

# Γενικά για γαλαξίες

## Η σκόνη

Το αστρικό φως θερμαίνει την μεσοαστρική σκόνη σε μερικές εκατοντάδες βαθμούς Κέλβιν.

Η θερμοκρασία εξισορρόπησης (equilibrium value) εξαρτάται από την χημική σύσταση της σκόνης και τον ρυθμό απώλειας θερμότητας. Η θερμασμένη σκόνη παράγει μια θερμική εκπομπή στο υπέρυθρο. Έτσι τα νέφη σκόνης που δεν φαίνονται στο ορατό φως γίνονται φωτεινά σε μεγαλύτερα μήκη κύματος (μεσαίο υπέρυθρο). Αυτό συμβαίνει σε σκόνη που βρίσκεται κοντά σε αστέρια μεγάλης μάζας ή σε πυρήνες ενεργών γαλαξιών.

Αν και η σκόνη αποτελεί μόνο ένα μικρό μέρος της συνολικής μάζας ενός γαλαξία, είναι ιδιαίτερα σημαντική. Στην επιφάνεια ενός κόκκου σκόνης σχηματίζεται πάχος από μόρια. Έτσι αυτά διατηρούνται με ασφάλεια. Πολύπλοκα οργανικά μόρια, αλλά και το μόριο του νερού επιβιώνουν σε μορφή πάγου στους κόκκους σκόνης. Η σκόνη βοηθάει την διασπορά των βαρύτερων μετάλλων στην μεσοαστρική ύλη. Επίσης είναι σημαντικό ότι μπορεί να μαγνητιστεί. Έτσι δημιουργούνται μαγνητικά πεδία μεγάλης έκτασης και μικρής έντασης στους γαλαξίες. Τα νέφη αερίου και σκόνης συγκρούονται, με αποτέλεσμα να συμπιέζονται αυτά τα μαγνητικά πεδία. Το ίδιο συμβαίνει και μέσω διαστελλόμενων <φουσκών> αερίου και σκόνης, με μηχανισμό κίνησης τους αστρικούς ανέμους και τις εκρήξεις σουπερνόβα. Κατά την παραπάνω διαδικασία συμπίεσης του μαγνητικού πεδίου επιταχύνονται φορτισμένα σωματίδια (κυρίως πρωτόνια και ηλεκτρόνια) που είναι παγιδευμένα στις μαγνητικές γραμμές. Όταν αποκτήσουν αρκετά μεγάλη ενέργεια διαφεύγουν από το μαγνητικό πεδίο ως κοσμική ακτινοβολία.

Μπορούμε να μετρήσουμε αυτά τα μαγνητικά πεδία. Οι κόκκοι σκόνης είναι ελαφρώς μαγνητισμένοι, και ως μικροσκοπικοί μαγνήτες ευθυγραμμίζονται με το μαγνητικό πεδίο. Έτσι το φως που αλληλεπιδράει ή σκεδάζεται από την σκόνη είναι πολωμένο (έχει μεγαλύτερη ένταση προς μια συγκεκριμένη γωνία, περνάει ευκολότερα από τους ευθυγραμμισμένους κόκκους σκόνης προς μια συγκεκριμένη κατεύθυνση). Ο βαθμός πολικότητας αποτελεί δείκτη της έντασης του μαγνητικού πεδίου. Έτσι μπορούμε να κατασκευάσουμε έναν χάρτη του μαγνητικού πεδίου του Γαλαξία μας.

Ο ήλιος μας βρίσκεται 27.000 έτη φωτός από το κέντρο του Γαλαξία. Με ταχύτητα 828.000 χιλ/ώρα ή 230 χιλ/δευτ. χρειάζεται 225- 250 εκ. έτη για μια περιφορά γύρω από το κέντρο του Γαλαξία.

## Η ποικιλία των γαλαξιών

Το περιεχόμενο και η μορφή ενός γαλαξία εξαρτώνται από τις συνθήκες που επικρατούσαν στην δημιουργία του και τις αλληλεπιδράσεις με το περιβάλλον του. Η αναλογία αερίου και σκόνης σε έναν γαλαξία μας παρουσιάζει το ιστορικό εξέλιξής του. Η εξέλιξη ενός γαλαξία εξαρτάται αρχικά από την μάζα και την στροφορμή του

πρώτο- γαλαξία και μετά από το περιβάλλον του (μεσογαλαξιακή πυκνότητα, αλληλεπίδραση με άλλους γαλαξίες). Φαίνεται να υπήρχαν εξαρχής όλοι οι τύποι γαλαξιών, περίπου όπως παρατηρούμε στους κοντινούς (σε πρόσφατο χρόνο) γαλαξίες.

## Το μεσοαστρικό αέριο

Εκτός από εκατοντάδες δις αστέρια, οι γαλαξίες ακόμη και σήμερα περιέχουν σημαντική ποσότητα αερίου και σκόνης, που κυμαίνεται ανάλογα τον γαλαξιακό τύπο. Για να δημιουργηθούν οι γαλαξίες κατέρρευσαν τεράστια νέφη αερίων, με αποτέλεσμα την έντονη αστρογέννηση. Ο ρυθμός της κατάρρευσης, άρα και της αστρογέννησης, καθόρισε την μορφή κάθε σημερινού γαλαξία. Ακόμη και σήμερα εμπλουτίζεται η μεσοαστρική ύλη από τα παλαιότερα αστέρια, με επακόλουθο τα αστέρια νέας γενιάς να είναι εμπλουτισμένα σε βαρύτερα στοιχεία. Εκτός από αυτή την εξέλιξη που χαρακτηρίζει τους απομονωμένους γαλαξίες, ο γαλαξιακός κανιβαλισμός έχει σημαντικό ρόλο στην γαλαξιακή εξέλιξη. Έτσι έχουμε μια ποικιλία από γαλαξιακά περιβάλλοντα, από τους σχεδόν χωρίς αέριο και αστρογέννηση ελλειπτικούς στους πλούσιους σε αέριο και με δραστηριότητα αστρογέννησης σπειροειδείς γαλαξίες. Στους τελευταίους η κατάρρευση του πρώτο- γαλαξία έγινε με πιο αργό ρυθμό, με αποτέλεσμα να υποστηριχτεί ο δίσκος (η κατάρρευση του αερίου συνέβη με πολύ πιο αργό ρυθμό από την αστρογέννηση, δηλαδή την μετατροπή του αερίου σε αστέρια). Υπάρχουν και οι γαλαξίες αστρογέννησης, που παρουσιάζουν δημιουργία αστεριών με μεγάλη ένταση. Περιέχουν έναν σημαντικό πληθυσμό νεαρών αστεριών και μπορεί να είναι από νάνοι ως γαλαξίες μεγάλης μάζας. Πρόκειται για γαλαξίες υπό σημαντική αλληλεπίδραση. Η ανώμαλη και νηματοειδής μορφή τους μας πληροφορεί για την παρουσία μεσοαστρικής ύλης με έντονο στροβιλισμό. Η παρουσία κρουστικών μετώπων και τεράστιων διαστελλόμενων <φουσκών> (super bubbles) μαρτυράει την παρουσία γιγάντιων νεαρών αστρικών σημάτων με πολλά αστέρια πολύ μεγάλης μάζας.

## Οι ελλειπτικοί γαλαξίες

Ένας πρώτο- γαλαξίας που προέρχεται από ένα αργά περιστρεφόμενο νέφος (μικρής στροφορμής) θα καταρρεύσει γρήγορα, με αποτέλεσμα την έντονη αστρογέννηση. Σε λίγες εκατοντάδες εκατομμύρια χρόνια θα έχει εξαντλήσει το περισσότερο από το αέριό του. Σχεδόν όλο το υπόλοιπο αέριο θα εκτιναχτεί μακριά από τον γαλαξία μέσω των πολλαπλών ισχυρότατων εκρήξεων σουπερνόβα. Θα απομείνει ένας ανενεργός γαλαξίας με σφαιροειδή μορφή, ένας ελλειπτικός γαλαξίας. Στους ελλειπτικούς δεν υπάρχει ένα επίπεδο περιφοράς των αστεριών. Τα αστέρια καταλαμβάνουν εξίσου όλο τον χώρο γύρω από το κέντρο του γαλαξία. Άλλα περιφέρονται σύμφωνα και άλλα αντίθετα από την περιστροφή του γαλαξιακού πυρήνα. Παρουσιάζουν συμπυκνώματα (τροχιές με περισσότερα αστέρια) που σχετίζονται με συγχωνεύσεις μικρότερων γαλαξιών. Μοιάζουν με σμήνος μελισσών γύρω από ένα μελίσι. Οι ελλειπτικοί γαλαξίες μπορεί να είναι από νάνοι ως οι

μεγαλύτερης μάζας γαλαξίες του σύμπαντος. Για παράδειγμα, ο κοντινός μας γίγαντας ελλειπτικός M87, που βρίσκεται σε απόσταση 53 εκατομμύρια έτη φωτός, έχει πάνω από 1 τρις αστέρια και 30.000 σφαιρωτά σμήνη. Αντίθετα, ο νάνος ελλειπτικός Leo 1 σε απόσταση 820.000 έτη φωτός είναι ένας από τους μικρότερης μάζας νάνους της τοπικής μας ομάδας, με μερικές δεκάδες εκατομμύρια αστέρια και μόλις 3 σφαιρωτά.

### Οι γαλαξιακοί δίσκοι

Οι πρώτο- γαλαξίες με σημαντική στροφορμή καταρρέουν με πολύ πιο αργούς ρυθμούς. Η συσσώρευση του αερίου έγινε με τόσο αργό ρυθμό που επέτρεψε την υποστήριξη δίσκου (το περισσότερο υλικό σχημάτισε έναν δίσκο γύρω από τον γαλαξιακό πυρήνα). Η κατάρρευση του αερίου διάρκεσε μεγάλο χρονικό διάστημα σε σχέση με την κατανάλωσή του στην αστρογέννηση (και ο ρυθμός αστρογέννησης ήταν πιο ήπιος). Έτσι το αέριο διατηρήθηκε στους γαλαξιακούς δίσκους με αποτέλεσμα να συνεχίζεται η αστρογέννηση ως σήμερα, ιδίως στους πλούσιους σε αέριο γαλαξιακούς βραχίονες. Οι σπειροειδείς είναι πεπλατυσμένοι και η πλειονότητα των αστεριών τους περιστρέφονται σύμφωνα με τον γαλαξιακό πυρήνα. Παρουσιάζουν μορφολογική ποικιλία, ανάλογα την ανάπτυξη της κεντρικής ράβδου. Οι σπείρες είναι συμπυκνώσεις ύλης στον γαλαξιακό δίσκο διάρκειας μερικών εκατομμυρίων ετών. Μοιάζουν με τις συγκεντρώσεις αυτοκινήτων σε μποτιλιάρισμα. Αποτελούν περιοχές αστρογέννησης (αυξημένης πυκνότητας της μεσοαστρικής ύλης) και είναι εμπλουτισμένες σε βαρύτερα στοιχεία. Η έντονη μορφή του δίσκου χάνεται στις απεικονίσεις στο υπέρυθρο, όπου φαίνεται κυρίως η κατανομή των παλαιότερων αστεριών. Αντίθετα με την κατανομή των νεαρών αστεριών στις σπείρες, τα παλαιότερα αστέρια έχουν πιο ομαλή γαλαξιακή κατανομή. Η μορφή των σπειροειδών κυριαρχείται από έναν δίσκο που αναπτύσσεται ως πολλαπλές τροχιές μικρής ελλειπτικότητας της ύλης και το γαλαξιακό κέντρο (κοιλιά), όπου τα αστέρια και το αέριο κινούνται με τρόπο που θυμίζει ελλειπτικό γαλαξία. Η άλως περιλαμβάνει έναν γερασμένο αραιό αστρικό πληθυσμό. Η εμφάνιση ράβδου οφείλεται σε αστάθειες του δίσκου, και η εξέλιξη της αποτελεί ένδειξη για γαλαξιακή εξέλιξη από σπειροειδή σε ελλειπτικό (μέσω συγχωνεύσεων). Οι σπειροειδείς με μικρή κοιλιά έχουν και μικρή μάζα. Οι σπειροειδείς μεγάλης μάζας έχουν αδύναμες σπείρες (ένδειξη εξέλιξης σε ελλειπτικό), άρα οι σπειροειδείς μικρής μάζας έχουν τις πιο εκτεταμένες σπείρες.

### Οι ράβδοι

Οι ραβδωτοί σπειροειδείς γαλαξίες ονομάζονται και γαλαξίες τύπου Φ, λόγω της εμφάνισής τους. Η αστάθεια του δίσκου που προκαλεί την ανάπτυξη ράβδου μπορεί να οφείλεται σε αλληλεπίδραση με άλλο γαλαξία. Παρατηρούμε αστέρια, σκόνη και αέριο της κεντρικής περιοχής του δίσκου να μεταναστεύουν από σχεδόν κυκλικές τροχιές σε επιμήκειες τροχιές. Μεταφέρονται από την μια πλευρά του δίσκου στην άλλη σαν ένα γιγάντιο εκκρεμές, ένα φαινόμενο που εμφανίζεται ως ράβδος.

Ουσιαστικά δημιουργείται αστάθεια, με αποτέλεσμα να συγκρούονται μεσογαλαξιακά νέφη. Αυτά συμπυκνώνονται, χάνουν στροφορμή και μεταναστεύουν προς την γαλαξιακή κοιλιά, αναπτύσσοντας ένα δακτύλιο αυξημένης αστρογέννησης. Μέρος του αερίου απορροφάται αργά από την κεντρική μαύρη τρύπα. Τα αστέρια του δακτυλίου εμφανίζονται σε εμάς ως ράβδος. Δεν πρόκειται για μια σταθερή δομή αλλά ένα ρεύμα κίνησης αστεριών. Σε γαλαξίες με μεγάλη κλίση προς εμάς ή με πολύ σκόνη η ράβδος μπορεί να μην είναι ορατή. Διακρίνεται καλύτερα στις υπέρυθρες. Η ράβδος του Γαλαξία μας μπορεί να αναπτύχθηκε λόγω της αλληλεπίδρασης με τα νέφη του Μαγγελάνου.

### Οι άμορφοι (ανώμαλοι) γαλαξίες

Μοιάζουν με ύλη που περίσσεψε από την δημιουργία των ελλειπτικών και των σπειροειδών γαλαξιών. Υπάρχει μεγάλη μορφολογική ποικιλία ανώμαλων (irregular) γαλαξιών. Πρόκειται για νάνους γαλαξίες. Οι πιο γνωστοί είναι τα νέφη του Μαγγελάνου. Στο μεγάλο νέφος το αέριο και η σκόνη δίνουν λίγο την μορφή δίσκου. Μπορεί να είναι πλούσιοι σε αέριο ή να μην έχουν καθόλου. Συνήθως το ψυχρό αέριο εξαντλείται σε ένα επεισόδιο αστρογέννησης και το θερμό διαφεύγει λόγω μικρής γαλαξιακής βαρύτητας. Όταν οι τροχιές των αστεριών του έρθουν σε ισορροπία (δισ έτη μετά την αστρογέννηση), ένας ανώμαλος γαλαξίας εξελίσσεται σε νάνο ελλειπτικό.

### Οι γαλαξίες υπό αλληλεπίδραση

Υπάρχουν πολλοί γαλαξίες που παρουσιάζονται παραμορφωμένοι λόγω έντονης αλληλεπίδρασης με άλλο γαλαξία (παλιρροιακές διαταραχές) ή πρόσφατο επεισόδιο συγχώνευσης. Ονομάζονται ιδιόρρυθμοι (peculiar). Έχουν μια βασική μορφή (σπειροειδής ή ελλειπτική) αλλά παρουσιάζουν παραμορφώσεις όπως δακτυλίους, κελύφη, τόξα κ.α. Η αναλογία τους ήταν μεγαλύτερη στο νεαρό σύμπαν, όταν σημειώθηκαν οι περισσότερες συγχωνεύσεις γαλαξιών. Ουσιαστικά λίγο- πολύ όλοι οι γαλαξίες έχουν σημάδια αλληλεπιδράσεων (τα πιο ήπια από αστρικά ρεύματα, συγχωνεύσεις αναλογικά μικρής μάζας νάνων ή σφαιρωτών). Οι γαλαξιακές συγχωνεύσεις αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι της γαλαξιακής εξέλιξης.

### Τα ραδιοκύματα

Τα ραδιοκύματα στον μεσοαστρικό χώρο δημιουργούνται από ελεύθερα ηλεκτρόνια που επιταχύνονται σε ταχύτητες κοντά στην ταχύτητα του φωτός, ενώ κινούνται σπειροειδώς γύρω και κατά μήκος μαγνητικών γραμμών, μέσα στην αραιή ύλη των μεσοαστρικών νεφών. Το μαγνητικό πεδίο και τα νέφη είναι συγκεντρωμένα στο γαλαξιακό επίπεδο, με αποτέλεσμα η εκπομπή του γαλαξία στα ραδιοκύματα να ταυτίζεται με αυτό. Επίσης σε αυτό το επίπεδο υπάρχει αφθονία νόβα, σουπερνόβα και αστεριών μεγάλης μάζας, που προκαλούνε υψηλές ενέργειες και επιταχύνουν σωματίδια. Αυτή η σχετικιστική ακτινοβολία ονομάζεται σύγχροτρον. Πρόκειται για

μη θερμική εκπομπή, διακριτή από την εκπομπή μελανού σώματος. Είναι μια συνεχής ηλεκτρομαγνητική εκπομπή, το μέγιστο της συχνότητας εξαρτάται από την ενέργεια των σωματιδίων και την ισχύ του μαγνητικού πεδίου. Η έντασή της ως συνιστώσα του μήκους κύματος διαφέρει από την ακτινοβολία μελανού σώματος. Έτσι, χάρη του ιδιαίτερου φάσματος, μπορεί να διαχωριστεί από αυτήν. Επίσης είναι πολύ πολωμένη. Κυρίως ανιχνεύεται στα ραδιοκύματα, αλλά ηλεκτρόνια μεγάλης ενέργειας σε ισχυρό μαγνητικό πεδίο ανιχνεύονται στις ακτίνες X και στο ορατό φως.

Η ανάλυση που μπορεί να έχει ένα οπτικό όργανο εκφράζεται από την σχέση Raleigh  $\theta = 1.22 \lambda / a$  (όπου  $\lambda$  είναι το μήκος κύματος,  $a$  η διάμετρος του οπτικού μέσου (φακού) και  $\theta$  η γωνιακή ανάλυση). Παρατηρούμε ότι η γωνιακή ανάλυση εξαρτάται κατά πολύ από το μήκος κύματος. Η ανάλυση στο ορατό φως από το ανθρώπινο μάτι κυμαίνεται στο  $1/30$  της φαινόμενης διαμέτρου του ηλίου ή της πανσέληνου. Άρα χρειαζόμαστε μεγάλη επιφάνεια οπτικού μέσου για τα ραδιοκύματα. Η λύση είναι η κατασκευή συστοιχιών ραδιοτηλεσκοπίων, αφού το μεγάλο μήκος κύματος επιτρέπει την συμβολομετρία με την ύπαρξη κενών ανάμεσα στα τηλεσκόπια.

Η πηγή ραδιοκυμάτων Κύκνος A παρουσιάζει 2 αντίθετους λοβούς εκπομπής ακτινοβολίας σύγχροτρον. Πρόκειται για έναν γιγάντιο γαλαξία με ενεργό πυρήνα, στα 700 εκατομμύρια έτη φωτός. Τέτοιοι ραδιογαλαξίες αποτελούν τα πιο εντυπωσιακά αντικείμενα στην αστρονομία ραδιοκυμάτων. Τεράστια νέφη ταχέως κινούμενων σωματιδίων εκτινάσσονται από ενεργούς γαλαξιακούς πυρήνες (AGN). Ο μηχανισμός εκτίναξης του υλικού σε 2 λοβούς βρίσκεται στον δίσκο προσαύξεσης της κεντρικής μαύρης τρύπας. Τα σωματίδια επιταχύνονται και εκτινάσσονται από τους πόλους της μαύρης τρύπας μέσω 2 πιδάκων, που μπορεί να έχουν μήκος ακόμη και εκατομμύρια έτη φωτός. Τα σωματίδια συγκρούονται με την εξωτερική ύλη του γαλαξία, σχηματίζοντας ένα κρουστικό μέτωπο και τους 2 λοβούς. Συνήθως πρόκειται για ελλειπτικούς γαλαξίες, αλλά μπορεί να συμβαίνει και σε σπειροειδείς. Η ενέργεια που εκλύει στα ραδιοκύματα η Κύκνος A (η ισχυρότερη σχετικά κοντινή πηγή ραδιοκυμάτων) είναι χιλιάδες φορές μεγαλύτερη από την εκπομπή ενός συνηθισμένου γαλαξία. Ισούται με περίπου 10 φορές την συνολική εκπομπή του Γαλαξία μας σε όλα τα μήκη κύματος. Τα Κβάζαρ, οι ισχυρότεροι ενεργοί γαλαξίες, είναι 100 φορές πιο λαμπροί από τον Γαλαξία μας.

### Η περιστροφική κίνηση (spin) των ατόμων

Τα ηλεκτρόνια που περιστρέφονται γύρω από κοσμικές μαγνητικές γραμμές δεν αποτελούν την μόνη πηγή εκπομπής ραδιοκυμάτων. Το υδρογόνο, το με διαφορά πρώτο σε αναλογία στοιχείο στο σύμπαν, είναι σημαντική πηγή ραδιοακτινοβολίας, μέσω 2 διαφορετικών διαδικασιών, την μετάβαση περιστροφής (spin transition) και την ακτινοβολία πέδησης (bremsstrahlung). Η πρώτη διαδικασία είναι μια απλή μετάβαση των ατόμων που προκαλεί την ραδιοεκπομπή στα 21 cm. Έχει μεγάλη σημασία διότι προκαλείται από το ουδέτερο υδρογόνο (η πιο συνηθισμένη μορφή του υδρογόνου στο σύμπαν). Προκαλείται από άτομα υδρογόνου με θερμοκρασία ως 100 Κέλβιν.

Ας φανταστούμε το ηλεκτρόνιο και το πρωτόνιο ενός ατόμου υδρογόνου ως περιστρεφόμενες σβούρες. Μπορούν να είναι ευθυγραμμισμένες, δηλαδή οι άξονες περιστροφής να δείχνουν την ίδια κατεύθυνση, ή όχι, δηλαδή οι άξονες να δείχνουν αντίθετες κατευθύνσεις. Πρόκειται για μια κβαντομηχανική ιδιότητα, με διαφορετική ενεργειακή κατάσταση για την καθεμιά. Κάθε μερικά εκατομμύρια έτη η σβούρα- ηλεκτρόνιο <αντιστρέφεται> αυθόρμητα, προκαλώντας την εκπομπή ενός φωτονίου μήκους κύματος 21 cm, την διαφορά των 2 ενεργειακών καταστάσεων). Αυτή η μετάβαση ονομάζεται απαγορευμένη (forbidden) επειδή οι πιθανότητες να συμβεί είναι πολύ ελάχιστες, μια σε μερικά εκατομμύρια έτη. Συχνά αυτές οι μεταβάσεις προκαλούνται από συγκρούσεις ατόμων υδρογόνου, που όμως δεν προκαλούν εκπομπή ραδιοκύματος, αφού την ενέργεια της μετάβασης την προσλαμβάνουν τα 2 συγκρουόμενα άτομα. Η μεγάλη μάζα υδρογόνου στις μικρές πυκνότητες, αλλά τεραστίων διαστάσεων νεφελωμάτων των γαλαξιών προκαλεί την συνεχή εκπομπή στα 21 εκατοστά.

Αυτή η γραμμή εκπομπής του (HI) αποτελεί το βασικό εργαλείο για την χαρτογράφηση του μεσοαστρικού αερίου του Γαλαξία μας. Έτσι μπορέσαμε να διακρίνουμε την σπειροειδή δομή και την περιστροφή του. Με την μέτρηση του ψυχρού ουδέτερου υδρογόνου μπορέσαμε να συμπεράνουμε τις συνολικές μάζες των γαλαξιών. Ένα άλλο θετικό στοιχείο είναι ότι το σύμπαν είναι αρκετά διαπερατό σε αυτό το μήκος κύματος. Παρατηρούμε ότι σε μικρές κλίμακες μερικών ετών φωτός το αέριο είναι κατανεμημένο σε νηματοειδής σχηματισμούς. Σε μεγαλύτερες κλίμακες η κατανομή του αερίου εκφράζει τις γαλαξιακές σπείρες. Το ουδέτερο υδρογόνο εκτείνεται σε ως και 3 φορές μεγαλύτερο χώρο από ότι τα αστέρια (εκπομπή στο ορατό) στους γαλαξιακούς δίσκους. Παρατηρήσαμε ότι η ταχύτητα περιφοράς του αερίου γύρω από έναν γαλαξία δεν μειώνεται με την απόσταση, όπως θα έπρεπε βάσει του νόμου του Κέπλερ, επιβεβαιώνοντας την ύπαρξη της σκοτεινής ύλης. Ακόμη παρατηρήθηκαν παραμορφώσεις των δίσκων που οφείλονται σε αλληλεπιδράσεις των γαλαξιών ή συγχωνεύσεις νάνων γαλαξιών από μεγαλύτερους.

## Η σκληρή ακτινοβολία

Σε πολλές περιοχές του μεσοαστρικού χώρου συναντάμε καυτό αέριο χιλιάδων βαθμών. Πρόκειται για τα διάχυτα νεφελώματα, όπως αυτό του Ωρίωνα. Εκεί το αέριο είναι ιονισμένο (πλάσμα). Τα άτομα, κυρίως υδρογόνου αλλά και οξυγόνου, άνθρακα, αζώτου και άλλων βαρύτερων στοιχείων έχουν απολέσει ηλεκτρόνια μέσω υπεριώδεις ακτινοβολίας (αστρικοί άνεμοι) ή συγκρούσεις με ταχέα ηλεκτρόνια. Όταν ένα ελεύθερο ηλεκτρόνιο σε ένα αέριο περνάει κοντά από ένα πρωτόνιο ή ιόν, η έλξη λόγω αντίθετων ηλεκτρικών φορτίων το επιβραδύνει. Αυτό χάνει κινητική ενέργεια με την μορφή φωτονίων (ακτινοβολία bremsstrahlung), με συνέπεια μια συνεχής ακτινοβολία σε διάφορα μήκη κύματος. Αν το αέριο είναι πολύ θερμό, με εκατομμύρια βαθμούς, αυτή η ακτινοβολία κορυφώνεται στις ακτίνες Χ. Όπως η ακτινοβολία σύγχροτρον αποτελεί την αιτία της περισσότερης ραδιοεκπομπής σε μεγάλα μήκη κύματος, έτσι η bremsstrahlung είναι η κύρια πηγή ακτινοβολίας σε μικρά μήκη κύματος.

Οι συνδυασμένες μετρήσεις στα ραδιοκύματα, στο οπτικό και της bremsstrahlung στις ακτίνες Χ μας δείχνουν την θερμοκρασία και πυκνότητα ενός μεσοαστρικού αερίου. Οι πιο εντυπωσιακές πηγές ακτινών Χ είναι οι μεγάλοι ελλειπτικοί γαλαξίες και τα σμήνη των γαλαξιών, που περιέχουν εκατοντάδες, ακόμα και χιλιάδες γαλαξίες, όπως το σμήνος της κόμης της Βερενίκης. Η εκπομπή ακτινών Χ συνήθως δεν προέρχεται από κάποιον γαλαξία ενός σμήνους, αλλά από όλο το σμήνος. Είναι σαν να βρίσκονται οι γαλαξίες ενός σμήνους μέσα σε ένα πεδίο ακτινών Χ, δηλαδή πολύ θερμού αερίου. Πρόκειται για τεράστιες μάζες ιονισμένου αερίου, κυρίως υδρογόνου, θερμοκρασίας δεκάδων εκατομμυρίων βαθμών. Οι σπειροειδείς γαλαξίες που βρίσκονται στο εσωτερικό των γαλαξιακών σμηνών παρουσιάζουν ελάττωση ουδέτερου υδρογόνου. Φαίνεται να το απώλεσαν κατά την κίνησή τους μέσα στο καυτό μεσογαλαξιακό αέριο. Και εδώ έχουμε μια απόδειξη της ύπαρξης της σκοτεινής ύλης, σε επίπεδο γαλαξιακών σμηνών. Χωρίς αυτήν το καυτό μεσογαλαξιακό αέριο θα είχε διαφύγει από τα σμήνη. Οι συνδυασμένες παρατηρήσεις των γαλαξιακών σμηνών σε πολλά μήκη κύματος μας έδωσαν τεράστιες μάζες για τα σμήνη (10 – 100 τρις ηλιακές μάζες).

## Η σκοτεινή ύλη

Γνωρίζουμε ότι η σκοτεινή ύλη αλληλεπιδρά βαρυτικά με την ορατή, βαρυονική ύλη αλλά δεν ανιχνεύεται στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα. Υπάρχει μια σχέση λαμπρότητας/μάζας των αστεριών (κυρίως ακολουθίας)  $L \sim M^{3,5}$ . Έτσι ένα αστέρι 5 ηλιακών μαζών είναι 280 φορές πιο λαμπρό από τον ήλιο. Αν γνωρίζουμε την συνιστώσα αστρικής μάζας (Initial mass function) μπορούμε να υπολογίσουμε την αστρική μάζα ενός γαλαξία. Για να συμπεράνουμε την συνολική μάζα ενός γαλαξία πρέπει να συνυπολογίσουμε την μάζα των αντικειμένων που εκπέμπουν πολύ λίγο, όπως τα αστέρια πολύ μικρής μάζας, οι νάνοι, οι μαύρες τρύπες και το ψυχρό μεσοαστρικό αέριο. Ως εναλλακτική μέθοδο, η κινηματική των σωμάτων σε έναν γαλαξία μας δείχνει την διασπορά μάζας του, ανεξάρτητα με την εκπομπή τους. Χωρίς τον υπολογισμό της σκοτεινής ύλης οι 2 μέθοδοι μέτρησης μάζας δίνουν πολύ διαφορετικά αποτελέσματα. Οι ταχύτητες των αστεριών στον Γαλαξία μας είναι πολύ μεγαλύτερες από ότι δικαιολογεί η ορατή ύλη του. Όπως αναφέραμε, οι ταχύτητες αυτές δεν παρουσιάζουν ελάττωση προς τα έξω, χάρη στην σκοτεινή ύλη που σχηματίζει ένα κουκούλι γύρω από τον Γαλαξία μας και περιλαμβάνει το 90% της συνολικής ύλης του.

## Το θεώρημα Virial (εξισορρόπηση δυνάμεων)

Το παραπάνω θεώρημα εκφράζεται με μια μαθηματική σχέση ανάμεσα στην μάζα ενός συστήματος, το μέγεθός του και τις ταχύτητες των συστατικών μερών του. Μας δίνει την μάζα ενός συστήματος που τα μέρη του είναι σε υδροδυναμική ισορροπία. Οι γαλαξίες ενός σμήνους αποτελούν ένα τέτοιο σύστημα. Οι ταχύτητες των γαλαξιών και το μέγεθος του σμήνους μας δίνουν την μάζα του. Το βασικό συμπέρασμα είναι ότι το σύστημα (το σμήνος γαλαξιών) είχε αρκετό χρόνο ώστε να

ισορροπήσει. Δηλαδή δεν κατάρρευσε ούτε διαμελίστηκε. Για να πετύχει ένα τυπικό σμήνος γαλαξιών αυτή την εξισορρόπηση, θα πρέπει, βάσει της παρατηρήσιμης βαρυονικής ύλης του, της ταχύτητας των γαλαξιών και του μεγέθους του, να έχει δεκαπλάσια σκοτεινή ύλη από την βαρυονική. Σήμερα γνωρίζουμε ότι η σκοτεινή ύλη σχηματίζει ένα κοσμικό πλέγμα, με τα σμήνη γαλαξιών να βρίσκονται στους κόμβους του πλέγματος. Η ορατή, βαρυονική ύλη θυμίζει τα φώτα που βλέπουμε παρατηρώντας μια πόλη την νύχτα, χωρίς να είναι ορατά τα κτήρια της πόλης.

### Πως <βλέπουμε> την σκοτεινή ύλη

Οι τεράστιες εκπομπή ακτινών X από το καυτό (ως και 100 εκατομμύρια K, αλλά πολύ αραιό) μεσοαστρικό αέριο των γαλαξιακών σμηνών προδίδει την βαρυτική επίδραση της σκοτεινής ύλης σε αυτό. Αποτελεί μυστήριο η μεγάλη ποσότητα του μεσογαλαξιακού αερίου. Μάλλον διέφυγε από τους γαλαξίες χάρη σε έντονα επεισόδια εκρήξεων σουπερνόβα, στο πρώιμο σύμπαν. Το μεσογαλαξιακό αέριο έχει πιο σφαιρική συμμετρία από τους γαλαξίες ενός σμήνους. Μας προσφέρει μια καλή χαρτογράφηση της σκοτεινής ύλης, παρατηρώντας το στις ακτίνες X είναι σαν να βλέπουμε την διασπορά της σκοτεινής ύλης.

Επίσης, οι παρατηρήσεις στα ραδιοκύματα (21cm) του ουδέτερου υδρογόνου στον M31 μας δείχνουν ότι η ταχύτητα περιφοράς του γύρω από τον γαλαξία παραμένει σταθερή με την απόσταση από το κέντρο του, μια απόδειξη της ύπαρξης της σκοτεινής ύλης.

### Η χρησιμότητα της κατάταξης των γαλαξιών

Οι εικόνες σε συνδυασμό με φωτομετρικά δεδομένα μπορούν να ξεδιαλύνουν το πλήθος των γαλαξιακών δομών. Ο χάρτης φωτομετρίας μας ενημερώνει για τις κινηματικές και την εξέλιξη των μερών ενός γαλαξία. Η απεικόνιση μας βοηθάει να ξεχωρίσουμε το κέντρο από τον γαλαξιακό δίσκο. Μας πληροφορεί για λεπτομέρειες όπως η κατανομή μάζας, οι περιοχές αστρογέννησης, και την παρουσία ράβδου/εξωτερικού δακτυλίου ή άλλων δομών. Οι σκοτεινές περιοχές μας ενημερώνουν για την παρουσία σκόνης σε έναν γαλαξία. Η μορφολογία ενός γαλαξία μας πληροφορεί για την εξέλιξή του, με την υποστήριξη προσομοιώσεων. Έτσι οι άτλαντες γαλαξιών έχουν πρακτική χρησιμότητα.

Οι 3 κατηγορίες του Hubble είναι οι ελλειπτικοί, οι σπειροειδείς και οι φακοειδής γαλαξίες. Οι ανώμαλοι συμπληρώνουν τις παραπάνω κατηγορίες. Για κάθε κατηγορία υπάρχουν υπό- ομάδες, ανάλογα την μορφή τους. Οι ελλειπτικοί και οι φακοειδής αναφέρονται και ως προγενέστερου τύπου, ενώ οι ανώμαλοι και οι σπειροειδείς ως μεταγενέστερου τύπου, μια παραπλανητική ορολογία, αφού δεν αντικατοπτρίζει την εξέλιξη των γαλαξιών. Ένα μειονέκτημα της παραπάνω κατηγοριοποίησης είναι ότι αναφέρεται σε απεικονίσεις δύο διαστάσεων. Ακόμα, η εμφάνιση ενός γαλαξία εξαρτάται πολύ από το μήκος κύματος που εκπέμπει πιο έντονα. Έτσι η μορφολογία πρέπει να συνδυάζεται με την λαμπρότητα, την μάζα, το χρώμα, την ποσότητα



αερίου και τον ρυθμό αστρογέννησης ενός γαλαξία. Πολλοί γαλαξίες βρίσκονται σε μεταβατικά στάδια, και πολλοί είναι υπό αλληλεπίδραση με άλλους γαλαξίες.

- .Τα σχήματα και οι μορφολογίες των γαλαξιών μπορούν να μας δώσουν πληροφορίες όπως
- .Η πυκνότητα του γαλαξιακού περιβάλλοντος (αν ένας γαλαξίας είναι απομονωμένος ή σε αλληλεπίδραση).
- .Την κοσμική του εξέλιξη, που καθορίζει την ισχύ των βραχιόνων και της ράβδου σε ένα σπειροειδή γαλαξία. Ακόμα και την παρουσία δακτυλίων, αστρικών ρευμάτων και άλλων εξωτερικών δομών που προδίδουν συγχωνεύσεις νάνων γαλαξιών από τον γαλαξία.
- .Την ανάμειξη χαρακτηριστικών δομών, που σημαίνουν βίαιο παρελθόν (δίσκοι με παραμόρφωση, αυξημένη λαμπρότητα της γαλαξιακής κοιλιάς, έντονη παρουσία σκόνης σε σπειροειδείς γαλαξίες)
- .Τις διεργασίες που πυροδοτούν έντονη αστρογέννηση, όπως οι γαλαξιακές συγχωνεύσεις.
- .Η μορφολογία των γαλαξιών μας δείχνει την εξέλιξή τους, βάζοντας τάξη όπως το διάγραμμα H/R για τα αστέρια.

Πέρα από τα παραπάνω, οι εικόνες των γαλαξιών μας διεγείρουν την φαντασία και μας βοηθάνε να κατανοήσουμε την τεράστια κλίμακα του σύμπαντος, από τον κβαντικό κόσμο ως την κοσμολογία. Η ψηφιακή εποχή μας προσφέρει όλο και πιο λεπτομερείς άτλαντες γαλαξιών και συνδυασμό πολλών μηκών κύματος. Ακόμα, η αστρονομία πολυμέσων (multimessenger astronomy) συνδυάζει τις παρατηρήσεις ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, την κοσμική ακτινοβολία, τα νετρίνα και τα βαρυτικά κύματα.

