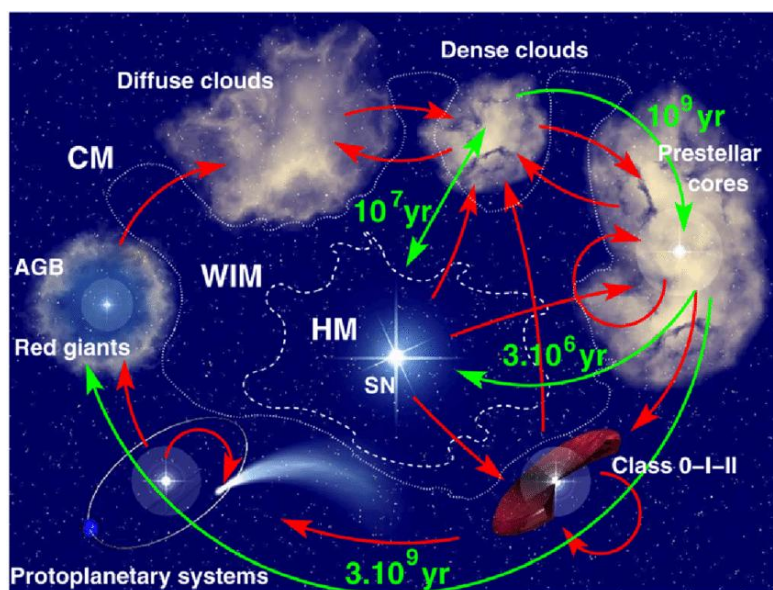


ΜΕΣΟΑΣΤΡΙΚΗ ΚΑΙ ΜΕΣΟΓΑΛΑΞΙΑΚΗ ΥΛΗ

Την σημερινή εποχή του σύμπαντος η κατανομή της βαρυονικής (μη σκοτεινής) ύλης είναι ως εξής:

Περίπου το 7% της βαρυονικής ύλης βρίσκεται στα αστέρια, κυρίως ακολουθίας ή εξελιγμένα, και αστρικά πτώματα. Το 2% αποτελεί το διάχυτο αέριο ανάμεσα στα αστέρια, η μεσοαστρική ύλη (interstellar medium, ISM). Το 5% είναι περιγαλαξιακό αέριο (circumgalactic medium, CGM), που δεν συνδέεται με τα αστέρια ενός γαλαξία αλλά είναι βαρυτικά δεσμευμένο σε αυτόν, μέσα στην γαλαξιακή άλω σκοτεινής ύλης. Το 4% αποτελεί το καυτό εσωσμηνικό αέριο (intracluster medium, ICM), που δεν ανήκει σε κάποιον συγκεκριμένο γαλαξία, αλλά είναι δεσμευμένη σε γαλαξιακά σμήνη. Το 38% της βαρυονικής ύλης είναι το διάχυτο μεσογαλαξιακό αέριο (diffuse intergalactic medium, DIM), που αποτελείται από μικρής πυκνότητας και βασικά φωτιονισμένο αέριο θερμοκρασίας 10^5 K. Το 44% αποτελεί το θερμό- καυτό μεσογαλαξιακό αέριο (warm- hot intergalactic medium, WHIM), που έχει θερμανθεί μέσω κρουστικών κυμάτων σε θερμοκρασίες 10^5 K- 10^7 K.



1) Η μεσοαστρική ύλη

Τα μοριακά νέφη (molecular clouds) περιέχουν ως κυρίαρχη μορφή Υδρογόνου το H_2 . Φτάνουν τοπικά σε πυκνότητα 10^6 σωματίδια/ cm^3 , όπου δημιουργούνται αστέρια μέσω κατάρρευσης της ύλης, λόγω αυτοβαρύτητας. Αν και καταλαμβάνουν ελάχιστο όγκο της μεσοαστρικής ύλης, λόγω μεγάλης πυκνότητας περιέχουν σημαντικό μέρος της συνολικής μάζας της (το 20%). Η θερμοκρασία τους είναι στους 15K.

Στο ψυχρό ουδέτερο αέριο (cold neutral medium, CNM) κυριαρχεί το ατομικό αέριο (HI). Καταλαμβάνει μόνο το 1% του όγκου της μεσοαστρικής ύλης αλλά περίπου το 30% της μάζας της, με θερμοκρασία 80K.

Και στο θερμό ουδέτερο αέριο, θερμοκρασίας 6000K (warm neutral medium, WNM) κυριαρχεί το HI. Αποτελεί το 35% της μάζας της μεσοαστρικής ύλης.

Το θερμό ιονισμένο αέριο (warm ionized medium, WIM) αποτελείται βασικά από ιονισμένο Υδρογόνο (HII). Με θερμοκρασία 8000K αποτελεί το 12% της μεσοαστρικής ύλης.

Το καυτό ιονισμένο αέριο (hot ionized medium, HIM) αποτελείται επίσης από ιονισμένο Υδρογόνο και διαφέρει από το θερμό λόγω θερμοκρασίας (10^6 K). Είναι πιο αραιό από το ηλιακό στέμμα, που έχει παρόμοια θερμοκρασία. Πρόκειται για αέριο που θερμάνθηκε από κρουστικά κύματα των εκρήξεων σουπερνόβα. Σχηματίζει αραιές τοπικές φούσκες (μέσα σε μια φούσκα μεγέθους 100 pc βρίσκεται και ο ήλιος μας). Αν και καταλαμβάνει τον περισσότερο όγκο της μεσοαστρικής ύλης, περιέχει μόλις το 3% της μάζας της.

Η συνολική μάζα της μεσοαστρικής ύλης του Γαλαξία μας είναι δύσκολο να εκτιμηθεί, με επικρατέστερη τιμή τις 7 δις ηλιακές μάζες. Το 1% από αυτή είναι σε μορφή σκόνης. Η αστρική μάζα του Γαλαξία μας είναι 60 δις ηλιακές μάζες, αλλά η αναλογία αστρικής μάζας- μεσοαστρικής ύλης κυμαίνεται σημαντικά από γαλαξία σε γαλαξία. Για παράδειγμα, στο μεγάλο Μαγγελανικό νέφος το αέριο κυριαρχεί της αστρικής μάζας κατά αναλογία 1 προς 1,4. Αντίθετα, η αναλογία αερίου/ αστρικής μάζας στην κεντρική περιοχή του ελλειπτικού γαλαξία M87 είναι 0,02/ 1!

Η χημική σύνθεση της μεσοαστρικής ύλης δεν είναι ομοιογενής σε έναν γαλαξία. Όμως πάντα κυριαρχεί το Υδρογόνο, και τα υπόλοιπα χημικά στοιχεία έχουν πολύ μικρότερη αναλογία από το Ήλιον.

The Most Abundant Elements in Universe

1	H	93.4%	1200	<u>Next 6</u>	
2	He	6.5%	120	Al	0.0002%
3	O	0.06%	1	Ca	0.0002%
4	C	0.03%	1/2	Na	0.0002%
5	Ne	0.011%	1/5	Ni	0.0001%
6	N	0.01%	1/6	Cr	0.00004%
7	Fe	0.003%	1/20	P	0.00003%
8	Mg	0.003%	1/20		
9	Si	0.002%	1/30		
10	S	0.001%	1/60		

Τα νεφελώματα από ιονισμένο αέριο στην μεσοαστρική ύλη

Στην μεσοαστρική ύλη υπάρχουν 3 τύποι ιονισμένων νεφελωμάτων.

.Οι περιοχές HII περιέχουν αέριο που θερμάνθηκε και ιονίστηκε από αστέρια μεγάλης μάζας με επιφανειακή θερμοκρασία $>25000\text{K}$. Ένα παράδειγμα αποτελεί το νεφέλωμα του Ωρίωνα.

.Τα πλανητικά νεφελώματα περιέχουν αέριο που εκτινάχτηκε από εξελιγμένο αστέρι μικρής μάζας, και στην συνέχεια θερμάνθηκε και ιονίστηκε από τον λευκό νάνο (πυρήνας αστεριού μικρής μάζας). Ένα πολύ γνωστό πλανητικό νεφέλωμα είναι το ring nebular.

.Τα υπολείμματα σουπερνόβα (supernova remnants), όπως το νεφέλωμα του Καρκίνου στον Ταύρο, αποτελούνται από πολύ θερμό και ιονισμένο αέριο.

Αυτοί οι 3 τύποι σχετικά ψυχρού ιονισμένου αερίου αποτελούν το μικρότερο μέρος ιονισμένου αερίου της μεσοαστρικής ύλης. Το 90% της ιονισμένης ύλης του Γαλαξία μας είναι σε μορφή θερμού ιονισμένου αερίου (WIM).

Κατάσταση ισορροπίας (equilibrium)

Το αέριο στην μεσοαστρική και μεσογαλαξιακή ύλη αποτελείται από άτομα, μόρια, ιόντα και ελεύθερα ηλεκτρόνια. Όλα αυτά αλληλεπιδρούν μεταξύ τους. Η μεσοαστρική αλλά και η μεσογαλαξιακή ύλη δεν βρίσκονται σε κατάσταση τέλει ισορροπίας. Σε μια δεδομένη θερμοκρασία, τα άτομα του Υδρογόνου κινούνται με διπλή ταχύτητα από αυτά του Ηλίου και τετραπλή από αυτά του Οξυγόνου. Στην ατμόσφαιρα της Γης τα μόρια Αζώτου και τα μόρια Οξυγόνου βρίσκονται σε κινητική ισορροπία στους 300K . Αυτή η κινητική ισορροπία (kinetic equilibrium, <thermalized>) επιτυγχάνεται με την αλληλεπίδραση των σωματιδίων. Ο χρόνος για να επιτευχθεί η κινητική ισορροπία εξαρτάται από την τοπική πυκνότητα. Ενώ ένα σωματίδιο θα συγκρουστεί με άλλο σε νανοδευτερόλεπτα σε μια πλανητική ατμόσφαιρα, στα πυκνά μέρη των μοριακών νεφελωμάτων χρειάζεται, κατά μέσο όρο, περισσότερο από μια ώρα και στο θερμό μεσοαστρικό αέριο μισό αιώνα για να συμβεί αυτό! Έτσι σε αυτά τα περιβάλλοντα η διαδικασία να επιτευχθεί κινητική ισορροπία είναι πολύ αργή. Υπάρχουν και άλλα είδη ισορροπίας, όπως η ισορροπία διέγερσης και η ισορροπία πίεσης.

Θέρμανση και ψύξη της μεσοαστρικής ύλης

Η θέρμανση (αύξηση της κινητικής ενέργειας των σωματιδίων) της μεσοαστρικής ύλης συμβαίνει βασικά μέσω συγκρούσεων των σωματιδίων της ύλης με ελεύθερα ηλεκτρόνια. Αυτά μεταβιβάζουν κινητική ενέργεια στα σωματίδια της μεσοαστρικής ύλης. Τα ελεύθερα ηλεκτρόνια μεγάλης ταχύτητας προέρχονται (αποδεσμεύτηκαν) από άτομα που έχουν αλληλεπιδράσει με την κοσμική ακτινοβολία, από κόκκους σκόνης ή άτομα που συγκρούστηκαν με φωτόνια, ή απλά επιταχύνθηκαν από κρουστικά κύματα.

Η κοσμική ακτινοβολία αποτελείται κυρίως από φορτισμένα σωματίδια (90% πρωτόνια). Προέρχονται από εκρήξεις σουπερνόβα και άλλα βίαια φαινόμενα. Τα μοριακά νέφη θερμαίνονται κυρίως από την κοσμική ακτινοβολία, που μπορεί να διεισδύσει

σε αυτά (η σκόνη δεν επιτρέπει στα φωτόνια να διεισδύσουν στο εσωτερικό των μοριακών νεφών).

Στις ψυχρές και θερμές περιοχές ουδέτερου αερίου της μεσοαστρικής ύλης ο βασικός μηχανισμός παραγωγής ελεύθερων ηλεκτρονίων είναι η σύγκρουση φωτονίων με κόκκους σκόνης. Με την κινητική τους ενέργεια τα ελεύθερα ηλεκτρόνια θερμαίνουν αποτελεσματικά το γύρω τους αέριο, αποτελώντας τον βασικό μηχανισμό θέρμανσης του ψυχρού και του θερμού ουδέτερου μεσοαστρικού αερίου. Αντίθετα, το θερμό και το καυτό ιονισμένο αέριο θερμαίνονται κυρίως μέσω των κρουστικών κυμάτων των εκρήξεων σουπερνόβα.

Η ψύξη της μεσοαστρικής ύλης συμβαίνει με την εκπομπή φωτονίων από τα σωματίδιά της. Το ψυχρό ουδέτερο αέριο και τα μοριακά νέφη ψύχονται με την εκπομπή υπέρυθρης ακτινοβολίας από τα σωματίδια Άνθρακα και Οξυγόνου. Το θερμό ουδέτερο και το θερμό ιονισμένο αέριο ψύχονται από την εκπομπή φωτονίων του Υδρογόνου, αλλά και ιονισμένων ατόμων όπως τα OIII, CIV, OVI.

Ένα ιονισμένο αέριο θερμοκρασίας πάνω από 1 εκατομμύρια K παρουσιάζει εκπομπή ακτινοβολίας πέδησης (free free emission or bremsstrahlung). Αυτή η ακτινοβολία είναι σημαντική για την ψύξη του καυτού ιονισμένου αερίου και του μεσογαλαξιακού αερίου. Στις τεράστιες περιοχές χαμηλής πυκνότητας του διάχυτου μεσογαλαξιακού αερίου έχουμε ψύξη του αερίου λόγω συμπαντικής διαστολής.

Η θέρμανση ενός αερίου έχει ως αποτέλεσμα την διαστολή του (ελάττωση της πίεσης), που με τη σειρά της έχει ως αποτέλεσμα την ψύξη του. Αντίθετα, η ψύξη έχει ως αποτέλεσμα την συστολή (αύξηση της πίεσης), που θα φέρει την αύξηση θερμοκρασίας. Αυτή η τάση ισορρόπησης σπάει αν διατηρήσουμε την πίεση σταθερή.

Σε μια εναλλακτική προσέγγιση υπάρχουν 3 φάσεις του μεσοαστρικού αερίου. Η πρώτη είναι το ψυχρό ουδέτερο αέριο με θερμοκρασία 40K, μεγάλη πυκνότητα και μικρό βαθμό ιονισμού. Η δεύτερη είναι το θερμό αέριο, με ουδέτερο αλλά και με ιονισμένο μέρος, με θερμοκρασία 8000K και μικρότερη πυκνότητα. Η τρίτη φάση είναι το καυτό ιονισμένο αέριο, το μεγαλύτερο μέρος της συνολικής μάζας του μεσοαστρικού αερίου, που δημιουργείται από <φούσκες> εκρήξεων σουπερνόβα. Έχει θερμοκρασία πάνω από 10^6 K, πολύ μικρή πυκνότητα και είναι σχεδόν τελείως ιονισμένο.

2) Το ψυχρό ουδέτερο αέριο

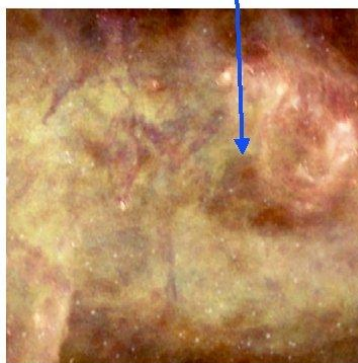
Το ψυχρό ουδέτερο αέριο (CNM, cold neutral medium) στην μεσοαστρική ύλη απεικονίζεται στις φασματικές γραμμές απορρόφησης, στα φάσματα καυτών αστεριών του πεδίου. Παρατηρούμε γραμμές των SII, SiII, MgII, MnII, CII, FeI. Οι γραμμές αυτές μας πληροφορούν για την πυκνότητα, θερμοκρασία, χημική σύνθεση και τον βαθμό ιονισμού του αερίου ανάμεσα σε εμάς και του αστεριού. Επίσης σημαντική είναι και η εκπομπή της σκόνης του ψυχρού ουδέτερου αερίου. Η μέση πυκνότητα του ψυχρού ουδέτερου αερίου στον Γαλαξία μας είναι 1 άτομο ανά κυβικό εκατοστό!

Στην γειτονιά του Ηλίου, σε ακτίνα 100 pc, δεν υπάρχει πολύ ψυχρό ουδέτερο αέριο, αλλά κυρίως θερμό ουδέτερο αέριο, λόγω της τοπικής <φούσκας> σουπερνόβα.

Cold Neutral Medium (CNM)

◆ Observed in 21cm HI *absorption* (including self absorption)

◆ $T \approx 50$ K, $n_{\text{HI}} \approx 50 \text{ cm}^{-3}$.



CGPS, 21cm HI (Perseus region)

3) Το θερμό ουδέτερο αέριο

Το ψυχρό και το θερμό ουδέτερο αέριο (WNM, warm neutral medium) αποτελούν περισσότερο από τη μισή μάζα του μεσοαστρικού αερίου του Γαλαξία μας. Σε αυτά το περισσότερο από το αέριο είναι ουδέτερο. Ενώ η γραμμή εκπομπής του Υδρογόνου Lyman α δεν διαπερνάει την γήινη ατμόσφαιρα, ανιχνεύουμε το ουδέτερο αέριο πιο εύκολα στα ραδιοκύματα, στην γραμμή των 21cm. Μία θεωρητική σφαίρα θερμού μεσοαστρικού αερίου με ακτίνα 3 pc (περιέχει 1 ηλιακή μάζα αερίου) λάμπει περίπου 6 δις φορές λιγότερο από τον ήλιο. Το θερμό μεσοαστρικό αέριο έχει πολύ μεγάλη αναλογία μάζας/ λαμπρότητας σε σχέση με τον ήλιο μας. Έτσι είναι πολύ σημαντική η εκπομπή στα 21 εκατοστόμετρα για την ανίχνευσή του. Ενώ σε άλλα μήκη κύματος, όπως στο ορατό και στο υπεριώδες τα αστέρια και στο υπέρυθρο η σκόνη, δημιουργούν έναν σημαντικό θόρυβο, στα 21 εκατοστά υπάρχει ενόχληση μόνο από την κοσμική ακτινοβολία υποβάθρου και τα ηλεκτρόνια κοσμικών ακτίνων που αλληλεπιδρούν με το μεσοαστρικό μαγνητικό πεδίο.

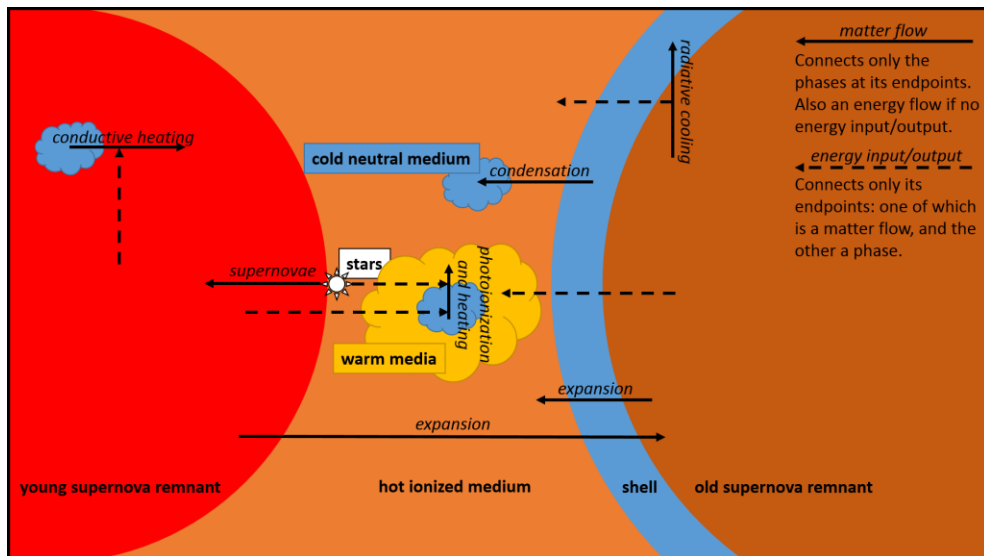


Table 1: Components of the interstellar medium^[3]

Ύλη	Όγκος	Διαστάσεις σε pc	Θερμοκρασία (K)	Πυκνότητα σωματίδια/cm ³	Κατάσταση του Υδρογόνου	Βασική τεχνική παρατήρησης
Μοριακά νέφη	< 1%	80	10–20	10 ² –10 ⁶	Μοριακό	Μοριακές γραμμές απορρόφησης στο υπέρυθρο και στα ραδιοκύματα
Ψυχρή ουδέτερη ύλη (CNM)	1–5%	100–300	50–100	20–50	Ατομικό ουδέτερο	Γραμμή απορρόφησης H I :12 cm
Θερμή ουδέτερη ύλη (WNM)	10–20%	300–400	6000–10000	0.2–0.5	Ατομικό ουδέτερο	Εκπομπή H I :12 cm
Θερμή ιονισμένη ύλη (WIM)	20–50%	1000	8000	0.2–0.5	Ιονισμένο	Εκπομπή Hα, πάλσαρ
Περιοχές H II	< 1%	70	8000	10 ² –10 ⁴	Ιονισμένο	Εκπομπή Hα, πάλσαρ
Καυτή ιονισμένη ύλη (HIM)	30–70%	1000–3000	10 ⁶ –10 ⁷	10 ^{–4} –10 ^{–2}	Ιονισμένο, και τα μέταλλα ισχυρά ιονισμένα	Εκπομπή ακτίνων Χ, εκπομπή ισχυρά ιονισμένων μετάλλων

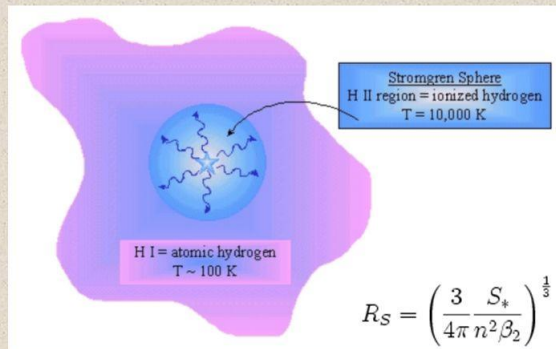
4) Το θερμό ιονισμένο αέριο και τα ιονισμένα νεφελώματα

Ένα ηλεκτρόνιο, δεσμευμένο σε ένα άτομο, ιόν ή μόριο, μπορεί να διεγερθεί σε μεγαλύτερη ενεργειακή βαθμίδα μέσω ακτινοβολίας ή σύγκρουσης. Με τον ίδιο τρόπο μπορεί να ιονιστεί η μεσοαστρική ύλη (φωτοϊονισμό ονομάζουμε το ιονισμό μέσω ακτινοβολίας). Στην ουδέτερη μεσοαστρική ύλη ο βαθμός ιονισμού είναι πολύ χαμηλός, και ακόμη χαμηλότερος στην ψυχρή ουδέτερη μεσοαστρική ύλη. Παρόλο που τα ελεύθερα ηλεκτρόνια σπανίζουν στην ουδέτερη μεσοαστρική ύλη, αποτελούν σημαντικούς ρυθμιστές των ιδιοτήτων του μεσοαστρικού αερίου. Συμβάλλουν ώστε να βρεθεί το θερμό μεσοαστρικό αέριο σε κινητική ισορροπία. Τα ηλεκτρόνια που αποσπώνται από τους κόκκους σκόνης μέσω ακτινοβολίας αποτελούν την βασική πηγή θέρμανσης του ψυχρού αλλά και του θερμού ουδέτερου αερίου.

Όμως μόνο το θερμό και το καυτό ιονισμένο αέριο περιέχουν κυρίως ιονισμένο Υδρογόνο. Το θερμό ιονισμένο αέριο αποτελεί μόλις το 12% της μάζας της μεσοαστρικής ύλης του Γαλαξία. Οι περιοχές ιονισμένου Υδρογόνου (HII regions) και τα πλανητικά νεφελώματα έχουν παρόμοια θερμοκρασία με το θερμό ιονισμένο αέριο (8000 K), αλλά τα τελευταία έχουν πολύ μεγαλύτερη πυκνότητα.

Για να συμπεράνουμε τον βαθμό ιονισμού μιας περιοχής πρέπει να γνωρίζουμε την πυκνότητα και την θερμοκρασία του αερίου (Υδρογόνου). Είναι σημαντικό αν το αέριο είναι οπτικά διαφανές ή όχι, και αν υπάρχει σημαντικό ποσοστό ιονισμού μέσω συγκρούσεων (collisional ionization). Σε ένα ιονισμένο νεφέλωμα, όπως ένα πλανητικό ή μία περιοχή HII, κυριαρχεί ο φωτοϊονισμός από τα λαμπρά αστέρια (εκπομπή υπεριώδους ακτινοβολίας). Η σφαίρα Stromgren είναι η περιοχή όπου κυριαρχεί η ακτινοβολία μιας πηγής (αστέρι) σε μια συγκεκριμένη ακτίνα του αερίου γύρω της. Ένα καυτό (μεγάλης μάζας) αστέρι χρειάζεται μόλις 3000 έτη ώστε να δημιουργήσει και τέτοια σφαίρα στο ψυχρό ουδέτερο μεσοαστρικό αέριο, ιονίζοντάς το με την υπεριώδη ακτινοβολία του σχεδόν πλήρως σε ακτίνα 6 pc. Στην σφαίρα Stromgren επικρατεί ισορροπία ιονισμού, αλλά όχι ισορροπία πίεσης. Η θερμοκρασία έξω από τη σφαίρα είναι 80K και μέσα 8000K, και η πυκνότητα σωματιδίων είναι διπλάσια στο εσωτερικό της. Η σφαίρα έχει 200 φορές μεγαλύτερη πίεση από το αέριο γύρω της, με αποτέλεσμα να διαστέλλεται το καυτό της αέριο. Όμως ο χρόνος διαστολής ξεπερνάει κατά πολύ τον χρόνο επανασύνδεσης του ιονισμένου αερίου σε ουδέτερο. Έτσι χρειάζονται 500.000 έτη ώστε να διπλασιάσει το μέγεθός της μια σφαίρα Stromgren, εκατό φορές περισσότερο χρόνο από την επανασύνδεση. Το αέριο Ήλιον κάνει την σφαίρα Stromgren πιο πολύπλοκη, επειδή απαιτείται μεγάλη ενέργεια ώστε αυτό να ιονιστεί.

Free-free Emission: Stromgren Sphere



- S_* is the ionizing flux, n is the density, and β is the total recombination coefficient.
- Ionized sphere is “radiation bounded,” that is, its size is set by the amount of ionizing radiation produced by the source.
- By construction, every ionizing photon will ionize an atom.

27

Θέρμανση και ψύξη

Οι παρατηρήσεις μας δείχνουν ότι η θερμοκρασία μιας περιοχής HII είναι ανεξάρτητη από την επιφανειακή θερμοκρασία του αστεριού που την θερμαίνει. Ουσιαστικά είναι το αποτέλεσμα της ισορροπίας ανάμεσα στους μηχανισμούς θέρμανσης και ψύξης του ιονισμένου αερίου. Ο φωτοϊονισμός αποτελεί την βασική πηγή θέρμανσης των ιονισμένων νεφελωμάτων. Οι μηχανισμοί ψύξης μετριάζουν την κινητικότητα των σωματιδίων. Η ψύξη μέσω επανασύνδεσης (recombination cooling) συμβαίνει με την απώλεια κινητικής ενέργειας των ηλεκτρονίων που επανασυνδέονται με τα πρωτόνια, δημιουργώντας άτομα ουδέτερου Υδρογόνου. Αυτός ο μηχανισμός ψύξης μέσω εκπομπής ακτινοβολίας (radiative recombination) είναι μια πολύ αργή διαδικασία. Αν ήταν ο μόνος μηχανισμός ψύξης, το ιονισμένο αέριο μέσα σε μια σφαίρα Stromgren θα ήταν 47% θερμότερο από την επιφανειακή θερμοκρασία του αστεριού. Ένας άλλος μηχανισμός ψύξης είναι η ακτινοβολία πέδησης (bremsstrahlung), που επιβραδύνει τα ελεύθερα ηλεκτρόνια όταν προσεγγίσουν πρωτόνια ή άλλα ιόντα. Σε ένα αέριο με θερμοκρασία 8000K οι 2 παραπάνω μηχανισμοί είναι το ίδιο αποτελεσματικοί. Ένα αστέρι κυρίως ακολουθίας τύπου O3 με επιφανειακή θερμοκρασία 45000K θα θέρμαινε το αέριο στην σφαίρα στους 66000K αν υπήρχε μόνο ο ένας μηχανισμός και στους 33000K και με τους δύο. Για να ψυχθεί το αέριο στους 8000K (θερμοκρασία βάσει των παρατηρήσεων) απαιτείται και ένας τρίτος μηχανισμός, η εκπομπή μέσω διέγερσης από συγκρούσεις (collisionally excited line emission). Αν ένα ελεύθερο ηλεκτρόνιο διεγείρει, μέσω σύγκρουσης, ένα άτομο ή ένα ιόν, αυτό θα αποδιεγερθεί με την εκπομπή ακτινοβολίας. Αν η ακτινοβολία διαφύγει από το αέριο, τότε αυτό θα απολέσει θερμοκρασία. Εδώ έχει σημαντικό ρόλο η μεταλλικότητα της ύλης. Τα σπάνια στην μεσοαστρική ύλη άτομα βαρύτερων χημικών στοιχείων όπως το Οξυγόνο και το Άζωτο είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικά σε αυτόν τον μηχανισμό ψύξης. Αν υπάρχει μεγάλη πυκνότητα ελεύθερων ηλεκτρονίων, όπως σε πολύ πυκνές περιοχές HII, η ψύξη με αυτόν τον μηχανισμό είναι αναποτελεσματική. Αντίθετα, οι αραιές ιονισμένες περιοχές ψύχονται σε χαμηλότερες θερμοκρασίες.

Περιοχές μεγάλης μεταλλικότητας ψύχονται σε χαμηλότερες θερμοκρασίες από ίδιας πυκνότητας περιοχές μικρής μεταλλικότητας.



Η δυναμική των περιοχών HII

Σε μια νέα διαστελλόμενη περιοχή HII η ταχύτητα διαστολής είναι, σχετικά με την ταχύτητα του ήχου στο γύρω ουδέτερο αέριο, υπερηχητική. Δημιουργείται ένα κρουστικό κύμα που αρχικά συμπιέζει ελαφρά το γύρω αέριο. Σταδιακά η ταχύτητα διαστολής αυξάνεται και η διαφορά πίεσης και θερμοκρασίας της <φούσκας> με την εξωτερική περιοχή είναι σημαντικές. Το κρουστικό μέτωπο αυξάνεται σε πυκνότητα αλλά ελαττώνεται σε ταχύτητα. Η ταχύτητα του ήχου στο ουδέτερο αέριο αυξάνεται, και το αέριο της φούσκας δεν έχει πλέον υπερηχητική ταχύτητα. Έτσι ένα μέρος του ουδέτερου αερίου πρώτα συμπιέζεται από το κρουστικό κύμα και μετά ιονίζεται και απομακρύνεται μέσω της υπεριώδους ακτινοβολίας του αστεριού.

5) Το καυτό ιονισμένο αέριο

Αν και καταλαμβάνει τον μισό όγκο της μεσοαστρικής ύλης, η πολύ αραιή καυτή ιονισμένη ύλη (hot ionized medium, HIM) αποτελεί μόνο ένα μικρό ποσοστό της συνολικής μάζας της. Η μεγάλη θερμοκρασία της οφείλεται στην θέρμανση μέσω κρουστικών κυμάτων από εκρήξεις σουπερνόβα. Δημιουργούνται μεγάλες φούσκες, όπως η τοπική μας φούσκα (Local Bubble), που έχει διάμετρο 50 pc, και δημιουργήθηκε από μια έκρηξη σουπερνόβα πριν από 2 εκατομμύρια έτη. Αυτή η ηλικία προκύπτει

από την εύρεση ιζημάτων στον ωκεανό της Γης, πλούσια στο ισότοπο ^{60}Fe . Από τις μετρήσεις στις ακτίνες Χ εκτιμάται η θερμοκρασία του καυτού αερίου της φούσκας στο 1 εκατομμύριο βαθμούς. Μέσα στην φούσκα υπάρχει και πιο ψυχρό, πυκνότερο αέριο. Ο ήλιος βρίσκεται σε μια περιοχή 10pc με ιδιότητες του θερμού ιονισμένου αερίου (WIM). Αυτή η περιοχή ονομάζεται τοπικό μεσοαστρικό νέφος.

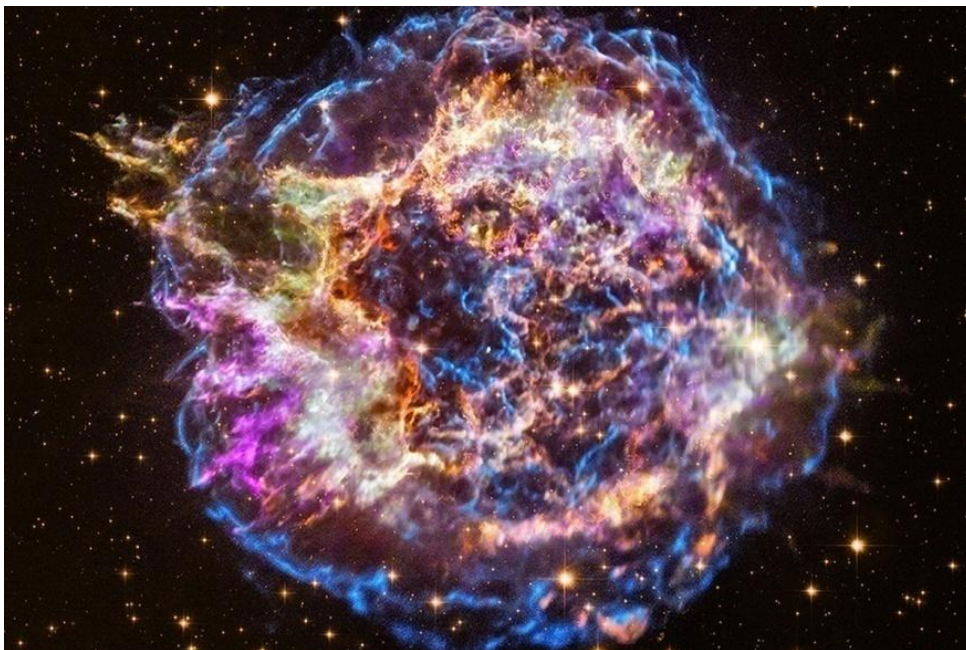
Το κρουστικό μέτωπο

Κρουστικό μέτωπο ονομάζουμε ένα λεπτό διαχωριστικό στρώμα ανάμεσα σε 2 περιοχές αερίου με πολύ διαφορετική πυκνότητα, πίεση και ταχύτητα. Δημιουργείται από ένα ηχητικό κύμα που διασχίζει το αέριο. Το κύμα αναπτύσσεται μέχρι να σχηματιστεί το μέτωπο, που θα έχει αρκετή πυκνότητα ώστε να σημειωθεί ικανός αριθμός συγκρούσεων σωματιδίων. Για παράδειγμα, ένας ήχος στην καθημερινότητά μας δεν δημιουργεί κρουστικό μέτωπο. Ένα τυπικό μεσοαστρικό μέτωπο από σουπερνόβα έχει ταχύτητα διάδοσης 1000 km/s. Το κρουστικό μέτωπο μετατρέπει το κινούμενο με υπερηχητική ταχύτητα αέριο σε υποηχητικό. Η πίεση, πυκνότητα και θερμοκρασία του αερίου στο μέτωπο αυξάνονται και μειώνεται η ταχύτητά του. Το καυτό αέριο στο κρουστικό μέτωπο δεν βρίσκεται σε θερμοδυναμική ισορροπία και ψύχεται. Σχηματίζεται μια ζώνη ακτινοβολίας που αποβάλλει την θερμότητα, και κυριαρχείται από εκπομπή bremsstrahlung σε θερμοκρασίες πάνω από 2 εκατομμύρια K, και από εκπομπή διέγερσης μέσω συγκρούσεων των σωματιδίων σε θερμοκρασίες 100.000 K- 2 εκατομμύρια K. Στις μεγάλες θερμοκρασίες η ψύξη είναι πολύ αργή και το κρουστικό μέτωπο εξαντλεί το διαθέσιμο αέριο πριν αυτό ψυχθεί σημαντικά. Σε μικρότερες θερμοκρασίες η ψύξη μέσω ακτινοβολίας είναι πιο αποτελεσματική, το αέριο αποκτάει θερμοκρασία ισορροπίας και το κρουστικό μέτωπο γίνεται ισόθερμο.

Τα υπολείμματα (νεφελώματα) εκρήξεων σουπερνόβα (SNR, supernova remnants).

Ένας τρόπος δημιουργίας κρουστικού μετώπου είναι η παροχή μεγάλης ποσότητας ενέργειας σε μικρό όγκο αερίου σε μικρό χρονικό διάστημα, όπως συμβαίνει σε μία έκρηξη. Υπάρχουν 2 βασικά είδη σουπερνόβα, αυτές από κατάρρευση αστρικού πυρήνα (cc, core collapse) και οι θερμοπυρηνικές εκρήξεις λευκών νάνων (thermonuclear). Στις cc σουπερνόβα δημιουργείται ενέργεια με τη μορφή νετρίνων 10^{53} erg. Όμως αυτή δεν μεταβιβάζεται στην γύρω μεσοαστρική ύλη, αφού τα νετρίνα αλληλεπιδρούν ελάχιστα με αυτήν. Επίσης, η ενέργεια ύψους 10^{49} erg με τη μορφή φωτονίων που παράγεται διαπερνάει κατά μεγάλο ποσοστό την μεσοαστρική ύλη. Μόνο η κινητική ενέργεια του διαστελλόμενου νεφελώματος που δημιουργείται από τα εξωτερικά στρώματα του αστεριού και την πυκνή γύρω του (περιαστρική) ύλη μεταβιβάζεται στην μεσοαστρική ύλη. Ένα τυπικό νεφέλωμα έχει μάζα 10 ηλιακές και ταχύτητα διαστολής 3000 km/s, με κινητική ενέργεια 2×10^{51} erg. Αρχικά το νεφέλωμα κινείται βαλλιστικά με σχεδόν σταθερή ταχύτητα, στην φάση της ελεύθερης διαστολής (free expansion). Δεν επιβραδύνεται σημαντικά μέχρι να σαρώσει μεσοαστρική ύλη μάζας συγκρίσιμη με την δική του αρχική μάζα. Στο παράδειγμά μας αυτό θα συμβεί μετά από 1000 έτη. Η αρχική ταχύτητα της διαστολής ξεπερνάει κατά πολύ την ταχύτητα του ήχου της μεσοαστρικής ύλης. Το κρουστικό μέτωπο που σχηματίζεται αυξάνει σημαντικά την

πίεση στην μεσοαστρική ύλη που σαρώνει. Το αέριο του νεφελώματος γίνεται λιγότερο πυκνό και καυτό όσο διαστέλλεται το νεφέλωμα, και ψύχεται αδιαβατικά. Όταν η πίεση του αερίου στο νεφέλωμα ελαττωθεί ώστε να είναι παρόμοια με αυτήν του αερίου που δέχτηκε το κρουστικό μέτωπο, σχηματίζεται ένα αντίστροφο (reverse) κρουστικό μέτωπο που κινείται προς το εσωτερικό του νεφελώματος, θερμαίνοντας το αέριο που συναντάει. Στο τέλος της φάσης ελεύθερης διαστολής έχουμε, θεωρητικά, ένα σφαιρικό κρουστικό μέτωπο να διαστέλλεται στην μεσοαστρική ύλη. Εσωτερικά του ένα στρώμα καυτού, σχετικά πυκνού αερίου που αποτελείται από μεσοαστρική ύλη και ύλη του νεφελώματος περικυκλώνει έναν πυρήνα από καυτό μικρής πυκνότητας αέριο που θερμάνθηκε από το αντίστροφο κρουστικό μέτωπο. Στην πράξη παρατηρούμε να σχηματίζονται νήματα πυκνότερης ύλης. Μάλιστα στο νεφέλωμα του Καρκίνου παρατηρούμε την επιτάχυνση της διαστολής του, που οφείλεται στην ακτινοβολία του πάλσαρ στο κέντρο του (νεφέλωμα ανέμου πάλσαρ, pulsar wind nebula).



Η φάση μετά την ελεύθερη διαστολή ονομάζεται φάση Sedon- Taylor (κύμα έκρηξης, blastwave). Σε αυτή τη φάση η μάζα της μεσοαστρικής ύλης που δέχτηκε το κρουστικό μέτωπο ξεπερνάει κατά πολύ την μάζα της ύλης που σχημάτισε αρχικά το νεφέλωμα. Οι ιδιότητες του κρουστικού μετώπου δεν καθορίζονται πια από την αρχική ύλη του νεφελώματος. Η πίεση του αερίου πίσω από το κρουστικό μέτωπο παραμένει πολύ μεγαλύτερη από αυτή της μεσοαστρικής ύλης, με αποτέλεσμα να συνεχίζεται σχεδόν ανεμπόδιστα η διαστολή του νεφελώματος. Το νεφέλωμα του Κύκνου (Cygnus Loop) είναι ένα χαρακτηριστικό νεφέλωμα Sedon- Taylor. Η απότομη αύξηση της πυκνότητας από μέσα προς τα έξω σε ένα τέτοιο νεφέλωμα

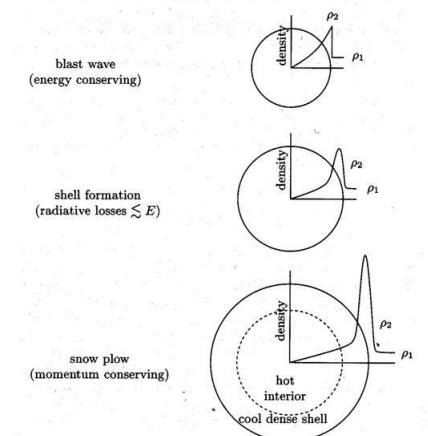
έχει ως συνέπεια η περισσότερη μάζα του να βρίσκεται σε έναν δακτύλιο στο εξωτερικό του. Αυτή η φάση διαρκεί μέχρι να ψυχθεί αποτελεσματικά το νεφέλωμα (1000 - 40.000 έτη μετά την σουπερνόβα).



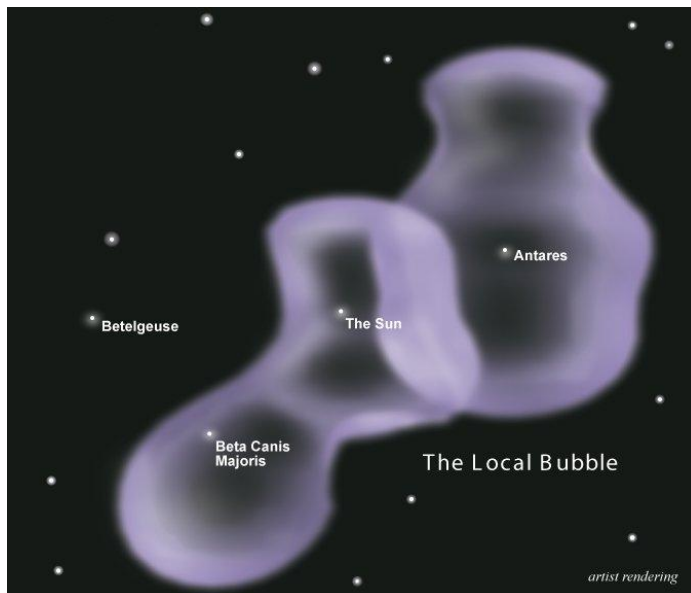
Μόλις γίνει σημαντική η απώλεια ενέργειας μέσω ακτινοβολίας σχηματίζεται ένα πυκνό κέλυφος πίσω από το κρουστικό μέτωπο. Το νεφέλωμα βρίσκεται πια στην φάση snowplow (εκχιονιστικό φτυάρι). Ονομάζεται έτσι γιατί το πυκνό διαστελλόμενο κέλυφος <σαρώνει> την μεσοαστρική ύλη. Σε αυτή την φάση σχεδόν όλη η μάζα του νεφέλωματος βρίσκεται στο κέλυφος, ενώ εσωτερικά υπάρχει ένα πολύ καυτό και αραιό αέριο, που πιέζει το κέλυφος. Η ταχύτητα διαστολής του νεφέλωματος ελαττώνεται και γίνεται υποηχητική. Το κρουστικό κύμα υποβαθμίζεται σε ακουστικό. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργούνται οι τοπικές φούσκες καυτού, μικρής πυκνότητας ιονισμένου αερίου, που σε διάστημα 35 εκατομμυρίων ετών φτάνουν σε διάμετρο τα 300pc.



HD phases of an SNR evolution

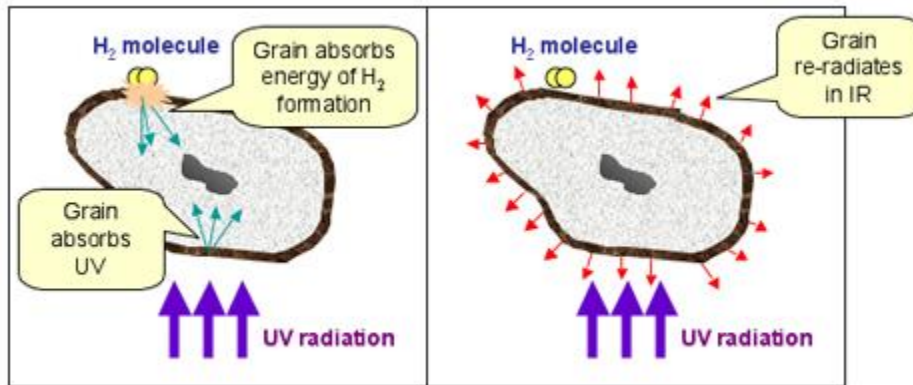


Στον Γαλαξία μας οι εκρήξεις σουπερνόβα δεν δημιουργούν μεμονωμένες φούσκες στην μεσοαστρική ύλη αλλά σχηματίζονται μέσα σε μεγάλες περιοχές καυτού ιονισμένου αερίου. Τα αστέρια μεγάλης μάζας, που καταλήγουν σε εκρήξεις σουπερνόβα κατάρρευσης αστρικού πυρήνα, βρίσκονται στο μέσο επίπεδο του δίσκου (επίπεδο με πλάτος μόλις 50pc). Αυτό το πλάτος είναι μικρότερο από την διάμετρο μιας φούσκας, με αποτέλεσμα να είναι πολύ πιθανό να αλληλεπικαλύπτονται φούσκες. Στην δημιουργία καυτής μεσοαστρικής ύλης συμβάλλουν, σε μικρό ποσοστό, και τα καυτά αστέρια Wolf- Rayet με τους πολύ ισχυρούς αστρικούς ανέμους τους. Ο χρόνος ψύξης του μικρής πυκνότητας καυτού ιονισμένου αερίου ξεπερνάει την ηλικία του Γαλαξία μας, με αποτέλεσμα αυτό να μην βρίσκεται σε θερμική ισορροπία, αλλά να ψύχεται συνεχώς. Σε πολύ μικρότερο χρόνο θα σημειωθεί πάλι μια έκρηξη σουπερνόβα, που θα δημιουργήσει μια νέα φούσκα.



6) Η μεσοαστρική σκόνη

Η μεσοαστρική σκόνη ανιχνεύεται έμμεσα. Η σκόνη σκεδάζει το φως (scattering), όπως συμβαίνει στο νεφέλωμα αντανάκλασης γύρω από τις Πλειάδες. Επίσης η σκόνη απορροφάει (absorbing), ανάλογα τις ιδιότητες των κόκκων της, το ορατό φως και την υπεριώδη ακτινοβολία, και εκπέμπει στο υπέρυθρο. Η σκέδαση και απορρόφηση του φωτός από τη σκόνη ονομάζεται εξάλειψη (extinction). Ο βαθμός εξάλειψης εξαρτάται από τη πολικότητα του φωτός. Υπάρχει αναλογία ανάμεσα στην εξάλειψη του φωτός από τη σκόνη και την πυκνότητα στήλης του Υδρογόνου, που μας επιτρέπει να υπολογίσουμε την πυκνότητα του μεσοαστρικού αερίου ή ενός νεφελώματος από την εξάλειψη της σκόνης.



Οι ιδιότητες των κόκκων

Η σκόνη αποτελείται από στερεό υλικό με σημαντική αντανάκλαστικότητα. Η συνολική μάζα της μεσοαστρικής ύλης του Γαλαξία εκτιμάται σε 7 δις ηλιακές. Ενώ σχεδόν όλη αυτή η μάζα αποτελείται από Υδρογόνο, η σκόνη του Γαλαξία εκτιμάται στις 500.000 ηλιακές μάζες. Η μισή από την συνολική ύλη των βαρύτερων χημικών στοιχείων από το Ήλιο είναι διασπαρμένη με την μορφή σκόνης. Τα χημικά στοιχεία που επικρατούν στην σκόνη είναι ο Άνθρακας, το Μαγνήσιο, το Πυρίτιο και ο Σίδηρος. Αυτά σχηματίζουν χημικές ενώσεις με στοιχεία όπως το Υδρογόνο, το Οξυγόνο και το Άζωτο. Υπάρχουν κόκκοι σκόνης από ένα μόνο χημικό στοιχείο (π.χ. γραφίτης) αλλά και πιο σύνθετοι, όπως τα πυριτικά άλατα (silicates). Στις πιο ψυχρές και πυκνές περιοχές των νεφελωμάτων σχηματίζονται κόκκοι με κάλυμμα από πάγο (π.χ. νερό, διοξείδιο του Άνθρακα). Οι 2 βασικές μορφές κόκκων σκόνης πυριτικών αλάτων είναι τα olivine και pyroxene, που είναι και πολύ συνηθισμένα στη Γη μας. Το μέγεθος των κόκκων είναι σημαντικό για την μελέτη της μεσοαστρικής σκόνης. Για παράδειγμα, στο εσωτερικό των νεφελωμάτων σουπερνόβα μόνο οι σχετικά μεγάλοι κόκκοι δεν καταστράφηκαν από την έκρηξη. Επίσης σημαντικό είναι και το σχήμα των κόκκων, που απέχει από το σφαιρικό.

Θέρμανση και ψύξη, δημιουργία και καταστροφή των κόκκων

Βασικά οι κόκκοι σκόνης θερμαίνονται από την υπεριώδη ακτινοβολία των αστεριών μεγάλης μάζας, και ψύχονται αποτελεσματικά μέσω εκπομπής στο υπέρυθρο. Μια μέση θερμοκρασία της σκόνης στην μεσοαστρική ύλη είναι 20 K.

Οι κόκκοι αναπτύσσονται μέσω συγκρούσεων με κολλώδη αποτελέσματα (sticky collisions). Για την αποτελεσματική δημιουργία των κόκκων απαιτείται μεγαλύτερη πυκνότητα από αυτή της μεσοαστρικής ύλης, όπως έχουν οι αστρικοί άνεμοι των αστεριών στον ασυμπτωτικό κλάδο. Ένα αστέρι τύπου Mira παρουσιάζει μεγάλη απώλεια μάζας μέσω του αστρικού ανέμου του, με αποτέλεσμα να εμπλουτίζει την γύρω μεσοαστρική ύλη με σκόνη. Αντίθετα, οι συγκρούσεις μεγάλης ταχύτητας καταστρέφουν τους κόκκους. Κοντά σε εκρήξεις σουπερνόβα σχεδόν όλοι οι κόκκοι εξατμίζονται από το κρουστικό κύμα. Οι κόκκοι επίσης παρασύρονται από το αέριο, όπως συμβαίνει στο εσωτερικό των πρωτοπλανητικών δίσκων. Ενώ τα βραδέως κινούμενα άτομα στο ψυχρό αέριο προσκολλώνται στους κόκκους, τα ιόντα σε ένα καυτό αέριο αφαιρούν άτομα από αυτούς (sputtering). Και η κοσμική ακτινοβολία καταστρέφει την σκόνη. Ενώ σε ένα νεφέλωμα σουπερνόβα ο μέσος χρόνος

ζωής ενός κόκκου σκόνης είναι τα 100.000 έτη, στην μεσοαστρική ύλη είναι τα 30 εκατομμύρια έτη.



7) Τα μοριακά νέφη

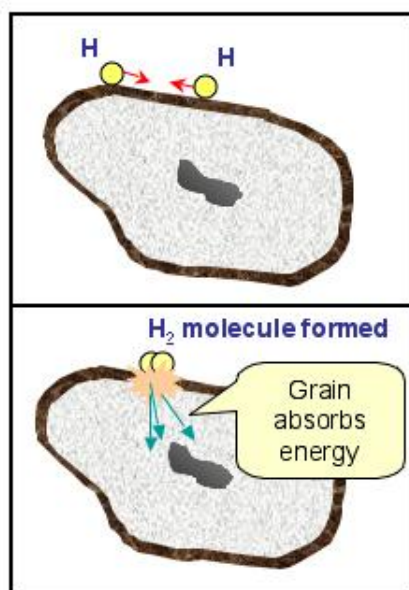
Τα μοριακά νέφη αποτελούνται κυρίως από μοριακό Υδρογόνο. Το επόμενο σε αναλογία μόριο (το Ήλιο δεν σχηματίζει εύκολα μόρια) είναι το μονοξείδιο του Άνθρακα, σε αναλογία 1/20.000 με το H₂. Υπάρχουν και πολλά άλλα, κυρίως διατομικά μόρια στα μοριακά νεφελώματα, αλλά η ενέργεια διάσπασης αυτών των μορίων σε άτομα είναι μικρότερη από την ενέργεια ιονισμού των ατόμων που συναντάμε στην μεσοαστρική ύλη, με αποτέλεσμα να μην διατηρούνται εύκολα. Το μοριακό Υδρογόνο διασπάται από την υπεριώδη ακτινοβολία και τις συγκρούσεις σε θερμοκρασία >50.000 K. Έτσι μπορεί να συντηρηθεί μόνο σε ψυχρές προστατευμένες περιοχές όπως τα μοριακά νέφη. Το H₂ δεν ανιχνεύεται άμεσα, επειδή ως μόριο 2 ίδιων ατόμων δεν εκπέμπει διπολική ακτινοβολία (dipole radiation). Το ανιχνεύουμε μέσω της εκπομπής του CO, με την παραδοχή της σχετικής αναλογίας τους.



Δημιουργία, θέρμανση και ψύξη των μοριακών νεφών

Τα μοριακά νέφη περιέχουν πολύ σκόνη και είναι αδιαφανή στις υπεριώδεις ακτίνες, με αποτέλεσμα στο εσωτερικό τους να μην θερμαίνονται από αυτές. Ο βασικός μηχανισμός θέρμανσης είναι μέσω της κοσμικής ακτινοβολίας. Για την ψύξη πάλι είναι πολύ σημαντικό το CO, που εκπέμπει αρκετά ισχυρά ώστε να συμβάλλει στην ψύξη των μοριακών νεφών.

Το H₂ δημιουργείται αποτελεσματικά στις επιφάνειες των κόκκων σκόνης, που δρουν ως καταλύτες. Τα άτομα Υδρογόνου που συγκρούονται με τους κόκκους σκόνης έχουν πιθανότητες να κολλήσουν στις επιφάνειες αυτών και να σχηματίσουν μόρια. Η αποτελεσματικότητα της συγκόλλησης των ατόμων Υδρογόνου στους κόκκους σκόνης εξαρτάται από τους εξής παράγοντες: πόσο αργές είναι οι σχετικές ταχύτητες της σύγκρουσης, πόσο μεγάλο μέγεθος έχουν οι κόκκοι της σκόνης, πόσο ψυχρή είναι η σκόνη, και την χημική σύσταση της σκόνης. Η διαδικασία της συγκόλλησης ατόμων στους κόκκους σκόνης ονομάζεται adsorption (προσρόφηση). Absorption (απορρόφηση) είναι όταν το άτομο διεισδύσει στο εσωτερικό του κόκκου.



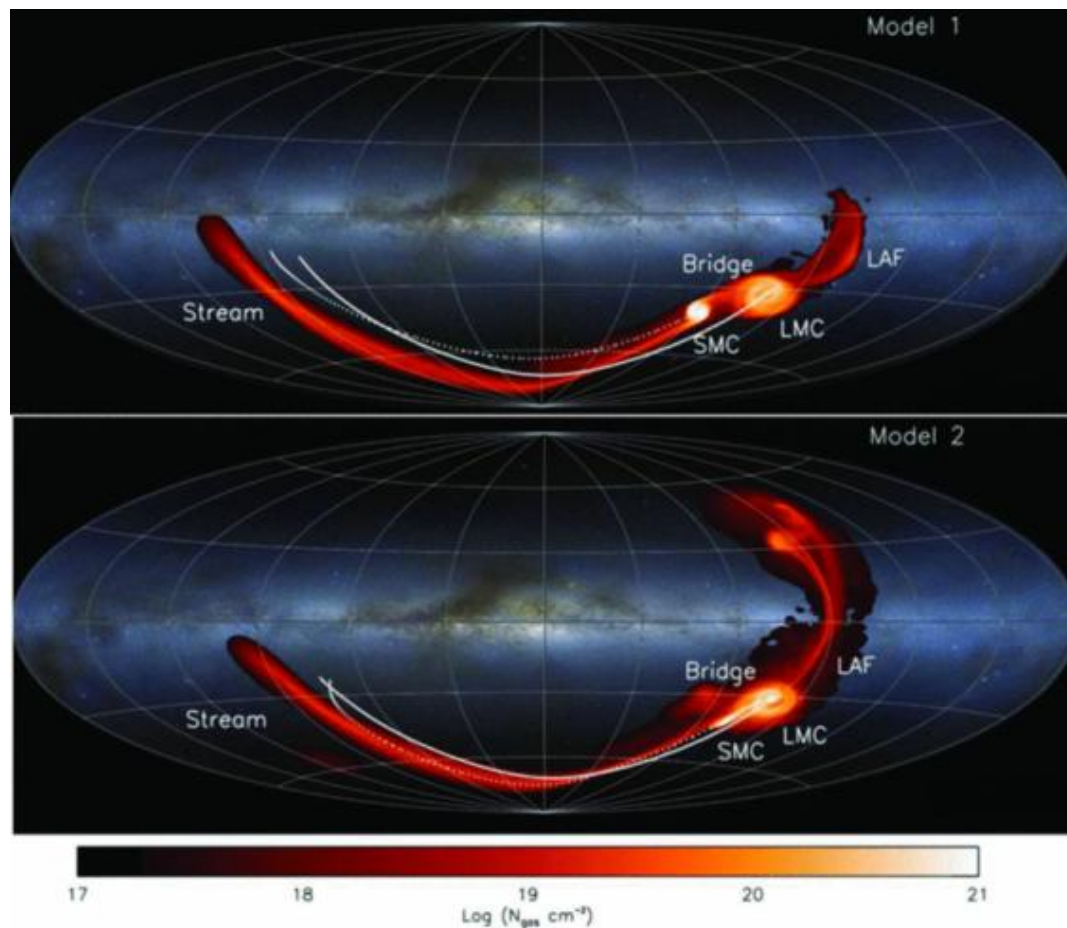
Η υπεριώδης ακτινοβολία από εξωτερικές πηγές (κοντινά άστρα) απορροφάται από το μοριακό Υδρογόνο στο εξωτερικό ενός νέφους, με αποτέλεσμα το εσωτερικό του να μένει προστατευμένο. Έτσι στις εξωτερικές περιοχές ενός μοριακού νέφους τα μόρια έχουν μικρότερη αναλογία με τα άτομα από ότι στο εσωτερικό του. Αυτές οι συνθήκες ευνοούν την αστρογέννηση, δηλαδή στο εσωτερικό τα μόρια διατηρούνται για αρκετό χρόνο ώστε να ψυχθεί αποτελεσματικά και να συμπυκνωθεί κατά τόπους ένα μοριακό νέφος. Τότε η δημιουργία αστεριών φασματικού τύπου A, B, O θα διαλύσει τα μόρια γύρω τους, διαβρώνοντας από μέσα το μοριακό τους νεφέλωμα.

8) Το περιγαλαξιακό και το εσωσμηνικό αέριο

Η περιγαλαξιακή ύλη (circumgalactic medium, CGM) είναι το διάχυτο αέριο, με την προσθήκη σκόνης, που βρίσκεται πέρα από τον αστρικό πληθυσμό ενός γαλαξία, αλλά είναι βαρυτικά δεσμευμένη σε αυτόν. Η εσωσμηνική ύλη (intracluster medium) είναι το καυτό διάχυτο αέριο (και σκόνη) που βρίσκεται μέσα στην σφαίρα βαρυτικής κυριαρχίας (virial radius) ενός γαλαξιακού σμήνους, χωρίς να ανήκει σε κάποιον συγκεκριμένο γαλαξία. Η σφαίρα βαρυτικής κυριαρχίας εκτείνεται 200 φορές περισσότερο από την ορατή ύλη ενός σμήνους γαλαξιών ή ενός γαλαξία. Για το Γαλαξία μας, φτάνει σε ακτίνα τα 220 kpc, με τον γαλαξιακό δίσκο να έχει πλάτος 3kpc. Η μάζα virial του Γαλαξία μας (περιέχει και την σκοτεινή ύλη) είναι 1,1 τρις ηλιακές, ενώ η αστρική του μάζα είναι μόλις 60 δις ηλιακές. Το σμήνος της κώμης της Βερενίκης έχει virial radius 2,5 Mpc και virial μάζα 2 τετράκις ηλιακές (2×10^{15}).

Η περιγαλαξιακή ύλη του Γαλαξία μας

Η έκτασή της φτάνει ως το 1/3 της απόστασης μέχρι τον γαλαξία της Ανδρομέδας. Στην περιγαλαξιακή ύλη το αέριο βρίσκεται σε διάφορες καταστάσεις. Το περιγαλαξιακό αέριο προέρχεται από συσσώρευση μεσοσμηνικής ύλης, από αέριο που αποδεσμεύτηκε από νάνους γαλαξίες και από αέριο που εκτινάχτηκε από την κεντρική περιοχή του Γαλαξία μας. Ανιχνεύεται στα 21 εκατοστά, γραμμή εκπομπής του ουδέτερου Υδρογόνου. Σε αυτό ανακαλύψαμε τεράστια νέφη μεγάλων ταχυτήτων (HVC, high-velocity clouds). Η περιγαλαξιακή ύλη του Γαλαξία μας παρουσιάζει το μέγιστο πυκνότητας στήλης γύρω από τα Μαγγελανικά νέφη. Αυτή η ύλη χαρακτηρίζεται ως μεσοαστρική ύλη των 2 δορυφόρων γαλαξιών παρά ως περιγαλαξιακή ύλη του Γαλαξία. Ένα μεγάλης μάζας (1 δις ηλιακές) και ταχύτητας ρεύμα αερίου και σκόνης αναπτύσσεται από τα Μαγγελανικά νέφη μέσα στον Γαλαξία, και ονομάζεται Μαγγελανικό ρεύμα.



Σε αντίθεση, πολλά από τα HVC δεν έχουν εμφανή σύνδεση με δορυφόρους του Γαλαξία μας. Φαίνεται όμως να έχουν σύνδεση με τον γαλαξιακό μας δίσκο, βρίσκονται σε μια ζώνη με 30 μοίρες πάχος γύρω από το γαλαξιακό επίπεδο. Η συνολική τους μάζα φτάνει τα 70 εκατομμύρια ηλιακές. Ενώ το θερμό ουδέτερο αέριο σε αυτά τα νέφη ανιχνεύεται σχετικά εύκολα, αποτελεί ένα μικρό μόνο μέρος της περιγαλαξιακής ύλης.

Οι γραμμές απορρόφησης σε φάσματα μακρινών Κβάρζαρ μας δείχνουν ότι η περιγαλαξιακή ύλη του Γαλαξία μας έχει θερμοκρασία 10.000 K ως 10 εκατομμύρια K.

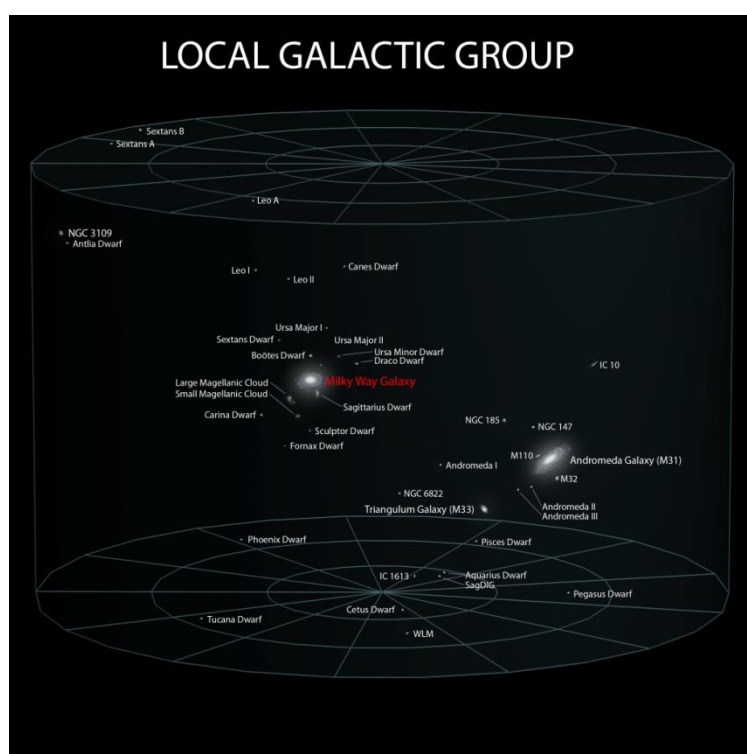
Η περιγαλαξιακή ύλη σε άλλους γαλαξίες

Ένα μέρος της περιγαλαξιακής ύλης είναι χαμηλής μεταλλικότητας μεσογαλαξιακό αέριο που εισήρθε στο πεδίο βαρυτικής κυριαρχίας ενός γαλαξία. Το επικρατέστερο κοσμολογικό μοντέλο Λ CDM (ψυχρής σκοτεινής ύλης) προβλέπει την εισροή σε νήματα μεσογαλαξιακού αερίου στους γαλαξίες. Αυτή η εισροή ελαττώνει την συνολική μεταλλικότητα του περιγαλαξιακού αερίου. Όμως αυτό το μοντέλο προβλέπει και την ανάπτυξη γαλαξιακού ανέμου που απομακρύνει αέριο από τους γαλαξιακούς δίσκους. Σε γαλαξίες αστρογέννησης, όπως ο M82, παρατηρούμε ισχυρούς γαλαξιακούς ανέμους. Ο μηχανισμός ανάπτυξης του ανέμου είναι οι εκρήξεις σουπερνόβα (βασικά κατάρρευσης αστρικού πυρήνα). Από τα νεφελώματα σουπερνόβα εκτιμάμε ότι στον M82 έχουμε μια τέτοια έκρηξη κάθε 10 έτη! Σε συγκεκριμένο χώρο και χρόνο ($0,5 \text{ pc}^{-2}/\text{Myr}$) ο ρυθμός σουπερνόβα είναι 25.000 φορές πιο έντονος από ότι στον Γαλαξία μας. Αυτές οι σουπερνόβα

σημειώνονται βασικά σε μια στενή λωρίδα στον ισημερινό του γαλαξιακού δίσκου, όπου το αέριο συμπυκνώνεται σε νέφη αστρογέννησης. Έτσι μπορούν να εκτινάξουν σημαντικές ποσότητες αερίου έξω από τον γαλαξία.

Η εσωσμηνική ύλη

Τα σμήνη γαλαξιών είναι πολλών μεγεθών. Το δικό μας μικρό σμήνος ονομάζεται τοπική ομάδα και κυριαρχείται από τον Γαλαξία μας και τον γαλαξία της Ανδρομέδας. Η λαμπρότητα του Γαλαξία μας εκτιμάται στις 2×10^{10} ηλιακές, και του γαλαξία της Ανδρομέδας 1,3 φορές περισσότερη. Η συνολική λαμπρότητα της ομάδας είναι 2,7 φορές αυτή του Γαλαξία μας, με τον τελευταίο και την Ανδρομέδα να κατέχουν το 85% της συνολικής λαμπρότητας της ομάδας. Συνολικά στην τοπική ομάδα υπάρχουν 50 γαλαξίες, αλλά οι περισσότεροι είναι νάνοι.



Το πιο κοντινό πολύ μεγάλο σμήνος γαλαξιών είναι αυτό της κώμης της Βερενίκης. Το κέντρο της απέχει 100 Mpc από εμάς. Περιέχει, μαζί με τους νάνους, πάνω από 10.000 γαλαξίες. Το ζευγάρι τεράστιων ελλειπτικών γαλαξιών NGC 4889, 4874 κυριαρχούν με 11 και 9 φορές την λαμπρότητα του Γαλαξία μας, αντίστοιχα. Όμως η λαμπρότητα και των 2 αυτών γαλαξιών αναλογεί μόλις στο 8% της συνολικής του σμήνους, που λάμπει με 250 φορές την λαμπρότητα του Γαλαξία μας. Ενώ στην τοπική μας ομάδα οι 2 μεγάλοι γαλαξίες κυριαρχούν, δεν συμβαίνει το ίδιο στο σμήνος της κώμης. Φαίνεται ότι σε ένα πλούσιο σμήνος γαλαξιών υπάρχει μια συνολική σκοτεινή άλω (από σκοτεινή ύλη) που διαποτίζεται από καυτή, μικρής πυκνότητας εσωσμηνική (intracluster) ύλη. Η συνολική μάζα του σμήνους (2×10^{15} ηλιακές μάζες) είναι 25 με 50 φορές την αστρική του μάζα. Παρατηρούμε διαφορά ταχυτήτων (velocity dispersion) των γαλαξιών ως 1000 km/s, που

σημαίνει ότι είναι απαραίτητη η παρουσία τόσο μεγάλης μάζας ώστε το σμήνος να διατηρήσει την συνοχή του. Έχουμε ανακαλύψει ίχνη μετάλλων στην 10^8 K καυτή εσωσμηνική ύλη του σμήνους, όπως δείχνει η γραμμή του σιδήρου Fe K α .

Γενικά παρατηρούμε μια ψυχρή εισροή αερίου (cooling flow, η πίεση του αερίου ελαττώνεται με αποτέλεσμα αυτό να πέσει προς το κέντρο του σμήνους) προς τα γαλαξιακά σμήνη, όπως στο Abell 478, που παρουσιάζει πολύ μεγαλύτερη πυκνότητα αερίου (θερμοκρασίας 3000 K) στην κεντρική του περιοχή από το παρόμοιου μεγέθους σμήνος της κώμης. Ο χρόνος ψύξης (να αποκτήσει θερμοδυναμική ισορροπία) του αερίου στο Abell 478 είναι 500 εκατομμύρια έτη και η μάζα της μεσοαστρικής ύλης υπολογίζεται στις 7×10^{12} ηλιακές. Έτσι εκτιμάται ο ρυθμός εισροής αερίου στα 500 εκατομμύρια ηλιακές μάζες το έτος, ενώ συνήθως στα γαλαξιακά σμήνη είναι 30- 300 εκατομμύρια ηλιακές μάζες το έτος. Μόνο ένα ελάχιστο μέρος αυτού του εισερχόμενου αερίου καταναλώνεται στην δημιουργία αστεριών. Σχεδόν όλο το αέριο αναθερμαίνεται μέσω των ενεργών γαλαξιακών πυρήνων. Οι πίδακες από τα AGN, μέσω κρουστικών κυμάτων, μπορούν να αναθερμάνουν το αέριο αποτελεσματικά, σε αντίθεση με τις εκρήξεις σουπερνόβα που συμβάλλουν σε μικρότερο ποσοστό.

9) Η διάχυτη μεσογαλαξιακή ύλη (DIM, diffuse intergalactic medium)

Η συνολική βαρυονική ύλη (τα αστέρια, η μεσοαστρική ύλη, η περιγαλαξιακή ύλη και μεσοσμηνική ύλη), που είναι βαρυτικά δεσμευμένη σε δομές όπως οι γαλαξίες, αποτελεί μόλις το 15% της συνολικής βαρυονικής ύλης του σύμπαντος. Το μεγαλύτερο ποσοστό της βαρυονικής ύλης αποτελεί η αραιή ιονισμένη μεσογαλαξιακή ύλη (IGM, intergalactic medium). Ενώ η θερμή- καυτή μεσογαλαξιακή ύλη ιονίζεται βασικά μέσω συγκρούσεων σωματιδίων, η ψυχρότερη διάχυτη μεσογαλαξιακή ύλη (DIM, diffuse intergalactic medium) ιονίζεται μέσω αλληλεπίδρασης των σωματιδίων της ύλης με την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία (photoionization).

Στην τεράστια χωρική κλίμακα του μεσογαλαξιακού αερίου είναι πλέον σημαντική η συμπαντική διαστολή. Το αποτέλεσμα είναι να ελαττώνεται η πυκνότητά του σε βαρυόνια. Η διαστολή του σύμπαντος μετριέται στα 70km/s/Mpc, που αντιστοιχεί σε ηλικία του σύμπαντος 13,97 δις έτη. Αυτή η πολύ αραιή μεσογαλαξιακή ύλη δεν ανιχνεύεται άμεσα, αλλά μέσα από τις γραμμές απορρόφησης στην γραμμή θέασης μακρινών Κβάζαρ, ιδίως με την φασματική γραμμή του Υδρογόνου Lyman α . Η απορρόφηση αυτής της γραμμής ονομάζεται φαινόμενο Gunn- Peterson. Το γεγονός ότι η απορρόφηση δεν είναι πολύ ισχυρή δείχνει ότι η μεσογαλαξιακή ύλη είναι πολύ αραιή ή πολύ ιονισμένη (ισχύουν και τα δύο).

Η επανασύνδεση (recombination)- επαναιονισμός (reionization)

Το Υδρογόνο άρχισε να γίνεται ουδέτερο στο σύμπαν σε $z = 1400$ (ηλικία 380.000 ετών) και ιονίστηκε την εποχή του επαναιονισμού $z = 7$. Αυτή η εξέλιξη είχε ως αιτία την ισορροπία ανάμεσα στον φωτοιονισμό και την επανασύνδεση των ατόμων μέσω εκπομπής φωτονίων. Τα πρώτα αστέρια δημιουργήθηκαν σε $z = 30$, ηλικία του σύμπαντος 100 εκατομμύρια έτη. Τα αστέρια μεγάλης μάζας και οι ενεργοί γαλαξιακοί πυρήνες ήταν οι βασικοί μηχανισμοί επαναιονισμού, μέσω εκπομπής υπεριώδους ακτινοβολίας. Πρώτα ιονίστηκε η ύλη γύρω

από τους γαλαξίες, και σταδιακά η υπόλοιπη μεσογαλαξιακή ύλη. Πληροφορίες για την εποχή του επαναιονισμού παίρνουμε από την μελέτη της κοσμικής ακτινοβολίας υποβάθρου (CMB), στα μικροκύματα. Η οπτική πυκνότητα των ελεύθερων ηλεκτρονίων την εποχή του επαναιονισμού απεικονίζεται στις διακυμάνσεις της CMB. Γνωρίζουμε ότι από την εποχή $z = 11$ υπάρχουν γαλαξίες στο σύμπαν. Όμως σημαντικό πλήθος από Κβάζαρ παρατηρούμε από την εποχή $z = 7$, που σημαίνει ότι αρχικά ο επαναιονισμός συνέβαινε στις περιοχές αστρογέννησης, μέσω της εκπομπής υπεριώδης ακτινοβολίας από τα αστέρια μεγάλης μάζας (>25 ηλιακές μάζες). Να σημειώσουμε ότι στους χαμηλής μεταλλικότητας γαλαξίες εκείνης της εποχής η δημιουργία αστεριών μεγάλης μάζας ήταν ενισχυμένη. Βέβαια το πυκνό αέριο των γαλαξιών και η σκόνη δεν επέτρεψαν να εξαπλωθεί ο ιονισμός με αυτόν τον μηχανισμό στην μεσογαλαξιακή ύλη. Ο ρυθμός αστρογέννησης (SFR, star formation rate) κορυφώθηκε στο σύμπαν αρκετά αργότερα, την εποχή $z = 1,9$ (σε ηλιακές μάζες το έτος), σε ηλικία του σύμπαντος 3,4 δις έτη, με εύρος μεγάλης δραστηριότητας από τα 2 δις ως τα 7 δις ηλικίας του σύμπαντος. Η συχνότητα των Κβάζαρ (η δημιουργία ενεργού γαλαξιακού πυρήνα είναι μια σύντομη εξελικτική φάση ενός γαλαξία) κορυφώθηκε σε $z = 2,4$ (ηλικία του σύμπαντος 2,7 δις έτη), με πιο απότομη καμπύλη από την αστρογέννηση (απότομη κορύφωση και ελάττωση), από τα 2 δις ως τα 4 δις ηλικίας του σύμπαντος.

Το δάσος Lyman α

Στα φάσματα από Κβάζαρ όπως το 4C05.34 με $z = 2,877$, παρατηρούνται γραμμές απορρόφησης που έχουν μικρότερο μήκος κύματος από την Lyman α (δάσος Lyman α), που οφείλονται στην μεσογαλαξιακή ύλη ανάμεσα στον παρατηρητή και το Κβάζαρ. Αυτό μας βοηθάει στην κατασκευή ενός κοσμικού χάρτη της ύλης στο σύμπαν.

10) Η θερμή- καυτή μεσογαλαξιακή ύλη (WHIM, warm-hot intergalactic medium)

Η θερμοκρασία της κυμαίνεται από 100.000 K ως 10 εκατομμύρια K και είναι σχεδόν πλήρως ιονισμένη. Σχηματίζει μεγάλα κοσμικά νήματα, σε αντίθεση με την διάχυτη μεσογαλαξιακή ύλη. Στις πυκνές περιοχές που ενώνονται τα νήματα υπάρχουν τα γαλαξιακά σμήνη. Αυτά, με τους μηχανισμούς τους, δημιουργούν κρουστικά κύματα θερμαίνοντας την μεσογαλαξιακή ύλη σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες από την διάχυτη, με αποτέλεσμα η θερμή- καυτή μεσογαλαξιακή ύλη να ενισχύεται μέσω αυτής της διαδικασίας. Σε ηλικία του σύμπαντος $z = 7$ το 84% της βαρυονικής μάζας του ήταν στην διάχυτη μεσογαλαξιακή ύλη, ενώ σήμερα είναι μόλις το 45%. Ενώ έχει παρόμοια θερμοκρασία με την θερμή μεσοαστρική ύλη του Γαλαξία μας, είναι πολύ πιο αραιή, με πολύ χαμηλή μεταλλικότητα. Οι <απαγορευμένες> φασματικές γραμμές μετάλλων όπως του Οξυγόνου μας επιτρέπουν να την ξεχωρίζουμε από την ψυχρότερη διάχυτη μεσογαλαξιακή ύλη.

