $\text{H}_2\text{O}$ ), ( $\text{CO}_2$ ), (CO) στο κοντινό υπέρυθρο. Ο πάγος προδίδει την ύπαρξη παλαιότερης, πυκνότερης ύλης.

.Παράδειγμα δομής.



Το L673 είναι ένα καλά μελετημένο μοριακό νέφος με εκπομπή από (CO) και τα ισοτοπόλογά του. Έχουν ανιχνευτεί 15 μικροί πυκνοί κόμποι μέσα στο νέφος από συμβολομετρικά τηλεσκόπια, με εκπομπές των (NH<sub>3</sub>), (CS), (HCO<sup>+</sup>), (N<sub>2</sub>H<sup>+</sup>) (όλα μόρια- ανιχνευτές πυκνού αερίου). Οι κόμποι έχουν πυκνότητες 10000 / cm<sup>3</sup>, ακτίνες μερικά εκατοστά του πάρσεκ και μάζες 0,1 -1ηλιακή. Η σχέση τους με προ-αστρικούς πυρήνες μπορεί να απαντηθεί με την μεσοαστρική χημεία. Η παρατήρησής μας έδειξαν ότι τα (CS), (HCO<sup>+</sup>), (N<sub>2</sub>H<sup>+</sup>) φαίνονται να ανιχνεύουν διαφορετικές κατανομές κόμπων. Αυτό τώρα ερμηνεύεται ως συνέπεια της εξάρτησης της χημείας από τον χρόνο, που εμφανίζεται σε διαφορετικές φάσεις της χημικής και δυναμικής εξέλιξης, έτσι ώστε μερικά μόρια (CS) να κορυφώνονται πριν από άλλα ((NH<sub>3</sub>), (H<sub>2</sub>H<sup>+</sup>), (HCO<sup>+</sup>)).

### Ελάττωση αερίου σε πυκνούς πυρήνες.

Σε πυκνούς και ψυχρούς πυρήνες τα άτομα και τα μόρια σε αέρια φάση παγώνουν πάνω σε κόκκους σκόνης και έτσι χάνονται τελείως ή ελαττώνονται από το αέριο. Η έκταση του παγώματος (ελάττωσης) εξαρτάται από την πολύπλοκη χημεία που κυμαίνεται μη γραμμικά στον χρόνο, και ανάλογα το φυσικό περιβάλλον. Η εξάρτηση της ελάττωσης από την ηλικία και την πυκνότητα την κάνει χρήσιμο δείκτη του ιστορικού του πυρήνα.

Είναι δύσκολο να εξακριβώσουμε την ελάττωση παρατηρησιακά. Η εκπομπή του αερίου (CO) είναι το πιο σύνηθες μόριο που χρησιμοποιούμε για να συμπεράνουμε την αναλογία των ειδών σε παγωμένα καλύμματα σκόνης. Το πετυχαίνουμε συγκρίνοντας την αναλογία του παρατηρήσιμου (CO) με αυτό που αναμέναμε θεωρητικά σε πυκνότητα σωματιδίων χωρίς πάγωμα. Αυτό όμως προϋποθέτει γνώση της πυκνότητας του (H<sub>2</sub>) και της αποτελεσματικότητας μη θερμικών μηχανισμών απορρόφησης που θα επέστρεφαν το αφαιρεμένο (CO) στην αέρια φάση, ανεξάρτητα από την αποτελεσματικότητα του παγώματος. Ο βαθμός ελάττωσης του (CO) δεν είναι απαραίτητα ίσος με την ελάττωση του μοριακού αερίου, αφού διαφορετικά είδη παγώνουν σε διαφορετικές συνθήκες και έχουν διαφορετικούς συντελεστές επικόλλησης, όπως μας δείχνουν οι παρατηρήσεις από το τηλεσκόπιο Spitzer.

Είναι άξιο αναφοράς ότι η στατιστική σύγκριση της ελάττωσης του (CO) σε πυρήνες μέσα σε ένα νέφος, που είναι μέλος της ομάδας των τοπικών μοριακών νεφών, βοηθάει να έχουμε ένα γενικό συμπέρασμα για τέτοια περιβάλλοντα. Μια πρόσφατη μελέτη στη ζώνη του Gould μας έδειξε ότι μέσα σε κάθε νέφος τα υψηλότερα επίπεδα ελάττωσης έχουν βρεθεί στις μακροβιότερες περιοχές. Υπάρχει επίσης στενή σχέση μεταξύ ελάττωσης και πυκνότητας, και οι πυρήνες χωρίς αστέρια έχουν μεγαλύτερη ελάττωση από τους πρώτο-αστρικούς πυρήνες. Το γεγονός ότι αυτά τα συμπεράσματα είναι σύμφωνα με την θεωρία σημαίνει ότι ανάλογες μελέτες του (CO) μπορεί να αποτελέσουν ένα χρήσιμο εργαλείο καθορισμού της ελάττωσης σε πυκνούς πυρήνες.

Οι περιοχές αστρογέννησης και οι εκροές τους.

Τα πολύ νεαρά αστέρια (YSO, young stellar objects) μικρής και μεγάλης μάζας παρουσιάζουν εκροές ύλης. Σε μερικές περιπτώσεις η δράση αυτή εκτείνεται σε αποστάσεις πάρσεκ από το αναπτυσσόμενο άστρο. Μπορεί να είναι σε μορφή πολύ ευθυγραμμισμένων πιδάκων ή μεγάλης γωνίας αστρικών ανέμων. Είναι μάλλον διπολικά, αλλά με την μία κατεύθυνση εκροής (λοβός) να είναι πολύ δυσδιάκριτη για τους παρατηρητές. Τέτοιες εκροές έχουν βρεθεί και σε πολλά άλλα αντικείμενα, όπως πρώτο-πλανητικά νεφελώματα, διπλοί ακτίνων Χ, συμβιωτικοί διπλοί, και σε γαλαξιακές κλίμακες, ενεργοί γαλαξιακοί πυρήνες. Η χημεία στις εκροές των νέων αστέρων έχει παράγοντα την δυναμική, αλλά στα μεγάλης μάζας αστέρια υπάρχει και πολύ έντονο πεδίο PDR, λόγω του ισχυρού αστρικού ανέμου.

Αυτές οι εκροές μπορούν να είναι σημαντικές πηγές ενέργειας για το γύρω περιβάλλον. Και οι εκροές, και η γύρω ύλη μπορούν να μελετηθούν μέσω της αλληλεπίδρασης των εκροών με το περιβάλλον. Αυτές οι αλληλεπιδράσεις συμβαίνουν μέσω κρουστικών κυμάτων μεταξύ των εκροών και του γύρω αερίου, και μέσω διείσδυσης του ρεύματος εκροής στο περιβάλλον υλικό. Οι αλληλεπιδράσεις δημιουργούν τις φυσικές συνθήκες που μπορούν να κινήσουν συγκεκριμένες χημικές αντιδράσεις, ώστε να υπάρχουν μοναδικοί ατομικοί και μοριακοί ανιχνευτές. Έτσι συμπεραίνουμε την φύση της εκροής και τις αναλογίες του αερίου στο περιβάλλον των νεαρών αστέρων.

### .Εκροές από αστέρια μικρής μάζας.

Ο σχηματισμός ενός αστέρα μικρής μάζας αρχίζει με την βαρυτική κατάρρευση ενός περιστρεφόμενου πυκνού πυρήνα μέσα σε ένα μοριακό νέφος(Class 0). Αποδεικνύεται ότι ο σχηματισμός ενός πρωτοαστέρα στο κέντρο του πυρήνα είναι συνδεδεμένος με την κατάρρευση υλικού στον ισημερινό του, και την εκροή από τους πόλους του (Class I). Η φάση T-Ταύρου (Class II) συμβαίνει όταν έχει σχηματιστεί δίσκος, αλλά η κατάρρευση και η εκροή υλικού συνεχίζονται. Τελικά η εισροή υλικού ελαττώνεται, και το αστέρι μπαίνει στην κύρια ακολουθία με ένα υπόλειμμα του δίσκου, όπου μπορεί να δημιουργηθούν πλανήτες (Class III).

Ευθυγραμμισμένες εκροές (πίδακες <jets>) με ταχύτητες 100- 500 km/ s έχουν παρατηρηθεί από νεαρά αστέρια. Οι πολύ πυκνές περιοχές κοντά στο αστέρι, από τις οποίες προέρχεται ο πίδακας, μπορούν να αναλυθούν από στις συνεχές ραδιοεκπομπές εκατοστόμετρων και τις εκπομπές των μορίων νερού.

Εκπομπές από (FeII), (SII), και από ro- περιστροφικές και περιστροφικές γραμμές του (H2) ανιχνεύονται τυπικά στους πίδακες και κυρίως στην κεφαλή τους, όπου και εμφανίζεται η πιο βίαιη αλληλεπίδραση με την περιβάλλον ύλη. Εκπομπές από το σώμα του πίδακα εμφανίζονται σε περιοχές με μικρότερης ισχύς κρουστικά μέτωπα από ότι στην κεφαλή, ίσως επηρεασμένες από τις περιοδικές διακυμάνσεις της ταχύτητας του πίδακα, που κάνουν την ταχύτερα κινούμενη ύλη να δράσει ως κρουστικό κύμα στην βραδύτερη ύλη. Και στις δύο περιπτώσεις η αλληλεπίδραση δημιουργεί μια δομή διπλού κρουστικού κύματος. Ένα δευτερεύον κρουστικό κύμα επιβραδύνει την κινούμενη ύλη, και το πρώτο κρουστικό κύμα επιταχύνει την ύλη

που δέχεται την σύγκρουση. Η εκπομπή (H<sub>2</sub>) μπορεί να είναι από μόρια που βρίσκονται μετά το κρουστικό μέτωπο μέσα στον πίδακα ή από μόρια που σχηματίστηκαν στο περιοδικό σύστημα διπλού κρουστικού κύματος. Αυτές οι συμπυκνώσεις ύλης κατά μήκος του πίδακα ανιχνεύονται και από εκπομπές (H $\alpha$ ), (FeII), (H<sub>2</sub>)(1-0), (S)(1). Έχουν βρεθεί και υψηλής ταχύτητας μόρια (CO) κοντά σε τέτοιες λαμπρές περιοχές εκπομπής.

Οι εκπομπές από τους πίδακες, και ειδικά τις κεφάλες (αντικείμενα Herbig- Haro) μπορεί να είναι αρκετά μεγάλης έντασης ώστε να παράγουν φωτοχημεία σε κοντινά ψυχρά πυκνά αέρια, δημιουργώντας χαρακτηριστικούς χημικούς ανιχνευτές. Τα (NH<sub>3</sub>), (HCO<sup>+</sup>) εκπέμπουν στα χιλιοστόμετρα από συμπυκνώσεις πυκνού αερίου κοντά σε τέτοια αντικείμενα. Αυτό έχει αποδοθεί σε εξάτμιση καλυμμάτων πάγου από κόκκους σκόνης μέσω φωτόλυσης, που την ακολουθούν αντιδράσεις μεταξύ των (C<sup>+</sup>) και (H<sub>2</sub>O) (επίσης από καλύμματα πάγου), με αποτέλεσμα να παράγουν (HCO<sup>+</sup>) σε αναλογίες αρκετά πάνω από τις συνήθεις για μοριακά νέφη. Αυτή η διαδικασία παράγει και άλλα ανιχνεύσιμα είδη όπως τα (CH<sub>3</sub>OH), (H<sub>2</sub>CO). Αυτά έχουν παρατηρηθεί να είναι πολύ ενισχυμένα στις συμπυκνώσεις κοντά στα Herbig-Haro (HH) σε σχέση με τα κανονικά σκοτεινά νέφη, ενώ υποβαθμίζονται τα (HCN), (CN).

Έχουν βρεθεί κλασσικές διπολικές εκροές γύρω από νεαρά αστέρια (Μεταγενέστερα της Class 0). Αυτά μπορεί να σχηματίστηκαν από πίδακες, όπως αυτοί εμβόλισαν την κοντινή ύλη μέσω πιο αργών κρουστικών κυμάτων και παρασύροντάς την, η πιθανά μέσω προπόρευσης του συστήματος πίδακα- άστρο. Η εκροή ανιχνεύεται σε ώριμα συστήματα από εκπομπές (CO) και (H<sub>2</sub>), όπου έχει εισέλθει περιβάλλον αέριο στην ροή του πίδακα. Οι περιοχές που έχουν βρεθεί από την εκπομπή του (CO) με ταχύτητα εκροής μικρότερη από 30 km/s είναι γενικά λίγο ευθυγραμμισμένες και περιέχουν την περισσότερη από την εκ ρέουσα μάζα. Οι λοβοί της εκροής τερματίζουν στο κρουστικό μέτωπο. Εκπομπή(CO) μεγαλύτερης ταχύτητας εμφανίζεται στις νεότερες εκροές (Class 0), που είναι πολύ πιο ευθυγραμμισμένες. Μερικές φορές η ροή σπάει σε <σφαίρες μορίων> (molecular bullets), που είναι πυκνά και διακριτά συμπυκνώματα από αέριο υψηλής ταχύτητας, και έχουν βρεθεί στις εκπομπές του (H<sub>2</sub>) στο IR και του (CO) (με υψηλό J). Οι ταχύτητες μπορεί να είναι πολύ πιο μεγάλες από την κρίσιμη ταχύτητα της διάλυσης του (H<sub>2</sub>). Αυτό δείχνει ότι η επιτάχυνση έγινε ομαλά, όχι απότομα.

Και άλλα μόρια είναι χρήσιμοι ανιχνευτές διπολικής εκροής. Σε μερικές πηγές η εκπομπή του (SiO) είναι δυνατή και στους 2 κόμπους εκπομπής, μέσα στην εκροή και κατά μήκος του τείχους εκροής. Η μεγάλη ποσότητα του μορίου αυτού μας δίνει ενδείξεις ότι συμβαίνουν καταστροφές κόκκων σκόνης πυριτίου μέσω των κρουστικών κυμάτων. Οι γραμμές περιστροφής του (SiO) που ανακαλύψαμε απαιτούν πυκνότητα υδρογόνου μεγαλύτερη από 1 εκατομμύριο σωματίδια/cm<sup>3</sup>. Οι πιο δυνατές τέτοιες γραμμές εμφανίζονται στις νεότερες πηγές. Τα τείχη των λοβών εκροής έχουν επίσης ανιχνευτεί μέσω δυνατών εκπομπών (HCO<sup>+</sup>), όπου το μόριο αυτό είναι πολύ πιο συχνό από ότι στα άλλα νέφη. Αυτή η υπέρ-αναλογία

είναι δείκτης λύσης καλυμμάτων πάγου από κόκκους σκόνης σε αυτή την θερμή διεπαφή στην εξωτερική περιοχή της εκροής. Υποψιαζόμαστε ότι η αντίδραση του (C+) (από την εκροή) με το (H<sub>2</sub>O) (από τα καλύμματα πάγου) σχηματίζουν (HCO<sup>+</sup>), ένας μηχανισμός παρόμοιος με τον σχηματισμό(HCO<sup>+</sup>) κοντά σε αντικείμενα ΗΗ.

Στις νεότερες εκροές (Class 0) μπορεί να υπάρχει ακόμη πτώση υλικού στο πρωτοαστέρι. Και η εκροή, και η εισροή πολύ κοντά στο αστέρι μπορούν να ανιχνευτούν με εκπομπή (CO) ή ισοτοπόλογά του. Στην περίπτωση του B5 IRS1 το σχήμα της κοιλότητας που δημιουργείται από την εκροή μπορεί να ανιχνευτεί μέσω του (CO), και είναι φανερό ότι με την πάροδο του χρόνου η γωνία του ανοίγματος της κοιλότητας μειώνεται. Σε χρονοδιάγραμμα 10000 ετών η κοιλότητα εκροής μπορεί να είναι τελείως ανοιχτή. Αυτός είναι ένας προτεινόμενος μηχανισμός υποβάθμισης της εκροής στο αστέρι.

Σε αναπτυσσόμενη διαφυγή της εκροής έξω από το μοριακό νέφος σε περιοχή όπου κυριαρχούν τα άτομα, οι ανιχνευτές (CO), (H<sub>2</sub>) δεν ισχύουν πια. Οι λοβοί (CO) δεν μπορούν να ανιχνεύσουν την πλήρη έκταση της εκροής. Όμως οι σφαίρες (CO) σε ισχυρές εκροές ανιχνεύονται πολύ πιο μακριά από τα όρια της εκροής του (CO).

Ανιχνευτές. Εκτός τα (H<sub>2</sub>IR), (CO), (SiO), και άλλα είδη ((H<sub>2</sub>O), (OH), (H<sub>2</sub>S), (SO), (SO<sub>2</sub>)) ανιχνεύουν την δραστηριότητα στις εκροές.

Παράδειγμα. Ένα από τα καλύτερα δείγματα εκροής πλούσιας χημείας είναι το πρωτοαστέρι Class 0 L1157- mm, σε απόσταση μερικών εκατοντάδων πάρσεκ. Η εκροή συνδυάζεται με μερικά τοξωτά κρουστικά κύματα μέσω εκπομπής (H<sub>2</sub>), (CO), (H<sub>2</sub>CO), (CH<sub>3</sub>OH), (SiO). Το λαμπρότερο κρουστικό μέτωπο L1157- B1 έχει μελετηθεί εκτενώς και παρουσιάζει μια πλούσια και με κόμπους (συμπυκνώσεις) δομή. Σε κάθε τέτοιον κόμπο συνυπάρχουν διαφορετικά μόρια σε διαφορετικές συνθήκες. Τα φάσματα υψηλής ανάλυσης με το Herschel μας δίνουν εξαιρετικούς ανιχνευτές της ταχύτητας των κρουστικών μετώπων, της θερμοκρασίας και της προ του κρουστικού κύματος πυκνότητας ((NH<sub>3</sub>), (H<sub>2</sub>O)), των χημικών αντιδράσεων στις επιφάνειες των κόκκων σκόνης ((H<sub>2</sub>CO),(CH<sub>3</sub>OH)) και της αποτελεσματικότητας παγώματος στους κόκκους της σκόνης(HCl).

### .Εκροές από αστέρια μεγάλης μάζας.

Οι περιοχές γέννησης άστρων μεγάλης μάζας μας δείχνουν επίσης μεγάλη παρουσία εκροών. Επειδή τα μεγάλα αστέρια είναι πολύ πιο λαμπρά και η μηχανική λαμπρότητα αγγίζει την αστρική (μέσω σύντηξης) λαμπρότητα, οι εκροές μπορεί να είναι πολύ ισχυρές και εκτεταμένες (σε αυτά η σύντηξη αρχίζει από πολύ νωρίς, όταν ακόμα καταρρέει η ύλη στο αστέρι) . Οι εκροές στα μεγάλα αστέρια έχουν όλα τα χαρακτηριστικά με αυτές των μικρών αστέρων (πίδακες, ανέμους, κρουστικά μέτωπα, αντικείμενα Herbig- Haro, διπολικές δομές και σφαίρες μορίων). Όλα αυτά μπορεί να δημιουργούνται από περισσότερες από 1 πηγές σε ένα αστρικό σμήνος. Γενικά οι εκροές των λαμπρότερων πηγών (100000 ηλιακές λαμπρότητες) είναι λίγο ευθυγραμμισμένες. Οι περιοχές σχηματισμού άστρων μεγάλης μάζας έχουν ένα πρόσθετο χαρακτηριστικό σε σχέση με αυτές των άστρων μικρής μάζας. Είναι και

εκτεταμένες PDR, που δημιουργήθηκαν από το ισχυρό πεδίο σκληρής ακτινοβολίας του νεαρού άστρου. Έτσι οι χημικοί παράγοντες είναι και η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία και η δυναμική. Αυτές οι περιοχές περιέχουν επίσης πυκνούς κόμπους από αέριο και σκόνη που συσχετίζονται με το νεαρό αστέρι, όπως και καυτούς πυρήνες. Τέτοιες (πολύ αμυδρές) περιοχές είναι σπάνιες στον Γαλαξία μας και βρίσκονται γενικά βαθιά μέσα σε μοριακά νέφη. Οι περιοχές δημιουργίας αστέρων μεγάλης μάζας είναι από τις πιο δύσκολες για ανάλυση.

.Παράδειγμα. Το σύμπλεγμα Orion Kleinmann- Low βρίσκεται στα 450 pc από τον Ήλιο, η κοντινότερη και πιο μελετημένη περιοχή δημιουργίας άστρων μεγάλης μάζας. Η λαμπρότητα στο υπέρυθρο του Orion KL είναι 100000 φορές η ηλιακή. Η περιοχή αυτή έχει το λιγότερο 2 εκροές, μια χαμηλής ταχύτητας (18 km/s) και μια υψηλής (100 km/s). Η παρουσία τους επιβεβαιώθηκε από λοβούς μεγάλης ταχύτητας στις γραμμές εκπομπής των (CO), (H<sub>2</sub>S). Αποτελούν αποδείξεις ύπαρξης κρουστικών κυμάτων που συνδέονται με τις εκροές. Στο υπέρυθρο, οι εκπομπές από τα (H<sub>2</sub>O), (OH), (CO) μας δείχνουν τις υπογραφές του επεκτεινόμενου αερίου στις εκροές, και τα (OI), (CII) την παρουσία PDR. Οι δυνατές γραμμές εκπομπής (SiO) από την αργή και την ταχεία εκροή δείχνουν ότι τα κρουστικά κύματα είναι ικανά να αποσυνθέσουν την σκόνη πυριτίου, ώστε να παραχθεί αέριο (SiO).

Οι εκροές (ονομάζονται πλατό του Orion KL) έχουν πολλά <δάκτυλα> εκπομπής από κρουστικά κύματα (H<sub>2</sub>). Αυτά είναι νεαρής ηλικίας, λιγότερης των χιλίων ετών. Το Orion KL περιλαμβάνει και το Orion Hot Core, μια πολύ πυκνή (10 εκ/cm<sup>3</sup>), θερμή (250 K) και μικρή (0,1 pc) περιοχή, πλούσια σε οργανικά και άλλα μόρια, και το Compact Ridge, μια λίγο πιο αραιή και πιο εκτεταμένη περιοχή από την προηγούμενη. Όλη η περιοχή είναι εμβαπτισμένη σε ένα πιο ψυχρό (60K) και αραιό (100000 /cm<sup>3</sup>) αέριο. Επίσης ο πυρήνας του KL περιέχει δύο πυκνές περιοχές (HII).

Γενικά αναμένουμε οι διπολικοί λοβοί να έχουν ένα στρώμα ανάμειξης στα όριά τους, όπου η ταραχή εισάγει μοριακό αέριο μέσα στο αέριο του λοβού. Ο μεγάλος εμπλουτισμός σε (HCO<sup>+</sup>) σε αντίστοιχες περιοχές άστρων μικρής μάζας γίνεται με αυτήν την διαδικασία, και παρόμοιες διαδικασίες μπορεί να γίνονται στην διεπαφή μεταξύ εκροής και μοριακού νέφους, σε περιοχή σχηματισμού άστρου μεγάλης μάζας. Παρατηρήσεις του Cep A East μας δείχνουν μια εκτεταμένη περιοχή με ασυνήθιστα χημικά στοιχεία ((H<sub>2</sub>CS), (OCS), (CH<sub>3</sub>OH), (HDO)), αλλά και απουσία σε άλλων ανιχνευτών ((H<sub>2</sub>S), (SO<sub>2</sub>), (SO), (CS)). Αυτή η χημική υπογραφή μπορεί να φανερώνει μια διεπαφή όπου τα καλύμματα κόκκων εξατμίζονται σε μια θερμή, πυκνή και λαμπρή περιοχή.

.Ανιχνευτές των περιοχών δημιουργίας αστέρων μεγάλης μάζας.

Σε αυτές τις περιοχές μπορούν να βρεθούν όλα τα γνωστά μεσοαστρικά μόρια. Η περιοχή πλατό Orion KL ανιχνεύεται καλά με απλούς ανιχνευτές κρουστικών κυμάτων ((H<sub>2</sub>O), (OH), (CO στις IR)).

Σχηματισμός αστεριών μικρής μάζας.

Τα μοριακά νέφη είναι περιοχές αστρογέννησης. Θα δούμε δύο φάσεις- κλειδί στο σχηματισμό αστέρων μικρής μάζας, που είναι ιδανικές για μελέτη μοριακών γραμμών. Αυτές είναι πρώτα ο θερμός πυρήνας γύρω από πρωτοαστέρι και δεύτερον η μεταγενέστερη φάση, όπου το υλικό που περιστρέφεται γύρω του έχει σχηματίσει δίσκο, τον τόπο γέννησης πλανητών.

### .Θερμοί πυρήνες γύρω από εκκολαπτόμενα αστέρια

Οι θερμοί πυρήνες (warm cores, <hot corinos>) περιβάλλουν τις πηγές εκπομπής Class 0, δηλαδή μόλις σχηματισμένα αστέρια. Μέσα στον θερμό πυρήνα, το αέριο και η σκόνη θερμαίνονται από την ακτινοβολία της πηγής σε 100K (είναι πιο ψυχροί από τους καυτούς πυρήνες). Το θερμό αέριο είναι πλούσιο σε σύνθετα οργανικά μόρια, δευτερεύοντα είδη, και μεγάλες αλυσίδες ακόρεστων υδρογονανθράκων και κυανοπολυινών. Η εσωτερική αυτή περιοχή είναι εμβαπτισμένη σε έναν εξωτερικό ψυχρό μανδύα (10K), που φαίνεται να έχει την χημεία ενός ψυχρού πρωτοαστρικού πυρήνα, και είναι όμοιος με τους πυκνούς κόμπους στα μοριακά νέφη. Η πλούσια χημεία στην εσωτερική θερμή ζώνη μάλλον αναπτύσσεται από την εξέλιξη και εξάτμιση των καλυμμάτων πάγου των κόκκων σκόνης. Μερικά είδη (μεθανόλη) παρουσιάζουν πολύ αυξημένη ποσότητα στο όριο μεταξύ θερμής και ψυχρής ζώνης. Στους θερμούς πυρήνες οι χημικοί παράγοντες είναι η κοσμική ακτινοβολία και η χημεία κόκκων σκόνης. Η κοσμική ακτινοβολία επιδρά στην αέρια φάση, ενώ το πάγωμα των μορίων στους κόκκους έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία πάγου, όπου η στερεή φάση επιτρέπει την ανάπτυξη σύνθετων χημικών στοιχείων.

.Παράδειγμα. Ο καλά μελετημένος θερμός πυρήνας IRAS 16293-2422 που περιβάλλει το πρωτοαστέρι L1689N, απέχει από τον Ήλιο 120 pc. Ο μανδύας εκτείνεται από τις 25 ως τις 7000 AU από το πρωτοαστέρι και περιέχει 2 ηλιακές μάζες αέριο. Στα εξωτερικά του όρια η θερμοκρασία είναι 13K και η πυκνότητα 100000/cm<sup>3</sup>. Η θερμοκρασία της σκόνης είναι 100K σε ακτίνα 80 AU, όπου η πυκνότητα είναι 300 εκατομμύρια/cm<sup>3</sup>, και εξατμίζονται καλύμματα πάγου. Το πρωτοαστέρι είναι διπλό, με απόσταση 480 AU μεταξύ του A και του B αστέρα.

Αυτή η πηγή είναι πλούσια σε χημικές αντιδράσεις και το φάσμα της έχει πολλές γραμμές στα GHz και 30 αναγνωρισμένα είδη, όσες ένας τυπικός θερμός πυρήνας. Επίσης ο περιβάλλον πυρήνας είναι πλούσιος σε σπάνια ισοτοπόλογα, ιδίως σε δευτερεύοντα είδη. Η εκπομπή από σχετικά απλά μόρια είναι σημαντική, όπως και αυτή των σύνθετων οργανικών μορίων (COM), μεγάλα όπως τα (HCOOCH<sub>3</sub>), (CH<sub>3</sub>OCH<sub>3</sub>).

Η πηγή (αστέρι) A έχει διαφορετική χημική σύσταση από την B. Η B έχει μεγαλύτερη εκπομπή σύνθετων οργανικών μορίων ενώ η A παρουσιάζει εκπομπή σε απλά (N) και (S) μόρια. Συμπεράσματα δυναμικής μας δίνουν για το A μια ηλιακή μάζα, ενώ για το B μια τάξη μεγέθους λιγότερη. Η χημεία του θερμού πυρήνα μπορεί να έχει άμεση σχέση με την πρωτοαστρική μάζα. Συγκεκριμένα μόρια στους θερμούς πυρήνες μπορούν να περιορίσουν την αποτελεσματικότητα δημιουργίας του αστεριού.

Οι ανεξάρτητες φασματικές πηγές από θερμούς πυρήνες είναι χρήσιμες για την κατανόηση της δράσης της χημείας. Επίσης μας αποκαλύπτουν ότι κάποια συγκεκριμένα είδη (μόρια) μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην έρευνα ειδικών χαρακτηριστικών.

.Μοριακοί ανιχνευτές. Τα (CH<sub>3</sub>OH), (H<sub>2</sub>CO), (H<sub>2</sub>O), (SiO) δείχνουν μεγάλη άνοδο στα όρια του θερμού πυρήνα και χρησιμοποιούνται για να συνθέσουν χημικά μοντέλα της θερμής φάσης.

Τα (HDO), (D<sub>2</sub>CO) και άλλα δευτερεύοντα είδη μας θέτουν τα όρια της χημείας στην ψυχρή προαστρική φάση. Τα COM μας δείχνουν τα όρια της χημείας κατά τη διάρκεια της θερμής φάσης. Μάλλον συνδέονται με πηγές Class 0 μικρότερης μάζας.

Η ανακάλυψη των COM σε θερμούς πυρήνες έχει ειδικό ενδιαφέρον, επειδή δεν υπάρχουν ενδείξεις μηχανισμών χημείας αέριας φάσης που να τα δημιουργεί, κάτω από τις συνθήκες που τα παρατηρούμε. Φαίνεται ότι σχηματίστηκαν σε χημεία στερεής φάσης δημιουργίας πάγου σε κόκκους σκόνης κατά την φάση κατάρρευσης της δημιουργίας του άστρου και σε αντιδράσεις αέριας φάσης ανάμεσα σε προϊόντα αυτής, μετά από εξάτμιση. Έτσι η ανακάλυψη μεγάλων μορίων σε θερμούς (και καυτούς) πυρήνες βοηθάει να μελετήσουμε την χημεία στερεής κατάστασης, και τις φυσικές συνθήκες με τις οποίες ο πάγος αποθηκεύτηκε και εξελίχτηκε χημικά.

Τα προηγούμενα χρόνια, ειδικά με τα δεδομένα του Spitzer, τα χαρακτηριστικά της στερεής φάσης μορίων έχουν παρατηρηθεί σε πολλούς πυρήνες και πρωτοαστέρια. Έτσι έχουμε συμπεράσματα για την εκεί φύση του πάγου. Το νερό είναι το πιο σύνηθες συστατικό του πάγου, με το (CO) και το (CO<sub>2</sub>) να είναι σε αναλογία 30% σε σχέση με το νερό. Τα (CN<sub>4</sub>), (NH<sub>3</sub>) είναι πολύ πιο ελάχιστα, 5 φορές μικρότερης αναλογίας από το (CO). Ενώ τα (CH<sub>4</sub>), (NH<sub>3</sub>), (H<sub>2</sub>O) ποικίλλουν λίγο σε ποσότητα, σε μεγάλο αριθμό δειγμάτων πρωτοαστέρων μικρής μάζας, τα (CO), (CO<sub>2</sub>), (CH<sub>3</sub>OH) ποικίλλουν στο διπλάσιο ή τριπλάσιο. Αποτελούν αποδείξεις για πιο σύνθετο πάγο, όπως προκύπτει από τα χημικά μοντέλα.

### .Πρωτοπλανητικοί δίσκοι

Οι πρωτοπλανητικοί δίσκοι είναι μια σημαντική φάση εξέλιξης ανάμεσα σε θερμό πυρήνα και σχηματισμό πλανητοειδών και πλανητών. Οι δίσκοι αυτοί έχουν παρατηρηθεί γύρω από αστέρια μικρής (T-Tauri) και ενδιάμεσης μάζας (Herbig Ae). Η χημεία του δίσκου βοηθάει να απομονώσουμε τα μόρια που μπορεί να συμμετέχουν στους πρωτοπλανήτες. Δίσκοι που ανιχνεύτηκαν με εκπομπή του (CO) έχουν τυπική διάμετρο μικρότερη από 1000 AU, δίνοντας λιγότερη ανάλυση από 1 arcsec/1 κpc απόσταση. Έτσι απαιτούνται τα συμβολομετρικά τηλεσκόπια στα χιλιοστά και υπό- χιλιοστόμετρα μήκος κύματος για την ανάλυση της δομής του δίσκου.

Ένας πρωτοπλανητικός δίσκος μπορεί να φωτίζεται έντονα από το πρωτοαστέρι στις υπέρυθρες και, συνήθως με μεταβλητότητα, από εκπομπή ακτίνων Χ από το κεντρικό μεγάλο πρωτοαστέρι, και (επειδή η αστρογέννηση γίνεται συνήθως σε σμήνη) πιθανώς από ακτινοβολία προερχόμενη από κοντινά άστρα. Ο δίσκος μπορεί να επηρεάζεται από εκπομπή UV από διαχέουσα διαδικασία προσαύξησης, ιδίως στα πιο μεγάλα Herbig Ae άστρα. Η ύλη στον δίσκο κοντά στην πηγή ακτινοβολίας (ακτίνα μερικές AU) είναι θερμή και ακτινοβολεί έντονα στο υπέρυθρο, ενώ η ύλη πιο μακριά είναι πιο ψυχρή και εκπέμπει στα χιλιοστόμετρα. Ο πλούσιος σε αέριο δίσκος είναι περιοχή PDR, XDR ή και τα δύο, που δημιουργήθηκαν στις εξωτερικές περιοχές του από υπεριώδεις και ακτίνες Χ που εκπέμπει το άστρο ή και άλλες κοντινές του πηγές. Τα στρώματα θερμών μορίων βρίσκονται πίσω από αυτές τις περιοχές, και ένα ενδιάμεσο στρώμα, αν η μείξη τους είναι αργή, θα ψυχθεί αρκετά σε μεγάλη ακτίνα, ώστε να εμφανιστεί εκτεταμένο πάγωμα των μορίων αέριας κατάστασης. Αυτό σε συνδυασμό το μικρό μέγεθος του αντικείμενου σημαίνουν ότι η πυκνότητα μορίων στον δίσκο είναι γενικά μικρή σε σχέση με αυτή στους θερμούς πυρήνες. Σχετικά με τους παράγοντες, ο δίσκος είναι σύνθετη περιοχή όπου η κοσμική ακτινοβολία, οι PDR, οι XDR και ο πάγος στη σκόνη δημιουργούν όλα μαζί χημεία.

.Παράδειγμα. Υπάρχει ένα σημαντικό εύρος χημικών ιδιοτήτων σε αντικείμενα αυτού του είδους που έχουμε παρατηρήσει, και αυτές οι διακυμάνσεις μας δίνουν μια ιδέα για τις εκεί χημικές αντιδράσεις και την κινητήρια πηγή τους. Δεν μπορούμε όμως να ορίσουμε έναν δίσκο ως τυπικό. Στο IM Lup έχουμε ανακαλύψει σχετικά πλούσια χημεία, μια πηγή με ένα κεντρικό αντικείμενο τύπου M0, με λαμπρότητα όμοια με την ηλιακή, και έναν μεγάλο πλήρη δίσκο με μάζα 0,1 ηλιακές. Τα μόρια που έχουμε ανιχνεύσει εκεί είναι τα (CO), (HCO+), (DCO+), (N<sub>2</sub>H+), (H<sub>2</sub>CO), (HCN), (CN) στα υποχιλιοστόμετρα και (CO<sub>2</sub>), (H<sub>2</sub>O), (OH), (HCN), (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>) στο υπέρυθρο. Γενικά τα άστρα T- Tauri έχουν χημικά πιο πλούσιους δίσκους από τα Herbig Ae.

.Χρήσιμοι ανιχνευτές. Το (CO) μετράει τα φυσικά χαρακτηριστικά και την διεύθυνση στον χώρο ενός δίσκου. Η αναλογία (HCN)/ (CN) μετράει το τοπικό πεδίο ακτινοβολίας. Μετρήσεις διάφορων πηγών μας βοηθάνε να καθορίσουμε τη συνεισφορά της ακτινοβολίας (που παράγεται κατά τη διάρκεια της διαδικασίας προσαύξησης) στην ολική αστρική ακτινοβολία. Η παραπάνω σχέση των μορίων επηρεάζεται από τα φαινόμενα δημιουργίας σκόνης και μεγαλώματος των κόκκων κατά την προσαύξηση που επιτρέπουν να διεισδύει στον δίσκο περισσότερη ακτινοβολία. Η σχέση (HCO+)/(DCO+) δείχνει την παραγωγή δευτερίου, μια διαδικασία πολύ ευαίσθητη στην θερμοκρασία. Η σχέση (N<sub>2</sub>H+)/(HCO+) ανιχνεύει το πάγωμα του (CO), επειδή το (N<sub>2</sub>H+) καταστρέφεται στις αντιδράσεις με το (CO). Το (H<sub>2</sub>CO) δείχνει την παρουσία εκτεταμένης ψυχρής χημείας στον δίσκο.

### Σχηματισμός αστέρων μεγάλης μάζας.

Οι περιοχές όπου δημιουργούνται μεγάλα αστέρια περιέχουν μια αξιοθαύμαστη ποικιλία μοριακών πηγών, που περιλαμβάνει το υπόβαθρο ψυχρού αερίου



μοριακού νέφους με εμβαπτισμένους πυκνούς μοριακούς πυρήνες, τους πίδακες και ανέμους από νεαρά αστέρια που παράγουν κρουστικά κύματα και μοριακές εκροές, την αλληλεπίδραση της αστρικής ακτινοβολίας με το αέριο που δημιουργεί μια περιοχή PDR, και την πολύ πυκνή περιαστρική ύλη. Η δημιουργία αστέρων μεγάλης μάζας εμφανίζεται στα λεγόμενα υπέρυθρα σκοτεινά νέφη (Infrared dark clouds, IRDCs). Αυτές είναι περιοχές μεγάλης εξάπλωσης μέσα στο λαμπρό μεσαίο-υπέρυθρο γαλαξιακό υπόβαθρο. Η μοριακή ύλη εκεί είναι ψυχρή (25K) και πυκνή (100000/cm<sup>3</sup>).

.Καυτοί πυρήνες κοντά σε μεγάλης μάζας πρωταστέρια.

Οι καυτοί πυρήνες είναι μικρά (< 0,1pc), πυκνά (10 εκ/cm) και θερμά (200K) αντικείμενα που βρίσκουμε στην γειτονιά μόλις σχηματισμένων μεγάλων αστέρων. Είναι πολύ πλούσιες πηγές όλων των τύπων μορίων, περιλαμβανομένων πολλών ισοτοπολόγων, και είναι μοναδικές για την παραγωγή και διατήρηση των COM (πολύπλοκων οργανικών μορίων) που έχουμε ανακαλύψει σε αυτά. Είναι περιοχές με πολύ πυκνό αέριο, που συνδέεται με την δημιουργία πρωταστέρων μεγάλης μάζας, κατά την διάρκεια της κατάρρευσης ενός μοριακού νέφους. Περιλαμβάνουν υλικό που καταρρέει πολύ κοντά στο πρωταστέρι, αλλά δεν ενσωματώνεται σε αυτό. Η ύλη αυτή ακτινοβολείται και θερμαίνεται πολύ από το πρωταστέρι. Έτσι τα μόρια είναι πολύτιμα δείγματα των καυτών πυρήνων και (με τη χρήση χημικών μοντέλων) της προγενέστερης ψυχρής φάσης της κατάρρευσης, από μια λιγότερη πυκνή φάση της ύλης. Οι χημικοί παράγοντες των καυτών πυρήνων είναι η κοσμική ακτινοβολία (περιλαμβάνοντας τη χημεία αέριας φάσης) και οι διαδικασίες στους κόκκους σκόνης που οδηγούν σε σχηματισμό πάγου και την μετέπειτα εξέλιξη.

Η αφθονία των ειδών που έχουμε ανακαλύψει σε καυτούς πυρήνες είναι εκπληκτικά μεγάλη. Για παράδειγμα, η τοπική αφθονία των (OCS),(CS) στον καυτό πυρήνα του Ωρίωνα είναι κοντά στο 10 στη -7. Διαφορετικά είδη φαίνεται να δείχνουν διαφορετικές περιοχές του πυρήνα. Για παράδειγμα, το methyl cyanide στον καυτό πυρήνα G 31.41+0,31 είναι διανεμημένο σχετικά ευρέως, ενώ το glycolaldehyde έχει πολύ μεγαλύτερη συγκέντρωση στο κέντρο του πυρήνα, σε αντίθεση με την κατανομή των μορίων αυτών στο γαλαξιακό κέντρο.

.Παράδειγμα. ΤοG 29.96-0.02,ένας θερμός πυρήνας σε απόσταση 6 kpc, είναι μια περιοχή ισχυρής μοριακής εκπομπής. Εκεί έχουμε ανακαλύψει πολλούς τύπους μορίων σε αφθονία ((NH<sub>3</sub>), (CH<sub>3</sub>CN), (HNCO), (HCOOCH<sub>3</sub>), (CH<sub>3</sub>OH), (H<sub>2</sub>CO), (H<sub>2</sub>S)). Το (CH<sub>3</sub>OH), με το δάσος του από γραμμές (φασματικές γραμμές του ίδιου μορίου σε διάφορα μήκη κύματος) μας δίνει μια εκτίμηση της θερμοκρασίας στον θερμό αυτόν πυρήνα (300K), ενώ οι παρατηρήσεις των μοριακών γραμμών με βάση το θείο ενισχύουν την άποψη ότι στους κόκκους της σκόνης εμφανίζεται μια χρονικά εξαρτώμενη χημική απορρόφηση. Εκτός ότι αποτελεί πρωτότυπο θερμό πυρήνας, το G 29.96-0.02 έχει ενδιαφέρον επειδή είναι από τους λίγους για τους οποίους έχουμε καθαρές αποδείξεις περιστροφής και σχετικών διπολικών εκροών, μέσω της ερμηνείας των μοριακών μεταβάσεων υψηλού J.

.Μόρια- ανιχνευτές. Όλα τα COM μας παρέχουν παρατηρητικές πληροφορίες για την δυναμική των αερίων μέσα στον πυρήνα και για την εκεί χωρική διανομή των μοριακών ειδών. Μπορούν να δώσουν μοντέλα για τον σχηματισμό μορίων στους καυτούς πυρήνες. Το υψηλής διπολικής ροπής methyl cyanide είναι εξαιρετικός ανιχνευτής της κινητικής δομής, ενώ ο μεγάλος αριθμός μεταβάσεων μεθανόλης επιτρέπει τον καθορισμό της θερμοκρασιακής δομής. Τα είδη βασιζόμενα στο θείο με την μεταβατική χημεία τους αποτελούν χρήσιμα εξελικτικά εργαλεία.

Οι παρατηρήσεις στις περιοχές των πρωτοαστέρων μεγάλης μάζας μας παρουσιάζουν χαμηλότερα επίπεδα πάγων (CO), (CO<sub>2</sub>) από αντίστοιχα μικρής μάζας, λόγω της πιο μεγάλης θέρμανσης της σκόνης στα μεγάλης μάζας αστέρια.

### Περιαστρικό υλικό.

Θα δούμε την εξέλιξη της περιαστρικής ύλης στην μετάβαση ενός αστεριού (μικρής και μεσαίας μάζας) στην μετάβασή του από τον ασυμπτωτικό κλάδο (AGB, μετά την κύρια ακολουθία και τον οριζόντιο κλάδο των γιγάντων) σε πρωτοπλανητικό και μετά σε πλανητικό νεφέλωμα. Προς το τέλος της ζωής τους στην κυρία ακολουθία, αυτά τα αστέρια αρχίζουν να μην συγκρατούν την εξωτερική τους ατμόσφαιρα, και αναπτύσσουν εκτεταμένα κελύφη αερίων και σκόνης. Η εξέλιξη από τον ασυμπτωτικό κλάδο στο πλανητικό νεφέλωμα μπορεί να αποδοθεί με λεπτομέρεια μέσα από τις εκπομπές των μορίων, που σχηματίστηκαν ειδικά σε κάθε στάδιο της εξέλιξης.

Θα δούμε και τον σχηματισμό μορίων σε νόβα και σούπερ νόβα. Και στις 2 περιπτώσεις, εμφανίζονται να προηγούνται του σχηματισμού της σκόνης απλές χημικές αντιδράσεις. Η εκπομπές των μορίων μας δίνουν πληροφορίες για τις συνθήκες σχηματισμού σκόνης σε αυτά τα αντικείμενα.

### .Ψυχρά περιαστρικά κελύφη.

Τα αστέρια στον AGB δημιουργούν κελύφη από σκόνη και αέριο, που εκτείνονται σε χιλιάδες αστρικές ακτίνες. Αυτά τα ψυχρά περιαστρικά κουκούλια (Cool circumstellar envelope, CSE) αποτελούν σημαντικές τοποθεσίες δημιουργίας σκόνης και μορίων. Η ανάπτυξη και διατήρηση της χημείας εκεί είναι εντυπωσιακή, και περιλαμβάνει απλά ανόργανα είδη, οργανικά, ρίζες, δακτυλίδια και αλυσίδες. Αυτά τα κουκούλια απομακρύνονται από τα άστρα τους με τυπική γωνιακή ταχύτητα 10-20 km/s. Έχουν κατά βάση ύλη που προέρχεται από την ψυχρή (λόγω μετάβασης του αστέρα από την φάση του ερυθρού γίγαντα) αστρική ατμόσφαιρα, και περιλαμβάνουν (για άστρα με  $(C)/(O) > 1$ ) αρκετά απλά είδη όπως τα (H<sub>2</sub>), (CO), (C<sub>2</sub>), (HCN), (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>). Αυτά δημιουργήθηκαν σε τοπική θερμοδυναμική ισορροπία (local thermodynamic equilibrium, LTE) στην αστρική ατμόσφαιρα. Η κίνησή τους μακριά από το αστέρι δημιουργείται από κρουστικά κύματα, μερικές αστρικές ακτίνες έξω από το άστρο. Αυτά παράγονται από παλμούς του άστρου, με αποτέλεσμα η εκροή της ύλης να περιέχει συμπυκνώματα. Από αυτή την διάμετρο μέχρι τις εκατό

αστρικές ακτίνες υπάρχει η περιοχή σχηματισμού σκόνης. Μετά υπάρχει μια ζώνη πλούσια σε μόρια, που μάλλον εκτείνεται για δεκάδες χιλιάδες αστρικές ακτίνες.

Αυτά τα συστήματα είναι μάλλον πολύπλοκα. Σε αυτά το αέριο με τη σκόνη, πλούσιο σε απλά μόρια, κινείται προς μια περιοχή που κυριαρχείται από την επίδραση του μεσοαστρικού πεδίου ακτινοβολίας. Έτσι έχουμε μια PDR σε ένα μοριακό νέφος που κινείται προς ένα πεδίο ακτινοβολίας, που δυναμώνει πιο πολύ όσο το αέριο με σκόνη γίνεται πιο αραιό, μέχρι που σε κάποιο χωρικό όριο το πεδίο ακτινοβολίας κυριαρχεί, διαλύοντας τα μόρια. Έτσι το αέριο ξαναγίνεται ατομικό/ιονισμένο. Η σκόνη μπορεί να μείνει κατά πολύ ανεπηρέαστη από το πεδίο ακτινοβολίας και να ανακατευτεί με το μεσοαστρικό αέριο. Αυτό έτσι εμπλουτίζεται, και όταν δημιουργηθούν οι συνθήκες κατάρρευσής του, τα νέα αστέρια θα είναι πιο πλούσια σε χημικά στοιχεία και μέταλλα. Η φωτοχημεία των <πατρικών> ειδών της αστρικής ατμοσφαιράς ( $\text{CO}$ ), ( $\text{CN}$ ), ( $\text{C}_2\text{H}_2$ ) κ.α.) παράγει προϊόντα που παίρνουν μέρος στις χημικές αντιδράσεις της φωτοχημικής ζώνης. Αυτή εκτείνεται για μερικές χιλιάδες αστρικές ακτίνες και δημιουργεί θυγατρικά είδη στο διαστελλόμενο αέριο.

Αυτά τα κελύφη είναι πιο σύνθετα από άλλες περιοχές κοσμικών χημικών αντιδράσεων, όπως ένα στατικό μεσοαστρικό νέφος. Είναι συστήματα όπου μπορούν να πετύχουμε ακριβείς παρατηρήσεις και να επαληθεύσουμε τα μοντέλα αστροφυσικής. Οι μελέτες αυτές μας δίνουν σημαντικές πληροφορίες για τις δομές των CSE, της αστρικής εξέλιξης, και της ανάμειξης ύλης (ιδίως της σκόνης) στην μεσοαστρική ύλη. Η ακρίβεια των μοντέλων οφείλεται στο γεγονός ότι, σε αντίθεση με τα μοντέλα της χημείας των μεσοαστρικών νεφών, υπάρχει μια συγκεκριμένη και μοναδική πηγή παροχής της ύλης (το σχετικά ψυχρό αστέρι). Η γεωμετρία του είναι καλά ορισμένη και απλή, άρα και οι φυσικοί παράμετροι. Το χημικό χρονοδιάγραμμα καθορίζεται από την δυναμική, την πυκνότητα και το εξωτερικό πεδίο ακτινοβολίας. Είναι τυπικά της τάξης των 10000 ετών.

.Παράδειγμα. Το IRC +10216 είναι ένα καλά μελετημένο και κοντινό (100pc) αστέρι άνθρακα στον AGB. Το κέλυφός του έχει πλούσια χημεία, και έχουμε ανιχνεύσει πάνω από 70 είδη μορίων εκεί. Η εγγύτητά του μας βοηθάει να μελετήσουμε την δομή των CSE και τον σχηματισμό των ( $\text{H}_2\text{O}$ ), ( $\text{SiO}$ ), ( $\text{SiS}$ ). Η εκτεταμένη δομή του μας πληροφορεί για την ύπαρξη επεισοδιακών γεγονότων εκτίναξης ύλης, παρά την ομαλή εκροή της.

.Χρήσιμοι ανιχνευτές. Τα ( $\text{H}_2\text{O}$ ), ( $\text{OH}$ ), ( $\text{H}_2\text{CO}$ ) παρουσιάζονται ακόμα και σε αστέρια άνθρακα, αν το κέλυφος έχει συμπυκνώσεις, δίνοντας πληροφορίες για το μικρής ταχύτητας κρουστικό μέτωπο. Αλυσίδες άνθρακα όπως το ( $\text{HC}_3\text{N}$ ) μπορεί να υπάρχουν στις συμπυκνώσεις και να εμποδίζεται η καταστροφική δράση του πεδίου ακτινοβολίας στο αέριο στο κέλυφος. Οι συμπυκνώσεις είναι ένδειξη πιθανών επεισοδιακών εκτινάξεων.

Τα ανιόντα ( $\text{C}_4\text{H}^-$ ), ( $\text{C}_6\text{H}^-$ ), ( $\text{C}_8\text{H}^-$ ), ( $\text{CN}^-$ ), ( $\text{C}_3\text{N}^-$ ), ( $\text{C}_5\text{N}^-$ ) έχουν ανιχνευτεί στο IRC +10216 και μερικά από αυτά και σε άλλα CSE, αλλά πουθενά αλλού στην

μεσοαστρική ύλη. Η απλή χημεία τους μας δείχνει τις χημικές διασυνδέσεις που μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε σε ένα μοντέλο διαστολής της ύλης, και την εξέλιξη των χημικών αντιδράσεων στο κέλυφος.

### .Πλανητικά νέφη.

Ο μεγάλος ρυθμός απώλειας μάζας (10στη-4 ηλιακές /έτος για το IRC + 10216) στην φάση του ασυμπτωτικού κλάδου δεν μπορεί να συνεχιστεί για πολύ για το αστέρι. Όταν πάψει, το αντικείμενο θα είναι πλέον ένα μη σφαιρικό πρωτοπλανητικό νεφέλωμα (Proto- planetary nebula, PPN). Αυτό είναι ένα αντικείμενο πλήρως εμβαπτισμένο, και οπτικά σκιασμένο από την ίδια του περιαστρική σκόνη, και ανιχνεύεται μόνο στο μακρινό υπέρυθρο. Μόλις η ροή ύλης από το αστέρι στο νεφέλωμα πάψει, το κεντρικό αστέρι συρρικνώνεται και γίνεται τόσο καυτό (30000K), ώστε η ακτινοβολία του να είναι αρκετά σκληρή για να φωτιονίσει το γύρω του νεφέλωμα (το αστέρι θα είναι πλέον ένας λευκός νάνος). Το άστρο αποκτάει έναν πολύ γρήγορο (2000 km/s) μικρής πυκνότητας άνεμο, που συμπιέζει και πλάθει το γύρω από αυτό νεφέλωμα σε ένα πλανητικό νεφέλωμα (planetary nebula, PN). Αυτό συχνά μοιάζει με πεπλατυσμένο δίσκο με διπολική εκροή. Το χρονοδιάγραμμα για τις 3 φάσεις είναι 10000 έτη για το κέλυφος στον AGB, 1000 για το πρωτοπλανητικό και 10000 έτη για το πλανητικό νεφέλωμα. Οι παρατηρήσεις των μορίων σε αυτές τις 3 φάσεις μας δίνουν την ευκαιρία να παρατηρήσουμε τα βήματα εξέλιξης αυτών των αστρονομικά πολύ μικρών χρονοδιαγραμμάτων. Τα πρωτοπλανητικά και τα πλανητικά νέφη είναι πολύπλοκα αντικείμενα. Περιέχουν περιοχές που επηρεάζονται πολύ από την υπεριώδη ακτινοβολία του άστρου (PDR), από τους ταχύς αστρικούς ανέμους και τα κρουστικά μέτωπα, που προκαλούν (D (dynamic) DR), ενώ οι εξωτερικές περιοχές τους παραμένουν όμοιες των ψυχρών κελυφών των αστέρων στον AGB.

Η εξέλιξη ενός άστρου στο AGB σε PPN και μετά σε PN συνοδεύεται από τις χημικές αντιδράσεις της αέριας φάσης μορίων. Το περιεχόμενο της ύλης σε μόρια είναι κυρίαρχο σε ένα μεγάλο μέρος αυτής της εξέλιξης και παίζει σημαντικό ρόλο στην κατανομή της μάζας και στο σχήμα του νεφέλωματος. Μια όμοια εξέλιξη παρουσιάζεται στην χημική δομή των άμορφων κόκκων σκόνης άνθρακα. Αυτή την παρακολουθούμε στο κοντινό (3μm) υπέρυθρο, που δείχνει την μετατροπή των αλειφατικών (πλούσια σε H) δομών στο AGB, σε αρωματικές (φτωχές σε H) δομές σε PPN και PN, μέσω της επίδρασης από το κεντρικό αστέρι.

.Παράδειγμα. Το CRL618 είναι ένα PPN που μόλις πρόσφατα εξελίχτηκε από την φάση AGB. Έχει ένα κεντρικό αστέρι B0, έναν πυκνό πεπλατυσμένο δακτύλιο, ένα κέλυφος με μάζα 1 ηλιακή που διαστέλλεται με 20 km/s και ένα μεγάλης ταχύτητας αέριο με κόμπους που διαστέλλεται με 200 km/s. Είναι πλούσιο σε μόρια, και πολλά από αυτά είναι ανιχνεύσιμα σε απορρόφηση γο περιστροφής στο υπέρυθρο. Μερικά είναι τυπικά για την φάση του ασυμπτωτικού κλάδου, ενώ άλλα είναι αποτέλεσμα της χημείας μέσω της αστρικής υπεριώδους ακτινοβολίας και των κρουστικών κυμάτων. Αλυσίδες άνθρακα όπως (C<sub>4</sub>H<sub>2</sub>), (C<sub>6</sub>H<sub>2</sub>) είναι άφθονες, και ο σχηματισμός τους παράγεται από αντιδράσεις προσθήκης (C<sub>2</sub>H), το οποίο

δημιουργείται από φωτοϊονισμό UV του (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>) στις εσωτερικές περιοχές του πρωτοπλανητικού νέφους. Γραμμές υψηλού J του (CO) ανιχνεύουν την αργή διαστολή της κεντρικής πυκνής περιοχής, που δημιουργείται από την τελική εκροή από το (πρώην στο AGB) αστέρι. Πολυίνες μεθυλίου, όπως (CH<sub>3</sub>C<sub>2</sub>H), (CH<sub>3</sub>C<sub>4</sub>H) υπάρχουν στο CRL618, αλλά δεν βρέθηκαν στο πρωτότυπο αστέρι στον AGB, IRC +10216. Επίσης βρέθηκαν δομές δακτυλίου στο CRL618. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχουν μερικά μόρια όπως τα (HCO<sup>+</sup>), (CO<sup>+</sup>), (HCN), (CN) που βρέθηκαν σε αφθονία, σχετικά με την παρουσία τους στα μεσοαστρικά νέφη. Είναι ασαφές πως αυτά επιβιώνουν το ισχυρό πεδίο ακτινοβολίας που υπομένουν κατά την διαστολή. Μια πιθανότητα είναι να προστατεύονται καλά μέσα σε πυκνούς κόμπους (όπως οι γνωστοί κομητοειδείς κόμποι στο νεφέλωμα Helix).

.Χρήσιμοι ανιχνευτές. Πολλοί υδρογονάνθρακες και πολλά ιόντα όπως τα (HCO<sup>+</sup>), (CO<sup>+</sup>) είναι πολύτιμοι ανιχνευτές μετάβασης του αστέρα από τον ασυμπτωτικό κλάδο στο πρωτοπλανητικό νεφέλωμα. Η εμφάνιση ή ενίσχυση του (HCO<sup>+</sup>) ανταποκρίνεται σε διάφορα στάδια εξέλιξης, ανάλογα με τι δημιουργεί την αφθονία του. Σε πολύ αρχικά στάδια αυτό το ιόν μπορεί να σχηματιστεί με τις αντιδράσεις του βραχύβιου (H<sub>3</sub><sup>+</sup>) με (CO), ενώ σε μεταγενέστερα στάδια με αντιδράσεις του (CO<sup>+</sup>) με (H<sub>2</sub>). Ο βαθμός διακύμανσης των (HCO<sup>+</sup>), (CO<sup>+</sup>) σε σχετικά μεγάλο δείγμα PPN και PN μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν εργαλείο για την διάγνωση της εξέλιξής τους. Οι γραμμές του (H<sub>2</sub>) μπορούν να είναι καλοί ανιχνευτές της πυκνότητας επειδή υποδεικνύουν εκπομπή από κόμπους πολύ πυκνού αερίου, που είναι εμβαπτισμένο σε ιονισμένο αέριο. Οι εξωτερικές περιοχές των κόμπων είναι PDR που διεγείρονται από την ακτινοβολία του αστεριού. Σε νέα πλανητικά έχουν ανιχνευτεί γραμμές των (C<sub>6</sub>O), (C<sub>7</sub>O), άρα η χημεία υδρογονανθράκων εκεί είναι πολύ γρήγορη.

Σημείωση. Σε πολλά πλανητικά έχουμε ανιχνεύσει άτομα (και μόρια που τα περιέχουν) βαρύτερα του σιδηρού. Αυτά ξέρουμε ότι παράγονται κατά τις εκρήξεις σουπερνόβα με την γρήγορη απορρόφηση νετρονίων (μεταλλάσσονται σε πρωτόνια στον συνήθως από σίδηρο πυρήνα, που τα απορροφάει). Υπάρχει όμως και η αργή απορρόφηση νετρονίων, που συμβαίνει στον ασυμπτωτικό κλάδο στα μικρότερα αστέρια, αυτά που εξελίσσονται σε πλανητικά νεφελώματα. Κάποια βαρύτερα του σιδήρου στοιχεία σχηματίζονται με την γρήγορη, κάποια με την αργή και κάποια και με τους δύο τρόπους απορρόφησης νετρονίων.

### Εκρήξεις νόβα.

Στις εκρήξεις νόβα έχουμε ανιχνεύσει (H<sub>2</sub>), (CO), (CN), (SiO<sub>2</sub>), (SiC), μέσω της εκπομπής γο δόνησης στο κοντινό υπέρυθρο. Τα μόρια αυτά βρέθηκαν να υπάρχουν από νωρίς στην εξέλιξη του νόβα (10 ημέρες μετά την έκρηξη), και εν μέρη πριν τον σχηματισμό των παχιών στο οπτικό κελυφών σκόνης, που παρατηρούμε στο 1/3 όλων των νόβα, 1 μήνα περίπου μετά την έκρηξη. Έτσι ο σχηματισμός μορίων αποτελεί έναν πρόδρομο της δημιουργίας σκόνης στις νόβα. Οι φυσικές συνθήκες στις οποίες εμφανίζεται η χημεία είναι πολύ όμοιες με τις μεσοαστρικές και αυτές των άλλων περιαστρικών περιβαλλόντων. Περιλαμβάνουν πολύ υψηλές, αλλά

γρήγορα φθίνουσες πυκνότητες και θερμοκρασίες, και εντατικά πεδία σκληρής ακτινοβολίας, όσο το άστρο εξελίσσεται. Η δημιουργία μορίων και σκόνης εμφανίζεται πιθανώς μόνο σε μια ζώνη μετάβασης, όπου η ψύξη και η ολική κάλυψη από (Fe) επιτρέπουν την ανάπτυξη χημικών αντιδράσεων στο διαστελλόμενο κέλυφος. Επειδή στην μοριακή ζώνη είναι βέβαιη η παρουσία πεδίων ακτινοβολίας μεγάλης έντασης, η χημεία εμφανίζεται στις πυκνές περιοχές, όπου δεν κυριαρχεί η ακτινοβολία. Ο κύριος παράγοντας χημείας στις νόβα είναι η έκρηξη που παράγει κρουστικό κύμα, θερμαίνει, ιονίζει και ωθεί το αέριο. Όταν η επανένωση ιόντων και ηλεκτρονίων έχει σχεδόν ολοκληρωθεί, οι συνθήκες επιτρέπουν την δημιουργία μορίων. Συμπεραίνουμε ότι ο παράγοντας χημείας στις νόβα είναι η δυναμική. Οι χημικές αντιδράσεις περιλαμβάνουν αντιδράσεις ουδέτερο- ουδέτερο και ιόν- μόριο, χρησιμοποιώντας τον υπόλοιπο ιονισμό που υπάρχει από την (κοσμική) περίοδο της επανένωσης, και ακολουθεί η δημιουργία σκόνης. Οι τύποι σκόνης που ανακαλύψαμε μέσω της IR φασματογραφίας περιλαμβάνουν άμορφο άνθρακα, υδρογονάνθρακες, silicates, silicon carbide, alumina.

.Παράδειγμα. Το QV Vul 1984 μας αποκάλυψε μόρια 20 μέρες μετά την έκρηξη. Η πρώτη σκόνη που είδαμε ήταν άμορφος άνθρακας, silicon carbide και υδρογονάνθρακες στις 50 ημέρες, και τα πλούσια σε (O) silicates εμφανίστηκαν στις 100 ημέρες.

.Μοριακοί ανιχνευτές. (H<sub>2</sub>), (CO), (CN), (SiO), (SiO<sub>2</sub>), (SiC), (C<sub>2</sub>).

### Εκρήξεις σουπερνόβα.

Το περιβάλλον των σουπερνόβα φαίνεται να μην είναι περιοχή σχηματισμού μορίων. Τα (CO), (SiO) που ανακαλύψαμε σε σουπερνόβα τύπου II εμφανίστηκαν 100 ή και περισσότερες ημέρες μετά την έκρηξη. Ένα χρόνο αργότερα αρχίζει η δημιουργία σκόνης. Το κλάσμα των μορίων στην έκρηξη αποτελεί περίπου το 30% της συνολικής μάζας της ύλης που εκτινάσσεται κατά την διάρκειά της.

Τα αστέρια που εκρήγνυνται ως σουπερνόβα II είναι υπεργίγαντες με πάνω από 12 ηλιακές μάζες στην κύρια ακολουθία. Στο τέλος της ζωής τους ο πυρήνας τους περιέχει τα προϊόντα της σύντηξης σε διακριτές στοιβάδες, με άκαυτο υδρογόνο στην εξωτερική περιοχή. Το πρώτο κέλυφος μετά το υδρογόνο περιέχει ήλιον, στο επόμενο έχουμε άνθρακα και οξυγόνο, μέχρι το σίδηρο στον αστρικό πυρήνα (με νικέλιο). Αν δεν έχουμε ανακάτεμα των στοιβάδων κατά την έκρηξη, αυτές παραμένουν διακριτές και η χημεία στην έκρηξη περιλαμβάνει μόνο τα στοιχεία της κάθε στοιβάδας. Η έκρηξη γίνεται ορατή από την εκπομπή ακτίνων γ από την ραδιενεργό διάσπαση των βραχύβιων (<sup>56</sup>Ni), (<sup>56</sup>Co), και από άλλα μήκη κύματος όπως η υπεριώδης ακτινοβολία. Το υλικό της έκρηξης είναι υπέρπυκνο (10<sup>12</sup> σωματίδια /cm) και καυτό (10000K), και εμφανίζεται χημεία 3 σωμάτων. Σχετικά με τους χημικούς παράγοντες, αυτές οι περιοχές είναι μεγάλης πυκνότητας PDR με ένα αντισυμβατικό πεδίο ακτινοβολίας. Έτσι η χημεία είναι εντελώς αντισυμβατική, αφού το υδρογόνο, το κυριότερο στοιχείο στην χημεία όλου του σύμπαντος,

απουσιάζει (εκτός αν έχουμε ανακάτεμα των στοιβάδων). Έτσι οι χημικές διαδρομές είναι πολύ περιορισμένες, σχετικά με αυτές στα περιβάλλοντα με υδρογόνο. Η πιο σημαντική στοιβάδα για την εκεί χημεία είναι αυτή με άνθρακα και οξυγόνο.

.Παράδειγμα. Στη SN1987A στο νέφος του Μαγγελάνου βρέθηκαν μόρια (CO), (SiO) στην θεμελιώδη εκπομπή τους στα 416 $\mu$ m και 8 $\mu$ m αντίστοιχα. Η εκπομπή (CO) ανιχνεύτηκε από 157 ως 532 μέρες μετά την έκρηξη, ενώ αυτή του (Si) από 160 ως 519 ημέρες. Η δημιουργία σκόνης ανιχνεύτηκε μετά από 530 ημέρες, άρα το πυρίτιο δεν ήταν δεσμευμένο σε σκόνη μέχρι τότε. Η μάζα της σκόνης που ανιχνεύτηκε ήταν 10στη -4 ηλιακές, αλλά πρόσφατες μετρήσεις του Spitzer έδειξαν ότι αυξήθηκε σε 0,4- 0,7 ηλιακές μάζες. Περιλαμβάνει άμορφο άνθρακα και silicates και ενσωματώνει την περισσότερη διαθέσιμη πυρίμαχη υλη.

.Μόρια ανιχνευτές. Τα (SiO), (CO) θέτουν τα όρια της έκρηξης σε κάποιο συγκεκριμένο μοντέλο. Η ανίχνευση άλλων ειδών σημαίνει ότι είχαμε ανακάτεμα των στοιβάδων κατά την έκρηξη.

### Το κέντρο του Γαλαξία μας.

Η κεντρική μοριακή ζώνη (Central molecular zone, CMZ) είναι μια περιοχή εύρους μισού kpc στο κέντρο του Γαλαξία μας. Εκεί οι φυσικές συνθήκες του αερίου είναι τελείως διαφορετικές από ότι στον γαλαξιακό δίσκο. Υπάρχουν νέφη αερίων με πυκνότητα 10000/cm<sup>3</sup>, μεγέθους 20 pc και με κινητική θερμοκρασία 200K. Η θερμοκρασία των κόκκων σκόνης μέσα σε αυτά είναι 30K. Αυτά τα νέφη είναι πλούσια σε μόρια, και σε κάποιες περιοχές τους έχουν βρεθεί τα πιο πολύπλοκα οργανικά μόρια στο μεσοαστρικό διάστημα. Αυτά τα COM έχουν μεγάλη αφθονία σχετικά με το υδρογόνο (10στη-9 με 10στη-8), και ακόμα μεγαλύτερη για τη μεθανόλη (10στη-7 με 10στη-6). Είναι ενδιαφέρον να δούμε τι κάνει αυτές τις περιοχές τόσο διαφορετικές από άλλες μοριακές περιοχές του Γαλαξία. Η εκπομπή των μορίων από τα CMZ έχει σημαντική συνεισφορά σε αυτό. Η CMZ είναι μια πολύ ενεργή περιοχή του Γαλαξία μας, και η πολύπλοκη χημεία της περιλαμβάνει και τους τέσσερις χημικούς παράγοντες. Είναι σίγουρα περιοχή με ενισχυμένη κοσμική ακτινοβολία και εντατικά πεδία ακτινοβολίας όπου εμφανίζονται βίαιες δυναμικές διαδικασίες. Η παρουσία άφθονων COM, που δεν μπορούν να σχηματιστούν στις αντιδράσεις αέριας φάσης, σημαίνει ότι παίζουν ρόλο εκεί οι διαδικασίες στους κόκκους σκόνης.

.Παράδειγμα. Ένα πλούσιο σε μόρια νέφος στο κέντρο του Γαλαξία μας είναι το MCG-0.11-0.08. Σε αυτό το νέφος έχουν ανακαλυφτεί τα εξής μόρια με σχετική αφθονία (CH<sub>3</sub>OH) (μεθανόλη), (C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH) (αιθανόλη), ((CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>O) (dimethylether), (HCOOCH<sub>3</sub>), (methylformate), (HCOOH) (formicacid), (CH<sub>3</sub>COOH) (aceticacid), (H<sub>2</sub>CO) (formaldehyde), (CH<sub>2</sub>CHO) (propynal), (CH<sub>2</sub>CHCHO) (propenal), (CH<sub>3</sub>CH<sub>2</sub>CHO) (propionaldehyde), (CH<sub>2</sub>OHCHO) (glycolaldehyde), (HOCH<sub>2</sub>CH<sub>2</sub>OH) (ethyleneglycol), (c-C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>O) (ethyleneoxide), (CH<sub>3</sub>CHO) (acetaldehyde) και (H<sub>2</sub>CCO)(ketene).

Αυτά τα μόρια θεωρούνται γενικά υπογραφές των καυτών πυρήνων, και η αφθονία των σχετικών με τις μεταβολές μορίων στην CMZ είναι τελείως όμοια με αυτήν στους καυτούς πυρήνες. Ενώ στους καυτούς πυρήνες τα μόρια αναπτύσσονται σε χημεία στερεής κατάστασης και μετά την εξάτμιση του πάγου από τους κόκκους, και σε μια μικρή περιοχή, στο γαλαξιακό κέντρο αυτή η περιοχή είναι εκτεταμένη. Οι φυσικές συνθήκες στους καυτούς πυρήνες (πυκνότητα 10 εκατ./cm<sup>3</sup>, μέγεθος 0.1pc) και στην CMZ (10000/cm<sup>3</sup>, 20pc) είναι πολύ διαφορετικές. Έτσι οι χημικές αντιδράσεις που παράγουν μόρια δεν είναι ίδιες στις 2 περιοχές. Η θερμοκρασία στους κόκκους σκόνης στη CMZ είναι αρκετά χαμηλή ώστε να μην προξενήσει εξάτμιση του πάγου. Έτσι δεν σημειώνεται διάβρωση των καλυμμάτων πάγου σε αυτές τις περιοχές, που δέχονται συνήθως μικρής ταχύτητας (20 km/s) κρουστικά κύματα.

Ένας πιο τυπικός καυτός πυρήνας κοντά στο κέντρο του Γαλαξία, ο πιο πλούσιος σε είδη μορίων που γνωρίζουμε, είναι ο Large Molecule Heimat (SgrB2(N-LMH). Περιέχει μικρότερα είδη όπως μεθανόλη(CH<sub>3</sub>OH), φορμαλδεΐδη (H<sub>2</sub>CO), formic acid (HCOOCH<sub>3</sub>), dimethylether (CH<sub>3</sub>OCH<sub>3</sub>), acetone(CH<sub>3</sub>COCH<sub>3</sub>), ethyleneglycol ((CH<sub>2</sub>OH)<sub>2</sub>), glycolaldehyde (CH<sub>2</sub>OHCHO), vinyl cyanide (CH<sub>2</sub>CHCN), ethyl cyanide (CH<sub>3</sub>CH<sub>2</sub>CN), acetic acid (CH<sub>3</sub>COOH). Τα πιο άφθονα από αυτά τα είδη, όπως το methylformate έχουν κλασματική αφθονία ως 10 στη -7. Ο πλούτος της χημείας στην CMZ μας προϋποθέτει ότι μένουν να ανακαλυφθούν και άλλα είδη COM.

.Μόρια ανιχνευτές. Όλα τα πολύπλοκα οργανικά μόρια θέτουν τα όρια στη φύση του πάγου, των διαδικασιών παγώματος, της συχνότητας του μηχανισμού επιστροφής του μανδύα, των μικρής ταχύτητας κρουστικών κυμάτων και της μετέπειτα χημείας αέριας φάσης.

## 5) Μοριακοί ανιχνευτές σε άλλους γαλαξίες.

Οι πρώτες ανιχνεύσεις εκπομπών από μόρια όπως τα (CO), (HCN) σε άλλους, κοντινούς γαλαξίες έγιναν τη δεκαετία του 1970. Από το 2003 έχουμε φάσμα εκπομπής (CO) από Κβάζαρ μέσω βαρυτικού φακού, σε ερυθρολίση z= 6,4. Δηλαδή στην πολύ νεαρή ηλικία του σύμπαντος. Έτσι ξέρουμε ότι οι χημικές αντιδράσεις συμβαίνουν από τότε και είναι ευρέως διαδεδομένες στο σύμπαν. Τώρα έχουμε παρατηρήσει πιο σύνθετα μόρια σε μακρινούς γαλαξίες, άρα η εξέλιξη της χημείας άρχισε από πολύ νωρίς. Το ερώτημα είναι αν μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τους χημικούς δείκτες, ώστε να συμπεράνουμε τις εκεί φυσικές συνθήκες, όπως κάνουμε στον Γαλαξία μας.

Ένα πρόβλημα είναι ότι οι μακρινοί γαλαξίες δύσκολα αναλύονται χωρικά, έτσι δεν μπορούμε να ξεχωρίσουμε τις περιοχές τους. Όμως η εκπομπή των (CO), (SiO), (CH<sub>3</sub>OH) σε έναν γαλαξία που δεν αναλύεται σε περιοχές δεν σημαίνει ότι τα μόρια αυτά υπάρχουν το ίδιο σε όλον τον γαλαξία. Το (CO) μας δηλώνει την ύπαρξη ψυχρών πυκνών περιοχών, το (SiO) ισχυρά κρουστικά μέτωπα και το (CH<sub>3</sub>OH)



πυκνούς πυρήνες αστρογέννησης. Οι μακρινοί γαλαξίες περιέχουν γενικά όμοια ποικιλία περιοχών και χημικών πηγών με τον Γαλαξία μας.

Ένα άλλο θέμα είναι ότι οι γαλαξίες που βλέπουμε έχουν ποικιλία από σχήματα, μεγέθη και φυσικές συνθήκες. Το εύρος των φυσικών παραμέτρων (πυκνότητες αερίων, πεδία UV, βαθμοί ιονισμού μέσω κοσμικής ακτινοβολίας, περιοχές σκόνης) μας δείχνουν ότι οι συνθήκες μπορεί να είναι πολύ διαφορετικές σε άλλους γαλαξίες από ότι στον δικό μας. Για αυτό η ευαισθησία της αστροχημείας σε αυτές τις παραμέτρους είναι πολύ σημαντική. Έτσι, μία αναλογία που ισχύει για τον Γαλαξία για μας να μετατρέψει την ένταση των ολοκληρωμένων γραμμών του (CO) σε πυκνότητα στήλης του (H<sub>2</sub>) μπορεί να δώσει λάθος αποτελέσματα σε άλλον γαλαξία.

Τι ελπίζουμε να ανακαλύψουμε χρησιμοποιώντας την μελέτη των μοριακών εκπομπών σε άλλους γαλαξίες? Για τον Γαλαξία μας, τα κυριότερα ζητήματα για το ποια μόρια είναι ιδανικοί δείκτες, είναι να ανιχνεύουν την ύλη που είναι διαθέσιμη για αστρογέννηση, να περιγράφουν την διαδικασία της αστρογέννησης και να καθορίζουν την επιρροή των νέων αστερίων στο περιβάλλον τους. Για τους γαλαξίες, εκτός από αυτά τα ερωτήματα υπάρχουν και μεγαλύτερης κλίμακας. Πως σχηματίζονται οι γαλαξίες, πως εξελίσσονται και αλληλεπιδρούν και ποιες είναι η ψυχρές πηγές εκπομπής τους.

Υπάρχει μεγάλο ενδιαφέρον για τους πιο λαμπρούς γαλαξίες. Για παράδειγμα, οι γαλαξίες αστρογέννησης (starburst galaxies) προέρχονται από ένωση γαλαξιών πλούσιων σε μεσοαστρική ύλη. Αυτή η φάση της έντονης αστρογέννησης πρέπει να είναι σχετικά βραχύβια, όσο επαρκούν τα αποθέματα μεσοαστρικής αέριας ύλης. Όπου αυτά είναι πλούσια σε σκόνη, απορροφάται μεγάλο μέρος από την υπεριώδης ακτινοβολία των μεγάλης μάζας άστρων από τη σκόνη, και επανεκπέμπεται ως υπέρυθρη ακτινοβολία. Έτσι έχουμε μια ξεχωριστή κατηγορία, τους Ultra-luminous infrared galaxies (ULIRG) που αποτελούν μερικές από τις πιο δυνατές πηγές υπέρυθρων στο σύμπαν. (Υπάρχουν και οι Extreme (ELIRG), ακόμα πιο λαμπροί στο υπέρυθρο). Άλλη σημαντική κατηγορία είναι οι ενεργοί γαλαξίες (active galaxies, AGN= active galaxy nucleus), που έχουν μια πολύ λαμπρή σε όλα τα μήκη κύματος πυκνή περιοχή στο κέντρο τους. Αυτή τροφοδοτείται από μια υπερμεγέθους μαύρη τρύπα και τον δίσκο προσάυξής της με τους πίδακές του. Αυτές οι κατηγορίες δεν αλληλοαποκλείονται. Ένας ULIRG μπορεί να επαναεκπέμπει στο υπέρυθρο την αρχική υπεριώδης που να προέρχεται όχι μόνο από μεγάλης μάζας αστέρια, αλλά και από έναν AGN. Στην πράξη η κατηγοριοποίηση των χωρικά μη αναλυμένων γαλαξιών ως starburst ή κυριαρχούμενοι από AGN είναι αμφιλεγόμενη.

**Τύποι γαλαξιών και τα φυσικά τους χαρακτηριστικά.**

Κανονικοί σπειροειδείς. Παρουσιάζουν πολύ επίπεδους δίσκους, που υποστηρίζονται από την περιστροφή τους, με σπειροειδείς βραχίονες (στους οποίους έχουμε αστρογέννηση) και μια κεντρική ράβδο (απαλλαγμένη από νεαρά

αστέρα). Έχουν τυπική μάζα 1 δις- 1 τρις ηλιακές, μέγεθος 6-100 κpc, λαμπρότητα 100 εκ.- 100 δις ηλιακές.

Προγενέστερου τύπου (early type). Με πολύ λίγη σκόνη και αέριο, κυριαρχούνται από μεγάλης ηλικίας αστέρια. Με μάζα 1 εκ.- 100 τρις ηλιακές, μέγεθος 1- 150 κpc και λαμπρότητα 1 εκ- 1 τρις ηλιακές.

Ραβδωτοί. Σπειροειδείς με σπείρες αερίων και σκόνης, που καταλήγουν σε μπάρα (ράβδο) που διασχίζει τον πυρήνα. Όμοιες μάζες και λαμπρότητες με τους σπειροειδείς.

Ανώμαλοι. Δεν κυριαρχεί ένας δίσκος ή μια μπάρα, με το 10%- 20% της μάζας τους να είναι αέριο. Μάζα 1 εκ.- 100 δις ηλιακές, διάμετρος 1- 10 κpc και λαμπρότητα 1 εκ- 1 δις ηλιακές.

Αστρογέννησης. Με μεγάλο απόθεμα αερίων και υψηλό βαθμό αστρογέννησης. Μπορεί να είναι κανονικοί ή ακανόνιστοι στο σχήμα. Με μάζα 1 εκ.- 10 δις ηλιακές, μέγεθος 100-1000 κpc, λαμπρότητα 1 δις- 100 τρις ηλιακές.

ULIRG. Με πολύ σκόνη, πιθανώς περιέχουν ισχυρά AGN, μεγαλύτερης λαμπρότητας από 1 τρις ηλιακές.

Νάνοι. Πολύ αμυδροί γαλαξίες, μάζας 1 εκ. ηλιακής και έκτασης 1000 pc.

Ευτυχώς, η χημεία των γαλαξιών είναι πολύ επηρεασμένη από το τοπικό περιβάλλον. Αυτό μας δίνει την ευκαιρία να χρησιμοποιήσουμε τις χημικές υπογραφές που προέρχονται από διαφορετικά περιβάλλοντα για να ξεχωρίσουμε τις μοριακές εκπομπές, και να αναγνωρίσουμε διαφορετικά περιεχόμενα σε έναν γαλαξία, ακόμα και αν δεν είναι χωρικά αναλύσιμος.

### Πολυσύνθετοι γαλαξίες.

Οι κοντινότεροι γαλαξίες, όπως ο starburst M82, μπορεί να αναλυθούν σχετικά απλά με μονό τηλεσκόπιο (πιάτο) στις χωρικές περιοχές τους, με ανάλυση μερικών δευτερολέπτων (arcsec) του τόξου. Μια ακτίνα όμως στο μονό τηλεσκόπιο περιλαμβάνει πολλές πηγές αερίου. Ενώ μπορούμε να αναλύσουμε τον πυρήνα του, δεν μπορούμε να ανιχνεύσουμε σε κανένα μήκος κύματος την χωρική εξάπλωση της περιοχής αστρογέννησης με μονά τηλεσκόπια. Το ALMA, με δυνατότητα ανάλυσης σε πλήρη συμβολομετρία 0,01 arcsec, σε μήκος κύματος 0,3 mm, θα μπορεί να αναλύσει τις εκεί περιοχές εύρους 0,15 pc. Ενώ αυτό το εύρος είναι μικρότερο από μια τυπική περιοχή αστρογέννησης, είναι μεγαλύτερο από έναν πυρήνα στον οποίο σχηματίζεται ένα νέο άστρο.

Έχουμε πολλά δεδομένα μορίων σε κοντινούς γαλαξίες, και όλο και περισσότερες πληροφορίες για μακρινούς μη αναλύσιμους. Η χημική ποικιλία και πολυπλοκότητα μας δείχνει ότι η μοριακή εκπομπή δεν προέρχεται όλη από τον ίδιο τομέα του γαλαξία. Για παράδειγμα, μια αντιπροσωπευτική μοριακή γραμμή στο εύρος κύματος 1,7- 2,3 mm από την περιοχή του κέντρου του γαλαξία NGC253 δείχνει την

παρουσία 20 διαφορετικών ειδών μορίων. Αυτή η πολυπλοκότητα δεν μπορεί να εξηγηθεί σε ένα μοντέλο ενός τομέα. Μας δείχνει πως οι διάφορες σχετικές αφθονίες μεταξύ μορίων μπορούν να μας δώσουν την εικόνα των φυσικών διασπορών του μοριακού αερίου σε αυτούς τους γαλαξίες. Ο καθορισμός των φυσικών δομών των γαλαξιών με τη χρήση των μοριακών εκπομπών μπορεί να είναι ακόμα πιο ισχυρός σε μεγάλη ερυθρολίσθηση, όπου οι ακτίνες που μετράμε περιλαμβάνουν όλο τον γαλαξία. Για παράδειγμα, οι παρατηρήσεις του APM08279+5255, ένας γαλαξίας με  $z=3,911$ , αποκαλύπτουν αναλογίες πυκνοτήτων μοριακών στηλών όπως των  $(\text{HCN})/(\text{HCO}^+)$ ,  $(\text{HCN})/(\text{CO})$ , που είναι πολύ διαφορετικές από αυτές του δικού μας ή γειτονικών μας γαλαξιών. Αυτές οι διαφορές είναι ανωμαλίες που οφείλονται σε υψηλό ιονισμό ή σε μεγάλη αστρογέννηση. Μπορεί όμως οι πολυσύνθετοι τομείς, ο καθένας με διαφορετικές φυσικές συνθήκες, να συμβάλλουν στην εκπομπή που ανιχνεύουμε, ώστε η γνώση του κάθε τομέα να είναι απαραίτητη για την ερμηνεία αυτών των αναλογιών.

Η αστροχημεία μας λέει ότι η ανίχνευση ειδών όπως τα  $(\text{HCO}^+)$ ,  $(\text{CH}_3\text{OH})$  στην ίδια παρατήρηση ενός μη χωρικά αναλύσιμου γαλαξία σημαίνει ότι η εκπομπή προέρχεται από διαφορετικούς μεσοαστρικούς τομείς με διαφορετικές φυσικές συνθήκες. Ξέρουμε πως σχηματίζονται τα πιο συνήθη μόρια, κάτω από ποιες συνθήκες αφθονούν και ποιες φυσικές διαδικασίες ανιχνεύονται μέσω αυτών. Ποια μόρια να χρησιμοποιήσουμε ως ανιχνευτές φυσικών συνθηκών στους γαλαξίες? Μπορεί η μετρήσιμη αφθονία να μας πει αν κάποιοι γαλαξίες κυριαρχούνται από μια ή περισσότερες πηγές ενέργειας? Θα αντιμετωπίσουμε αυτά τα ερωτήματα, καταρχήν για τους γαλαξίες που φαίνεται να κυριαρχούνται από μια μοναδική ενεργειακή πηγή.

### PDR - περιοχές κυριαρχίας φωτονίων.

Η ακτινοβολία που εκπέμπεται από μερικούς γαλαξίες φαίνεται να κυριαρχείται από εκπομπή γιγαντιαίων PDR. Αυτές είναι ισχυρές πηγές εκπομπής σε μοριακές γραμμές, στα χιλιοστά και υποχιλιοστά. Σχηματίζονται σε γαλαξίες όπου υπάρχουν σμήνη μεγάλων νεαρών αστεριών και σε γαλαξίες που κυριαρχούνται από ακτινοβολία που προέρχεται από ενεργό γαλαξιακό πυρήνα. Το αν ένα μόριο είναι καλός ανιχνευτής μιας εξωγαλαξιακής PDR εξαρτάται από τις φυσικές και χημικές συνθήκες του γαλαξία. Η μεταλλικότητα του γαλαξία επηρεάζει πολύ την χημική του σύσταση. Μικρή μεταλλικότητα σημαίνει χαμηλή αφθονία των περισσότερων ειδών (εξαιρέσεις είναι τα  $(\text{CO})$ ,  $(\text{H}_2\text{O})$ ,  $(\text{HCO}^+)$ ,  $(\text{OH})$ ). Εδώ τα ιόντα δευτερίου είναι πιο άφθονα από ότι περιμέναμε. Αντίθετα, μεγάλη μεταλλικότητα (σε σχέση με τον Ήλιο μας) σημαίνει τάση πολυπλοκότητας. Υπάρχουν είδη που έχουν διακύμανση της σχετικής αφθονίας τους ανάλογα με τις αλλαγές της μεταλλικότητας, άλλα που δεν επηρεάζονται από τη μεταλλικότητα, και άλλα που έχουν αντίστροφη αφθονία σε σχέση με την μεταλλικότητα.

Οι άλλοι γαλαξίες μπορεί να διαφέρουν από τον δικό μας όχι μόνο στην μεταλλικότητα, αλλά και στην αρχική χημική τους σύσταση. Για παράδειγμα, οι γαλαξίες δεύτερης γενιάς (από συγχωνεύσεις) έχουν χαμηλό ποσοστό του στοιχείου

άζωτο, ενώ το θείο και το οξυγόνο τους είναι ενισχυμένα. Τα είδη που βασίζονται στο θείο είναι πολύ ευαίσθητα στις αφθονίες των στοιχείων ενός γαλαξία.

Η χημική σύσταση ενός γαλαξία επηρεάζεται και από την ισχύ του πεδίου ακτινοβολίας του. Γενικά, η ισχυρή ακτινοβολία υποβαθμίζει την χημεία. Μερικά είδη είναι πολύ ευαίσθητα στην UV ((CS), (OCS), (CO<sub>2</sub>)). Άλλα ((C<sub>2</sub>), (C<sub>2</sub>H)) δείχνουν μικρή ενίσχυση όταν η υπεριώδης είναι ισχυρή, κάτι που οφείλεται στην παροχέτευση ελευθέρου άνθρακα από τη φωτόλυση του (CO). Βέβαια, οι διακυμάνσεις σε πυκνότητα και κοσμική ακτινοβολία επηρεάζουν επίσης τις χημικές αντιδράσεις στις PDR.

.Ανιχνευτές PDR. (HCO<sup>+</sup>). Αυτό το μόριο κυριαρχεί στις PDR ανεξάρτητα από την μεταλλικότητα, την ποσότητα των στοιχείων οξυγόνο και θείο, την κοσμική ακτινοβολία, την μακρινή υπεριώδη και την πυκνότητα αερίου του γαλαξία. Η εκτιμώμενη αφθονία του είναι χαμηλή (10<sup>στη-12</sup>). Είναι όμως από τα ελάχιστα είδη που μπορούν να οριστούν ως πραγματικοί ανιχνευτές PDR σε γαλαξίες, γιατί μένουν ανεπηρέαστα από φυσικές αλλαγές (όσο ο βαθμός ιονισμού από την κοσμική ακτινοβολία δεν ξεπερνάει κάποιο όριο).

.(H<sub>3</sub>O<sup>+</sup>). Αυτό το μόριο είναι παρόμοιας αφθονίας με το προηγούμενο. Είναι ένα άλλο ιόν, που γενικά βρίσκεται στις PDR και μένει ανεπηρέαστο από τις τοπικές συνθήκες. Έχει ειδικό ενδιαφέρον γιατί το ανιχνεύουμε σε πολύ χαμηλές μεταλλικότητες. Αυτό γίνεται λόγω σοβαρής μείωσης της πυκνότητας ηλεκτρονίων στη χαμηλή μεταλλικότητα. Επειδή η κύρια απώλεια πολυατομικών ιόντων γίνεται μέσω διαλυτικών επανενώσεων, η αφθονία των ιόντων αυξάνεται.

.(CO). Αυτό το μόριο είναι βέβαια πολύ άφθονο στις PDR. Ακόμα και σε χαμηλές μεταλλικότητες, όπου οι κλασματικές του αφθονίες μπορεί να ελαττώνονται κατά 1000 φορές από την κανονική παρουσία του (10<sup>στη-4</sup>), είναι το πιο άφθονο είδος στις PDR. Αυτό το μόριο είναι παντού παρών, έτσι η χρησιμότητά του είναι να ανιχνεύει κυρίως το μοριακό αέριο, παρά μια συγκεκριμένη διαδικασία ή κάποιον τομέα σε έναν γαλαξία. Από την άλλη, είναι το μόνο μόριο μέσω του οποίου μπορούμε να παρατηρήσουμε την πλήρη κλίμακα J για μια ποικιλία εξωγαλαξιακών αντικειμένων. Έτσι το (CO) είναι ένας ισχυρός ανιχνευτής διεγερμένων καταστάσεων σε έναν γαλαξία.

.(H<sub>2</sub>O), (CS). Σε μεγάλη εξάλειψη (λόγω απορρόφησης) του ορατού φωτός αυτά τα 2 είδη είναι άφθονα στις PDR, άσχετα με τις φυσικές συνθήκες του γαλαξία. Για να είναι ένα νέφος με μεγάλη εξάλειψη ορατού φωτός μια περιοχή PDR χρειάζεται ένα πεδίο ακτινοβολίας μεγάλης έντασης στις μακρινές υπεριώδεις. Αυτό το πεδίο το ανιχνεύουν αυτά τα είδη.

.(HCO.) Αυτό το μόριο είναι καλός ανιχνευτής των διεπαφών των PDR. Το κλάσμα (HCO<sup>+</sup>)/(HCO) έχει τιμή 2,5 ως 30 σε κλασικές γαλαξιακές PDR, και αυτό σε συνδυασμό με μεγάλη αφθονία (10<sup>στη-10</sup>) του (HCO) πιστεύουμε ότι σημαίνει την ύπαρξη φωτοχημείας κυριαρχούμενη από μακρινό υπεριώδες.

CO+. Αυτό το μόριο σχηματίζεται από τον απευθείας φωτοϊονισμό του (CO), όταν η PDR έχει παράγοντα πεδία σκληρής ακτινοβολίας μεγάλης έντασης. Η μεγάλη αφθονία αυτού του μορίου συσχετίζεται με αντίστοιχη αύξηση της αναλογίας του (HOC+), και το κλάσμα (CO+)/(HOC+) παρατηρείται με τιμή 1- 10 σε πολλές PDR.

Περιοχές κυριαρχούμενες από κοσμική ακτινοβολία.

Η δημιουργία της κοσμικής ακτινοβολίας είναι συσχετισμένη με τον σχηματισμό αστέρων μεγάλης μάζας. Έτσι κάποιοι γαλαξίες που παρουσιάζουν έντονη αστρογέννηση ή είναι σε φάση συγχώνευσης, έχουν πολύ δυνατά ρεύματα κοσμικής ακτινοβολίας. Οι γαλαξίες (ή μέρη τους) με αυτές τις συνθήκες είναι CRDR (περιοχές κυριαρχούμενες από κοσμική ακτινοβολία). Τα ισχυρά ρεύματα αυξάνουν την κινητική θερμοκρασία του μεσοαστρικού αερίου και τον ιονισμό, ακόμα και σε περιοχές που δεν τις επηρεάζει η υπεριώδης.

Οι αποκλίσεις του βαθμού ιονισμού από την κοσμική ακτινοβολία (σε σχέση με την ισχύ της στον Γαλαξία μας) μπορούν να οδηγήσουν σε διαφορετική χημεία. Σε βαθμό ιονισμού ( $\zeta$ ) ως 10στη-15/s, η χημεία είναι πλούσια όπως στον Γαλαξία μας. Αν ανέλθει σε 10στη-12/s, η περισσότερη χημεία υποβαθμίζεται επειδή το μοριακό υδρογόνο, που είναι το κλειδί όλης της μεσοαστρικής χημείας, καταστρέφεται πιο γρήγορα από ότι δημιουργείται. Επίσης η αύξηση της θερμοκρασίας λόγω της κοσμικής ακτινοβολίας που διεισδύει σε ένα αέριο έχει ως συνέπεια οι αντιδράσεις με το καυτό ατομικό υδρογόνο να καταστρέψουν όλα τα άλλα μόρια. Δεν ξέρουμε πόσο ισχυρή μπορεί να γίνει η κοσμική ακτινοβολία, αλλά ξέρουμε ότι η αστρογέννηση σε μερικούς γαλαξίες είναι τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη από ότι στον δικό μας.

Ακόμα και αν η κοσμική ακτινοβολία είναι 10000 φορές μικρότερη από την (10στη-17/s) του δικού μας Γαλαξία, θα πρέπει να υπάρχει μια χρήσιμη και με ποικιλία χημεία. Θα μπορούσαμε να την χρησιμοποιήσουμε για ανίχνευση των CRDR. Πάντως τα πιο πολλά μόρια μειώνονται με την αύξηση του βαθμού ιονισμού από την κοσμική ακτινοβολία.

.Ανιχνευτές. Είδη σχετικά με το θείο. Τα είδη που είναι πιο ευαίσθητα στον βαθμό ιονισμού από την κοσμική ακτινοβολία είναι τα (OCS), (SO<sub>2</sub>), (H<sub>2</sub>CS). Αυτά τα είδη δεν έχουν παρατηρηθεί ευρέως σε εξωγαλαξιακά περιβάλλοντα. Η προβλεπόμενη κλασματική αφθονία τους σχετικά με το υδρογόνο μειώνεται πολύ (από 10στη-7 ως 10στη-9 για τον Γαλαξία μας στη μη ανιχνεύσιμη τιμή 10στη-12) σε μοντέλα με  $\zeta$  ιονισμό 10στη-15/s.

.(C<sub>2</sub>). Αυτό το μόριο ενισχύεται σε αυξημένο  $\zeta$ . Αυτό οφείλεται στην αύξηση του (C+), που απελευθερώνεται σε ιονισμό διάλυσης του (CO) από (He+) και κορυφώνεται για  $\zeta = 10$ στη-13/s, άσχετα από τη μεταλλικότητα του γαλαξία.

.(H<sub>2</sub>O), (OH), (OH+), (H<sub>2</sub>O+), (H<sub>3</sub>O+). Αυτά τα είδη ενισχύονται σε μεγάλο βαθμό ιονισμού από την κοσμική ακτινοβολία και κορυφώνονται στο  $\zeta = 10$ στη -14/s. Μερικά είδη όπως τα (OH), (OH+) έχουν μεγάλη αφθονία σε  $\zeta = 10$ στη-12/s. Το

(H<sub>3</sub>O<sup>+</sup>) έχει ειδικό ενδιαφέρον επειδή γίνεται άφθονο (10<sup>10</sup>th-10<sup>11</sup>/ (H)) μόνο για ζ= 10<sup>10</sup>th-13/s, αλλά ξαναμειώνεται σε μεγαλύτερο ζ.

(HCO<sup>+</sup>). Χρησιμοποιείται ως ανιχνευτής κοσμικής ακτινοβολίας στον δικό μας Γαλαξία. Χρησιμεύει και σε άλλους γαλαξίες με ζ μέχρι 10<sup>10</sup>th-13/s. Η συμπεριφορά του είναι συνέπεια της θερμικής διέγερσης των ενδοθερμικών αντιδράσεων, που μπορεί να κινήσει τις χημικές αντιδράσεις του οξυγόνου και του άνθρακα, με την αύξηση της κινητικής θερμοκρασίας, που γίνεται λόγω του μεγαλύτερου ιονισμού. Όπως και να έχει, η μείωση της παραγωγής (H<sub>2</sub>) και η καταστροφή από τα άτομα (H) υποβαθμίζει όλες αυτές τις διεργασίες.

Μερικά εξωγαλαξιακά περιβάλλοντα μπορεί να έχουν υψηλό βαθμό ιονισμού μέσω κοσμικής ακτινοβολίας και υψηλή μεταλλικότητα, όπως τα ULIRG. Η επιλογή των δυνητικών μοριακών ανιχνευτών εξαρτάται από την μεταλλικότητα. Στις CRDR η μεταλλικότητα καθορίζει την αφθονία του (C<sup>+</sup>), ενός από τους πιο σημαντικούς ανιχνευτές περιοχών κυριαρχούμενες από κοσμική ακτινοβολία.

### Περιοχές κυριαρχούμενες από ακτινοβολία Χ.

Η εκπομπή ακτίνων Χ είναι σημαντικά ισχυρή σε γαλαξίες που περιέχουν ενεργούς πυρήνες (AGN). Το μοριακό αέριο εκεί εκτίθεται σε δυνατές εκπομπές ακτίνων Χ. Αυτές δεν απορροφώνται από τη σκόνη, όπως συμβαίνει με την υπεριώδη μετά από βάθος μερικών mag, αλλά διεισδύουν ακόμα και σε περιοχές με πυκνότητα στήλης 10<sup>24</sup> μόρια υδρογόνου /cm<sup>2</sup>, πριν εξασθενήσουν σημαντικά. Έτσι οι ΧDR μπορούν να είναι οι κυρίαρχες πηγές εκπομπής από μοριακά νέφη κοντά σε AGN. Οι ΧDR εξηγούν ανώμαλες αναλογίες εξωτικών μοριακών γραμμών, όπως η μεγάλης αφθονίας (HCN)/(CO) αναλογία στο Seyfert 2 γαλαξία NGC 1068.

Πιο άμεση απόδειξη ΧDR αποτελεί η μεγάλη σχετική αφθονία (10<sup>10</sup>th-9) του (SiO) σε γαλαξίες όπως ο NGC1068. Μπορεί όμως να συμβάλλουν και ισχυρά κρουστικά μέτωπα. Στην πράξη είναι δύσκολο να ξεχωρίσουμε την χημεία περιοχών που κυριαρχούνται από την κοσμική ακτινοβολία από αυτή των περιοχών κυριαρχίας ακτίνων Χ (και οι δύο παράγοντες εισχωρούν βαθειά μέσα στα νέφη). Είδη όπως τα (CN), (HCO), (HCO<sup>+</sup>), (HOC<sup>+</sup>) έχουν χρησιμοποιηθεί ως ανιχνευτές ΧDR. Η ένταση των γραμμών και τα κλάσματα αφθονίας διαφέρουν μεταξύ των 2 πηγών ακτινοβολίας. Για παράδειγμα, μοντέλα χημείας και μεταφοράς ακτινοβολίας δείχνουν ότι η ένταση της περιστροφικής γραμμής του (CO) αυξάνεται όταν ενισχύεται ο ιονισμός από την κοσμική ακτινοβολία, αλλά παραμένει χαμηλότερος από ότι σε ΧDR. Οι μεγάλοι J (>10) γραμμές (CO) μας βοηθάνε να διακρίνουμε τις PDR με ενισχυμένο ιονισμό κοσμικής ακτινοβολίας από τις ΧDR.

### Μοριακά νέφη και πυκνό αέριο σχηματισμού αστέρων.

Τα GMC είναι οι περιοχές όπου σημειώνεται η περισσότερη αστρογέννηση στους γαλαξίες. Σε μακρινούς γαλαξίες οι συμπυκνώσεις αστρογέννησης είναι εμβαπτισμένες σε αυτά τα γιγαντιαία μοριακά νέφη και δεν αναλύονται παρατηρησιακά. Το αέριο εκεί φτάνει σε πυκνότητα 1000 /cm<sup>3</sup> και θερμοκρασία

100K, ενώ στις συμπυκνώσεις αστρογέννησης έχει πυκνότητα 10 εκατ./cm<sup>3</sup> και μόνο 10K θερμοκρασία. Έτσι το αέριο σε άλλους γαλαξίες που δεν μπορεί να αναλυθεί χωρικά μέσω της παρατήρησης δείχνει μεγάλο εύρος πυκνότητας και θερμοκρασίας. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό όταν εκτιμάμε την μοριακή μάζα ενός γαλαξία από τις παρατηρήσεις του (CO) μέσω του παράγοντα X (βλέπε μοριακά νέφη και προαστρικοί πυρήνες).

Η παρατήρηση μορίων είναι ένα ιδανικό εργαλείο για να ανιχνεύσουμε ένα μεγάλο εύρος πυκνοτήτων στη μεσοαστρική ύλη, λόγω ότι έχουμε ένα μεγάλο εύρος πυκνοτήτων να συσχετίζονται με διαφορετικά είδη μορίων ή την μετάβαση κάποιων ιδίων μορίων. Στους άλλους γαλαξίες οι δομές πυκνότητας είναι πολύ λίγο αναλυμένες. Έτσι ο παρατηρητής έχει το πρόβλημα να ερμηνεύσει μοριακές παρατηρήσεις θεωρώντας κάποιο μέσο όρο πυκνότητας. Πώς να αναγνωρίσουμε μη αναλύσιμες δομές μεγάλης πυκνότητας?

Τα μόρια για αυτή την δουλειά είναι τα (HCN), (HNC). Αλλά οι περιοχές μεγάλης πυκνότητας δεν είναι απαραίτητα περιοχές αστρογέννησης. Η μεταβολή στην πυκνότητα επηρεάζει το περιεχόμενο σε μόρια ενός γαλαξία, αλλά ο εκφυλισμός μεταξύ πυκνότητας και θερμοκρασίας συνεπάγεται ότι οι απλές μεταβάσεις ενός μορίου δεν πρέπει να χρησιμοποιούνται για τον ποσοτικό καθορισμό της πυκνότητας του αερίου, ειδικά σε εκτός του Γαλαξία μας περιβάλλοντα. Εδώ βοηθάει η χρήση πολλών ειδών και σε πολλές διαφορετικές γραμμές.

Τα παρακάτω μόρια είναι χρήσιμα για την αποκάλυψη των πυκνών περιοχών από αέριο μακριά από τον Γαλαξία μας, αλλά οι παρατηρήσεις που έχουν γίνει δεν επαρκούν ώστε να χαρακτηρίσουμε τη λίστα αυτή ως ολοκληρωμένη.

.(CS). Αυτό το μόριο είναι γνωστό για την ανίχνευση πυκνών κόμπων σε GMC στο Γαλαξία μας. Πρόσφατες έρευνες σε πολλές γραμμές του σε εξωγαλαξιακά περιβάλλοντα έχουν συνδυάσει τις χαμηλού J < 4 μεταβολές του ίχνος (CS) με πυκνότητα αερίου της τάξης των 100000/cm<sup>3</sup>, ενώ οι μεγάλοι J (στο 7) μεταβολές συνδυάζονται με πυκνότητες μια τάξη μεγέθους μεγαλύτερες, άρα πιθανό αέριο αστρογέννησης.

.(HCN), (HNC). Αυτά τα 2 είδη χρησιμοποιούνται για ανιχνευτές περιοχών αστρογέννησης σε μακρινούς γαλαξίες. Το (HCN) φαίνεται να ανιχνεύει τις ίδιες πυκνότητες με το χαμηλού J (CS) (και όχι απαραίτητα αστρογέννηση) ενώ το (HNC) κορυφώνεται σε μεγαλύτερες πυκνότητες, και μπορεί να είναι καλύτερος ανιχνευτής αστρογέννησης.

.(CH<sub>3</sub>OH). Η κλίμακα της μεθανόλης, όπως αυτή του (CS), είναι πολύτιμη για την διάγνωση πολλαπλών πυκνοτήτων. Επειδή η μεθανόλη είναι και καλός ανιχνευτής κρουστικών κυμάτων, άρα και μεγάλων θερμοκρασιών, είναι πολλές φορές δύσκολο να αναλύσουμε τον εκφυλισμό μεταξύ θερμοκρασίας και πυκνότητας με παρέκταση των φυσικών παραμέτρων από την παρατήρηση της μεθανόλης.

Χαρακτηρισμός των γαλαξιών μέσω των μορίων τους.

Μέχρι τώρα επικεντρωθήκαμε στα μόρια θαυτά που έχουν ήδη ανιχνευτεί σε γαλαξίες και σε αυτά που προβλέπονται από τα χημικά μοντέλα) που αποτελούν πολύτιμους ανιχνευτές σε περιπτώσεις που είναι ενισχυμένος ένας φυσικός παράγοντας. Για παράδειγμα, οι γαλαξίες που κυριαρχούνται από PDR έχουν πολύ έντονο πεδίο ακτινοβολίας UV και τους ανάλογους ανιχνευτές. Οι γαλαξίες όπου είναι σημαντικές οι CRDR, έχουν ρεύματα κοσμικής ακτινοβολίας μεγάλης έντασης και τους αντίστοιχους ανιχνευτές τους. Σε αυτά τα χημικά μοντέλα θεωρούμε γενικά ότι εμπλέκονται και άλλοι παράγοντες χημείας εκτός από τον έναν ενισχυμένο, και παίρνουν κανονικές τιμές, όπως συμβαίνει στον Γαλαξία μας.

Αυτή η προσέγγιση που μας βοηθάει να αναγνωρίσουμε μόρια ως πολύτιμους ανιχνευτές σε γαλαξίες με ένα μοναδικό κυρίαρχο φυσικό χαρακτηριστικό, είναι και υπεραπλουστευμένη. Για παράδειγμα, οι γαλαξίες με έντονο πεδίο UV, μπορεί να έχουν πολλά αστέρια μεγάλης μάζας που να το δημιουργούν. Όμως αυτά παράγουν και ένα πολύ ισχυρό ρεύμα κοσμικής ακτινοβολίας. Άρα αυτοί οι γαλαξίες έχουν ενισχυμένη υπεριώδης, αλλά και ενισχυμένη κοσμική ακτινοβολία. Έτσι είναι απαραίτητο να έχουμε πρόβλεψη από πιο ρεαλιστικά μοντέλα, όπου περιλαμβάνονται όλοι οι φυσικοί παράγοντες (ένταση του πεδίου ακτινοβολίας, ροή κοσμικής ακτινοβολίας, πυκνότητα, αναλογία σκόνης/ αερίου κ.λπ.) με τιμές που αντιστοιχούν σε κάθε τύπο γαλαξία. Θα εξετάσουμε διαφορετικούς ρεαλιστικούς τύπους γαλαξιών που έχουν αναγνωριστεί από την μορφολογία τους και τις φυσικές διαδικασίες που τους χαρακτηρίζουν. Στην πραγματικότητα βέβαια αυτοί οι τύποι γαλαξιών δεν είναι αυστηρά ξεχωριστοί και μάλλον αλληλεπικαλύπτονται.

### **.Μοριακοί ανιχνευτές σε γαλαξίες με έντονο πεδίο UV ακτινοβολίας.**

Τα μοριακά νέφη σε γαλαξίες αστρογέννησης (starburst, SB) όπως οι M83, NGC253 κατατάσσονται χονδρικά σε χημικά μοντέλα με τιμές για την μεταλλικότητα, την αναλογία σκόνης με αέριο, τον βαθμό σχηματισμού (H<sub>2</sub>), τον βαθμό ιονισμού από την κοσμική ακτινοβολία και τις αφθονίες των στοιχείων κοντά σε αυτές του Γαλαξία μας. Τα νέφη αυτά δείχνουν πυκνότητα υδρογόνου 10000/ cm<sup>3</sup> και μεγάλη εξάλειψη φωτός (8 mag). Η ένταση της υπεριώδης που διεισδύει σε αυτά είναι πολύ μεγάλη, 100 χιλιάδες φορές αυτή στον Γαλαξία μας.

Άλλοι γαλαξίες, όπως οι Agr220, NGC3079 έχουν πτυχές χαρακτηριστικών γαλαξιών αστρογέννησης αλλά και παρουσιάζουν ενεργό πυρήνα. Αυτοί οι SB+ AGN γαλαξίες περιλαμβάνονται σε χημικά μοντέλα με όμοιες παραμέτρους με αυτά των SB, αλλά με UV ελαττωμένη κατά 100 φορές (λόγω χαμηλότερου ρυθμού αστρογέννησης) και ανάλογα ενισχυμένη κατά 100 φορές κοσμική ακτινοβολία (όσο και στους AGN).

Σε μεγάλες τιμές ερυθρολίσησης, οι ιδιότητες των γαλαξιών είναι ακόμα πιο αβέβαιες, αλλά για τον APM 08279 (μεγάλης ανάλυσης μέσω βαρυτικού φακού Κβάζαρ με  $z=2,56$ ) έχουν ανιχνευτεί πολλά μόρια σε πυκνό και σε μη πυκνό αέριο. Αυτοί οι γαλαξίες αντιπροσωπεύονται χονδρικά στα χημικά μοντέλα μέσω της μεταλλικότητας, της αναλογίας σκόνης/ αερίου, τον βαθμό σχηματισμού (H<sub>2</sub>) και



την αφθονία στοιχείων, όλα κατά 10 φορές μικρότερα από ότι στον Γαλαξία μας, αλλά με ένα μεγάλης έντασης πεδίο UV και πολύ μεγάλο βαθμό ιονισμού μέσω της κοσμικής ακτινοβολίας.

Υπάρχουν πολλοί γνωστοί και πιθανοί ανιχνευτές των PDR σε αυτούς τους γαλαξίες. Πολύ μεγάλη αφθονία παρουσιάζουν, αναμενόμενα, τα (CO), (H<sub>2</sub>O), ενώ τα (CS), (CN), (OH) έχουν μικρότερη αφθονία, αλλά είναι και αυτά καλοί ανιχνευτές. Τα (HCN), (HNC), (HCO<sup>+</sup>), που είναι συχνά ανιχνευτές του πυκνού αερίου των γαλαξιών, έχουν μικρές τιμές. Το συμπέρασμα είναι ότι υπάρχουν πολλοί μη δοκιμασμένοι ανιχνευτές για τις PDR στους γαλαξίες.

### .Μόρια καυτών πυρήνων στους γαλαξίες

Ο σχηματισμός αστερών μεγάλης μάζας προϋποθέτει τον σχηματισμό πυκνών καυτών πυρήνων που περιέχουν χαρακτηριστικά, σχετικά μεγάλα μόρια. Αυτά τα μόρια δημιουργούνται σε πλούσιες χημικές αντιδράσεις στερεής φάσης σε μανδύες πάγου της μεσοαστρικής σκόνης, και απελευθερώνονται όταν ο πάγος ζεσταθεί κατά την δημιουργία των αστερών. Το μεσοαστρικό πεδίο ακτινοβολίας του γαλαξία είναι ασήμαντο για τη χημεία των καυτών πυρήνων, επειδή έχουν πολύ μεγάλη οπτική αδιαπερατότητα, λόγω πυκνότητας. Αυτά τα μόρια είναι καλοί ανιχνευτές σχηματισμού άστρων μεγάλης μάζας. Οι καυτοί πυρήνες υπάρχουν και σε κανονικούς και σε γαλαξίες αστρογέννησης. Για την παρατήρησή τους δεν χρειάζεται ο γαλαξίας να μπορεί να αναλυθεί χωρικά. Η ολοκληρωμένη εκπομπή από τους καυτούς πυρήνες μας δίνει μια άμεση και ανεξάρτητη μέτρηση για τον στιγμιαίο βαθμό αστρογέννησης, ώστε να μπορούμε να έχουμε μετρήσεις από μακρινούς γαλαξίες. Το αβέβαιο είναι το πλήθος των καυτών πυρήνων σε έναν γαλαξία. Στον δικό μας εκτιμάμε να έχουμε 10000, και να γεννιέται ένα αστέρι τον χρόνο. Άλλοι γαλαξίες έχουν κατά τάξεις μεγέθους πιο έντονη αστρογέννηση, και αν ο αριθμός των καυτών πυρήνων είναι ανάλογος με την αστρογέννηση, μπορεί να έχουν και 10 εκατομμύρια καυτούς πυρήνες.

Εδώ θα αναλύσουμε την πρόβλεψη των χημικών μοντέλων των καυτών πυρήνων σε διάφορα γενικά μοντέλα γαλαξιών. Στους τυπικούς σπειροειδείς, όπως οι IC342, NGC4736 έχουμε ένα μοντέλο με παραμέτρους του Γαλαξία μας που περιλαμβάνει καυτούς πυρήνες θερμοκρασίας 300K. Σε έναν γαλαξία αστρογέννησης όπως ο M83 περιμένουμε να είναι μεγαλύτερες οι θερμοκρασίες των καυτών πυρήνων (500K).

Μας είναι γνωστό ότι κάποιοι γαλαξίες έχουν χαμηλή μεταλλικότητα (IC 10). Για αυτούς υπολογίζουμε χαμηλότερη μεταλλικότητα από ότι στον Γαλαξία μας κατά 5 φορές και θερμοκρασία καυτού πυρήνα 500K, αν είναι αστρογέννησης, όπως είναι οριακά ο IC 10. Αλλιώς χρησιμοποιούμε τις παραμέτρους του Γαλαξία μας.

Τέλος, έχουμε ένα μοντέλο για καυτούς πυρήνες σε γαλαξίες μεγάλης ερυθρολίσθησης όπως ο Cloverleaf ή ο APM 08279. Οι φυσικοί παράμετροι αυτών των γαλαξιών είναι άγνωστοι, αλλά βάσει της ερυθρολίσθησης υπολογίζουμε την μεταλλικότητα και την σκόνη σε αυτούς ελαττωμένες κατά παράγοντα 20 (πρόκειται για πολύ μακρινούς, άρα νεαρούς γαλαξίες), τον ιονισμό από την κοσμική

ακτινοβολία αυξημένο κατά παράγοντα 10 (όλα σε σχέση με τον δικό μας Γαλαξία), και την θερμοκρασία των καυτών πυρήνων στους 500K.

Αυτά τα μοντέλα είναι μόνο αντιπροσωπευτικά και δεν πρέπει να γενικεύονται για κάθε μεμονωμένη πηγή.

Υπάρχει σχετικός πίνακας των μορίων που ανιχνεύονται σε κάθε τύπο γαλαξία. Πρέπει να έχουμε επιφυλάξεις για διαφορές ανάμεσα στους ίδιους ανιχνευτές σε άλλο τύπο γαλαξία (είναι πιο δύσκολο να ξεχωρίσουμε τους καυτούς πυρήνες σε κανονικούς σπειροειδείς από αυτούς σε γαλαξίες αστρογέννησης). Ακόμα και σε μεγάλη ερυθρολίσθηση, όπου η μεταλλικότητα είναι πολύ λιγότερη, κάποια μόρια καυτών πυρήνων έχουν μεγάλη σχετική αφθονία και ανιχνεύονται εύκολα ((HCN), (HNC), (CS), (H<sub>2</sub>CS), (CH<sub>3</sub>CN)).

### Ανάλυση γαλαξιακού περιεχομένου.

Μεγάλο μέρος της μάζας του μεσοαστρικού αερίου στους γαλαξίες βρίσκεται στις PDR. Υπάρχει σχετικός πίνακας με τους ανιχνευτές για κάθε τύπο γαλαξία. Αν υπάρχει και άλλη πηγή ενέργειας, όπως στους AGN, αλλάζει το εύρος των ανιχνευτών που μπορούν να αναγνωριστούν. Η αστρογέννηση μπορεί να υπολογιστεί από τους ανιχνευτές καυτών πυρήνων, ακόμα και σε μη αναλύσιμους γαλαξίες. Σε κοντινούς γαλαξίες έχουμε αναλύσει τις πληροφορίες των μοριακών γραμμών, κατανοώντας έτσι την φύση των πηγών ενέργειας και την εξέλιξη αυτών των γαλαξιών (NGC253, M82, NGC1068).

### .Πρόσφατες μελέτες μοριακών γραμμών στους γαλαξίες.

Κανονικοί σπειροειδείς γαλαξίες.

Σπειροειδής γαλαξίας είναι ένας πλατύς, περιστρεφόμενος και σχετικά λεπτός δίσκος από αστέρια, αέριο και σκόνη. Έχει σπειροειδείς βραχίονες, που εξελίσσονται από το κέντρο του και εκτείνονται στο επίπεδο του δίσκου, και μια σφαιρική συγκέντρωση αστεριών στο κέντρο. Το πολύπλοκο αυτό σύστημα περιβάλλεται από μια αραιή σφαιροειδής άλω αστεριών, που περιέχει τα σφαιρωτά σμήνη. Η περισσότερη αστρογέννηση γίνεται στους βραχίονες του δίσκου, όπου υπάρχουν τα μεγάλα μοριακά νέφη (GMC). Αυτά τα νέφη στους βραχίονες εκπέμπουν σε μήκη κύματος χιλιοστών. Τα νεαρά αστέρια μεγάλης μάζας και οι περιοχές (HII) που δημιουργούν εκπέμπουν στο ορατό, και η θερμαινόμενη σκόνη, από τα αστέρια που είναι εμβαπτισμένα σε σκοτεινά νέφη, στο υπέρυθρο. Οι σπειροειδείς βραχίονες σε πολλούς γαλαξίες, όπως ο δικός μας, αναπτύσσονται από μια ράβδο κατά μήκος του γαλαξιακού κέντρου. Αυτοί οι γαλαξίες ονομάζονται σπειροειδείς ραβδωτοί.

Οι σπειροειδείς γαλαξίες έχουν ποικιλία από διαφορετικά περιβάλλοντα για μελέτη του μοριακού αερίου. Οι σπειροειδείς έχουν χαρτογραφηθεί στις παρατηρήσεις στα χιλιοστόμετρα του (CO) και οι σπείρες έχουν καταταγεί σε υποκατηγορίες ανάλογα με το μοριακό τους περιεχόμενο, που έχει μεγάλη ποικιλία.

Οι παρατηρήσεις του (CO) από μεμονωμένα πιάτα τηλεσκοπίων με σχετικά μικρή γωνιακή ανάλυση, χρησιμοποιήθηκαν για να αντλήσουμε τις ιδιότητες του μοριακού αερίου, όπως τη συνολική μάζα του, την αναλογία σε (H<sub>1</sub>), την μεταλλικότητα, την μορφολογία και την αστρογέννηση σε αυτό. Όπως και για κάθε άλλο τύπο γαλαξία, ο σταθερός συντελεστής μετατροπής μεταξύ (H<sub>2</sub>) και (CO), που χρησιμοποιείται για την εξακρίβωση της μοριακής μάζας από τις παρατηρήσεις του (CO), είναι αναξιόπιστος. Ο συντελεστής εξαρτάται από τις φυσικές συνθήκες. Παρ' όλα αυτά, η παρατήρηση του (CO) είναι σημαντική για τον καθορισμό των περιοχών μοριακού αερίου στις σπείρες.

Υπάρχουν πολύ λίγα δεδομένα παρατηρήσεων άλλων μορίων σε σπειροειδείς γαλαξίες. Τα (HCN), (HCO<sup>+</sup>) έχουν παρατηρηθεί σε μερικά GMC στον γαλαξία της Ανδρομέδας, και η σχέση (HCN)/ (HCO<sup>+</sup>) είναι αυξημένη σε σχέση με ότι στον Γαλαξία μας, αλλά μικρότερη από ότι στους Γαλαξίες αστρογέννησης. Το συμπέρασμα είναι ότι τα πεδία ακτινοβολίας είναι πιο δυνατά σε γαλαξίες αστρογέννησης από ότι στους σπειροειδείς γαλαξίες.

#### .Γαλαξίες προγενέστερου (early) τύπου.

Εδώ περιλαμβάνονται διαφορετικοί τύποι γαλαξιών, όπως οι ελλειπτικοί και οι φακοειδείς. Μέχρι πρόσφατα νομίζαμε ότι αυτοί ήταν οι τελικοί τύποι της γαλαξιακής εξέλιξης, επειδή έχουν ομαλό κόκκινο χρώμα στο οπτικό φάσμα και η θέση τους στο οπτικό διάγραμμα χρώματος/ λαμπρότητας είναι σε μια στενή κόκκινη ακολουθία. Ο διαχωρισμός των γαλαξιών προγενέστερου τύπου και των γαλαξιών αστρογέννησης σε ένα τέτοιο διάγραμμα συνεπάγεται ότι η ικανή για αστρογέννηση ύλη στους πρώτους πρέπει να καταναλώθηκε, να καταστράφηκε ή να απομακρύνθηκε σε ένα εύλογο σύντομο χρονικό διάστημα. Έχουν προταθεί πολλοί μηχανισμοί απομάκρυνσης, όλοι ικανοί να αφήσουν αυτούς τους γαλαξίες στην κόκκινη ακολουθία (μακριά από το μπλε της αστρογέννησης), με λίγο ή καθόλου ψυχρό μεσοαστρικό αέριο, και με λίγη ή καθόλου αστρογέννηση.

Όμως, οι παρατηρήσεις αποθηκών ουδέτερου υδρογόνου και σκόνης, όπως και αυξημένης UV που δεν δικαιολογείται από πληθυσμό παλαιών αστεριών, σημαίνει ότι κάποιος από τους γαλαξίες αυτούς έχουν απόθεμα ψυχρού αερίου και παρουσιάζουν αστρογέννηση. Από το (CO) που έχουμε αποκαλύπτει προκύπτει μοριακό αέριο αναλογίας 30% του συνολικού τους αερίου. Σε 260 γαλαξίες αυτών των τύπων βρίσκουμε μέσω παρατήρησης του (CO) ότι περιέχουν ο καθένας 10 εκατ. ως 1 δις ηλιακές μάζες (H<sub>2</sub>). Θεωρητικές μελέτες του μοριακού αερίου σε πλούσιους σε μέταλλα γαλαξίες προγενέστερου τύπου δείχνουν ότι στις PDR οι σχετικές αναλογίες μερικών ειδών όπως (CS), (H<sub>2</sub>S), (H<sub>2</sub>CS), (H<sub>2</sub>O), (H<sub>3</sub>O<sup>+</sup>), (HCO<sup>+</sup>), (H<sub>2</sub>CN) δείχνουν να είναι αμετάβλητες σε αύξηση της μεταλλικότητας, ενώ τα (C<sup>+</sup>), (CO), (C<sub>2</sub>H), (CN), (HCN), (HNC) είναι πιο ευαίσθητα σε αυτήν. Πιστεύουμε ότι οι γαλαξίες προγενέστερου τύπου έχουν ενισχυμένα στοιχεία α (στοιχεία με πυρήνα πολλαπλάσιο του στοιχείου ήλιου). Τα πιο ευαίσθητα είδη στην μεταβολή της σχετικής αφθονίας στοιχείων α είναι τα (C<sup>+</sup>), (C), (CN), (HCN), (HNC), (SO), (SO<sub>2</sub>), (H<sub>2</sub>O), (CS).

## .Γαλαξίες αστρογέννησης.

Είναι πολύ λαμπροί γαλαξίες λόγω της έντονης γέννησης αστεριών μεγάλης μάζας . Αστέρια με χίλιες και δεκάδες χιλιάδες φορές την λαμπρότητα του Ηλίου μας υπάρχουν σε αυτούς τους γαλαξίες σε σμήνη, μέσα σε μοριακά νέφη με πολύ σκόνη. Επειδή η ζωή των μεγάλης μάζας αστεριών είναι μικρή, έχουμε ενεργή και πλούσια χημεία στο περιβάλλον αέριο, μέσω εμπλουτισμού από την εξέλιξη των αστεριών.

Τους ανακαλύπτουμε με πολλούς έμμεσους τρόπους, από την επίδραση των μεγάλης μάζας αστεριών τους. Βλέπουμε ισχυρή εκπομπή και συνεχές στο ορατό και υπέρυθρη εκπομπή από τη σκόνη που θερμαίνονται. Υπάρχει ισχυρή σχέση μεταξύ της θερμικής στο μακρινό υπέρυθρο εκπομπής και της μη θερμικής στα ραδιοκύματα. Η μάζα των βραχύχρονων μεγάλης μάζας αστεριών ξεπερνάει τα 100 εκ. ηλιακές. Πιθανώς το ξέσπασμα αστρογέννησης να οφείλεται σε συγχωνεύσεις γαλαξιών ή γαλαξία με πλούσιο μεσογαλαξιακό αέριο (ίσως από συσώρευση).

Σε αυτούς τους γαλαξίες έχουμε ανιχνεύσει πολλά είδη μορίων στα χιλιοστόμετρα. Αυτά έχουν μοναδική σημασία, γιατί η παρατήρηση του (CO) και άλλων ειδών μπορεί να μας δώσει την πυκνότητα του μοριακού υδρογόνου και την μοριακή μάζα του γαλαξία, καθώς και τον ρυθμό αστρογέννησης. Η αναλογία (CO)/ (H<sub>2</sub>) δεν είναι η συνήθης, γιατί επηρεάζεται από την μεγάλη υπεριώδης ακτινοβολία. Οι γαλαξίες αυτοί είναι πολύ λαμπροί στο (CO), και η λαμπρότητα του (CO) έχει μεγάλη σχέση με την ροή στο μακρινό υπέρυθρο. Η μοριακή μάζα των γαλαξιών αστρογέννησης κυμαίνεται από 1 ως 10 δις ηλιακές και το περισσότερο (CO) τους είναι συγκεντρωμένο προς το γαλαξιακό κέντρο.

Το (CO) δεν είναι το μόνο μόριο που παρατηρούμε στους γαλαξίες αστρογέννησης. Έχουμε βρει 45 άλλα μόρια. Χρησιμοποιούμε ως παράδειγμα τους κοντινούς NGC253, M82 για την ποικιλία των μορίων και τι μας δείχνουν για την δυναμική της αστρογέννησης.

Και οι δυο γαλαξίες, ιδίως τα κέντρα τους, μελετιούνται στα υποχιλιοστόμετρα. Είναι κλασσικοί γαλαξίες αστρογέννησης, με λαμπρότητα υπέρυθρου 30 δις ηλιακές και με ισχυρό συνεχές στα ραδιοκύματα. Βρίσκονται σχετικά κοντά στον δικό μας Γαλαξία. Οι σχετικές αφθονίες των μορίων είναι πολύ συγκρίσιμες με αυτές σε μοριακά νέφη στο κέντρο του Γαλαξία μας, έτσι πιστεύουμε ότι κυριαρχούνται από μικρής ταχύτητας κρουστικά μέτωπα.

Πιο αναλυτικά όμως, η χημεία του NGC 253 διαφέρει με αυτήν του M82. Η χημεία και σε μεγάλο βαθμό η θέρμανση στην κεντρική περιοχή του πρώτου κυριαρχείται από μεγάλης κλίμακας κρουστικά μέτωπα χαμηλής ταχύτητας. Εκεί έχουμε την ίδια χημική σύνθεση με περιοχές αστρογέννησης του Γαλαξία μας. Αυτό δείχνει ότι στον NGC253 έχουμε ένα αρχαιότερο στάδιο αστρογέννησης από ότι στον M82. Οι αφθονίες των (SiO), (CH<sub>3</sub>OH), (HNCO), (CH<sub>3</sub>CN), (NH<sub>3</sub>) είναι χαμηλότερες στον M82, ενώ τα (HCO), (C<sub>3</sub>H<sub>2</sub>) είναι πιο άφθονα. Αυτό σημαίνει ότι ο M82 έχει

περισσότερη χημεία PDR από ότι ο NGC253, επειδή έχει περισσότερες περιοχές (HII).

Ο μηχανισμός θέρμανσης μέσω της εντατικής υπεριώδης από τα μεγάλα νεαρά αστέρια είναι μάλλον η μεταγενέστερη φάση εξέλιξης των γαλαξιών αστρογέννησης, όπου τα σμήνη των άστρων αυτών δημιουργούν τις μεγάλες PDR. Αυτό ισχύει για το M82, όπου έχουμε μεγάλη αφθονία ειδών όπως τα (HCO), (HOC+), (CO+), (H<sub>2</sub>O+), που υποτίθεται ότι είναι δείκτες μεγάλου βαθμού ιονισμού σε μεγάλες PDR. Οι παρατηρήσεις δείχνουν σημαντική ενίσχυση του (HCO+) σε περιοχές υψηλού ιονισμού. Η αναλογία αφθονίας (HCO+)/ (HOC+) = 270 που έχουμε στο πρότυπο PDR στον Ωρίωνα βρέθηκε ακόμα και μειωμένη σε άλλες γαλαξιακές και εξωγαλαξιακές PDR (NGC7023, SgrB2(OH), NGC2024). Αυτό είναι μια αντίθεση με τις κατά 1000 φορές πιο μεγάλες αναλογίες που βρίσκουμε σε πυκνά μοριακά νέφη, που είναι καλά προστατευμένα από την UV. Όμως αυτές τις παραπάνω χαμηλές αναλογίες δεν τις βρήκαμε σε άλλες γαλαξιακές PDR.

#### .Γαλαξίες κυριαρχούμενοι από ενεργό γαλαξιακό πυρήνα (AGN).

Μερικοί γαλαξίες έχουν και ενεργό πυρήνα και εκτεταμένη αστρογέννηση. Η σύνδεση των 2 αυτών ιδιοτήτων δεν έχει κατανοηθεί καλά, αλλά η παρουσία μεγάλης ποσότητας αερίου γύρω από το κέντρο του γαλαξία σημαίνει αλληλεπίδραση του μοριακού αερίου, που τροφοδοτεί την αστρογέννηση, με το βαρυτικό κέντρο όπου βρίσκεται ο ενεργός γαλαξιακός πυρήνας.

Σε αυτήν την κατηγορία είναι ο NGC 3079. Είναι λογικό να υποθέσουμε ότι τέτοιοι γαλαξίες έχουν (κατά παράγοντα 100) ενισχυμένο ιονισμό από την κοσμική ακτινοβολία σε σχέση με κανονικούς σπειροειδείς, και 1000 φορές ισχυρότερο πεδίο ακτινοβολίας. Δεν υπάρχει συγκεκριμένος μοριακός ανιχνευτής αυτών των πολύπλοκων αντικειμένων. Τα μόρια που ανιχνεύουμε εκεί είναι επίσης χαρακτηριστικά για <καθαρούς> γαλαξίες αστρογέννησης ή για σπειροειδείς. Οι παρατηρήσεις δείχνουν ότι η αφθονία μερικών ειδών, όπως των (HCN)/(HCO+) βοηθάει στην ανίχνευση της ενεργειακής διαδικασίας που κυριαρχεί σε αυτούς τους πολύπλοκους γαλαξίες. Όμως οι χημικές αντιδράσεις αυτών των μορίων εξαρτώνται από τις χημικές και φυσικές συνθήκες του αερίου. Μερικά μοντέλα δείχνουν, για παράδειγμα, ότι το (HCO+) ενισχύεται στις περιοχές κυριαρχίας από τις ακτίνες X, ενώ άλλα μοντέλα δείχνουν το αντίθετο. Είδη όπως το (HCO+) είναι πολύ ευαίσθητα σε αλλαγές παραμέτρων, και η αφθονία τους μπορεί να κυμαίνεται κατά μερικές τάξεις μεγέθους, κατά την χημική εξέλιξη ή λόγω διακύμανσης της κοσμικής ακτινοβολίας ή της διακύμανσης της υπεριώδης αστρικής ακτινοβολίας.

#### .Υπερ- λαμπροί γαλαξίες υπερθύρου (Ultra- Luminous Infrared Galaxies, ULIRG).

Αυτοί οι γαλαξίες είναι αντικείμενα με πολύ σκόνη, στα οποία η υπεριώδης ακτινοβολία που παράγεται από τα πρωτοαστέρια απορροφάται από σκόνη και επανεκπέμπεται στο υπέρυθρο, στα 100 μm. Αυτά τα αντικείμενα μπορούν να είναι

εκατό φορές πιο λαμπρά στις υπέρυθρες από ότι στο ορατό φάσμα.

Τροφοδοτούνται από ενεργούς γαλαξιακούς πυρήνες (AGN) και αστρογέννηση. Η μελέτη των μορίων του μεσοαστρικού αερίου σε αυτά δείχνει την υπογραφή και των δυο παραγόντων. Για παράδειγμα, η παρουσία άφθονης ποσότητας μοριακού αερίου έχει τεκμηριωθεί από τις μετρήσεις του (CO) (10 δις ηλιακές μάζες), που μας δείχνει το μέγεθος της αστρογέννησης (ορισμένη ως το κλάσμα της λαμπρότητας L στο μακρινό υπέρυθρο προς την μάζα M του μοριακού αερίου) σε 20-200 L Ηλίου/M Ηλίου, ενώ στους κανονικούς σπειροειδείς γαλαξίες το κλάσμα αυτό είναι 4 L Ηλίου/1 M Ηλίου. Αυτή η αναλογία είναι μεγαλύτερη από ότι σε γαλαξίες αστρογέννησης, όπως ο M82. Από την άλλη, οι παρατηρήσεις των εκπομπών των πολυκυκλικών αρωματικών υδρογονανθράκων (PAH) και της σκόνης πυριτίου δείχνουν την παρουσία του (μερικές φορές κρυμμένου) ενεργού γαλαξιακού πυρήνα. Το αν οι ULIRG κυριαρχούνται από αστρογέννηση ή AGN είναι ακόμα συζητήσιμο.

Ο γαλαξίας Arp 220 θεωρείται ο πρωτότυπος ULIRG. Οι συμβολομετρικές εικόνες της εκπομπής του (CO1-0) και των εκπομπών (HCN), (HCO+) δείχνουν ότι το 90% της δυναμικής μάζας του συστήματος και το 75% της μοριακής μάζας είναι περιορισμένο σε έναν κεντρικό πυρήνα με 600 pc διάμετρο. Η διασπορά του (CO3-2) δείχνει ότι υπάρχουν 3 πυκνές κορυφές, οι δύο στον διπλό πυρήνα και η τρίτη σε έναν εκτεταμένο δίσκο με διεύθυνση ND-BA, αλλά ξεχωριστά από τις λωρίδες σκόνης που παρατηρούμε στο οπτικό.

Οι μεγάλες λαμπρότητες του Arp 220 στο υπέρυθρο και στην εκπομπή του (CO1-0) τον κάνουν ιδανικό στόχο απογραφής εξωγαλαξιακών μορίων. Έχουν παρατηρηθεί σε αυτόν γραμμές χαμηλού J του (CS), (HCN) και (HCO+), και όλες αυτές δείχνουν ότι υπάρχει αφθονία αερίου υψηλής πυκνότητας ( $>100000/\text{cm}^3$ ). Η συστηματική αλλαγή του προφίλ των φασματικών γραμμών, όσο μεγαλώνει η πυκνότητα του αερίου, είναι ένδειξη ότι στα ULIRG συμβαίνουν διαχωρισμοί αέριας φάσης σε μεγάλη κλίμακα. Έτσι μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε μοριακές γραμμές υψηλού J /υψηλής διπολικότητας για να συμπεράνουμε την χαλάρωση του αερίου στον Arp220, απλά συγκρίνοντας τα προφίλ των γραμμών με ευρέως διαφορετικές απαιτήσεις εκτέλεσης. Βεβαίως, αυτός ο γαλαξίας περιέχει πολλαπλές φάσεις μοριακού αερίου, και οι παρατηρήσεις των μορίων δείχνουν ότι υπάρχει τουλάχιστον ένας διάχυτος αδέσμευτος τομέας του γαλαξία (100- 1000/  $\text{cm}^3$ ), καθώς και ένας πυκνότερος ( 100000- 1 εκ / $\text{cm}^3$ ) τομέας που περιέχεται στον όγκο της μοριακής μάζας. Οι πολύ ερεθισμένου (HCN) περιστροφικές μεταβάσεις και οι υψηλού J μεταβάσεις αντιστοιχούν σε μια φάση αερίου που είναι 10-100 φορές πυκνότερη από αυτήν σε χαμηλές τιμές της γραμμής (HCO+). Έτσι το (HCN) ανιχνεύει πυκνότερη φάση αερίου από το (HCO+).

Στον γαλαξία αυτόν έχει ανιχνευτεί (H<sub>3</sub>O<sup>+</sup>), και η σχετική αφθονία του εκτιμάται στην υψηλή τιμή του (2-10 X 10<sup>στη-9</sup>). Ενώ τα μοντέλα των γραμμών ακτινοβολίας X φαίνονται να είναι τα καλύτερα για την αναπαραγωγή των παρατηρήσεων του Arp 220, μπορούμε να δούμε την μεγάλη αφθονία αυτού του ιόντος σε χαμηλή (σε PDR)

όπως και σε υψηλή (πυκνό αέριο αστρογέννησης) εξάλειψη αστρικού φωτός. Σε μεγάλη εξάλειψη, που μπορεί να αντιπροσωπεύει την κεντρική περιοχή του γαλαξία, η αφθονία είναι ακόμη μεγαλύτερη.

Ένα άλλο ενδιαφέρον αντικείμενο στην πρόσφατη μελέτη των μοριακών εκπομπών είναι το ULIRG Mrk 231. Σε φάσματα υψηλής ανάλυσης από το Herschel διακρίνεται η παρουσία ιόντων όπως τα (OH<sup>+</sup>), (CH<sup>+</sup>) και (H<sub>2</sub>O<sup>+</sup>). Μεγάλης κλίμακας αφθονίες (το λιγότερο 10<sup>ση</sup> -10) αυτών των 3 ιόντων μπορούν να βρεθούν σε περιβάλλοντα με χαμηλή μεταλλικότητα (0,1 την ηλιακή), υψηλό ιονισμό από κοσμική ακτινοβολία και μικρή ορατή εξάλειψη. Οι μεγάλες αφθονίες αυτών των ιόντων εξηγούνται συχνά από την ανάμειξη της χημείας XDR. Στην πράξη, ο καθορισμός της προέλευσης της εκπομπής από τους ULIRG όπως ο Mrk 231 είναι σημαντικός όταν υπάρχει παρουσία και των δύο πηγών ενέργειας (κοσμική ακτινοβολία και ακτίνες X).

### .Νάνοι γαλαξίες.

Παρά το γεγονός ότι πολλοί νάνοι γαλαξίες παρουσιάζουν αστρογέννηση, άρα πρέπει να υπάρχει μεσοαστρικό αέριο, η ανίχνευση μορίων σε αυτούς είναι εμφανώς περιορισμένη. Δεν έχει ξεκαθαρίσει ακόμη αν η έλλειψη διάσπαρτου (CO) σημαίνει έλλειψη μοριακού υδρογόνου ή αν το (CO) σε αυτά τα αντικείμενα είναι αδύναμος ανιχνευτής του (H<sub>2</sub>). Αυτά τα αντικείμενα είναι ενδιαφέροντα, γιατί υποτίθεται ότι είναι κρίσιμα δομικά υλικά πολλών μεγάλων γαλαξιών. Έχουμε αποδείξεις ότι πολλοί νάνοι γαλαξίες στη συμπαντική μας γειτονιά έχουν πολύ νεαρότερο αστρικό πληθυσμό από τους μεγάλους γαλαξίες. Μια σημαντική αιτία αυτής της ασάφειας είναι ότι υπάρχει έλλειψη ακριβών μετρήσεων αυτών των μεσοαστρικών περιοχών των νάνων γαλαξιών. Τα τελευταία χρόνια έχουμε πετύχει ανίχνευση (CO) σε μεγάλο εύρος νάνους γαλαξίες χαμηλής μεταλλικότητας, και φαίνεται να υπάρχει σχέση μεταξύ της παρουσίας του (CO) και της δημιουργίας αστεριών μεγάλης μάζας. Επίσης βρέθηκε ότι η μη ανίχνευση του (CO) συσχετίζεται με φτωχούς σε μέταλλα μικρής μάζας γαλαξίες, που μάλλον σημαίνει ότι το (CO) δεν ανιχνεύει σε αυτούς τους γαλαξίες το μοριακό υδρογόνο.

Δεν έχουν ανιχνευτεί άλλα μόρια στους νάνους και το (CO) παραμένει η καλύτερη ελπίδα μας στην ανίχνευση αερίου αστρογέννησης σε αυτούς.

### Αστρογέννηση και συνιστώσα αρχική μάζας (Initial mass function, IMF).

Είδαμε ότι το χρονοδιάγραμμα της δημιουργίας αστέρων μικρής μάζας κυμαίνεται με τις αλλαγές στις τοπικές παραμέτρους όπως η πυκνότητα, η μεταλλικότητα, η ροή της κοσμικής ακτινοβολίας και η ένταση της υπεριώδης. Αυτό μας δείχνει ότι υπάρχουν συνδυασμοί παραμέτρων που επιτρέπουν την δημιουργία αστέρων μικρής μάζας (όπως στον Γαλαξία μας), ενώ άλλοι αποκλείουν την δημιουργία αστέρων μικρής μάζας. Αν υποθέσουμε ότι η δημιουργία αστέρων μεγάλης μάζας δεν συνδέεται με την δημιουργία αστέρων μικρής μάζας (τα αστερία μεγάλης μάζας συνήθως σχηματίζονται μετά από γεγονότα μεγάλης δυναμικής όπως η έκρηξη

σουπερνόβα), τότε συγκεκριμένες φυσικές συνθήκες μπορούν να δημιουργήσουν μια συμβατική συνιστώσα αρχικής μάζας (IMF, initial mass function) όπως στον Γαλαξία μας, όπου σε κάθε αστέρι μεγάλης μάζας αντιστοιχούν πολλά μικρής μάζας. Άλλες συνθήκες μπορούν να δημιουργήσουν πολύ <βαριάς κορυφής> (top heavy, να υπάρχουν πολλά αστέρια στο επάνω μέρος στο διάγραμμα των μαζών των αστεριών, δηλαδή στις μεγάλες αστρικές μάζες ) συνιστώσα αρχική μάζας.

Οι συνθήκες που υποβαθμίζουν την δημιουργία αστεριών μικρής μάζας (και οδηγούν σε IMF βαριάς κορυφής) είναι τα πεδία υπεριώδης ακτινοβολίας μεγάλης έντασης και η μεγάλη ροή κοσμικής ακτινοβολίας με μεταλλικότητα όμοια του Ηλίου. Αυτές οι συνθήκες βρίσκονται σε ενεργούς γαλαξίες μεγάλης ερυθρολίθωσης. Άλλοι γαλαξιακοί τύποι με IMF βαριάς κορυφής είναι γαλαξίες όμοιοι του δικού μας, αλλά με χαμηλή μεταλλικότητα (δεν ψύχεται αρκετά το αέριο, έτσι καταρρέουν μόνο μεγάλες περιοχές που θα δώσουν μεγάλα αστέρια, όπως έγινε με τα πρώτα αστέρια του σύμπαντος). Αν αυτές οι παραδοχές είναι σωστές, τότε όχι μόνο μπορούμε να προσδιορίσουμε την μορφή της IMF σε μακρινούς γαλαξίες, αλλά και να χρησιμοποιήσουμε τις μοριακές εκπομπές που υποστηρίζουν αυτή την πρόβλεψη. Η περιστροφική εκπομπή του (CO) φαίνεται να εξαρτάται σημαντικά από την μεταλλικότητα και την δραστηριότητα σε έναν γαλαξία. Εκπομπές άλλων μορίων ((HCN), (HNC), (CN)) μας δείχνουν την μεταλλικότητα. Έτσι μια συνδυασμένη προσέγγιση μπορεί να καθορίσει χονδρικά την IMF και την μεταλλικότητα των γαλαξιών μεγάλης ερυθρολίθωσης.

### .Μόρια στο σμήνος γαλαξιών του Περσέα

Είδαμε ότι η αλληλεπίδραση μεταξύ γαλαξιών μπορεί να αυξήσει την αστρογέννηση, τροφοδοτώντας τις περιοχές αυτές με νέα μεσοαστρική ύλη. Τα μεγάλα σμήνη γαλαξιών σε αλληλεπίδραση έχουν πιο δραματικές συνέπειες. Μπορεί να δημιουργήσουν ένα νέο φαινόμενο που δεν υπάρχει σε μεμονωμένους γαλαξίες ή σε ζευγάρια γαλαξιών.

Το πιο καλά μελετημένο σμήνος είναι αυτό του Περσέα, με τον γαλαξία NGC 1275 στο κέντρο του. Αυτό το σμήνος είναι ένα από τα κοντινότερά μας (80Mpc). Το σμήνος εκπέμπει ισχυρά στις ακτίνες X και στα ραδιοκύματα, ως συνέπεια της συσσώρευσης μεσογαλαξιακής ύλης στον NGC 1275. Το σμήνος του Περσέα είναι μέρος ενός μεγαλύτερου συμπλέγματος, του σμήνος Περσέα- Ιχθύος, που περιέχει πάνω από 1000 γαλαξίες.

Ο κεντρικός γαλαξίας του σμήνος του Περσέα είναι περικυκλωμένος από <νήματα>, που έχουν παρατηρηθεί σε εκπομπή στο οπτικό φάσμα, στο υπέρυθρο στις γραμμές του (H<sub>2</sub>) και σε εκπομπή χιλιοστομέτρων του (CO). Αυτά τα νήματα είναι τεράστια, με πάχος 100 pc και εκτείνονται πολλές δεκάδες Kpc. Η προέλευση και η διέγερσή τους πρέπει ακόμα να επιβεβαιωθεί, αλλά φαίνεται να έχουν συσταθεί ως ταραχώδη στρώματα ανάμειξης διάχυτων ταχέων εκροών και εισερχομένου αερίου, και ότι θερμαίνονται λόγω διάσπασης ή από κοσμική ακτινοβολία.



Όπως και να έχει, ο βαθμός θέρμανσης επιτρέπει την παρατήρηση γραμμών εκπομπής από τα νήματα. Ο βαθμός θέρμανσης είναι πολύ ισχυρός, σε σύγκριση με τυπικούς του Γαλαξία μας. Τα δείγματα μορίων των νημάτων αυτών μπορούν να βοηθήσουν στον καθορισμό του βαθμού θέρμανσης και στην αναγνώριση της πηγής θέρμανσης. Επειδή έχουμε ανιχνεύσει εκπομπή του (CO), είναι λογικό να ψάξουμε για νέα δείγματα εκπομπών άλλων μορίων. Τα μοντέλα που καλύπτουν μεγάλο εύρος φυσικών συνθηκών στα νήματα προτείνουν ως καλά δείγματα τα (HCO+), (C<sub>2</sub>H), (CN). οι πρόσφατες ανιχνεύσεις των (CN<sub>2</sub>-1), (HCO+3-2), (C<sub>2</sub>H<sub>3</sub>-2) υποστηρίζουν την άποψη ότι η θέρμανση τροφοδοτείται από την κοσμική ακτινοβολία, που εκεί είναι τουλάχιστον κατά δύο τάξεις μεγέθους ισχυρότερη από ότι στον Γαλαξία μας.

Η στοχευόμενη μοντελοποίηση και παρατήρηση των μοριακών γραμμών εκπομπής μπορεί να είναι πολύ χρήσιμη για την κατανόηση των συνθηκών σε νέφη σε τέτοιες εξωτικές περιοχές.

### .Συμπεράσματα.

Είναι ξεκάθαρο ότι τα μόρια έχουν σημαντικό ρόλο στην δημιουργία και εξέλιξη των γαλαξιών. Τα τελευταία χρόνια έχουμε ανακαλύψει πολλά εξωγαλαξιακά μόρια που μας δίνουν λεπτομερείς πληροφορίες για την ποσότητα και την διασπορά του μοριακού αερίου σε διαφορετικούς τύπους γαλαξιών. Λόγω του ότι με τα νέα τηλεσκοπία (ALMA) θα έχουμε λεπτομερή ανάλυση αντικειμένων μεγάλης ερυθρολίσθησης, την επόμενη δεκαετία θα μπορούμε να αναλύσουμε τους πολύ μακρινούς (που τους παρατηρούμε στην αρχή της δημιουργίας τους) γαλαξίες. Θα μελετήσουμε τις φυσικές συνθήκες και την εξέλιξή τους, όπως κάνουμε για τον δικό μας Γαλαξία.

## 6) Το νεαρό σύμπαν και οι πρώτοι γαλαξίες.

Οι παρατηρήσεις των μοριακών εκπομπών, σε συνδυασμό με λεπτομερή μοντέλα, μας επιτρέπουν να έχουμε μια σύνθετη φυσική περιγραφή της περιοχής των εκάστοτε μορίων, ακόμα και αν ο γαλαξίας στον οποίο βρίσκονται δεν αναλύεται χωρικά. Τι γίνεται όμως με την προ- γαλαξιών περίοδο του σύμπαντος? Είχαν τα μόρια ενεργό ρόλο εκείνη την εποχή, και αν ναι, μπορούν οι μοριακές εκπομπές να μας βοηθήσουν στην ανίχνευση των διαδικασιών που εμφανίστηκαν πολύ νωρίς στο σύμπαν? Πότε τα μόρια άρχισαν να αποκτάνε σημαντικό ρόλο? Ποιοι είναι οι καλύτεροι ανιχνευτές στους πρώτους γαλαξίες του σύμπαντος?

Σε αυτό το κεφάλαιο θα δούμε ότι τα μόρια έχουν παρουσία από την εποχή της επανασύνδεσης, μετά την μεγάλη έκρηξη, και είχαν σημαντικό ρόλο στον σχηματισμό των πρώτων γαλαξιών και αστεριών. Δεν είναι μέσα στις δυνατότητες των σημερινών τηλεσκοπίων να διαπιστώσουμε αν κάποια μόρια δημιούργησαν ανιχνεύσιμες υπογραφές από τις διαδικασίες εκείνης της εποχής. Μόλις εμφανίστηκαν τα πρώτα αστέρια και εμπλούτισαν την μεταλλικότητα στο

περιβάλλον τους, τα μόρια είχαν σημαντικό ρόλο στον σχηματισμό των πρώτων γαλαξιών. Αυτά τα μόρια θέλουμε να ανιχνεύσουμε.

Η προ γαλαξιακή εποχή.

Προ γαλαξιακή χημεία.

Στο κοσμολογικό μοντέλο το σύμπαν ψύχθηκε με τη διαστολή (αρχικά πληθωριστική) από μια πυκνή καυτή κατάσταση, όπου η πυρηνική σύντηξη της βαρυονικής μάζας των υποατομικών σωματιδίων δημιούργησε ένα απλό αέριο από άτομα υδρογόνου, και μικρή αναλογία δευτερίου, ηλίου<sup>3</sup> και 4, και λιθίου. Όλο το αέριο ήταν πλήρως ιονισμένο, και εμβαπτισμένο σε ένα πεδίο ακτινοβολίας μέλανος σώματος, που χαρακτηριζόταν από την ίδια θερμοκρασία με το αέριο. Το (H) αποτελούσε το 75% της βαρυονικής μάζας, το ήλιον σχεδόν όλο το υπόλοιπο, και υπήρχαν ίχνη λιθίου. Αυτή η καυτή ύλη ήταν σε μορφή πλάσματος, τα ηλεκτρόνια δεν ήταν δεσμευμένα στους ατομικούς πυρήνες με αποτέλεσμα να μην μπορεί να διαφύγει η ακτινοβολία. Στην διάρκεια της συμπαντικής διαστολής το αέριο και η ακτινοβολία ψύχθηκαν. Τελικά η θερμοκρασία τους έπεσε αρκετά ώστε να μπορέσουν να επανασυνδεθούν οι ατομικοί πυρήνες με τα ηλεκτρόνια. Πρώτα τα ιόντα ηλίου σχημάτισαν άτομα ουδέτερου ηλίου (σε ερυθρολίση  $z = 2500$ ) και αργότερα έγινε το ίδιο με το υδρογόνο ( $z = 1100$ ).

Όταν το αέριο ήταν πια ουδέτερο, η θερμοκρασία της ακτινοβολίας αποσυνδέθηκε από την θερμοκρασία της ύλης. Η κοσμική ακτινοβολία υποβάθρου (CMB), που ανιχνεύουμε σήμερα στα μικροκύματα, είναι το απομεινάρει από το πεδίο ακτινοβολίας στο τέλος της εποχής της επανασύνδεσης, όταν η θερμοκρασία του αερίου και της ακτινοβολίας ήταν 3000 K. Η ενεργειακή πυκνότητα στο πεδίο ακτινοβολίας αραιώσε και διαμορφώθηκε στο διαστελλόμενο σύμπαν ως σημερινή ακτινοβολία μελανού σώματος θερμοκρασίας 2,7 K.

Η εξέλιξη της μάζας μετά την επανασύνδεση επηρεάστηκε από απλές ατομικές και μοριακές διαδικασίες, και η ακτινοβολία είχε όλο και λιγότερη επιρροή. Η ενεργειακή πυκνότητα της ακτινοβολίας μειώθηκε πολύ γρήγορα ( $(1+z)^4$ ) και η θερμοκρασία της ακτινοβολίας επίσης ( $1+z$ ), ενώ η πυκνότητα του αερίου λιγότερο, ( $(1+z)^3$ ). Για αυτό, όσο το  $z$  μειώνεται ο αριθμός των φωτονίων που μπορούν να ιονίσουν ή να διαλύσουν άτομα ή μόρια μειώνεται ραγδαία.

Η επανασύνδεση στο διαστελλόμενο σύμπαν δεν ήταν τελείως ολοκληρωμένη, και έμεινε ένα επίπεδο αντίστασης ιονισμού στο τέλος της επανασύνδεσης όλο και να ελαττώνεται, μένοντας μια τάξη μεγέθους μικρότερο σε  $z=100$ . Το κλάσμα του ιονισμού του αερίου εκείνης της εποχής ήταν ικανό ώστε να αρχίσουν οι απλές χημικές αντιδράσεις. Λόγω απουσίας των κόκκων σκόνης (δεν υπήρχαν ακόμα τα βαρύτερα στοιχεία που σχηματίζουν τους κόκκους σκόνης), τα μόρια υδρογόνου σχηματίστηκαν με δύο αντιδράσεις,  $(H)+(H^+) = (H_2^+) + (h\nu)$ ,  $(H_2^+) + (H) = (H_2) + (H^+)$  και  $(H) + e = (H^-) + (h\nu)$ ,  $(H^-) + (H) = (H_2) + e$ . Επειδή το  $(H_2^+)$  έχει ισχυρότερο δεσμό από το  $(H^-)$ , η πρώτη από τις παραπάνω αντιδράσεις ήταν σημαντική μέχρι  $z=400$ , ενώ η

δεύτερη κυριάρχησε από  $z = 100$ , όταν το πεδίο ακτινοβολίας είχε μεταφερθεί σε μεγαλύτερα μήκη κύματος και ήταν μικρότερης έντασης.

Το ήλιον είχε παρόμοια πορεία,  $(\text{He}) + (\text{H}^+) = (\text{HeH}^+) + h\nu$  και  $(\text{HeH}^+) + (\text{H}) = (\text{H}_2^+) + (\text{He})$ . Στην πράξη αναπτύχθηκε ένα εκτεταμένο χημικό δίκτυο από τα τρία στοιχεία υδρογόνο, ήλιον και λίθιο και τα ιόντα τους. Μερικά είδη είναι χημικά ενεργά σε ερεθισμένα ηλεκτρόνια ή εσωτερικές καταστάσεις. Το δευτέριο, που αντιπροσωπεύει το 10στη-5 από το συνολικό υδρογόνο, σχημάτισε μερικά είδη, μεταξύ τους και το (HD) από αντιδράσεις όπως  $(\text{H}_2) + (\text{D}^+) = (\text{HD}) + (\text{H}^+)$ . Μερικές βασικές αντιδράσεις μένουν ακόμα ασαφείς, αλλά το εύρος αφθονίας των μορίων και των μοριακών ιόντων σε αυτά και σε όμοια χημικά μοντέλα είναι πολύ μικρό.

### Δυνητικά συμπεράσματα παρατηρήσεων.

Οι μοριακές αφθονίες κατά την εποχή της επανασύνδεσης είναι τόσο μικρές, ώστε η εκπομπή αυτών των ειδών δεν έχει ανιχνευτεί άμεσα στο φάσμα. Ωστόσο, δίνεται μεγάλη προσοχή στον πιθανό ρόλο των μορίων στην τροποποίηση του φάσματος του τότε πεδίου ακτινοβολίας. Τέτοιες επιδράσεις θα φαινότουσαν στην σημερινή GMB ως παρεκκλίσεις από την ακτινοβολία μελανού σώματος. Αυτές οι παρεκκλίσεις μπορεί να εμφανίστηκαν από επιδράσεις στο οπτικό βάθος που δημιουργήθηκαν με γραμμική απορρόφηση, φωτιονισμό και φωτοδιάσπαση (photodissociation) ατόμων και μορίων στην εποχή της επανασύνδεσης.

Επιδράσεις οπτικού βάθους σε ακτινοβόλο πεδίο εμφανίζονται μερικώς από την μετάβαση της γραμμής συντονισμού σε φάση μεγάλης διπολικότητας, όπως η μετάβαση σε  $(\text{HeH}^+)$ ,  $(\text{HD}^+)$ . Έχουν εξερευνηθεί μεταβάσεις ελεύθερου-ελεύθερου ή μεταβάσεις φωτοδιαχωρισμού (photodetachment) σε αρνητικά ιόντα όπως τα  $(\text{H}^-)$ ,  $(\text{He}^-)$ , και έχουν θεωρηθεί τυπικές μεταβάσεις του  $(\text{HeH}^+)$ . Τελευταίες μελέτες μας δείχνουν ότι το ιόν  $(\text{H}^-)$  έχει την μεγαλύτερη επίδραση στο προφίλ της GMB. Η παραμόρφωση μέσω του  $(\text{H}^-)$  είναι όμως μια τάξη μεγέθους κάτω από την δυνατότητα ανίχνευσης του δορυφόρου Planck. Ελπίζουμε ότι σε χάρτες της GMC από επομένους δορυφόρους να ανιχνεύεται η παραμόρφωση από το  $(\text{H}^-)$ , ιδίως από τα τηλεσκοπία ALMA, που θα είναι πολύ ευαίσθητα στα χιλιοστόμετρα.

### Ο σχηματισμός των πρώτων αστέρων.

.Η χημεία στην ανομοιογενείς σκοτεινή εποχή.

Είδαμε ότι στην σχεδόν ομογενής προ-αστρική και προ γαλαξιακή εποχή η σχετική αφθονία του μοριακού υδρογόνου ήταν πολύ χαμηλή (10στη-6), και τα άλλα μόρια είχαν ακόμα πολύ χαμηλότερη αφθονία. Όπως και να έχει, όσο μειώνεται η ερυθρολίση, η ανομοιογένεια του σύμπαντος αυξάνεται. Βάσει του κοσμολογικού μοντέλου, πρώτα σχηματίστηκαν μίνι άλως σκοτεινής ύλης και αργότερα μεγαλύτερες. Η περισσότερη βαρυονική ύλη έτεινε να πέσει μέσα στα βαρυτικά πηγάδια των μίνι-αλεών, και όταν η θερμική πίεση δεν ήταν πια αρκετά ισχυρή, η βαρυονική (τότε μόνο ατομική) ύλη άρχισε να μαζεύεται σε αυτές τις άλως. Κατά συνέπεια, η μεγάλη πυκνότητα βαρυονικής ύλης σε αυτές τις άλως

αύξησε τον βαθμό σχηματισμού μοριακού υδρογόνου πάνω από την αρχική, σχεδόν ομοιογένεια, φάση του σύμπαντος και έτσι σχηματίστηκαν πολύ μεγαλύτερες κλασματικές αφθονίες του (H<sub>2</sub>).

Όταν η αναλογία του (H<sub>2</sub>) ήταν αρκετά μεγάλη, η ραγδαία ψύξη (αποβολή θερμοκρασίας μέσω ακτινοβολίας) του αερίου είχε ως αποτέλεσμα να αποκτήσει το αέριο στην μίνι-άλω αρκετά χαμηλή θερμοκρασία, ώστε να συνεχιστεί η συσώρευση βαρυονικής μάζας μέχρι τον σχηματισμό των πρώτων αστεριών στο σύμπαν, πληθυσμού III. Θεωρούμε ότι τα αστέρια πληθυσμού III σχηματίστηκαν σε μίνι-άλω στην εποχή  $z=20-30$  (οι γαλαξίες ήταν ακόμη υπό διαμόρφωση). Αν η ψύξη ήταν πιο αργή σχετικά με την συμπαντική διαστολή, η θερμοκρασία θα έμενε πιο υψηλή και δεν θα είχαμε την δημιουργία αστέρων. Αρα μέσω του μηχανισμού ψύξης το μοριακό υδρογόνο θέτει μια ελάχιστη μάζα της μίνι-άλω, που μπορεί να οδηγήσει σε σχηματισμό αστεριών. Έτσι οι μεγαλύτερες μίνι-άλω συσώρευσαν περισσότερο ατομικό υδρογόνο, που δημιούργησε μοριακό υδρογόνο. Η επαρκώς αποτελεσματική ψύξη μέσω του μοριακού υδρογόνου επέτρεψε τον σχηματισμό των αστέρων πληθυσμού III.

Το μοριακό υδρογόνο αποτελεί έναν αποτελεσματικό <ψύκτη> ως θερμοκρασίες 200 K, μέχρι να επιτευχθεί η κρίσιμη πυκνότητα (για το μοριακό υδρογόνο τα 10000 άτομα/cm<sup>3</sup>). Τότε οι συγκρούσεις κυριαρχούν στην χαλάρωση του βαθμού ερεθισμού. Σε μίνι-άλω με μεγαλύτερη από αυτή την πυκνότητα η ψύξη και η συγκέντρωση ύλης επιβραδύνονται, αλλά τελικά η ύλη φτάνει την κρίσιμη μάζα Bonnor-Ebert, όπου η βαρυτική αστάθεια υπερέρχει της θερμικής πίεσης. Για την παραπάνω πυκνότητα και θερμοκρασία η μάζα αυτή είναι 1000 ηλιακές. Σε μεγαλύτερες μάζες η κατάρρευση συνεχίζεται, η πίεση ανεβαίνει και οι αντιδράσεις 3 σωμάτων κυριαρχούν στον σχηματισμό (H<sub>2</sub>). Τελικά, οι μεταβάσεις ψύξης του (H<sub>2</sub>) γίνονται οπτικά παχιές και η επίδραση της ψύξης μειώνεται. Η θερμοκρασία αυξάνεται όσο συνεχίζεται η κατάρρευση, το (H<sub>2</sub>) διαλύεται, και η αύξηση της θερμοκρασίας συνεχίζεται μέχρι η θερμική πίεση να ελαττώσει την κατάρρευση. Αυτό το αντικείμενο που υποστηρίζεται από την πίεση ονομάζεται πρωτοαστέρι πληθυσμού III.

Οι εξομοιώσεις δείχνουν ότι το πρωτοαστέρι περικυκλώνεται από έναν δίσκο προσαύξησης που μεγάλωσε αρκετά, ώστε να γίνει ασταθής. Αν είναι έτσι, τότε σχηματίστηκαν από την ύλη κάθε τέτοιου δίσκου πολλαπλά πρωτοαστέρια. Στην πράξη, το μοριακό υδρογόνο ήταν κρίσιμος παράγοντας στον έλεγχο της θερμοκρασίας του δίσκου. Με την ψύξη του (H<sub>2</sub>), ο δίσκος είχε μικρότερη θερμοκρασία. Χωρίς το (H<sub>2</sub>) θα ήταν λιγότερο ικανός να μεταφέρει μάζα στο πρωτοαστέρι. Έτσι η μάζα του δίσκου θα είχε αυξηθεί τόσο, ώστε να μπει σε φάση αστάθειας, με αποτέλεσμα να μην είναι εφικτός ο σχηματισμός αστεριών.

### Δυνητικά συμπεράσματα παρατηρήσεων.

Οι σημερινές παρατηρήσεις δεν μπορούν να εξετάσουν την εποχή του  $z=20$ , όταν άρχισε ο σχηματισμός των αστέρων πληθυσμού III, αλλά η εξελιγμένη τεχνολογία

σύντομα θα μας επιτρέψει κάτι τέτοιο. Σήμερα το Hubble μπορεί να παρατηρήσει γαλαξίες με ερυθρολίσθηση  $z = 7-8$ , με τον πιο μακρινό στο  $z = 8,6$ . Η φωτομετρία ευρείας ζώνης επιτρέπει την ανίχνευση του φάσματος απορρόφησης του ουδέτερου υδρογόνου, και η εκπομπή Lyman- $\alpha$  μπορεί να αποτελέσει επίσης μια ισχυρή υπογραφή μορίων από συγκεκριμένους γαλαξίες. Αυτές οι γραμμές έχουν πλέον μετατοπιστεί στο κοντινό υπέρυθρο. Τα νέα μεγάλα τηλεσκοπία (Giant Magellan Telescope, the Thirty Meter Telescope, the European Extremely Large Telescope) είναι επίγειες κατασκευές που θα έχουν μεγάλες δυνατότητες. Το James Webb διαστημικό τηλεσκόπιο θα βλέπει στα 0,6 -28  $\mu\text{m}$  και θα έχει μεγάλη ανάλυση αυτών των περιοχών ατομικού υδρογόνου.

Όπως αναφέραμε, ο σχηματισμός πρωτοαστέρων πληθυσμού III πρέπει να συνοδεύτηκε σε όλα τα στάδια της εξέλιξής του από άφθονη εκπομπή του ( $\text{H}_2$ ), σε συχνότητες περιστροφής- δόνησης. Κάποιες από τις εκπομπές δόνησης μπορεί να είναι ανιχνεύσιμες με το νέο διαστημικό τηλεσκόπιο. Οι καθαρά περιστροφικές εκπομπές θα έχουν μετατοπιστεί στα υποχιλιοστόμετρα και θα ανιχνεύονται από το ALMA. Η εκπομπή του υδρογόνου στα 21 εκατοστά θα έχει μετατοπιστεί στη κλίμακα των μέτρων και θα είναι στόχος του SKA (Square Kilometer Array), που θα καλύπτει ένα εύρος από τα 70 MHz (4m) ως τα 10GHz (3cm). Έτσι αισιοδοξούμε ότι σύντομα θα έχουμε παρατηρήσεις από την εποχή  $z=20$ .

## Ο σχηματισμός των πρώτων γαλαξιών.

.Η χημεία μετά τον σχηματισμό των αστέρων πληθυσμού III.

Ο σχηματισμός των γαλαξιών χαρακτηρίζεται από την γέννηση αστέρων πληθυσμού II. Έτσι θεωρούμε ότι τότε η αστρογέννηση είχε ίδια χαρακτηριστικά με ότι παρατηρούμε σήμερα σε μεγάλα μοριακά νέφη του Γαλαξία μας και σε κοντινούς μας γαλαξίες, αλλά με πολύ χαμηλότερη μεταλλικότητα.

Το σημαντικό για την χημεία είναι ότι τα αστέρια πληθυσμού III προμήθευσαν τους γαλαξίες με βαρύτερα στοιχεία. Άτομα όπως το οξυγόνο, ο άνθρακας και το άζωτο, και πιθανώς οι κόκκοι σκόνης, εμπλούτισαν για πρώτη φορά το αέριο, και διανεμήθηκαν στο αέριο της άλω μέσω διαταραχών και συγχωνεύσεων μεταξύ των αλεών.

Πλέον στο σύμπαν υπήρξαν οι συνθήκες για μια σημαντική χημική πολυπλοκότητα. Με αυτή την πολυπλοκότητα ήρθε μια αλλαγή στην διαδικασία αστρογέννησης, από την αστρογέννηση χωρίς μέταλλα του πληθυσμού III στην πιο οικεία μας, πλούσια σε μέταλλα αστρογέννηση του πληθυσμού II, συνεχίζοντας έτσι μέχρι σήμερα.

Δεν είναι σαφές αν οι άλως σκοτεινής ύλης είχαν την κρίσιμη, αλλά χαμηλή μεταλλικότητα (10στη-6 με 10στη-4 της ηλιακής), επιτρέποντας στον πληθυσμό II να υπάρξει πριν την δημιουργία των γαλαξιών. Βέβαια, αν η θερμική και δυναμική

ανάδραση από τα αστέρια πληθυσμού III στις άλως ήταν πολύ μεγάλη, δεν θα εμφανίστηκαν τότε αστέρια πληθυσμού II.

Όπως και να έχει, θα επικεντρωθούμε στους μοριακούς ανιχνευτές της αποθήκης ψυχρού αερίου, που μπορεί να εμφανίστηκαν στους πρώτους γαλαξίες χαμηλής μεταλλικότητας. Η μεταλλικότητα αυξάνεται από 2 πηγές. Η αρχική συνεισφορά είναι οι εκρήξεις σουπερνόβα των αστεριών πληθυσμού III. Αυτή η αρχική συνεισφορά επιτρέπει την δημιουργία αστερών πληθυσμού II, και αυτά τα αστέρια συμμετέχουν στην αύξηση της μεταλλικότητας. Η μεταλλικότητα αυξάνεται με την ελάττωση της ερυθρολίσθησης από μια μη μηδενική, αλλά πολύ χαμηλή τιμή, σε επίπεδα αναλογίας του Ηλίου μας.

Ποιος είναι ο κατάλληλος ανιχνευτής αποθήκης ψυχρού αερίου σε έναν χαμηλής μεταλλικότητας πρώτο- γαλαξία? Αν η μεταλλικότητα είναι πολύ χαμηλή σε ένα αέριο που αποτελείται κυρίως από ( $H_2$ ), τότε το ( $H_3^+$ ) μπορεί να είναι εκπληκτικά άφθονο και ανάλογο του ιονισμού της κοσμικής ακτινοβολίας. Όπως ξέρουμε, το ψυχρό μοριακό υδρογόνο δεν ανιχνεύεται, και παραδοσιακά χρησιμοποιούμε σε κοντινούς και μακρινούς γαλαξίες ως ανιχνευτή του το μονοξείδιο του άνθρακα. Υπάρχει μια στενή σχέση ανάμεσα στην λαμπρότητα στο μακρινό υπέρυθρο (ως δείκτης επιφανειακής πυκνότητας της αστρογέννησης) και της επιφανειακής πυκνότητας εκπομπής του ( $CO$ ) στις περιστροφικές του γραμμές. Στο τοπικό σύμπαν, αυτή η σχέση εκτείνεται σε πολλές τάξεις μεγέθους της λαμπρότητας στο μακρινό υπέρυθρο, και περιλαμβάνει ένα εύρος διαφορετικών περιβαλλόντων, από σχετικά χαμηλή μεταλλικότητα και κυρίως ατομικό αέριο μέχρι υψηλή μεταλλικότητα και μοριακό αέριο.

Είναι σημαντικό ότι η σχέση αυτή έχει επιβεβαιωθεί για αρκετούς γαλαξίες ακόμη και για  $z=6$ , και σε διαφορετικές γραμμές του ( $CO$ ).

Η σημασία του ( $CO$ ) ως ανιχνευτή ψυχρού αερίου σε γαλαξίες έχει επιβεβαιωθεί σε μια ποικιλία φυσικών συνθηκών και τιμών μεταλλικότητας (μέχρι 1% της ηλιακής), και σε γαλαξίες μεγάλης ερυθρολίσθησης. Έχουν υπολογιστεί συντελεστές μετατροπής για εύρος φυσικών συνθηκών. Οι φυσικές συνθήκες που υιοθετούμε σημαίνουν κινητικές θερμοκρασίες 10-100 K.

Οι συντελεστές μετατροπής είναι ανάλογοι της μάζας του ( $H_2$ ). Πρέπει να χρησιμοποιείται ο σωστός και να σημειωθεί η ευαισθησία των παραμέτρων. Αν για παράδειγμα, χρησιμοποιηθεί η μετάβαση (7-6), ο συντελεστής μετατροπής είναι πολύ ευαίσθητος στο πεδίο υπεριώδους ακτινοβολίας που επηρεάζει το νέφος, ενώ οι ακτίνες X έχουν σημαντική αλλά μικρότερη επίδραση. Οι μάζες νεφών που τεκμηριώθηκαν με την χρήση ευαισθησίας των ολοκληρωμένων γραμμών του ( $CO$ ) μπορεί να έχουν σφάλμα ως 1 τάξη μεγέθους, όταν δεν έχουν καθοριστεί καλά οι παράμετροι της εκπομπής των νεφών.

Το ( $CO$ ) αποτελεί έναν σημαντικό ανιχνευτή ψυχρού αερίου μέχρι το πολύ για  $z=6$ . Από θεωρητική άποψη όμως, είναι ασαφές αν είναι και καλός ανιχνευτής για  $z=10$ , την εποχή της δημιουργίας των πρώτων γαλαξιών. Η μεταλλικότητα τότε ήταν πολύ

χαμηλότερη από το 1% της ηλιακής. Ένα μεγάλο πρόβλημα είναι η σχέση αερίου/ σκόνης. Πόση από την μεταλλικότητα που απελευθέρωσαν τα αστέρια πληθυσμού III και τα πρώτα αστέρια πληθυσμού II είναι σε μορφή σκόνης και πόση στην μορφή βαρέων ατόμων?

Υπάρχουν δύο χαρακτηριστικά της σκόνης που επηρεάζουν την θεώρηση της <κανονικής> μεσοαστρικής χημείας σε αυτήν την εποχή. Το ένα είναι ο σχηματισμός του (H<sub>2</sub>), από τον οποίο εξαρτάται σχεδόν όλη η χημεία. Το χρονοδιάγραμμα του σχηματισμού του (H<sub>2</sub>) σε αντιδράσεις στους κόκκους σκόνης σε ένα μεσοαστρικό νέφος του Γαλαξία μας με 1000 άτομα (H<sub>2</sub>)/ cm<sup>3</sup> είναι της τάξης των 1 εκατομμύριων ετών. Αν η σχέση σκόνης/ αερίου αλλάζει με την μεταλλικότητα, και η μεταλλικότητα σε έναν γαλαξία μεγάλου z είναι 1000 φορές λιγότερη από την ηλιακή, και υποθέτοντας ότι η σκόνη έχει την ίδια ικανότητα να σχηματίζει (H<sub>2</sub>) όπως στον Γαλαξία μας, το χρονοδιάγραμμα σχηματισμού (H<sub>2</sub>) θα είναι της τάξης των 1 δις ετών. Μπορεί να ξεπερνάει την διάρκεια ζωής ενός νέφους σε πρώτο-γαλαξία. Εξαρτώμενη από τον κλασματικό ιονισμό του αερίου, η διαδικασία που ξεκίνησε από ηλεκτρόνια και πρωτόνια σε ραδιενεργό σύνδεσμο με άτομα (H) μπορεί να σχημάτισε γρηγορότερα (H<sub>2</sub>) στους πρώτους γαλαξίες, και να είναι η κύρια πηγή εμφάνισης της μεσοαστρικής χημείας.

Θεωρώντας ότι το (H<sub>2</sub>) σχηματίστηκε σε ένα λογικό χρονοδιάγραμμα, ο σχηματισμός του (CO) εμφανίστηκε σε μια PDR. Για τις μέσες συνθήκες της μεσοαστρικής ύλης στον Γαλαξία μας η μετατροπή του άνθρακα σε (CO) εμφανίζεται σε ορατό βάθος 2-3 mag σε ένα μεσοαστρικό νέφος, που αντιστοιχεί σε μια τυπική απόσταση 1 pc. Αν η σχέση σκόνης/ αερίου ήταν 1000 φορές μικρότερη από αυτή στον γαλαξία μας, το βάθος αυτό θα ήταν 1 kpc. Δεν είναι σαφές αν αυτή είναι μια αντιπροσωπευτική τιμή μεγέθους για τους πρώτους γαλαξίες. Πρέπει να διευκρινιστεί ο ρόλος του XDR στην τροποποίηση της κυριαρχίας του PDR στους πρώτους γαλαξίες.

Μένουν πολλά αναπάντητα ερωτήματα για την χημεία των πρώτων γαλαξιών. Όσο αναμένουμε πιο λεπτομερείς μελέτες της χημείας χαμηλής μεταλλικότητας των πρώτων γαλαξιών, η καλύτερη στρατηγική παρατήρησης είναι να συνεχίζουμε να έχουμε το (CO) ως ανιχνευτή. Και οι γραμμές ραδιοκυμάτων επανασύνδεσης του ατομικού υδρογόνου ανιχνεύονται στους πρώτους γαλαξίες, αλλά δεν μας δείχνουν τις αποθήκες ψυχρού αερίου. Μας δείχνουν όμως τις εντάσεις των πεδίων ακτινοβολίας X και της υπεριώδης ακτινοβολίας.

### Δυνητικά παρατηρησιακά συμπεράσματα.

Σε z =10, η γραμμή του (H) στα 12 εκατοστά εμφανίζεται στα μήκη κύματος μέτρου, ένας στόχος για το SKA. Έτσι η ατομική σύνθεση του μεσοαστρικού αερίου θα καθοριστεί καλά. Πιο μεγάλο ενδιαφέρον για την αστρογέννηση έχει ο καθορισμός της μοριακής σύνθεσης. Η χαμηλότερης ενέργειας μετάβαση του (CO1-0) μετατοπίζεται από τα 2,6 mm στα 2,6 cm, όπου μπορεί να ανιχνευτεί από το SKA. Ακόμα, το SKA θα μπορεί να ανιχνεύσει την εκπομπή από την επανασύνδεση των ατόμων (H). Στην περίπτωση του πλούσιου σε (H<sub>2</sub>) αερίου πολύ χαμηλής

μεταλλικότητας, το (H3+) είναι καλός ανιχνευτής. Δεν έχει ούτε φάσμα ηλεκτρονίου (δεν έχει διεγερμένη κατάσταση ηλεκτρονίου), ούτε καθαρό φάσμα περιστροφής (δεν έχει διπολική ροπή) αλλά έχει ένα ro-δόνησης φάσμα (όχι μετατοπισμένο στο ερυθρό) στα 3  $\mu\text{m}$ . Αυτές οι γραμμές θα ανιχνεύονται από το JWST για  $z$  μικρότερο του 10.

## 7) Συνταγές για μοριακή αστρονομία υποχιλιοστόμετρων.

Ξέρουμε ότι οι μοριακές γραμμικές εκπομπές μπορούν να δώσουν σημαντικές πληροφορίες για το αέριο και τη σκόνη του δικού μας, αλλά και των μακρινών γαλαξιών. Αυτό που δεν έχουμε ξεκαθαρίσει είναι το πώς τα αποτελέσματα της παρατήρησης μετατρέπονται σε χρήσιμες πληροφορίες. Θα περιγράψουμε την σχέση μεταξύ παρατηρήσιμων μεγεθών στην μοριακή αστρονομία υποχιλιοστών και των φυσικών πληροφοριών που κερδίζουμε από αυτές. Αναπόφευκτα πολλές προσεγγίσεις γίνονται για να αντλήσουμε αυτές τις πληροφορίες, που εξαρτώνται από την διαθέσιμη φασματική και χωρική ανάλυση και από τις παρατηρήσιμες μοριακές μεταβάσεις κάθε είδους μορίου.

Θα αρχίσουμε με τη συσχέτιση του τι μετράμε με τηλεσκόπια υποχιλιοστόμετρων και τα ραδιοτηλεσκόπια, που είναι η θερμοκρασία κεραίας T-α, με την θεμελιώδη μοριακή σταθερά και τις σχετικές αστρονομικές παραμέτρους. Αυτό που θέλουμε να ξέρουμε είναι οι πυκνότητες των παρατηρήσιμων ειδών και η θερμοκρασία και πυκνότητα του τοπικού αερίου. Θα περιγράψουμε πρώτα πως αποκτάμε την γνώση αυτών των ποσοτήτων, αν το αέριο είναι σε τοπική θερμική ισορροπία (Local Thermal Equilibrium, LTE). Αυτό γίνεται, όπου οι πληθυσμοί μορίων κυριαρχούνται από συγκρούσεις σε ένα αέριο με ομοιόμορφη θερμοκρασία. Οι μέθοδοι που κερδίζουμε αυτήν την πληροφορία εξαρτώνται από τα σχετικά μόρια. Θα συζητήσουμε την μετατροπή της πυκνότητας σε κλασματικές αφθονίες συγκριτικά με την απόλυτη αφθονία του υδρογόνου, ποσότητες που είναι άμεσα συγκρίσιμες με τις προβλέψεις των χημικών μοντέλων. Θα περιγράψουμε και κάποιες προσεγγίσεις που χρησιμοποιούμε όταν δεν έχουμε LTE.

Η θερμοκρασία κεραίας.

Στην αστρονομία υποχιλιοστόμετρων, ο παρατηρητής συνήθως υπολογίζει μια θερμοκρασία κεραίας T-α, που παράγεται από μια συχνότητα  $\nu$  μιας πηγής με οπτικό βάθος  $\tau$ . Ακολουθεί μια σειρά μαθηματικών τύπων που περιλαμβάνουν την πυκνότητα στήλης, το πλάτος της γραμμής, τον βαθμό απορρόφησης και αυθόρμητης εκπομπής και άλλων παραμέτρων.

Η διαδικασία αυτή απλοποιείται με δύο παραδοχές. 1) η πηγή <γεμίζει> την δέσμη ώστε ο όρος που σχετίζεται με στερεές (ατόφιες) γωνίες μπορεί να αγνοηθεί και 2) θεωρούμε ότι η εκπομπή στην μετάβαση είναι οπτικά λεπτή ώστε το οπτικό βάθος  $\tau$  να είναι αρκετά μικρό, ώστε η τελική αγκύλη της εξίσωσης να είναι κοντά στην



μονάδα. Τότε η πυκνότητα στήλης είναι άμεσα ανάλογη της ολοκληρωμένης έντασης.

Βέβαια, η τελική εξίσωση μας δίνει μόνο την πυκνότητα στήλης ενός είδος στην ανώτερη κατάσταση της μετάβασης, ενώ συνήθως μας ενδιαφέρει η ολική πυκνότητα στήλης. Χρησιμοποιούμε πολλές προσεγγίσεις να καθορίσουμε από την θερμοκρασία κεραίας μιας μετάβασης και την πυκνότητα στήλης επιπέδου την απόλυτη πυκνότητα ενός είδους. Το πρώτο θέμα που πρέπει κάποιος να δει είναι αν το σύστημα είναι σε LTE, όπου μπορούμε να υποθέσουμε πως όλα τα θερμοδυναμικά μεγέθη έχουν θερμοδυναμική ισορροπία ανάλογη των τοπικών τιμών θερμοκρασίας και πίεσης. Στα περισσότερα μεσοαστρικά περιβάλλοντα, η πυκνότητα του υδρογόνου είναι ανεπαρκής για να θερμάνει κάποιες ή όλες τις μεταβάσεις, ώστε οι πληθυσμοί των ενεργειακών επιπέδων συγκεκριμένων ειδών να μην περιγράφονται από LTE, και σε αυτή την περίπτωση οι ραδιενεργές διεγέρσεις ακολουθούμενες από αυθόρμητη εκπομπή κυριαρχούν των συγκρούσεων.

### Τοπική θερμοδυναμική ισορροπία (LTE).

Σε ένα περιβάλλον που είναι σε LTE, οι ολικές πυκνότητες των παρατηρήσιμων ειδών και η κινητική θερμοκρασία του αερίου μπορούν να λαμβάνονται από μια μοναδική μετάβαση (ενώ άλλες τιμές όπως η πυκνότητα ενός είδους και η δομή της ταχύτητας μπορούν να δοθούν μόνο από παρατηρήσεις πολλαπλών μεταβάσεων). Στα περιβάλλοντα LTE η πυκνότητα ανώτατου επιπέδου είναι σχετική με την απόλυτη πυκνότητα. Έτσι σε αυτά τα περιβάλλοντα μπορούμε να μετρήσουμε την ολική μοριακή πυκνότητα από την πυκνότητα οποιασδήποτε μετάβασης που έχει γνωστή θερμοκρασία.

Αν έχουμε παρατηρήσεις περισσότερων από 1 μεταβάσεων, μπορούμε να κατασκευάσουμε ένα διάγραμμα περιστροφής (rotational diagram). Η θερμοκρασία που τεκμηριώνεται από τέτοια διαγράμματα αναφέρεται πολλές φορές σαν θερμοκρασία περιστροφής και αναμένεται να είναι ίση με την κινητική θερμοκρασία αν θερμαίνονται όλα τα επίπεδα.

Αυτά τα διαγράμματα μπορούν να είναι χρήσιμα εργαλεία για την αξιολόγηση, ώστε οι πληθυσμοί επιπέδων να μπορούν να περιγράφουν ως LTE και να καθορίσουν την θερμοκρασία που περιγράφει καλύτερα την διασπορά του πληθυσμού στην περίπτωση που εκδηλώνεται η LTE. Μπορεί και να αξιολογήσει κανείς αν η εκπομπή είναι οπτικά λεπτή ή παχιά. Στην περίπτωση που είναι οπτικά λεπτή, το βάθος είναι πολύ μικρό. Αν είναι παχιά, τότε το βάθος είναι μεγάλο και χρειάζεται μια διόρθωση στις πράξεις.

Έτσι, συνοψίζοντας, μια οπτικά λεπτή μετάβαση παράγει μια θερμοκρασία κεραίας που είναι ανάλογη της πυκνότητας στήλης στο ανώτατο επίπεδο της παρατηρούμενης μετάβασης. Αν όλες οι μεταβάσεις έχουν θερμανθεί και ξέρουμε την κινητική θερμοκρασία, μπορούμε να την μετατρέψουμε με μια μέτρηση πυκνότητα στήλης μέσα στην ολική πυκνότητα στήλης του είδος που εξετάζουμε. Αν

η εκπομπή δεν είναι οπτικά λεπτή, η τελική αδιαφάνεια παράγει μια υποτιμημένη στο ανώτατο επίπεδο πυκνότητα της παρατηρούμενης μετάβασης, όπως και της θερμοκρασίας περιστροφής.

Το πρόβλημα είναι ότι ο παρατηρητής συνήθως δεν μπορεί να αναγνωρίσει αν είναι λεπτές οι γραμμές γιατί η αδιαφάνεια είναι μικρή ή γιατί η δέσμη εκπομπής είναι αραιωμένη.

Οι επιδράσεις του οπτικού βάθους διαφέρουν, και εξαρτώνται από το αν τα μόρια είναι γραμμικά ή όχι.

Ενώ για τα LTE γραμμικά μόρια μπορούμε να βρούμε το οπτικό βάθος, για τα μη γραμμικά η δομή ενεργειακού επιπέδου μπορεί να είναι πολύπλοκη. Πολλές φορές υπάρχουν διάφορες μεταβάσεις από μια δεδομένη κατάσταση, και η εξάρτηση των συχνοτήτων μετάβασης από την ενέργεια στο ανώτατο επίπεδο δεν είναι απλή. Ο καθορισμός του οπτικού πεδίου για μη γραμμικά μόρια δεν είναι καθολικός και πρέπει να εξετάζεται ανά περίπτωση. Οι υπολογισμοί επηρεάζονται από 1) την πολύπλοκη ενεργειακή δομή (πολλές μεταβάσεις από δεδομένη κατάσταση), 2) την πολύπλοκη εξάρτηση των συχνοτήτων μετάβασης στο ανώτατο ενεργειακό επίπεδο, 3) την εξάρτηση από ένα μεγάλο εύρος πυκνοτήτων του ( $H_2$ ) για απόκτηση θερμότητας, 4) ένα μεγάλο εύρος συντελεστών απορρόφησης. Γενικά, δεν μπορούν να αγνοηθούν αυτοί οι παράγοντες.

### Φόρμουλα LTE για συχνά παρατηρούμενα μεσοαστρικά μόρια.

Η περιγραφή της σχέσης ανάμεσα στα φασματοσκοπικά χαρακτηριστικά κάθε είδος, των παρατηρούμενων ποσοτήτων και των φυσικών συνθηκών ενός νέφους μπορεί να μας δώσει γενικές φόρμουλες ως αφετηρία για οποιοδήποτε μόριο. Είναι ξεκάθαρο ότι ανάλογα από την γεωμετρία της περιοχής εκπομπής, όπως και της μετάβασης και των ειδών που παρατηρούμε, έχουμε και διαφορετικές φόρμουλες. Η εξίσωση της πυκνότητας σε μια μετάβαση μπορεί να γραφτεί σε διαφορετικές φόρμουλες ανάλογα με ποια μετάβαση παρατηρήθηκε, ο τύπος της περιοχής που την εκπέμπει, η γωνιακή ανάλυση του οργάνου και αν είναι γνωστές όλες οι φασματοσκοπικές ποσότητες της μετάβασης.

Επειδή η μεσοαστρική ύλη περιέχει συμπυκνώσεις κλίμακας εκατοντάδων pc, μπορεί η δέσμη από μια μετάβαση από το αέριο να είναι σε LTE, ενώ άλλη μετάβαση του ίδιου ή άλλου είδος να μην είναι σε LTE. Τα πολύ ομογενή πεδία έχουν μικρή ανάλυση. Έτσι μόνο αν η εκπομπή έχει αναλυθεί και μπορούμε να ξεχωρίσουμε τα διαφορετικά συστατικά του αερίου, μπορούμε να πούμε ότι εμφανίζονται συνθήκες LTE. Στις πιο πολλές περιπτώσεις, ιδίως σε μη αναλύσιμες πηγές όπως οι μακρινοί γαλαξίες, η ακτίνα θα περιέχει ένα εύρος πυκνοτήτων και θερμοκρασιών, και οι υπολογισμοί της LTE θα δίνουν μόνο χονδρικές εκτιμήσεις των πυκνοτήτων και των θερμοκρασιών του αερίου, και της πυκνότητας των ειδών που παρατηρούμε.

### Μη LTE συνθήκες

Όταν το μέσο δεν γίνεται θερμικό, δηλαδή όταν το υδρογόνο έχει μικρή πυκνότητα που δεν μπορεί να δώσει θερμότητα σε μερικές ή όλες τις μεταβάσεις, εμφανίζονται διαφορετικές θερμοκρασίες στον πληθυσμό σε κάθε επίπεδο σχετικά με την βασική κατάσταση. Σε μη τοπική θερμοδυναμική ισορροπία μια περιοχή του χώρου μπορεί να επηρεαστεί από το πεδίο ακτινοβολίας και η απόλυτη πυκνότητα δεν μπορεί να υπολογιστεί χωρίς τον υπολογισμό της μετάβασης ακτινοβολίας.

.Παραγωγή κλασματικών αφθονιών από τις πυκνότητες των ειδών.

Εξετάσαμε την σχέση της πυκνότητας ενός είδος με την πυκνότητα του αερίου και την θερμοκρασία. Συχνά οι παρατηρητές θέλουν να καθορίσουν τις κλασματικές αφθονίες σε σχέση με το μοριακό υδρογόνο. Πολλές φορές υπάρχει ένα πλεονέκτημα στην απόκτηση κλασματικών αφθονιών. Είναι ανεξάρτητες από την γεωμετρία, γιατί δίνουν την απόλυτη αφθονία ενός είδος στην (υποθετικά ομοιογενείς) περιοχή εκπομπής.

Υπάρχουν πολλές μέθοδοι που χρησιμοποιούν οι αστρονόμοι για να μετατρέψουν τις μοριακές πυκνότητες σε κλασματικές αφθονίες, ανάλογα το οπτικό πάχος των διαθέσιμων γραμμών και των επιπλέον πληροφοριών που έχουν οι παρατηρητές. Είναι φανερό ότι αν η πυκνότητα του υδρογόνου είναι γνωστή σε κάποιες περιοχές εκπομπής τότε αυτή η μετατροπή είναι ομαλή. Όμως συχνά δεν έχουμε άμεση μέτρηση της πυκνότητας του (H<sub>2</sub>). Οι παρατηρήσεις της σκόνης μπορούν να μας δώσουν μετρήσεις του οπτικού βάθους, ή της εξάλειψης του ορατού φωτός της παρατηρούμενης περιοχής. Έτσι μπορούμε να υπολογίσουμε την πυκνότητα του (H<sub>2</sub>), κάνοντας την συνήθη παραδοχή για τον Γαλαξία μας ότι σε 1 mag ύλης έχουμε (1,6 X10<sup>21</sup>) cm<sup>-2</sup> πυρήνων υδρογόνου. Αν, όπως γίνεται συχνά, οι ακτίνες της παρατήρησης της σκόνης διαφέρουν από αυτές της παρατήρησης των μορίων, θα έχουμε σφάλμα στον υπολογισμό της πυκνότητας του (H<sub>2</sub>) και της μάζας της περιοχής. Αυτό το σφάλμα είναι ανάλογο των φαινομένων διάλυσης της ακτίνας (beam dilution effects) σε μια σχετικά ομοιογενείς περιοχή, αλλά δεν υπολογίζεται εύκολα αν υπάρχουν τοπικές συμπυκνώσεις.

Σε πολλές περιπτώσεις δεν έχουμε παρατηρήσεις της σκόνης για μια περιοχή, αλλά παρατηρήσεις του (CO). Τότε η αφθονία του μορίου που μας ενδιαφέρει μπορεί να είναι κλάσμα του (CO). Υποθέτουμε μια σάνταρ σχέση (CO)/(H<sub>2</sub>). Εδώ έχουμε τουλάχιστον 2 προβλήματα.

- 1) Αν δεν είναι ίδιο το μέγεθος ακτίνας του παρατηρούμενου είδος και του (CO), η εκτίμηση της σχετικής αφθονίας θα επηρεαστεί αρνητικά. Ακόμα και αν το μέγεθος ακτίνας είναι ίδιο, αλλά η πηγή είναι μικρότερη από το μέγεθος της ακτίνας, το (CO) έχει χαμηλή κρίσιμη πυκνότητα σε σχέση με τα περισσότερα είδη. Αυτό είναι σημαντικό για μεγάλα μόρια, που ανιχνεύουν συμπαγείς περιοχές, και έτσι θα ανιχνεύσουν διαφορετική σύσταση του αερίου από ότι η ανίχνευση με (CO).
- 2) Η σχέση (CO)/(H<sub>2</sub>) κυμαίνεται από γαλαξία σε γαλαξία. Έτσι ο καθορισμός πυκνότητας του (H<sub>2</sub>) από τις παρατηρήσεις του (CO) μπορεί να είναι

ανακριβείς. Θεωρητικές μελέτες δείχνουν ότι για την μετάβαση του (CO1-0) η υπολογισμένη σχέση μετατροπής εξαρτάται πολύ από την κανονικότητα του Γαλαξία μας. Ανάλογα με τις φυσικές συνθήκες, μπορεί να αλλάζει κατά παράγοντα 10 σε άλλους γαλαξίες. Σε διαφορετικούς γαλαξίες από τον δικό μας μπορεί να είναι καλύτεροι ανιχνευτές οι μεταβάσεις του (CO) μεγάλου J ή ακόμα και ο ιονισμένος άνθρακας.

## 8) Χημικά μοντέλα μετάβασης και μοντέλα μετάβασης ακτινοβολίας.

Είδαμε ότι μέσω απλών αναλύσεων των LTE μπορούμε να εκτιμήσουμε την θερμοκρασία και την πυκνότητα ενός αερίου σε ισορροπία. Οι μοριακές παρατηρήσεις μπορούν όμως να μας δώσουν περισσότερες πληροφορίες για τις φυσικές συνθήκες, την ιστορία και την δυναμική ενός αερίου. Θα δούμε τα χημικά μοντέλα μετάβασης και τα αντίστοιχα μοντέλα μετάβασης ακτινοβολίας που έχουν εξελιχτεί εδώ και πολλά χρόνια, και θα δείξουμε πως η προσεκτική χρήση των σωστών εργαλείων χρησιμοποιεί τα μόρια ως ισχυρούς διαγνώστες της εξέλιξης και κατανομής του μοριακού αερίου στην μεσοαστρική ύλη.

### Χημικά μοντέλα.

Επειδή έχουμε μεγάλο εύρος πυκνοτήτων και θερμοκρασιών στην μεσοαστρική ύλη, μπορεί να έχουμε σημαντικές διαφορές στην δυναμική και στην ενέργεια σε ένα αέριο, που οδηγούν σε μεγάλες διακυμάνσεις της χημικής αφθονίας. Για δεκαετίες, οι χημικές προσομοιώσεις παράγουν αστροχημεία με την παραδοχή της μοριακής αφθονίας ως συνιστώσα των φυσικών συνθηκών. Όμως η ερμηνεία των χημικών μοντέλων δεν είναι εύκολο έργο και απαιτεί λεπτομερή γνώση του τρόπου με τον οποίο έχει σχεδιαστεί ένα μοντέλο. Υπάρχουν τουλάχιστον 4 κατηγορίες χημικών μοντέλων.

1) Τα μοντέλα σταθερής κατάστασης ενός σημείου που χρησιμοποιούσαμε στο παρελθόν, κυρίως για την εκτίμηση αφθονιών ισορροπίας σε ομοιογενή μέσα, 2) τα μοντέλα σταθερής κατάστασης, εξαρτώμενη από το βάθος, αλλιώς μοντέλα PDR, που χρησιμοποιούσαμε να εκτιμήσουμε τις αφθονίες σε περιοχές PDR, 3) Μοντέλα ενός σημείου, εξαρτώμενα από τον χρόνο, κυρίως για καθορισμό αφθονίας σε πυκνούς πυρήνες και 4) μοντέλα εξαρτώμενα και από τον χρόνο και από το βάθος. Αυτή είναι μια καινούργια έκδοση. Αυτά τα μοντέλα μπορούν να είναι πολύ χρήσιμα για τον καθορισμό αφθονιών σε περιβάλλοντα όπου όχι μόνο αλλάζει η χημεία με τον χρόνο, αλλά και η δυναμική της περιοχής είναι τέτοια ώστε οι τοπικές διακυμάνσεις στις φυσικές συνθήκες οδηγούν σε ουσιαστικές διακυμάνσεις της χημείας (π.χ. περιοχές που δέχτηκαν κρουστικό μέτωπο). Κάθε κατηγορία μοντέλων περιλαμβάνει διαφορετικό τύπο χημείας, από καθαρή χημεία αέριας φάσης μέχρι πολύ πολύπλοκη χημεία αερίου- κόκκων σκόνης. Τέλος, έχουμε εξελίξει μερικά μοντέλα PDR σε δύο και τρεις διαστάσεις, ώστε να χρησιμοποιήσουμε πιο

πολύπλοκη γεωμετρία, για παράδειγμα ασύμμετρα πλανητικά νεφελώματα ή αέριο γύρω από περιοχές (HII).

Όλες οι κατηγορίες μοντέλων αφορούν τον υπολογισμό της λύσης εξισώσεων αστροχημικής κινητικής θέτοντας ένα σύστημα κανονικών διαφορικών εξισώσεων (ordinary differential equations, ODEs), που δείχνει τους όρους σχηματισμού και εξάλειψης για κάθε είδος.

### Τι γίνεται στα χημικά μοντέλα?

Εδώ θα περιγράψουμε τις φυσικές και χημικές παραμέτρους εισαγωγής σε κάθε κατηγορία μοντέλου, στο οποίο ο παρατηρητής πρέπει να προσθέσει αριθμητικές αξίες. Υπολογίζοντας αυτές τις παραμέτρους, μας επιτρέπεται να ερευνήσουμε περιοχές μεγάλων παραμέτρων που καλύπτουν μεσοαστρικές συνθήκες που να ταιριάζουν σε πολλά αντικείμενα, από νέφη ως γαλαξίες μεγάλης ερυθρολίσθησης.

.Αρχικές αφθονίες στοιχείων. Μερικά μοντέλα αρχίζουν τους χημικούς υπολογισμούς από τον καθορισμό του περιεχομένου σε αέριο και μανδύα πάγου, αλλά τα πιο πολλά υποθέτουν μια κατά κύριο λόγο αρχική σύνθεση ατομικού αερίου. Έτσι χρειάζονται να καθοριστούν οι αρχικές αφθονίες στοιχείων όπως ο άνθρακας, το οξυγόνο, το ήλιο, το άζωτο και τα βαρύτερα στοιχεία. Αυτά καθορίζονται συνήθως σε τιμές ή σε κλάσμα της μεταλλικότητας του Ηλίου. Σε κάποιες περιπτώσεις οι σχετικές αφθονίες μεταξύ των στοιχείων απέχουν πολύ από αυτές στον Ήλιο μας. Για παράδειγμα, η παρατηρούμενη σχέση (C)/(O) μπορεί να κυμαίνεται σημαντικά, ή το γεγονός ότι στο νεαρό σύμπαν το άζωτο ήταν πολύ λιγότερο.

.Γεωμετρία. Για μοντέλα των PDR, όπως και για μοντέλα εξαρτώμενα από τον χημικό χρόνο και το βάθος, πρέπει να καθοριστούν το μέγεθος για τα μονοδιάστατα και το σχήμα για τα τρισδιάστατα μοντέλα. Αυτή η πράξη επηρεάζει την οπτική εξάλειψη της προσομοίωσης, που με την σειρά της επηρεάζει την τοπική ένταση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου και την φωτοχημεία (πάντα στο μοντέλο).

.Βαθμός ιονισμού εξωτερικής κοσμικής ακτινοβολίας και ισχύ πεδίου ακτινοβολίας. Στα περισσότερα δίκτυα αντίδρασης, ο βαθμός ιονισμού του υδρογόνου από την κοσμική ακτινοβολία συγκρίνεται με μια τυπική τιμή του Γαλαξία μας  $10^{-17}$ /s. Αυτή η τιμή μπορεί να αυξηθεί ή να μειωθεί σε όλα τα χημικά μοντέλα. Ομοίως, στα περισσότερα δίκτυα οι βαθμοί φωτοαντίδρασης (photoreaction) έχουν εκτιμηθεί στην κατά μέσο όρο μεσοαστρική πυκνότητα πεδίου ακτινοβολίας του Γαλαξία μας κατά Draine ( $8,9 \times 10^{-14}$  erg/cm<sup>3</sup>) ή κατά Habing ( $5,3 \times 10^{-14}$  erg/cm<sup>3</sup>). Σε κάθε τύπο μοντέλου μπορεί να εμφανίζεται αύξηση ή μείωση της φωτοαντίδρασης από κάποιον παράγοντα.

.Πυκνότητα αερίου. Για μοντέλα σταθερής κατάστασης ενός σημείου, ο χρήστης θα καθορίσει την πυκνότητα του αερίου πριν αρχίσει τους υπολογισμούς. Για εξαρτώμενους από τον χρόνο και πολλαπλών σημείων υπολογισμούς συχνά έχει καθοριστεί μόνο η αρχική πυκνότητα. Οι διαφορετικές συνιστώσες εξέλιξης της

πυκνότητας μπορεί να περιέχονται σε αυτό το μοντέλο, εξαρτάται από το πώς αλλάζει η πυκνότητα με τον χρόνο και το βάθος.

.Θερμοκρασία αερίου και σκόνης. Οι περισσότεροι κώδικες των PDR υπολογίζουν την θερμική ισορροπία με αυτοσυνέπεια, αναλύοντας τους πληθυσμούς επιπέδου για τους κυρίως ψύκτες, των οποίων οι αφθονίες έχουν καθοριστεί στο μοντέλο. Από την άλλη, τα χημικά μοντέλα που εξαρτώνται από τον χρόνο και το βάθος έχουν την θερμοκρασία σαν καθορισμένη παράμετρο.

.Ιδιότητες των κόκκων σκόνης. Όλα τα χημικά μοντέλα περιλαμβάνουν την δημιουργία μοριακού υδρογόνου στους κόκκους. Μερικά περιλαμβάνουν και άλλες αντιδράσεις επιφάνειας και διασκόρπιση από την σκόνη. Οι σημαντικοί παράγοντες που πρέπει να καθοριστούν είναι το μέγεθος των κόκκων ή διασπορά των μεγεθών, και οι ιδιότητες των κόκκων (π.χ. αντανακλαστικότητα (albedo) και συνάρτηση φάσης). Μια διασπορά μεγεθών των κόκκων σκόνης που χρησιμοποιούμε συχνά είναι η Mathis- Rumpf- Nordsieck (MRN), που καταφέρνει να υπολογίσει τον μέσο όρο της καμπύλης της μεσοαστρικής εξάλειψης με την παραδοχή ότι η σκόνη αποτελείται από δύο συστατικά, το άμορφο πυρίτιο και τον γραφίτη. Η εξάλειψη ταιριάζει καλύτερα στην υπόθεση ότι όλοι οι κόκκοι έχουν συγκεκριμένο εύρος μεγέθους και αντανακλαστικότητα. Τώρα τα μοντέλα σκόνης ξεπερνάνε το μοντέλο MRN, και περιέχουν ένα συστατικό PAH (πολυκυκλικό αρωματικό υδρογονάνθρακες).

.Πάγωμα. Για μοντέλα, στα οποία περιλαμβάνονται τα είδη στέρεας κατάστασης όταν προσομοιώνεται η ψυχρή φάση του μεσοαστρικού μέσου, τα άτομα και τα μόρια παγώνουν στους κόκκους σκόνης. Αν δεν έχουμε εκρόφηση, υπάρχει ένας τύπος που μας δίνει τον βαθμό που ένα είδος εξαντλείται (δεσμεύεται) στην σκόνη, που έχει να κάνει με την πυκνότητα κόκκων σκόνης ανά πυρήνα υδρογόνου, την ακτίνα των κόκκων, την θερμοκρασία της σκόνης και τη μάζα και την πυκνότητα των ειδών, καθώς και την ικανότητα επικόλλησης κάθε είδος στην σκόνη. Για είδη που έχουν ασθενείς δεσμούς, όπως τα (CO), (N<sub>2</sub>), η ικανότητα επικόλλησης είναι κοντά στην μονάδα.

.Διαδικασίες εξάτμισης. Οι διαδικασίες θερμικής και μη εξάτμισης, που προκαλούνται από την δημιουργία του (H<sub>2</sub>), και από κοσμικές ακτίνες και φωτόνια, περιλαμβάνονται σε κάποια χημικά μοντέλα. Αυτό εισάγει πολλές ελεύθερες παραμέτρους, με αποτέλεσμα η επίδραση της κάθε διαδικασίας, κυρίως της μη θερμικής εξάτμισης, να είναι ασαφής. Τώρα, πειράματα μηχανισμών απορρόφησης θερμοκρασίας δίνουν μια καθαρή εικόνα πως τα είδη εξατμίζονται από τους κόκκους λόγω θερμοκρασίας.

.Βάσεις δεδομένων αντιδράσεων. Ο πιο σημαντικός παράγοντας σε κάθε μοντέλο είναι να υιοθετείται μια σειρά αντιδράσεων και οι συντελεστές ταχύτητάς τους. Η επιλογή του συντελεστή αντίδρασης εξαρτάται από παράγοντες όπως η διαθεσιμότητα, η ακρίβεια και το εύρος θερμοκρασιών. Υπάρχει διαθέσιμο ένα πλήθος συντελεστών ταχύτητας.

## Τι παίρνουμε από τα χημικά μοντέλα?

Ένα τυπικό χημικό μοντέλο υπολογίζει την κλασματική αφθονία όλων των ατομικών και μοριακών ειδών που περιλαμβάνονται στο δίκτυο, σε σχέση ή με το ατομικό ή με το μοριακό υδρογόνο. Αυτές οι κλασματικές αφθονίες δίνονται ως επίδραση του χρόνου (σε μοντέλα εξαρτώμενα από τον χρόνο) και του χώρου (σε εξαρτώμενα από το βάθος μοντέλα). Αν το μοντέλο περιλαμβάνει είδη επιφανειών, τότε θα δίνει και τις αφθονίες για τους πάγους. Τα μοντέλα PDR δίνουν επίσης θερμοκρασία αερίου και σκόνης, όπως και τα μεγέθη εκπομπής και έντασης των κυρίων <ψυκτών>, όπως τα (C), (C+), (O), (CO). Τελικά, οι συγκρίσεις πλεγμάτων από μοντέλα όπου οι εισαγόμενες παράμετροι έχουν επαληθευτεί με παρατηρήσεις, μας δίνουν πληροφορίες των φυσικών παραμέτρων όπως η πυκνότητα, η θερμοκρασία, ο ιονισμός από την κοσμική ακτινοβολία και η ηλεκτρομαγνητική ισχύ.

## Μοντέλα PDR (περιοχές που κυριαρχούνται από ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία).

Για τον πλήρη χαρακτηρισμό μιας τέτοιας περιοχής πρέπει να υπολογιστούν όλες οι τιμές όπως η κλασματική αφθονία των ατόμων και μορίων, η θερμοκρασία της σκόνης και του αερίου, η πίεση του αερίου και πιθανώς η σύνθεση της σκόνης και των PAH. Αυτοί οι υπολογισμοί είναι σημαντικοί όταν τα φωτόνια εισβάλλουν σε ένα αέριο, με αποτέλεσμα να ενώνονται διαφορετικά συστατικά των νεφών. Κάποιο μήκος κύματος θα επηρεάσει την θέρμανση της σκόνης και του αερίου, και θα αλλάξει η ισορροπία της θερμοκρασίας και η χημεία της περιοχής.

Οι υπολογισμοί της θερμοκρασίας και της χημείας είναι αλληλένδετα, και θα υπάρξει πρωτίστως ψύξη μέσω ατόμων και μορίων. Οι κωδικοί των PDR εκφράζονται μέσω 3 βημάτων υπολογισμού. 1) αναλύουν την τοπική χημική ισορροπία, ώστε να καθορίσουν τις τοπικές πυκνότητες, 2) αναλύουν την τοπική ισορροπία ενέργειας για να εκτιμήσουν τις τοπικές φυσικές τιμές όπως θερμοκρασίες, πιέσεις και πληθυσμοί μορίων και 3) αναλύουν την μετάβαση της ακτινοβολίας.

Μια παράμετρος- κλειδί στα μοντέλα αυτά είναι ο τύπος της γεωμετρίας. Οι πιο πολλοί κωδικοί είναι μονοδιάστατοι και χρησιμοποιούν παράλληλη γεωμετρία, που δέχεται φωτόνια από τη μια πλευρά ή και από τις δύο. Αυτή η γεωμετρία απλοποιεί σημαντικά το πρόβλημα της μετάβασης της ακτινοβολίας γιατί είναι επαρκής ο υπολογισμός μόνο για μια γραμμή θέασης. Μερικοί κωδικοί χρησιμοποιούν σφαιρική γεωμετρία.

Άλλη σημαντική παράμετρος είναι το πεδίο ακτινοβολίας. Στους πιο πολλούς κωδικούς, η περιβάλλον ακτινοβολία στο μακρινό υπεριώδες είναι σε μονάδες των πεδίων ακτινοβολίας κατά Draine ή κατά Habing. Η ακτινοβολία για ισότοπα πεδία είναι κατά μέσο όρο επί  $4\pi$  (κάτι που υποθέτει ότι το νέφος είναι σφαιρικό). Η κύρια διαφορά ενός με κατεύθυνση ή ενός ισότροπου πεδίου ακτινοβολίας μακρινού UV είναι η δράση της απόσβεσης από την σκόνη. Η σκέδαση της σκόνης

θέτει μια επιπλέον πολυπλοκότητα στην απόσβεση της ακτινοβολίας, επειδή πρέπει να καθοριστούν η αντανάκλαστικότητα και η συνιστώσα φάσης των κόκκων.

Σε χημικούς όρους, αυτές είναι οι κύριες παράμετροι για ένα μοντέλο PDR και χρειάζονται ακριβείς μετρήσεις της επίδρασης της ακτινοβολίας, της ζώνης μετάβασης (H)/(H<sub>2</sub>) και της ζώνης μετάβασης (C<sup>+</sup>)/(C)/(CO).

Για να υπολογίσουμε την θερμοκρασία σε ένα νέφος, πρέπει να υπολογίσουμε την ισορροπία μεταξύ θερμαινόμενου και ψυχομένου αερίου. Οι κυρίες πηγές του θερμαινόμενου αερίου είναι ο σχηματισμός και η διάλυση του (H<sub>2</sub>), οι κοσμικές ακτίνες, η φωτοηλεκτρική θέρμανση, η θέρμανση μέσω ακτίνων X και τα φωτοηλεκτρικά φαινόμενα από τους κόκκους σκόνης και τα μόρια των PAH. Σε όλες αυτές τις διεργασίες ιονίζονται άτομα και μόρια, και δίνουν ενέργεια σε ελευθέρη ηλεκτρόνια. Οι κύριες πηγές ψύξης είναι τα άτομα και τα μόρια ((O),(C), (C<sup>+</sup>), (CO) κ.α.), η αλληλεπίδραση του αερίου με την σκόνη και η επανασύνδεση μέσω της ακτινοβολίας (radiative recombination).

Τα μοντέλα των PDR διαφέρουν μεταξύ τους σε όλες αυτές τις παραμέτρους. Όμως συνήθως καταβάλλονται προσπάθειες συγκριτικής αξιολόγησης αυτών των μοντέλων.

### Μοντέλα αερίου- σκόνης.

Αυτά τα μοντέλα μπορούν να κατασκευαστούν με την χρήση 2 διαφορετικών προσεγγίσεων. Η πρώτη περιλαμβάνει μια απλή ή ψευδο- επιφανειακή χημεία, που βασίζεται στην παραδοχή ότι εμφανίζονται γρήγορες αντιδράσεις υδρογόνωσης (hydrogenation) ή/ και οξείδωσης (oxidation) με υψηλές επιδράσεις ως τον κορεσμό, ακόμα και σε χαμηλές θερμοκρασίες (10 K). Για παράδειγμα, θεωρούμε ότι τα άτομα (O) απορροφώνται γρήγορα από τις επιφάνειες για σχηματισμό του νερού, τα άτομα του αζώτου για το (NH<sub>3</sub>), και το (CO) για σχηματισμό (H<sub>2</sub>CO),(CH<sub>3</sub>OH). Το πλεονέκτημα αυτής της προσέγγισης είναι ότι δεν χρειάζεται να καθοριστούν οι συντελεστές των βαθμών αντίδρασης των επιφανειών, που είναι ελάχιστα διαθέσιμοι από πειράματα τα οποία έχουν προσαρμοστεί για μεσοαστρικές συνθήκες. Δεν μπορούμε να τους συμπεριλάβουμε στα ίδια μοντέλα που χρησιμοποιούμε για την αέρια φάση, γιατί η σκόνη μας φανερώνει πιο πολύ επιφάνεια από όγκο, ο οποίος δεν είναι γνωστός, επειδή οι κόκκοι σκόνης είναι πολύ πορώδεις. Το μειονέκτημα της απλής αυτής προσέγγισης είναι ότι περιλαμβάνει μόνο μικρό μέρος των αντιδράσεων των επιφανειών (υδρογόνωση μέχρι κορεσμού), και θέτουμε την παραδοχή ότι υπάρχει 100% ικανότητα χημικής αντίδρασης.

Η δεύτερη προσέγγιση περιέχει μια επιπλέον σύνθετη αντίδραση επιφάνειας στο μοντέλο. Λόγω των αβεβαιοτήτων στους συντελεστές ταχύτητας όλων των αντιδράσεων στις επιφάνειες και των αβεβαιοτήτων ως προς την φύση των επιφανειών των κόκκων σκόνης, έχουν εξελιχτεί διάφορες μέθοδοι. Η μέθοδος ορίου επικάθησης χρησιμοποιείται όταν το χρονοδιάγραμμα ενός ατόμου ή ενός μορίου να σαρώσει μια επιφάνεια είναι πολύ μικρότερο από τον χρόνο επικάθησης



του άλλου αντιδραστηρίου. Τότε οι χημικές αντιδράσεις είναι περιορισμένες από τον βαθμό επικάθησης του νέου είδος. Άλλη μέθοδος είναι η περιορισμένη από την αντίδραση προσέγγιση (μέσω υπολογισμών Monte Carlo), όπου ισχύει το αντίθετο. Ένα είδος είναι παγιδευμένο σε μια πλευρά και αντιδράει μόνο με τα άλλα που πέφτουν στην ίδια πλευρά (δεν υπάρχει η σάρωση). Αυτές οι μέθοδοι όμως δεν αντιμετωπίζουν την ανομοιογένεια των επιφανειών. Τελευταία έχουμε προσεγγίσεις που είναι πιο πλήρης.

### .Μοντέλα μετάβασης ακτινοβολίας.

Όταν δεν εμφανίζεται κάποια τοπική θερμοδυναμική ισορροπία (LTE, local thermodynamic equilibrium) είναι απαραίτητο να αναλογιστούμε όλες τις ξεχωριστές διαδικασίες που οδηγούν σε πληθυσμούς επιπέδων ιονισμού ή σε μείωση πληθυσμών. Οι συγκρούσεις και η ακτινοβολία καθορίζουν μαζί τους πληθυσμούς επιπέδων ιονισμού, μέσα από την εξίσωση της στατιστικής ισορροπίας. Η ερμηνεία των μοριακών γραμμών απαιτεί την χρήση ενός μοντέλου γραμμικής μετάβασης ακτινοβολίας που να είναι ικανό να υπολογίζει με ακρίβεια τους μη LTE πληθυσμούς επιπέδων ιονισμού και τα φάσματα που προκύπτουν. Οι κώδικες μετάβασης ακτινοβολίας υπολογίζουν την ροή ή την ένταση των ξεχωριστών γραμμικών εκπομπών και σε κάποιες περιπτώσεις τα προφίλ των γραμμών. Το βασικό προαπαιτούμενο ενός πετυχημένου κώδικα μετάβασης ακτινοβολίας είναι η διαθεσιμότητα και η ακρίβεια των δεδομένων των συγκρούσεων.

### .Προσέγγιση ταχύτητας μεγάλης κλίμακας (LVG, large velocity gradient).

Πολλές φορές μπορούμε να υπολογίσουμε τους σχετικούς πληθυσμούς διαφορετικών καταστάσεων περιστροφής των μορίων από τις εξισώσεις της στατιστικής ισορροπίας, με την μετάβαση ακτινοβολίας να προσεγγίζεται από μια απλή έκφραση της πιθανότητας απόδρασης, που περιλαμβάνει τους ίδιους πληθυσμούς. Αυτή η προσέγγιση υποθέτει ότι η περιοχή εκπομπής είναι ομοιογενής, ισόθερμη και χωρίς πεδία μεγάλης ταχύτητας, και μας επιτρέπει να ξεχωρίσουμε την μετάβαση ακτινοβολίας από τις εξισώσεις της στατιστικής ισορροπίας.

Ας υποθέσουμε ότι ένα φωτόνιο που εκπέμπεται από την θέση  $\rho_1$  απορροφάται στην θέση  $\rho_2$ , επηρεάζοντας έτσι τον εκεί πληθυσμό επιπέδων ιονισμού. Αν υποθέσουμε ότι το μέσο είναι ομοιογενές και ισόθερμο, τότε μπορούμε να κερδίσουμε την πιθανότητα μιας απορρόφησης όσο το φωτόνιο ταξιδεύει από το  $\rho_1$  στο  $\rho_2$ . Αυτή η προσέγγιση ονομάζεται εκτίμηση Sobolev ταχύτητας μεγάλης κλίμακας (LVG). Με άλλα λόγια, η LVG υποθέτει ότι οι διαφορές ταχυτήτων μεταξύ  $\rho_1$  και  $\rho_2$  είναι μεγάλες σχετικά με το πλάτος της διασποράς ταχυτήτων και στο  $\rho_1$  και στο  $\rho_2$ . Αυτό, μαζί με την παραδοχή μιας καθολικής θερμοκρασίας, πυκνότητας και αφθονίας μας διαβεβαιώνει ότι οι σχετικοί πληθυσμοί είναι οι ίδιοι σε όλο το νέφος. Ένας υπολογισμός της LVG διαφέρει αν έχει να κάνει με γραμμικά ή μη μόρια, αλλά περιλαμβάνοντας τις μεταβάσεις ακτινοβολίας και συγκρούσεων

μεταξύ αυθαίρετων ζευγαριών από επίπεδα περιστροφής, μπορεί να είναι σωστός και στις 2 περιπτώσεις.

Οι συντελεστές σύγκρουσης αντιπροσωπεύουν τις κύριες πηγές της αβεβαιότητας πολλών μορίων. Αλλά ακόμα και να υποθέσουμε ότι αυτοί είναι γνωστοί, δεν πρέπει να ξεχνάμε ότι τα μοντέλα LVG έχουν έναν εγγενή εκφυλισμό, στον οποίο ο συνδυασμός της πυκνότητας του αερίου και της θερμοκρασίας που δίνουν την καλύτερα ταιριαστή LVG δεν περιλαμβάνει οπωσδήποτε την σωστή θερμοκρασία ή πυκνότητα. Αν οι παρατηρήσεις μας λένε ότι υπάρχει μια καθαρή δομή στην περιοχή, η προσέγγιση LVG είναι, κατά ορισμό, ελλιπής.

### Μη- LVG προσέγγιση.

Η προσέγγιση LVG είναι καθαρά μια εκτίμηση, και παρ' ότι είναι πολύ δυνατή στο να περιορίζει τα διαστήματα των παραμέτρων της πιθανής πυκνότητας και θερμοκρασίας που ταιριάζουν με τα δεδομένα των παρατηρήσεων, χρειάζεται κάποιες φορές να λύνουμε το πρόβλημα της μετάβασης ακτινοβολίας με μεγαλύτερη ακρίβεια.

Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε πολλές τεχνικές και όπως ξέρουμε, ειδικά από τα μοντέλα της ηλιακής ατμόσφαιρας, οι εκτιμήσεις των αλγορίθμων της μετάβασης ακτινοβολίας μπορούν να οδηγήσουν σε ουσιώδη λάθη στην εκτίμηση της έντασης των γραμμών.

Όπως έχουμε δει, το πρόβλημα της μετάβασης ακτινοβολίας μπορεί να συνοψίζεται μέσω μιας εξίσωσης που περιγράφει την εκπομπή, την απορρόφηση και την κίνηση των φωτονίων σε μια ευθεία μέσα σε ένα μέσο. Αν δεν χρησιμοποιήσουμε την LVG, τότε το σύνολο των εξισώσεων που υπολογίζουν το πεδίο ακτινοβολίας και τους πληθυσμούς επιπέδων πρέπει να λυθούν ξεχωριστά, συνήθως με μια διαδικασία επανάληψης. Οι πιο συχνές μέθοδοι είναι

.Lambda alteration (LI), Monte Carlo (MC), Approximated/ Accelerated LI (ALI), Accelerated MC (AMC).

Οι παράμετροι που χρειάζονται, εκτός τα δεδομένα των συγκρούσεων, είναι η αφθονία των ειδών, η πυκνότητα και θερμοκρασία ως συνιστώσα του βάθους μέσα στο νέφος, το πεδίο ακτινοβολίας και το πεδίο ταχύτητας. Τα πιο συνήθη αποτελέσματα είναι οι πληθυσμοί επιπέδων, οι θερμοκρασίες διέγερσης, οι γραμμικές εντάσεις και τα προφίλ των γραμμών.

Έχουν εκδοθεί πολλές εργασίες στην πρόσφατη βιβλιογραφία που ενώνουν χημικά μοντέλα με μοντέλα μετάβασης ακτινοβολίας. Για παράδειγμα, εδώ συνοψίζουμε τα αποτελέσματα μιας θεωρητικής μελέτης του μορίου εκπομπής (12C32S) (εφεξής(CS)), που έχει στόχο να βοηθήσει τους παρατηρητές, μέσω θεωρητικών προφίλ του (CS), να ερμηνεύσουν την εκπομπή από αυτό το μόριο σε καυτούς πυρήνες. Σε αυτήν την εργασία τρέξαμε ένα μοντέλο για μεγάλο εύρος παραμέτρων του χώρου, καλύπτοντας μεγάλο εύρος μεγεθών των πυρήνων (που περιλαμβάνει υπέρπυκνους πυρήνες και τα αραιά εξωτερικά τους πέπλα), πυκνοτήτων,

θερμοκρασιών και ηλικιών. Τα αποτελέσματα χρησιμοποιήθηκαν σε έναν κώδικα μετάβασης ακτινοβολίας που βασίζεται στο ALI, που θεωρεί τα πρώτα 40 επίπεδα περιστροφής του (CS) στην βασική κατάσταση δόνησης. Τα μοριακά δεδομένα και οι τιμές των συγκρούσεων σε σχέση με το (H<sub>2</sub>) πάρθηκαν από το Cologne Database for Molecular Spectroscopy. Οι ποσότητες που υπολογίστηκαν με τον κώδικα μετάβασης ακτινοβολίας είναι οι εντάσεις και τα φάσματα εκπομπής. Τα τελευταία τα συλλέξαμε επίσης από κατάλληλες παρατηρήσεις μέσω τηλεσκοπίων, και τελικά μπορέσαμε να εκτιμήσουμε τις γραμμικές ροές, ως σημαντικά αποτελέσματα.

Πέρα από την αξία που θα έχουν τέτοιες εργασίες στο μέλλον με το ALMA, μπορούμε να κερδίσουμε κάποια γενικά αστροχημικά συμπεράσματα. Για παράδειγμα, βρήκαμε ότι η κλασματική αφθονία του (CS) είναι μεγαλύτερη στις εσωτερικές περιοχές των υπέρπυκνων πυρήνων, ανεξάρτητα την ηλικία του πυρήνα. Αυτό μας λέει ότι το μόριο (CS) είναι ένας από τους καλύτερους ανιχνευτές πολύ πυκνών περιοχών αερίου. Οι γραμμές του (CS) υψηλού J έχουν τις ισχυρότερες ροές γραμμών, και τα πάχη των γραμμών είναι ευρύτερα από αυτά των γραμμών χαμηλού J. Παρατηρησιακά, είδαμε ότι η μέγιστη θερμοκρασία κεραίας όλων των μεταβάσεων του (CS), εκτός την (1-0), είναι καλός ανιχνευτής της κινητικής θερμοκρασίας μέσα στον καυτό πυρήνα. Τελικά, στο κέλυφος, όσο πιο γηραιός είναι ο καυτός πυρήνας, τόσο πιο ισχυρή είναι η αυτό- απορρόφηση του (CS). Ο καλύτερος ανιχνευτής ηλικίας είναι η γραμμή (CS 1-0), που δείχνει την μεγαλύτερη μεταβολή των ροών σχετικά με την ηλικία.

Η υπεροχή αυτής της προσέγγισης είναι ότι δεν χρειάζεται να γίνει εκτίμηση σχετικά με τις παρατηρήσεις για να συγκρίνουμε τους θεωρητικούς υπολογισμούς με τις παρατηρήσιμες φασματικές γραμμές. Τα μοντέλα αυτά δίνουν απευθείας τα προφίλ των γραμμών και τις εντάσεις τους.

## 9) Παρατηρήσεις. Ποια μόρια, ποιες μεταβάσεις?

Στα προηγούμενα κεφάλαια είδαμε ότι για να ανιχνεύσουμε διαφορετικά αστρονομικά χαρακτηριστικά στον Γαλαξία μας ή σε μακρινούς γαλαξίες με την χρήση των γραμμών εκπομπής, πρέπει να επιλέξουμε γραμμές που να ανταποκρίνονται σε κατάλληλες μεταβάσεις. Οι μεταβάσεις που χρησιμοποιούμε πρέπει να είναι αυτές που τα ανώτατα επίπεδα ιονισμού είναι κοινός πληθυσμός στο αέριο που παρατηρούμε. Σε πολλές περιπτώσεις, ο πιο σημαντικός μηχανισμός διέγερσης προς το ανώτατο επίπεδο είναι οι συγκρούσεις, με το (H<sub>2</sub>) να είναι ο συχνότερος εταίρος των συγκρούσεων.

Για παράδειγμα, είδαμε ότι η μετάβαση (CO1-0) είναι κατάλληλη για ανίχνευση ψυχρού ουδέτερου αερίου, με κινητική θερμοκρασία 10 K και πυκνότητα μορίων υδρογόνου 1000/cm<sup>3</sup>. Παρόλα αυτά, οι παρατηρήσεις της ακτινοβολίας που εκπέμπεται σε αυτήν την μετάβαση δεν μπορούν να αποκαλύψουν την παρουσία ψυχρού ή θερμού αερίου σε πυκνότητα 100000/cm<sup>3</sup>, επειδή μπορεί να

εμφανιστούν από-διεγέρσεις, λόγω συγκρούσεων στο ανώτατο επίπεδο, πριν εμφανιστεί η ακτινοβολία στην γραμμή (1-0). Έτσι για να παρατηρήσουμε αέρια μεγαλύτερης πυκνότητας, πρέπει να χρησιμοποιήσουμε πιο διεγερμένες γραμμές του (CO), που έχουν μεγαλύτερες αυθόρμητες πιθανότητες ακτινοβολίας (υποθέτοντας ότι αυτά τα πολύ διεγερμένα επίπεδα έχουν αρκετό πληθυσμό στην επικρατούσα θερμοκρασία). Εναλλακτικά, ο παρατηρητής μπορεί να χρησιμοποιήσει γραμμή από άλλο είδος μορίου, που έχει πιο κατάλληλες βασικές τιμές για τις φυσικές συνθήκες στο αέριο που παρατηρούμε. Βέβαια υπάρχουν πολυπλοκότητες από τα μεγάλα οπτικά βάθη στην γραμμή θέασης, που μας δυσκολεύουν να αναγνωρίσουμε τις φυσικές συνθήκες στην περιοχή που παρατηρούμε. Η απλή φυσική στα παραπάνω επιχειρήματα περιλαμβάνεται στην έννοια της κρίσιμης πυκνότητας.

Έχουμε ανακαλύψει περισσότερα από 180 είδη μορίων αέριας φάσης στις μεσοαστρικές και περιαστρικές περιοχές του Γαλαξία μας και 50 σε άλλους γαλαξίες. Μερικά από τα μόρια αυτά έχουν βρεθεί σε πολλές μεταβάσεις. Ένα ακραίο παράδειγμα, το (CO), έχει βρεθεί σε καθαρές περιστροφικές μεταβάσεις από όλα τα επίπεδα ( $J=1$  μέχρι  $J=37$ ), στο βασικό επίπεδο δόνησης. Τα περισσότερα μόρια έχουν ανακαλυφτεί σε μερικά μόνο επίπεδα μεταβάσεων, αλλά και πάλι δίνουν πολλές επιλογές στον σχεδιασμό ενός προγράμματος παρατήρησης. Είναι σημαντικό να δοκιμάζουμε και να επιλέγουμε αυτές τις μεμονωμένες μοριακές γραμμές (από τις χιλιάδες πιθανές επιλογές), που να μας δείχνουν πιο εύκολα τις τιμές για τις μεσοαστρικές ή περιαστρικές περιοχές που μελετάμε.

Δεν έχουν όλες οι πιθανές μοριακές γραμμές ίση αξία για τους αστρονόμους ως ανιχνευτές μεσοαστρικής ή περιαστρικής ύλης. Υπάρχει σχετικός πίνακας με τα είδη μορίων και συγκεκριμένες μεταβάσεις, και σε ποιες συχνότητες, ενέργειες ανώτατου επιπέδου και τιμές θερμοκρασίας και πυκνότητας αερίου στο οποίο αντιστοιχούν.

## Σημείωση 1

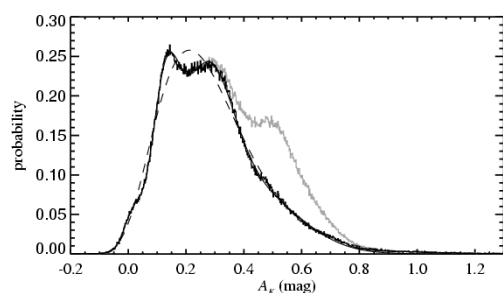
Με τον φασματογράφο GREAT στο αεροπλάνο- τηλεσκόπιο SOFIA, αστρονόμοι ανακάλυψαν μια φασματική γραμμή του μορίου παρά- ( $\text{H}_2\text{D}^+$ ) σε μια περιοχή αστρογέννησης, 400 έτη φωτός μακριά, στον ρ Οφιούχο. Το ( $\text{H}_2\text{D}^+$ ) δημιουργείται σε πολύ ψυχρά και πυκνά μεσοαστρικά νέφη, από συγκρούσεις των άφθονων ιόντων ( $\text{H}_3^+$ ) με μόρια (HD). Σε αυτά τα ψυχρά νέφη θερμοκρασίας κάτω από 20 K, αλλάζει με την πάροδο του χρόνου η κατάσταση από ορθό- υδρογόνο σε παρά- υδρογόνο, βάσει χημικών μοντέλων. Έτσι η σχέση ορθό/ παρά του ( $\text{H}_2\text{D}^+$ ) χρησιμεύει ως χημικό ρολόι στον καθορισμό ηλικίας ενός μοριακού νέφους.

Οι μετρήσεις του SOFIA στο ψυχρό αυτό νέφος, όπου δημιουργήθηκαν 3 πρωταστέρια όμοιου τύπου με τον Ήλιο μας, δίνουν ηλικία του νέφους μεγαλύτερη των 1 εκατομμυρίων ετών.

## Σημείωση 2

Στήλη πυκνότητας.

Όταν ένα αστρικό νέφος απορροφάει ακτινοβολία, με ένα ραδιοτηλεσκόπιο παίρνουμε το φάσμα ως μια Γκαουσιανή αντίστροφη καμπύλη. Περίπου στο μέσο αυτού του σχήματος, που μοιάζει με κύπελλο, υψώνουμε ένα ορθογώνιο, που αντιστοιχεί στην απορρόφηση που προκαλεί το νέφος. Το μέγεθος του ορθογωνίου είναι ανάλογο του βαθμού απορρόφησης. Μοιάζει με στήλη (στήλη πυκνότητας). Ο βαθμός απορρόφησης εξαρτάται από την πυκνότητα και άλλους παράγοντες (μεταλλικότητα, θερμοκρασία, ιονισμό κ.α.).



## Σημείωση 3

Με το συμβολομετρικό ραδιοτηλεσκόπιο ALMA ανακαλύψαμε ότι ο πρωτοπλανητικός δίσκος γύρω από το MWC 480 περιέχει μεγάλες ποσότητες methylcyanide ( $\text{CH}_3\text{CN}$ ), ένα σύνθετο μόριο με βάση τον άνθρακα. Υπάρχει αρκετό methylcyanide γύρω από MWC 480 ώστε να γεμίσει τους ωκεανούς της Γης. Αυτό το αστέρι είναι μόλις ενός εκ. ετών. Το όνομά του παραπέμπει στον Mount Wilson Catalog για B και A αστέρια με λαμπρές γραμμές υδρογόνου στο φάσμα τους. Αυτό το μόριο και το πιο απλό συγγενικό του υδροκυάνιο ( $\text{HCN}$ ) βρέθηκε στις ψυχρότερες εξωτερικές περιοχές στον νεοσύστατο αστρικό δίσκο, σε μια περιοχή ανάλογη με την ζώνη του Kuiper Belt στο ηλιακό μας σύστημα. Αυτό ενισχύει το σενάριο ότι η Γη εμπλουτίστηκε από κομήτες και αστεροειδείς αυτής της περιοχής, που μας έφεραν νερό και πολύπλοκα οργανικά μόρια.

