

Αστρικά ρεύματα στο τοπικό σύμπαν (Tidal streams)

Οι νάνοι γαλαξίες που πλησιάζουν πολύ έναν μεγάλο γαλαξία βιώνουν παλιρροϊκές διαταραχές. Η διαφορά της βαρυτικής δύναμης που ασκεί ο μεγάλος γαλαξίας στην κοντινή και στην μακρινή πλευρά του νάνου αφαιρεί αστέρια από αυτόν, που μπαίνουν σε τροχιά στον μεγάλο γαλαξία. Έτσι δημιουργείται ένα αστρικό ρεύμα.

Τα αστρικά ρεύματα και οι υπό- δομές της άλως

Όπως πολλοί μεγάλοι γαλαξίες, έτσι και ο δικός μας έχει σε τροχιά μικρότερους γαλαξίες, που περιέχουν αστέρια, αέριο και σκοτεινή ύλη. Τα σφαιρωτά σμήνη είναι πολύ πυκνά σε αστέρια, αλλά δεν περιέχουν σκοτεινή ύλη. Γνωρίζουμε 157 σφαιρωτά και 30 νάνους γαλαξίες του Γαλαξία μας. Τα σφαιρωτά μάλλον βίωσαν 1 ή 2 επεισόδια αστρογέννησης, ενώ οι μεγαλύτεροι από τους νάνους γαλαξίες έχουν συνεχή αστρογέννηση. Όμως το όριο ανάμεσα στα 2 αντικείμενα είναι δυσδιάκριτο. Οι νάνοι γαλαξίες μπορεί να περιέχουν σφαιρωτά σμήνη ή δορυφόρους- μικρότερους νάνους.

Οι παλιρροιακές δυνάμεις του Γαλαξία απομακρύνουν αστέρια από τα σφαιρωτά και τους νάνους. Αυτά σχηματίζουν αστρικά ρεύματα που μπορεί να κυκλώνουν όλο τον Γαλαξία. Αστέρια που απομακρύνθηκαν πρόσφατα από τον νάνο/ σφαιρωτό (δορυφόρο) όπου ανήκαν και κινούνται πιο αργά ή είναι πιο κοντά στο κέντρο του Γαλαξία από το κέντρο μάζας του δορυφόρου θα καταλάβουν τροχιές χαμηλότερης ενέργειας, λίγο πιο κοντινές στο κέντρο του Γαλαξία και με μικρότερες περιόδους. Τα αστέρια που κινούνται πιο γρήγορα και πιο μακριά από το κέντρο από ότι το κέντρο μάζας του δορυφόρου θα κινηθούν σε τροχιές μεγαλύτερης ενέργειας και μεγαλύτερης περιόδου (νόμος του Κέπλερ). Οι περίοδοι τροχιάς των δορυφόρων κυμαίνονται από εκατοντάδες χιλιάδες έτη ως δις έτη, και ανάλογο είναι το χρονοδιάγραμμα των αστρικών ρευμάτων.

Το περιεχόμενο και η πυκνότητα των νάνων γαλαξιών κυμαίνεται με την ακτίνα τους. Η σκοτεινή τους ύλη είναι δεκαπλάσια από την ορατή, και η ορατή κατανέμεται κοντά στο κέντρο. Και οι αστρικοί πληθυσμοί έχουν ακτινική κατανομή. Τα νεαρότερα, πιο πλούσια σε μέταλλα αστέρια βρίσκονται κοντά στο κέντρο και τα γηραιότερα πιο έξω. Αυτά τα χαρακτηριστικά των νάνων απεικονίζονται στα αστρικά ρεύματα. Τα εξωτερικά στρώματα ενός νάνου θα αφαιρεθούν πρώτα από τον Γαλαξία. Το υλικό τους θα μεταφερθεί μακρύτερα από τον νάνο. Έτσι αναμένουμε πρώτα να αφαιρεθεί η σκοτεινή ύλη, μετά τα παλαιά αστέρια και μετά τα νεότερα. Αυτό σχηματίζει μια ακολουθία στο αστρικό ρεύμα. Βέβαια οι νάνοι έχουν την δικιά τους πολυπλοκότητα και ασυμμετρία. Μπορεί να περιστρέφονται και να περιέχουν σφαιρωτά σμήνη. Αυτοί οι παράγοντες επηρεάζουν την ακολουθία.

Το μήκος ενός ρεύματος εξαρτάται από την μάζα και την ακτίνα του δορυφόρου, την τροχιά του γύρω από τον Γαλαξία και το χρονικό διάστημα που είναι δορυφόρος. Όταν ο δορυφόρος βρίσκεται στο περιγαλάξιο (το κοντινότερο προς το κέντρο του Γαλαξία πέρασμα της τροχιάς του) χάνει περισσότερα αστέρια. Αυτή η μεταβλητότητα

απώλειας αστεριών φαίνεται σε δομές στα αστρικά ρεύματα. Για μερικά ρεύματα μας είναι γνωστό από ποιόν δορυφόρο προέρχονται, αλλά για κάποια πάλι όχι, επειδή έχει διαμελιστεί πλήρως ή δεν έχει ανακαλυφτεί ακόμα.

Σήμερα γνωρίζουμε ότι τα αστρικά ρεύματα σχηματίζουν δομές στην γαλαξιακή άλω. Δεν είναι γνωστό αν όλα τα αστέρια της άλω προέρχονται από ρεύματα. Το μεγαλύτερο πλήθος αστεριών από ρεύματα βρίσκεται στα 20- 50 Kpc από το κέντρο του Γαλαξία. Μπορεί τα ρεύματα να ήταν τόσα πολλά στο παρελθόν που να μην ξεχωρίζουν τα αστέρια τους από πιθανά γηγενή αστέρια της άλω. Μετά τα 50 Kpc οι δορυφόροι δέχονται μόνο μικρές παλιρροϊκές διαταραχές από τον Γαλαξία και έχουν πολύ μεγάλες περιόδους, με αποτέλεσμα να μην σχηματίζουν ρεύματα. Η αναλογία αστεριών από ρεύματα είναι μερικές δεκάδες ποσοστά στα 30 Kpc και αυξάνεται ακτινικά. Η άλως έχει μια ομαλή αστρική κατανομή, αλλά περιέχει και νάνους γαλαξίες, σφαιρωτά σμήνη, αστρικά ρεύματα και <νέφη> (clouds). Τα νέφη είναι περιοχές αυξημένης πυκνότητας μεγέθους μερικών Kpc, που δεν μπορεί να έχουν βαρυτική συνοχή, και δεν έχουν το επίμηκες σχήμα των ρευμάτων. Πρέπει να είναι απομεινάρια μικρών γαλαξιακών συγχωνεύσεων με μεγάλη εκκεντρικότητα τροχιών.

Αστέρια που ξεχωρίζουν

Υπάρχουν κάποια αστέρια που δεν ταιριάζουν στο περιβάλλον της άλω, και μάλλον προέρχονται από ρεύματα. Ανακαλύψαμε αρκετά αστέρια φασματικού τύπου A στην άλω. Βρίσκονται μακριά από όποια περιοχή αστρογέννησης, κάτι που δεν δικαιολογείται από την προσδοκώμενη ηλικία της κατηγορίας τους. Τα blue stragglers είναι αστέρια που προέρχονται από συνένωση αστεριών και είναι πιο λαμπρά και θερμά από τον φασματικό τύπο τους. Η δημιουργία τους απαιτεί αστέρια μεγάλης μάζας (άρα νεαρά, που σημαίνει περιβάλλον αστρογέννησης). Πιστεύουμε ότι δημιουργούνται κυρίως στα σφαιρωτά σμήνη (μεγάλη πυκνότητα αστεριών). Βρέθηκαν και 20 αστέρια με τροχιά αντίθετης φοράς στην άλω.

Η άμορφη δομή της άλω, αλλά και της άλω του γαλαξία της Ανδρομέδας παραπέμπει σε παλαιότερες συγχωνεύσεις νάνων γαλαξιών στους 2 μεγάλους γαλαξίες. Καλύτερο δείγμα συγχώνευσης που συμβαίνει σήμερα είναι το ρεύμα του Τοξότη (Sagittarius dwarf galaxy stream). Το πλάτος αυτού του ρεύματος είναι 6 Kpc, σχεδόν όση η απόσταση του Ήλιου από το γαλαξιακό κέντρο! Η ακτίνα του δίσκου που σχηματίζει γύρω από τον Γαλαξία είναι 15 Kpc.

Τεχνικές παρατήρησης

Τα αστρικά ρεύματα ανιχνεύονται ως περιοχές αυξημένης πυκνότητας αστεριών στην άλω, ή αστεριών με παρόμοια ταχύτητα σε μια περιοχή. Χρησιμοποιούμε χαρακτηριστικά αστέρια που αποτελούν <κεριά λαμπρότητας>, δηλαδή έχουν όλα σχεδόν την ίδια λαμπρότητα (standard candles). Αυτά είναι οι μπλε γίγαντες

οριζώντιου κλάδου, μεταβλητοί RR Λύρας, κόκκινοι γίγαντες οριζώντιου κλάδου, blue stragglers, γίγαντες τύπου K και αστέρια στο σημείο αποκοπής από το H/R.

Τα αστέρια του οριζώντιου κλάδου είναι καλά κεριά λαμπρότητας με πολύ μικρή διακύμανση λαμπρότητας. Οι μπλε γίγαντες οριζώντιου κλάδου ξεχωρίζουν από το χρώμα τους, αρκεί να μην συγχέονται με τους blue stragglers, που έχουν επιφανειακή βαρύτητα αστέρα κύριας ακολουθίας (είναι πιο συμπαγής). Όμως οι μπλε υπεργίγαντες υπάρχουν μόνο σε παλαιούς αστρικούς πληθυσμούς χαμηλής μεταλλικότητας. Οι κόκκινοι γίγαντες οριζώντιου κλάδου μπορούν να μπερδευτούν με κόκκινους γίγαντες στον κλάδο των γιγάντων αλλά και με πολύ πιο αμυδρά αστέρια κύριας ακολουθίας. Τα καλύτερα κεριά είναι οι RR, αλλά είναι σπάνια και βρίσκονται μόνο σε πληθυσμό μέσης ηλικίας και χαμηλής μεταλλικότητας. Οι γίγαντες τύπου M είναι λαμπρότατοι, αλλά βρίσκονται μόνο σε πληθυσμό αυξημένης μεταλλικότητας, αντίθετα με την γαλαξιακή άλω. Τους βρίσκουμε μόνο στα πιο έντονα αστρικά ρεύματα. Οι γίγαντες K αποτελούν την καλύτερη επιλογή επειδή είναι περισσότεροι από άλλα αστέρια παρόμοιας λαμπρότητας και βρίσκονται σε όλους τους παλαιούς πληθυσμούς. Φασματικά ξεχωρίζουν από τα αστέρια K κυρίας ακολουθίας που βρίσκονται στον γαλαξιακό δίσκο. Αντίθετα, οι blue stragglers δεν αποτελούν καλά κεριά λαμπρότητας, είναι σπάνια και δεν είναι τόσο λαμπρά ώστε να ανιχνεύονται σε πολύ μεγάλες αποστάσεις. Τα αστέρια του σημείου αποκοπής είναι τα χειρότερα κεριά, έχουν απόκλιση λαμπρότητας ως 2 mag.

Για τα τελευταία, βρέθηκε ότι έχουν παρόμοια απόλυτη λαμπρότητα σε όλα τα σφαιρωτά της άλω. Κανονικά τα παλαιότερα σφαιρωτά θα έπρεπε να εμφανίζονται ότι έχουν πιο κόκκινα, αμυδρότερα αστέρια αποκοπής, επειδή τα αστέρια μεγαλύτερης μάζας είχαν περάσει πια αυτό το σημείο αστρικής εξέλιξης (το σημείο αποκοπής να βρίσκεται χαμηλότερα στο διάγραμμα). Όμως τα μεγαλύτερης ηλικίας και χαμηλότερης μεταλλικότητας αστέρια είναι γενικά πιο μπλε από τα ίδιας κατηγορίας νεαρότερα αστέρια. Στην άλω του Γαλαξία μας αυτά τα 2 αντίθετα φαινόμενα εξουδετερώνονται με αποτέλεσμα την ίδια απόλυτη λαμπρότητα για τα αστέρια του σημείου αποκοπής.

Ομάδες αστεριών με παρόμοια κίνηση

Πολλές δομές της άλως αναγνωρίστηκαν από τις παρόμοιες κινητικές αστεριών ίδιας κατηγορίας (RR, μπλε γίγαντες). Σε μερικές περιπτώσεις συνδέθηκαν με περιοχές αυξημένης αστρικής πυκνότητας. Το μειονέκτημα αυτής της προσέγγισης είναι ότι απαιτείται η μέτρηση της γωνιακής ταχύτητας ή και της ίδιας κίνησης των αστεριών. Το πλεονέκτημα είναι ότι μας βοηθάει να αναγνωρίσουμε ρεύματα με χαμηλότερη πυκνότητα αστεριών, που προέρχονται από παλαιότερα επεισόδια διαμελισμού δορυφόρων, ή που βρίσκονται πιο κοντά προς το κέντρο του Γαλαξία, όπου η πυκνότητα των αστεριών είναι γενικά αυξημένη. Δεν έχουμε ανακαλύψει ακόμα αστρικά ρεύματα στο γαλαξιακό ύψος του Ηλίου. Ίσως εκεί τα αστέρια από αστρικά ρεύματα να έχουν αφομοιωθεί από τα αστέρια του δίσκου, αλλά μπορεί να ξεχωρίσουν λόγω παρόμοιας γωνιακής ταχύτητας.

Χημικός διαχωρισμός

Η χημική ταυτότητα ενός αστεριού καθορίζεται από την χημική σύσταση του νεφελώματος όπου προήρθε. Αστέρια από το ίδιο ανοιχτό σμήνος ή το ίδιο σφαιρωτό έχουν παρόμοια χημική σύσταση (εννοούμε τα αστέρια που δεν έχουν εξελιχτεί τόσο πολύ ώστε να ανακατεύουν τα στοιχεία από το εσωτερικό τους με την επιφάνειά τους). Βέβαια στα περισσότερα σφαιρωτά παρατηρούμενα έχουν 2 διακριτούς αστρικούς πληθυσμούς. Η κατάταξη αστεριών σε ομάδες (ρεύματα) βάσει χημικής ταυτότητας απαιτεί καλή μέτρηση των αναλογιών δεκάδων χημικών στοιχείων τους. Με την ανάπτυξη αυτής της μεθόδου θα μπορέσουμε να γνωρίσουμε τις ιδιότητες κάθε νάνου γαλαξία που εξελίχθηκε σε αστρικό ρεύμα, αφού οι νάνοι περιέχουν πολλαπλούς αστρικούς πληθυσμούς.

Τα αστρικά ρεύματα και ο σχηματισμός του Γαλαξία

Τα αστρικά ρεύματα μας πληροφορούν για τις πολλές συσσωρεύσεις νάνων γαλαξιών στον Γαλαξία μας. Αυτές φαίνεται να ήταν πολύ συχνές στο παρελθόν αλλά συνεχίζονται και σήμερα. Έτσι υποστηρίζουν το ιεραρχικό σενάριο χτισίματος του Γαλαξία, δηλαδή από συσσωρεύσεις μικρότερων γαλαξιών. Η μεγάλη συχνότητα συσσωρεύσεων στην νεαρή ηλικία του σύμπαντος δεν ξεχωρίζει πολύ από το μονολιθικό σενάριο (ότι ο Γαλαξίας προήλθε από μια κατάρρευση υλικού). Μάλλον ο γαλαξιακός δίσκος προήλθε από συνεχή συσσώρευση (κατάρρευση) ψυχρού (πυκνού) αερίου που αποδεσμεύτηκε από την σκοτεινή ύλη. Έτσι τα αστέρια της άλω μπορεί να μην έχουν σχέση με τον δίσκο, αλλά να προήλθαν μέσω μιας τελείως διαφορετικής οδού, της συσσώρευσης άλλων γαλαξιών. Η εποχή της συσσώρευσης φαίνεται να διαδέχτηκε την εποχή της έντονης αστρογέννησης στον Γαλαξία μας.

Ο υπολογισμός της σκοτεινής ύλης

Στο ιεραρχικό μοντέλο Λ CDM η σκοτεινή ύλη αποτελεί το μεγαλύτερο μέρος της συνολικής ύλης του Γαλαξία μας. Γύρω από το κουκούλι σκοτεινής ύλης μπορεί να υπάρχουν χιλιάδες μικρότερες δομές σκοτεινής ύλης στο μέγεθος νάνων γαλαξιών, που φυσικά δεν είναι ορατές, αλλά αλληλεπιδρούν μόνο βαρυτικά. Μπορούμε να ανιχνεύσουμε την σκοτεινή ύλη μόνο μέσω κινήσεων των αστεριών και των γαλαξιών.

Αν και τα αστέρια της άλω αποτελούν μόνο το 1% του συνόλου των αστεριών του Γαλαξία, μας πληροφορούν για το ιστορικό συγχωνεύσεων του Γαλαξία μας. Τα αστέρια της άλω (ίσως και όλα) προήλθαν από συσσωρεύσεις μικρότερων γαλαξιών. Αποδεσμεύτηκαν από την σκοτεινή ύλη του νάνου γαλαξία τους, όπως συνέβη και σε σφαιρωτά σμήνη των νάνων. Έτσι τα αστρικά ρεύματα μπορούν να μας πληροφορήσουν για το βαρυτικό πεδίο του Γαλαξία. Και επειδή η σκοτεινή ύλη έχει την μεγαλύτερη συνδρομή στο γαλαξιακό βαρυτικό πεδίο, μπορούμε να μετρήσουμε με αυτόν τον τρόπο την κατανομή της. Το γεγονός ότι όλα τα αστέρια των ρευμάτων ήταν παλαιότερα δεσμευμένα στους νάνους γαλαξίες τους (ή σε

σφαιρωτά σμήνη) μας κάνει γνωστές τις κινήσεις που έχουν διαγράψει αυτοί οι προγεννήτορες στο πέρασμα του χρόνου.

Οι γωνιακές ταχύτητες των αστεριών των νάνων γαλαξιών μας πληροφορούν ότι οι νάνοι έχουν μεγάλο ποσοστό σκοτεινής ύλης (σκοτεινή άλως). Το ρεύμα το Τοξότη μας έδειξε μια τριαξονική δομή της σκοτεινής ύλης του Γαλαξία. Οι δομές αυτές (υπό-άλως σκοτεινής ύλης) μπορεί να επηρεάσουν σε μικρό βαθμό τα αστρικά ρεύματα αυξάνοντας το πλάτος τους, αλλά και σε μεγάλο βαθμό, δημιουργώντας χάσματα στα ρεύματα. Το πλάτος ενός ρεύματος μας δίνει πληροφορίες για τον νάνο γαλαξία όπου προέρχεται, και αν το συγκρίνουμε με το πλήθος των αστεριών μπορούμε να βγάλουμε συμπεράσματα για το μέγεθος της σκοτεινής ύλης του νάνου.

Ο γαλαξιακός δίσκος και οι παλιρροϊκές αλληλεπιδράσεις

Όταν ένας σχετικά μεγάλης μάζας νάνος πλησιάζει πολύ τον Γαλαξία, μπορεί ο δίσκος να αλληλεπιδράσει βαρυτικά μαζί του. Παρατηρούμε μια παραμόρφωση (warp) του δίσκου που οφείλεται στο μεγάλο Μαγγελανικό νέφος. Και το δακτυλίδι του Μονόκερου επηρεάζει τον γαλαξιακό δίσκο, όπως ο νάνος του Τοξότη. Παρόμοια φαινόμενα παρατηρούμε και στον δίσκο του γαλαξία της Ανδρομέδας.

Αστρικοί πληθυσμοί στο ρεύμα του Τοξότη

Η απομάκρυνση αστεριών ενός νάνου σε φάση συγχώνευσης στον Γαλαξία πετυχαίνεται πρώτα τα εξωτερικά του αστέρια. Αυτά έχουν την πιο ασθενή βαρυτική σύνδεση με τον νάνο. Τότε ο νάνος, λόγω της τροχιάς του γύρω από τον Γαλαξία, δημιουργεί επιμήκη αστρικά ρεύματα. Μπορούμε να μετρήσουμε τις διακυμάνσεις χημικής σύστασης και ηλικίας των αστεριών του νάνου και των ρευμάτων του. Αυτό γίνεται πολύπλοκο επειδή ο νάνος μπορεί να δημιουργήσει νέα αστέρια στο χρονικό διάστημα που απογυμνώνεται από τα εξωτερικά αστέρια του, και επειδή χάνονται πληροφορίες από αλληλοεπικαλύψεις των πολλαπλών τροχιών του γύρω από τον Γαλαξία. Έχουν παρατηρηθεί διακυμάνσεις μεταλλικότητας στο ρεύμα του Τοξότη σε όλο το μήκος του. Αυτές μας δείχνουν την ύπαρξη πληθυσμού μεγάλης μεταλλικότητας στον νάνο. Η τωρινή χημική σύσταση του νάνου δεν είναι αντιπροσωπευτική για την γαλαξιακή άλω. Η άλως εκφράζεται καλύτερα από τις παλαιές συγχωνεύσεις φτωχών σε μέταλλα νάνων γαλαξιών.

Η χημική εξέλιξη του νάνου και των ρευμάτων του

Υπάρχει σημαντική διαφορά στην αφθονία των στοιχείων s- process (La) /(Y) ανάμεσα στον νάνο και τα ρεύματα. Ο νάνος έχει ενισχυμένη αφθονία των βαρέων στοιχείων s και ελαττωμένη αφθονία των ελαφριών στοιχείων s σε σχέση με τα αστέρια του Γαλαξία. Επίσης παρουσιάζει ελάττωση αναλογίας στοιχείων α/ Fe (ειδικά των (O) και (Mg), αλλά και των (Si), (Ca), (Ti)), και των αναλογιών (Na)/(Fe), (Al)/(Fe), (Cu)/(Fe). Φαίνεται να υπήρξε έλλειψη ισχυρών σουπερνόβα τύπου II, ή ο νάνος να μην συγκράτησε τα στοιχεία που αυτές δημιούργησαν. Επικράτησε μια, απότομη προς την κορυφή της, συνιστώσα αρχικής

μάζας (IMF), με όριο τις 30 ηλιακές μάζες. Αυτές οι χημικές υπογραφές βοηθάνε στην ανίχνευση αστεριών που να προέρχονται από τον νάνο.

Τα σμήνη του νάνου του Τοξότη

Τα σφαιρωτά σμήνη έχουν σημαντικό ρόλο στην κατανόηση του σχηματισμού του Γαλαξία. 9 σφαιρωτά σμήνη φαίνεται να έχουν σύνδεση με τον νάνο του Τοξότη, ανάμεσά τους τα 2 μεγαλύτερα του Γαλαξία, το M54 και το NGC2419. Είναι νεαρότερα από τα σφαιρωτά του πεδίου. Ακολουθούν την σχέση ηλικίας/ μεταλλικότητας του νάνου.

Το σχήμα της άλως σκοτεινής ύλης του Γαλαξία

Λόγω μεγάλης απόστασης από το κέντρο του Γαλαξία (20- 60Kpc), η τροχιά του νάνου του Τοξότη είναι ευαίσθητη στις δομές της σκοτεινής ύλης του Γαλαξία. Φαίνεται η άλως σκοτεινής ύλης του Γαλαξία να είναι σφαιρική σε αυτές τις αποστάσεις. Η κατανομή των ρευμάτων στον Γαλαξία εξαρτάται από την τροχιά του νάνου προγεννήτορα, που επηρεάζεται κατά πολύ από την δομή της σκοτεινής ύλης. Μόνο τα μοντέλα που προβλέπουν σφαιρικό σχήμα της σκοτεινής άλως είναι σύμφωνα με την κινητική του προπορευόμενου ρεύματος. Η σκοτεινή άλως φαίνεται να έχει τριαξονική δομή. Το σχήμα της τροχιάς του νάνου του Τοξότη έχει επηρεαστεί επίσης από τα νέφη του Μαγγελάνου, όπως και η δομή της σκοτεινής ύλης του Γαλαξία, αλλά δεν είμαστε σίγουροι αν αυτά βρίσκονται στην πρώτη τους περιφορά γύρω από τον Γαλαξία.

Μάζα, λαμπρότητα και αναλογία μάζας/ φωτός

Δεδομένου της παλιρροϊκής διαταραχής που βίωσε ο νάνος του Τοξότη, η σημερινή λαμπρότητά του είναι ένα κλάσμα της συνολικής λαμπρότητας του συστήματος (νάνος και ρεύματα). Η λαμπρότητα του προγεννήτορα νάνου (από τον συνδυασμό της λαμπρότητας του νάνου και των ρευμάτων) πρέπει να ήταν πάνω από 100 εκατομμύρια ηλιακές, λίγο μεγαλύτερη από την σημερινή λαμπρότητα του μικρού Μαγγελανικού νέφους. Η μάζα του νάνου ήταν περίπου 16 δις ηλιακές, κάτι που εξηγεί την επιβίωσή του. Σήμερα είναι κοντά στο 1 δις ηλιακές, άρα έχει απολέσει το μεγαλύτερο μέρος της μάζας του.

Το διχαλωτό προφίλ πυκνότητας των ρευμάτων

Το προπορευόμενο ρεύμα παρουσιάζει διχαλωτή μορφή, με το λαμπρότερο μέρος να χωρίζεται από το αμυδρότερο κατά 15 μοίρες. Αυτό το δευτερεύον αμυδρό ρεύμα αναπτύσσεται παράλληλα με το πρωτεύον λαμπρότερο, και διαφέρει σε απόσταση, γωνιακή ταχύτητα και μεταλλικότητα. Και τα 2 ρεύματα προέρχονται από την ίδια φάση περιφοράς του νάνου. Ο σημερινός νάνος δεν παρουσιάζει περιστροφή ώστε να είναι αυτή η αιτία της διχοτόμησης. Παρόμοια διχοτόμηση παρατηρούμε και στο συρόμενο ρεύμα, στο νότιο γαλαξιακό ημισφαίριο.

Μια εξήγηση είναι τα δευτερεύον ρεύματα να προέρχονται από έναν συνοδό νάνο του Τοξότη, που δεν επιβίωσε ως σήμερα (στα πρότυπα του μεγάλου/ μικρού Μαγγελανικού νέφους). Όμως το αμυδρό ρεύμα παρουσιάζεται πάντα στην ίδια πλευρά του κυρίως ρεύματος και παράλληλα σε αυτό σε σταθερή γωνιακή απόσταση για σχεδόν 360 μοίρες, ενώ θα περιμέναμε να διασταυρώνεται με το κυρίως ρεύμα, αν ο δορυφόρος- νάνος περιφερόταν γύρω από τον νάνο του Τοξότη.



Το δακτυλίδι του Μονόκερου και άλλες παρόμοιες δομές κοντά στο γαλαξιακό επίπεδο

Το δακτυλίδι του Μονόκερου εκτείνεται ως αυξημένη πυκνότητα αστεριών, και σε απόσταση 11Kpc από τον Ήλιο και 20 περίπου Kpc από το γαλαξιακό κέντρο, για τουλάχιστον 100 μοίρες στον ουρανό. Παρουσιάζει διασπορά ταχυτήτων των αστεριών του 25 km/s. Αν βρισκόταν σε μεγάλο γαλαξιακό ύψος θα ήταν αναμφίβολα αστρικό ρεύμα. Όμως το μικρό του γαλαξιακό ύψος και η σύμφωνη με την γαλαξιακή περιστροφή τροχιά του, όπως αυτή του γαλαξιακού δίσκου, μας κάνει να υποψιαζόμαστε μήπως ανήκει στον δίσκο (είναι μια συμπίκνωσή του) και δεν είναι εξωγενής αστρικό ρεύμα. Τα αστέρια του δακτυλιδιού έχουν χαμηλότερη μεταλλικότητα από αυτά του δίσκου. Αλλά η μεταλλικότητα του δίσκου ελαττώνεται με την απόσταση από το γαλαξιακό κέντρο. Η μικρή διαφορά ταχυτήτων των αστεριών του μπορεί να οφείλεται σε αξονική ασυμμετρία του δίσκου. Αυτά τα αστέρια ή παρασύρθηκαν προς τον δίσκο από την συσσώρευση νάνου γαλαξία (αστρικό ρεύμα) ή εξωθήθηκαν από τον δίσκο (αστέρια του δίσκου). Αν ο δίσκος φτάνει μέχρι τα 15 Kpc από το κέντρο του Γαλαξία, και το δακτυλίδι του Μονόκερου εμφανίζεται στα 18Kpc θα πρέπει να υπάρχει ένα κενό με αραιότερα αστέρια ανάμεσα στις 2 περιοχές, κάτι που δεν είναι ορατό από την Γη μας. Θα μοιάζει με έναν εξωγαλαξιακής προέλευσης δίσκο γύρω από τον δίσκο του Γαλαξία μας.

Η μετανάστευση αστεριών με χαμηλή μεταλλικότητα από την άλω στον παχύ δίσκο είναι πιθανή. Αλλά μερικοί Κηφείδες (μεταβλητοί αστέρες) στον δίσκο έχουν χαμηλή μεταλλικότητα, σαν να προέρχονται από ένα μεμονωμένο επεισόδιο συσσώρευσης. Το δακτυλίδι του Μονόκερου μπορεί να αποτελείται από αστέρια που μέσω συσσώρευσης νάνου ή σφαιρωτού σμήνους από τον Γαλαξία μας εισήλθε στις εξωτερικές περιοχές του

δίσκου. Η διασπορά των στοιχείων $\alpha/(\text{Fe})$ σε σύγκριση με $(\text{Fe})/(\text{H})$ στα αστέρια του δακτυλιδιού δεν μοιάζει με ότι παρατηρούμε στα αστέρια του δίσκου, αλλά με ιδιότητες αστεριών νάνων σφαιροειδών γαλαξιών.



Φαίνεται το δακτυλίδι του Μονόκερου να είναι διακριτό από τον παχύ δίσκο. Το δακτυλίδι μπορεί να προέρχεται από ένα νάνο που πρόσφατα πέρασε το περιγαλάξιο. Ένα πρόβλημα είναι η εξήγηση του σχήματος του δακτυλιδιού. Ακόμα και μια σύγκρουση ανάμεσα στον προγεννήτορα του ρεύματος του Τοξότη και σε αυτό του δακτυλιδιού του Μονόκερου μπορεί να δικαιολογήσει την κυκλική εμφάνισή του. Ένα άλλο, πιο απίθανο σενάριο είναι το σχήμα να προέρχεται από επίδραση συμπυκνώσεων σκοτεινής ύλης, που εισέρχονται στην άλω του Γαλαξία.

Ιδιότητες της δομής του δακτυλιδιού του Μονόκερου

Η επικάλυψη (crowding), η σκόνη και η παραπλάνηση από αστέρια του λεπτού δίσκου σε μικρά γαλαξιακά ύψη κάνουν δύσκολη την εκτίμηση της ομοιομορφίας του δακτυλιδιού, και να γνωρίζουμε αν κυκλώνει τον Γαλαξία (360 μοίρες). Οι γωνιακές ταχύτητες από φασματογραφικά δεδομένα δείχνουν ότι τα αστέρια του κινούνται γενικά σύμφωνα με την περιστροφή του Γαλαξία. Η κίνηση των αστεριών του δακτυλιδιού φαίνεται να είναι αρκετά κυκλική, όμοια με αυτήν του δίσκου, αλλά όχι ταυτόσημη. Οι διασπορές ταχύτητας είναι μικρότερες από αυτές που θα είχαν αν ήταν αστέρια του παχύ δίσκου στην ίδια περιοχή. Το δακτυλίδι παρουσιάζει μεγαλύτερη μεταλλικότητα από την γαλαξιακή άλω και λίγο μικρότερη από τον παχύ δίσκο.

Δεν υπάρχει σαφή σύνδεση των αστεριών του δακτυλιδιού πάνω και κάτω από το γαλαξιακό επίπεδο. Τα πάνω αστέρια διαφέρουν σε γαλαξιοκεντρική απόσταση από τα κάτω του ιδίου γαλαξιακού πλάτους. Η βασική δομή των αστεριών πάνω από το επίπεδο σχηματίζει μια πλήρης αψίδα. Τα αστέρια που βρίσκονται νότια είναι μερικά K_{rc} πιο κοντά από αυτά που βρίσκονται βόρεια. Η παρουσία αστεριών RR Λύρας μας δείχνει έναν παλαιό αστρικό πληθυσμό, που μοιάζει περισσότερο με πληθυσμό της άλως παρά με νεαρό πληθυσμό του δυναμικού δίσκου. Αντίθετα με το ρεύμα του Τοξότη, δεν παρατηρούμε αστέρια του μπλε οριζώντιου κλάδου (αστέρια πληθυσμού II, άρα μεσαίας κυρίως μάζας,

μετά την φάση του ερυθρού γίγαντα) στο δακτυλίδι του Μονόκερου, κάτι που δηλώνει την διαφορετικότητα (προέλευση και αστρικό πληθυσμό) των 2 συστημάτων. Οι γίγαντες τύπου M στον Μονόκερο δηλώνουν αυξημένη μεταλλικότητα. Οι τροχιές κάποιων σφαιρωτών σμηνών ταιριάζουν με την τροχιά των αστεριών του δακτυλιδιού, χωρίς να είναι σαφής η σύνδεσή τους. Η συνολική αστρική μάζα του δακτυλιδιού είναι 10- 100 εκατομμύρια ηλιακές. Και πρέπει να συνυπολογίσουμε μια σημαντική ποσότητα σκοτεινής ύλης.

Η διαμάχη για τον νάνο γαλαξία της μεγάλης Άρκτου

Ένα συμπέρασμα από την κινηματική του δακτυλιδιού του Μονόκερου είναι ότι μπορεί να προέρχεται από ένα διαλυμένο νάνο γαλαξία που βρισκόταν στην μεγάλη Άρκτο. Όμως η υποτιθέμενη θέση του κοντά στο γαλαξιακό επίπεδο δεν μας αφήνει να διακρίνουμε σημάδια εναπομείναντος αστρικής συμπύκνωσης. Υπάρχουν κάποιες ενδείξεις (ασυμμετρία στην κατανομή της σκόνης, αυξημένος πληθυσμός νεαρών αστεριών), που όμως μπορεί και να είναι ανωμαλίες του δίσκου. Υπάρχουν 2 σχετικές υποθέσεις. 1) Πράγματι να βρίσκεται ένας νάνος εκεί (που δεν έχει ανακαλυφτεί ακόμα), με την παραδοχή ότι το δακτυλίδι προέρχεται από έναν νάνο που διαταράσσεται από τις παλιρροϊκές δυνάμεις του Γαλαξία, ή 2) Οι ασυμμετρίες που παρατηρούμε έχουν να κάνουν με παραμόρφωση του σχήματος του Γαλαξία (λόγω παλαιότερης βαρυτικής διαταραχής από άλλον γαλαξία) και τα νεαρά αστέρια (έξω από το επίπεδο του λεπτού δίσκου) προέρχονται από τον δίσκο και όχι από έναν νάνο γαλαξία που συγχωνεύτηκε από τον δικό μας.

Άλλες δομές κοντά στο γαλαξιακό επίπεδο, όπως το ρεύμα Τριγώνου –Ανδρομέδας.

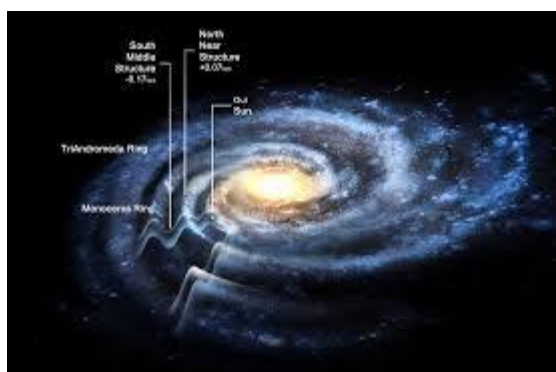
Στην κατεύθυνση αυτών των αστερισμών και πιο μακριά από το δακτυλίδι του Μονόκερου, 22 Kpc από τον Ήλιο, βρέθηκε μια συμπύκνωση αστεριών (ρεύμα TriAnd). Πιο πίσω (28 Kpc) στην ίδια κατεύθυνση βρέθηκε το ρεύμα TriAnd 2. Οι γωνιακές ταχύτητες των 2 ρευμάτων έδειξαν ότι συν-περιστρέφονται με τον δίσκο του Γαλαξία, με ταχύτητες που δείχνουν αρκετά ομαλή καμπύλη τροχιάς. Το ρεύμα TriAnd 2 έχει ίδια ταχύτητα με το TriAnd, βάσει κινηματικής των γιγάντων M, αλλά λίγο μικρότερη μεταλλικότητα. Και τα 2 έχουν μεγαλύτερη μεταλλικότητα από την γαλαξιακή άλω.

Αυτές οι 2 δομές παρουσιάζουν κοινά με το ρεύμα του σφαιρωτού σμήνους των Ιχθύων και τις 2 συμπυκνώσεις PAndAS Ne blob, PAndAS MW stream. Χαρακτηρίζονται από αμυδρά μπλε αστέρια του σημείου αποκοπής από την κύρια ακολουθία, σε μικρό εύρος σε χαμηλό γαλαξιακό ύψος. Ενώ το ρεύμα του σφαιρωτού των Ιχθύων έχει σαφή καθορισμό από το σφαιρωτό- δορυφόρο του Γαλαξία, τα άλλα 2 είναι υπό αμφισβήτηση. Μπορεί να προέρχονται από ταυτόχρονη συσσώρευση περισσότερων νάνων ή σφαιρωτών.

Υπάρχουν τουλάχιστον 3 δομές που είναι χονδρικά παράλληλες με το δακτυλίδι του Μονόκερου. Φαίνεται να προέρχονται από διαταραχές διακριτών δορυφόρων, όπως τα σφαιρωτά σμήνη ενός νάνου γαλαξία, και αποτελούν το ρεύμα του αντίκεντρου (Anticenter stream, ACS). Δείχνουν να είναι ξεχωριστές δομές από το δακτυλίδι του Μονόκερου.

Ο <κυματιστός> δίσκος ως αιτία της ύπαρξης των αστρικών ρευμάτων μικρού γαλαξιακού ύψους

Η παραπάνω θεωρία υποθέτει ότι η διάβαση σκοτεινών αλεών μεγάλης μάζας από νάνους γαλαξίες μπορεί να δημιουργήσει μια κυματοειδής δομή στον γαλαξιακό δίσκο. Αυτά τα κύματα αστρικής συμπύκνωσης μπορούν να δημιουργήσουν δακτυλίδια γύρω από τον Γαλαξία, ακόμα και νήματα πάνω από τον δίσκο. Συγκεκριμένα, ο νάνος του Τοξότη μπορεί να δημιούργησε το δακτυλίδι του Μονόκερου κατά το πέρασμά του από τον δίσκο. Παρατηρούμε μια ασυμμετρία των αστεριών του δίσκου ανάλογα την απόσταση από το επίπεδό του. Αυτή μπορεί να οφείλεται σε ένα πέρασμα ενός νάνου (του Τοξότη) με μεγάλη κάθετη ταχύτητα (50 km/s) και με πυκνότητα όμοια με αυτή του δίσκου. Παρατηρούμε αυξομειώσεις της πυκνότητας των αστεριών σε γαλαξιακό πλάτος, σε αποστάσεις 4-6, 8-10 και 12-16 Kpc από τον Ήλιο.



Η ίδια βαρύτητα του δίσκου τον εξομαλύνει σε κάθετη κατεύθυνση σε χρονοδιάγραμμα 300 εκατομμύρια έτη, έτσι αυτές οι ανωμαλίες πρέπει να οφείλονται σε πιο πρόσφατο εξωγενή παράγοντα. Οι δακτυλιοειδείς δομές είναι χονδρικά ευθυγραμμισμένες με τις γαλαξιακές σπείρες. Μπορεί και αυτές να προκαλούνται με τον ίδιο μηχανισμό. Ο νάνος του Τοξότη και ο M32 μπορεί να προκάλεσαν την σπειροειδή δομή των δίσκων του Γαλαξία και του γαλαξία της Ανδρομέδας, αντίστοιχα.

Αστρικά ρεύματα και <νέφη> στην γαλαξιακή άλω

Ως ρεύματα ονομάζουμε τις συμπυκνώσεις αστεριών με σημαντικά μεγαλύτερο μήκος από πλάτος. Έχουν μικρή διασπορά ταχυτήτων των αστεριών τους, και προέρχονται από παλιρροϊκή διαταραχή νάνου γαλαξία (τα ρεύματα με το μεγαλύτερο πλάτος, με περισσότερα αστέρια και ταχύτητα > 10km/s) ή σφαιρωτού σμήνους (αυτά με μικρό πλάτος, λίγα αστέρια, και ταχύτητα < 5km/s). Νέφη ονομάζουμε άμορφες συμπυκνώσεις αστεριών μεγάλου πεδίου με άγνωστο προγεννήτορα. Μπορεί να είναι αστέρια που αποδεσμεύτηκαν από νάνο γαλαξία όταν πέρασε το απογαλάξιο σε πολύ έκκεντρη τροχιά. Υπάρχουν αποδείξεις ότι ένα νέφος αποτελεί το απομεινάρι ενός νάνου γαλαξία, μετά την συγχώνευσή του στον Γαλαξία.

Όλα τα σφαιρωτά έχουν βιώσει, περισσότερο ή λιγότερο, παλιρροϊκές διαταραχές κατά την περιφορά τους γύρω από τον Γαλαξία.

Μία λίστα γνωστών αστρικών ρευμάτων (Wikipedia)

Όνομα	Προέλευση	Μάζα	Μήκος σε έτη φωτός	Σύσταση	Ανακαλύφτηκε
Arcturus stream	Διαμελισμένος νάνος γαλαξίας	Άγνωστη	Άγνωστο	Παλαιά φτωχά σε μέταλλα αστέρια	1971 ^[2]
Cetus Polar Stream	Διαμελισμένος νάνος γαλαξίας	Άγνωστη	Άγνωστο	Παλαιά αστέρια	2009 ^[3]
Magellanic Stream	Μαγγελανικά νέφη	200 εκ.	1 εκ.	Υδρογόνο	1972
Sagittarius Stream	Νάνος γαλαξίας του Τοξότη	100 εκ.	1 εκ.	Μεγάλη ποικιλία αστεριών	1994
Helmi stream	Διαμελισμένος νάνος γαλαξίας	10 -100 εκ	Πολλαπλές ολοκληρωμένες περιφορές γύρω από τον Γαλαξία	Παλαιά αστέρια, πολύ φτωχά σε μέταλλα	1999
Palomar 5 stream	Σφαιρωτό σμήνος Palomar 5	5,000	30,000	Παλαιά αστέρια	2001
Virgo stream	Διαμελισμένος νάνος γαλαξίας		30,000		2001
Monoceros ring	Νάνος γαλαξίας της μεγάλης	100 εκ.	200,000	Αστέρια μεσαίας ηλικίας	2002

	Άρκτου			ς	
Anticenter stream	Διαμελισμένος νάνος γαλαξίας	Άγνωστη	30,000	Παλαιά αστέρια	2006
NGC 5466 stream 45 Degree Tidal Stream	Σφαιρωτό σμήνος NGC 5466	10,000	60,000	Πολύ παλαιά αστέρια	2006 ^{[4][5]}
Orphan stream	Άγνωστος	Άγνωστη ^[6]	20,000	Παλαιά αστέρια	2006
Acheron stream	Σφαιρωτό σμήνος				2007 ^{[4][7]}
Cocytus stream	Σφαιρωτό σμήνος				2007 ^{[4][7]}
Lethe stream	Σφαιρωτό σμήνος				2007 ^[7]
Styx stream	Διαμελισμένος νάνος γαλαξίας				2007 ^{[4][7]}
Bootes III stream	Πιθανός προγεννήτορας του Styx				2007 ^{[4][7]}
Aquarius Stream	Διαμελισμένο νάνο γαλαξία	Άγνωστη	30,000	Παλαιά αστέρια	2010
Lamost 1	Διαταραγμένο σφαιρωτό σμήνος	21,000		Αστέρια μέσης ηλικίας	2015 ^[8]

(Η μάζα υπολογίζεται σε ηλιακές μάζες)

Αστρικά ρεύματα με προγεννήτορα σφαιρωτό σμήνος

Ένα από τα πιο γνωστά είναι το ρεύμα του σφαιρωτού Palomar (Pal) 5. Η σύνδεσή του με το σφαιρωτό είναι εμφανής, έχει μικρή ταχύτητα και βρίσκεται σε απόσταση 23 Kpc, αρκετά κοντά ώστε να παρατηρούμε λεπτομέρειες σε αυτό. Εκτείνεται για 25 μοίρες στον ουρανό.

Τα περισσότερα αστέρια του βρίσκονται ακόμα κοντά στο σφαιρωτό. Παρουσιάζει χάσματα στην πυκνότητά του, που μπορεί να οφείλονται σε επικυκλικές κινήσεις των αστεριών μέσα στο ρεύμα.

Το σφαιρωτό NGC5466 έχει ένα αστρικό ρεύμα, που μας βοηθάει στην κατανόηση της δομής της σκοτεινής άλω του Γαλαξία μας. Ενώ τα αστέρια του είναι αρκετά πυκνά κοντά στο σφαιρωτό, η άκρη του μακριά από το σφαιρωτό είναι πολύ αραιή. Εκεί φαίνεται η επίδραση της σκοτεινής ύλης του Γαλαξία.

Το ρεύμα GD-1 είναι αυτό με το μεγαλύτερο μήκος και την χαμηλότερη ταχύτητα που γνωρίζουμε. Σε απόσταση 9 Kpc παρουσιάζει πλάτος μόλις 70pc, κάτι που δείχνει ότι προέρχεται από σφαιρωτό σμήνος. Το περίκεντρό του είναι στα 14Kpc και το απόκεντρο στα 28Kpc. Φαίνεται να είναι μεγάλης ηλικίας και δεν ξεχωρίζουμε τον προγεννήτορα του. Αποτελεί καλή περίπτωση για την μελέτη της βαρυτικής επίδρασης της σκοτεινής ύλης σε αστρικό ρεύμα. Παρουσιάζει χάσματα πυκνότητας αστεριών που δείχνουν την ύπαρξη 100 υπό- αλεών σκοτεινής ύλης με μάζες 1 εκατομμύριο ηλιακές, κοντά στο απόκεντρο της τροχιάς του GD-1.

Το EBS είναι μια συμπύκνωση αστεριών μήκους 18 μοιρών. Είναι κοντά (10Kpc) στο ρεύμα αντίκεντρου (ACS) αλλά έχει άλλη μεταλλικότητα και κινηματική, και πιο έκκεντρη τροχιά. Περιέχει μια πιο πυκνή περιοχή που μάλλον είναι το απομεινάρι του προγεννήτορα.

Το ρεύμα Ιχθύων/ Τριγώνου είναι στενό και εκτείνεται για 5,5 Kpc, σε απόσταση 35 Kpc. Παρουσιάζει απότομο όριο (τελειώνει απότομα) και δεν έχει γνωστό προγεννήτορα.

Τα ρεύματα Acheron, Coctyos, Hermus, και Hyllus έχουν μεγάλο μήκος και είναι στενά με μικρή μεταλλικότητα. Το Alpheus είναι πολύ κοντά (2Kpc) και πιθανώς προέρχεται από το σφαιρωτό NGC 288. Το ρεύμα του Οφιούχου έχει μήκος μόλις 1,6Kpc, μικρή ταχύτητα και έκκεντρη τροχιά. Το περίκεντρο είναι στα 3,5Kpc και το απόκεντρο στα 17,5Kpc. Το μικρό του μήκος οφείλεται σε μεταβολή της τροχιάς του προγεννήτορα πριν από 250 εκατομμύρια έτη.

Αστρικά ρεύματα με προγεννήτορα νάνο γαλαξία

Το <ορφανό> ρεύμα (Orphan stream) ονομάζεται έτσι επειδή δεν έχει βρεθεί ο προγεννήτορας. Η εκτίμηση της ταχύτητας και της απόστασής του είναι δύσκολη επειδή είναι πολύ αμυδρό. Το ανιχνεύουμε από τη παρουσία αστεριών RR Λύρας στα 55 Kpc. Η μεγάλη διασπορά μεταλλικότητας σε αυτά τα αστέρια δείχνουν ότι το ρεύμα προέρχεται από έναν νάνο γαλαξία. Υπάρχουν υποψήφιοι νάνοι, όπως οι UMa II, Segue 1, Complex A, αλλά κανείς δεν έχει επιβεβαιωθεί. Το ρεύμα αποτελεί καλό μέτρο εκτίμησης της μάζας του Γαλαξία, αφού εκτείνεται σε μεγάλη ακτίνα του.

Το πολικό ρεύμα του Κήτους (Cetus Polar stream) ανιχνεύτηκε σε μελέτες του ρεύματος του Τοξότη, με διακριτή ταχύτητα και μεταλλικότητα από αυτό. Περνάει από τον νότιο πόλο του Γαλαξία και έχει μικρότερη αναλογία αστεριών του μπλε οριζόντιου κλάδου (BHB)/ blue stragglers από το ρεύμα του Τοξότη. Τα περισσότερα BHB στην περιοχή ανήκουν στο ορφανό και όχι στο ρεύμα του Τοξότη. Ο προγεννήτορας του πρέπει να είχε τροχιά αντίθετης φοράς με αυτή του νάνου του Τοξότη. Το σφαιρωτό NGC5824 είναι κοντά σε μια

τέτοια τροχιά. Το απόκεντρο της τροχιάς του είναι στα 36 Kpc και το περίκεντρο στα 24 Kpc. Η μάζα του νάνου προγεννήτορα εκτιμάται στο 1 εκατομμύριο ηλιακές. Πρέπει να είναι/ήταν πολύ αμυδρός σφαιροειδής νάνος (ultra faint spheroidal dwarf) με χαμηλή μεταλλικότητα.

Το ρεύμα PAndAS MW εκτείνεται στην γραμμή θέασης του M31. Το πλάτος του και η διασπορά ταχυτήτων των αστεριών του δείχνουν νάνο γαλαξία ως προγεννήτορα. Πρόκειται για μια παλαιά, μικρής μεταλλικότητας δομή με χονδρικά παράλληλη τροχιά προς το γαλαξιακό επίπεδο, σε απόσταση 17 Kpc από τον Ήλιο.

Το ρεύμα Styx βρίσκεται σε απόσταση 46 Kpc από τον Ήλιο και προέρχεται από διαλυμένο νάνο γαλαξία. Το απομεινάρι του νάνου αποτυπώνεται σε μια συμπύκνωση αστεριών στον Βώτη.

Νέφη και άλλες διάχυτες αστρικές δομές

Στην Παρθένο υπάρχουν πολλές συμπυκνώσεις αστεριών. Τα αστέρια στο σημείο αποκοπής δείχνουν μια τεράστια έκταση με συμπυκνώσεις. Σε μικρότερη έκταση παρατηρούμε συμπυκνώσεις αστεριών RR Λύρας (παλαιότερα αστέρια). Διακρίνουμε διακυμάνσεις πυκνότητας στην συμπύκνωση. Φαίνεται να υπάρχουν 3 κορυφώσεις πυκνότητας με εύρος από 10 ως 20 Kpc και ταχύτητες από 120 ως 220 km/s. Από την ίδια κίνηση και την γωνιακή ταχύτητα μερικών αστεριών του νέφους βρέθηκε ότι προέρχονται από ένα αντικείμενο που πρόσφατα πέρασε το γαλαξιακό περίκεντρο στην έκκεντρη τροχιά του. Μπορεί να πρόκειται για σφαιροειδή νάνο σχετικά μεγάλης μάζας που διαλύθηκε εντελώς περνώντας σχετικά κοντά από το κέντρο του Γαλαξία. Οι συμπυκνώσεις που παρατηρούμε στο νέφος μπορεί να προέρχονται από διαδοχικές συσσωρεύσεις τμημάτων του νάνου ή από αρχικά του συμπυκνώματα αστεριών. Ή πρόκειται για αστέρια από πολλαπλές περιφορές του νέφους που αλληλεπικαλύπτονται.

Η δομές TriAnd 1 και 2 βρίσκονται σε απόσταση 18 και 30 Kpc αντίστοιχα από τον Ήλιο. Αν και διαχωρίζονται κατά 5 Kpc, οι 2 δομές φαίνονται να έχουν ίδια ταχύτητα. Έχουν μικρή διαφορά στην μεταλλικότητα. Φαίνεται να προέρχονται από την διάλυση ενός νάνου γαλαξία. Οι παραπάνω δομές και ο Segue 2 πολύ αμυδρός γαλαξίας μάλλον αποτελούν τα απομεινάρια ενός επεισοδίου ταυτόχρονης συσσώρευσης νάνων γαλαξιών. Ο πλούσιος σε μέταλλα προγεννήτορας νάνος των TriAnd είχε δορυφόρους τους νάνους που σχημάτισαν το Segue2 και το PAndAS.

Το νέφος Ηρακλή- Αετού βρίσκεται σε ηλιοκεντρική απόσταση 10- 20 Kpc. Πρόκειται για μια συμπύκνωση αστεριών που καλύπτει μεγάλο μέρος του ουρανού. Έχει χαρτογραφηθεί με την χρήση των αστεριών τύπου RR Λύρας. Η αστρική πυκνότητά του είναι 1,6 φορές μεγαλύτερη από αυτήν στην άλω στα 15- 25 Kpc. Η μεταλλικότητα είναι όμοια με αυτήν της άλως. Η ταχύτητες των αστεριών του φτάνουν τα 25 km/s.

Το συμπύκνωμα των Ιχθύων είναι το πιο μακρινό που γνωρίζουμε στην γαλαξιακή άλω. Από τα αστέρια RR Λύρας συμπεραίνουμε ότι βρίσκεται σε απόσταση 81 Kpc. Η μάζα του είναι 10.000- 100.000 ηλιακές και έχει χαμηλή μεταλλικότητα. Χάρη στην ανακάλυψή του γνωρίζουμε ότι υπάρχουν συντρίμια νάνων δορυφόρων σε απόσταση 80 Kpc, μακριά στην εξωτερική γαλαξιακή άλω.

Το νέφος του Περσέα φαίνεται σαν να είναι προέκταση του TriAnd, αφού βρίσκονται στην ίδια απόσταση, αλλά οι διαφορετικές ταχύτητες δείχνουν ότι τα 2 νέφη δεν έχουν σχέση.

Υπάρχουν και άλλες αστρικές συμπυκνώσεις που όμως είναι άγνωστης φύσης, όπως οι συμπυκνώσεις της μεγάλης Άρκτου και αυτή της Αργού. Η πρώτη μπορεί να είναι απομεινάρια πρόσφατα συσσωρευμένου νάνου και να αποτελεί τον προγεννήτορα του δακτυλιδιού του Μονόκερου ενώ για την δεύτερη δεν γνωρίζουμε κάτι παραπάνω.

Αστρικά ρεύματα που ανακαλύψαμε από την κινηματική τους

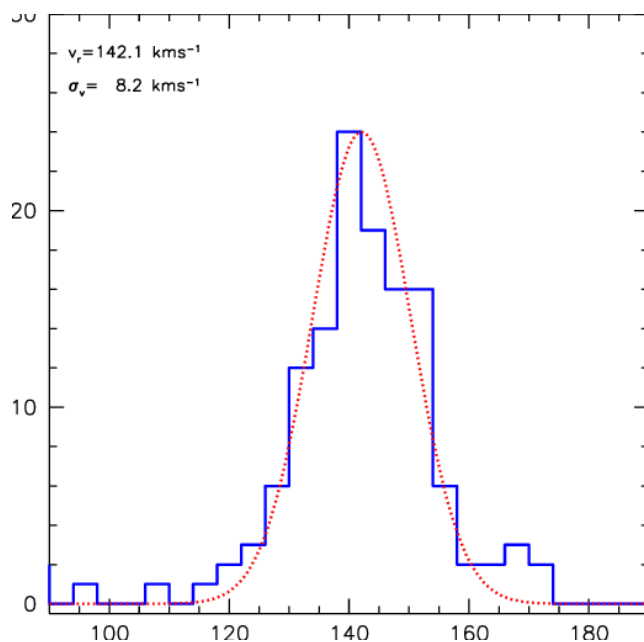
Η διάκριση της τοπικής διασποράς ταχυτήτων των αστεριών μας δίνει πολλές πληροφορίες για την αστρογέννηση και την δομή του Γαλαξία. Αυτές οι ομάδες αστεριών με κοινά χαρακτηριστικά κίνησης (moving groups) μπορεί να είναι από ανοιχτά σμήνη, αστέρια από εξωτερικές περιοχές του Γαλαξία που συσσωρεύονται στον δίσκο ή στην ράβδο μέχρι αστέρια με εξωγαλαξιακή προέλευση που παγιδεύτηκαν στον Γαλαξία μας. Γνωρίζουμε πολλά αστρικά ρεύματα στην άλω του Γαλαξία. Είναι όμως δύσκολο να εντοπίσουμε τα πιο διάχυτα ρεύματα από προγεννήτορες με όχι τόσο μεγάλη μάζα και με πολύ ελλειπτική τροχιά. Τα ρεύματα από προγεννήτορες που διαμελίστηκαν πριν από πολύ καιρό. Αυτά είναι δύσκολο να ανιχνευτούν ως αστρικά συμπυκνώματα. Η κινηματική μελέτη της εξέλιξης ενός ρεύματος μετά από 10 δις έτη δείχνει ότι αυτό παρουσιάζει πολλαπλές συμπυκνώσεις. Αυτό συμβαίνει γιατί το ρεύμα έχει <τυλιχτεί> πολλές φορές γύρω από τον Γαλαξία. Αν η άλως έχει σχηματιστεί από τα συντρίμια αρκετών δεκάδων νάνων γαλαξιών, πρέπει να έχει μερικές εκατοντάδες τέτοια συμπυκνώματα. Ο Γαλαξίας δεν είναι σφαιρικός, κάτι που δυσκολεύει πολύ τους σχετικούς υπολογισμούς. Είναι όμως συμμετρικός προς τον άξονα, που μας επιτρέπει να κάνουμε υπολογισμούς με βάση την στροφορμή. 2 ακόμη παράγοντες περιπλέκουν τις διαδικασίες υπολογισμού συγχώνευσης νάνων γαλαξιών. Τα αστέρια ενός νάνου που συσσωρεύεται στον Γαλαξία δεν ακολουθούν όλα την ίδια ακριβώς τροχιά, επειδή έχουν διαφορετικές ιδίες κινήσεις μέσα στον νάνο, και η μάζα του Γαλαξία και η κατανομή της (αέριο- αστρική μάζα) έχει μεταβληθεί με το πέρασμα των δις ετών, επηρεάζοντας βαρυτικά με διαφορετική στον χρόνο ένταση τους δορυφόρους γαλαξίες. Ένας προγεννήτορας μπορεί να παράγει πολλά αστρικά ρεύματα. Ενώ μπορεί να έχει διαμελίστει πλήρως, οι ταχύτητες των αστεριών του παραμένουν σχετικές.

Η αναζήτηση ρευμάτων της άλω που να εισήλθαν στην γειτονιά του Ηλίου είναι πολύ δύσκολη. Η πυκνότητα των αστεριών εδώ είναι αυξημένη σχετικά με την γαλαξιακή άλω, κάτι που σημαίνει ότι τα ρεύματα δεν ξεχωρίζουν ως συμπυκνώσεις αστεριών. Υπάρχουν ενδογενείς συμπυκνώσεις του γαλαξιακού δίσκου λόγω βαρυτικών διαταραχών κατά την περιφορά του γύρω από το κέντρο του Γαλαξία. Πολλά υποψήφια αστρικά ρεύματα, όπως αυτά των Υάδων- Πλειάδων, του Ηρακλή και του Αρκτούρου μάλλον είναι φυσικές συμπυκνώσεις του δίσκου (αστέρια του δίσκου). Η ομάδα κοινής κίνησης (moving group) Kerteyn ονομάστηκε έτσι γιατί έχει παρόμοια ταχύτητα με το ομώνυμο αστέρι που βρίσκεται μόνο 4 pc μακριά από τον Ήλιο. Η τροχιά της ομάδας είναι αντίθετης φοράς με αυτή του Γαλαξία και έχει ταχύτητα 50 km/s. Υπάρχει σύνδεση ανάμεσα στην ομάδα και το σφαιρωτό σμήνος Ωμέγα του Κενταύρου, που έχει παρόμοια χημική σύσταση και τροχιά. Για να προέρχονται τα αστέρια της ομάδας από το Ωμέγα του Κενταύρου χρειάζεται να υπήρξε μεγάλη δυναμική (ώστε να βρεθούν το σφαιρωτό και η ομάδα στην σημερινή

τροχιά τους). Κάτι που θεωρείται δύσκολο για την μάζα του σφαιρωτού. Οι παραπάνω ομοιότητες του σφαιρωτού με την ομάδα αστεριών και η διασπορά αστρικής ηλικίας (2 πληθυσμοί) του Ωμέγα δεν μπορούν να εξηγηθούν αν δεν έχουν κοινό προγεννήτορα (νάνο γαλαξία).

Ρεύματα της άλως σε μεγάλη απόσταση

Οι αβεβαιότητες υπολογισμού της γωνιακής ταχύτητας των αστεριών ευτυχώς δεν αυξάνονται με την απόσταση. Έτσι μπορούμε να διακρίνουμε αστρικά ρεύματα στην άλω από τις κινηματικές τους, ακόμα και σε μεγάλη απόσταση. Επιπλέον, το ανακάτεμα των άστρων από νάνους με τα τοπικά αστέρια στην εξωτερική άλω συμβαίνει πολύ αργά, με αποτέλεσμα να διακρίνουμε τις δομές από του προγεννήτορες ακόμα και δις έτη μετά την συσσώρευση. Η πιο σημαντική υπό- δομή της άλω είναι ο νάνος του Τοξότη. Αναλύοντας την διασπορά γωνιακής ταχύτητας των αστεριών του παρατηρούμε να έχει 2 κορυφές στο διάγραμμά της. Η δεύτερη κορυφή αντιστοιχεί στον νάνο του Τοξότη, ο οποίος είναι σε φάση αφομοίωσης από τον Γαλαξία μας, ενώ τα αστρικά ρεύματα από αυτόν τυλίγονται γύρα από τον Γαλαξία.



Η προέλευση και τα χαρακτηριστικά των παλλιρικών θραυσμάτων (Tidal Debris)

Υπάρχουν 2 ειδών παλλιρικών θραυσμάτων, τα αστρικά ρεύματα από τον διαμελισμό ενός νάνου γαλαξία σε μέτρια έκκεντρη τροχιά και τα κελύφη (shells) από τον διαμελισμό ενός νάνου σε πολύ έκκεντρη τροχιά. Η παλλιρροιακή διαταραχή ενός δορυφόρου αρχίζει όταν τα

αστέρια του αποδεσμεύονται βαρυτικά από αυτόν και ακολουθούν τις δικιές τους τροχιές γύρω από τον Γαλαξία.

Οι ιδιότητες των τροχιών τους μεταβάλλονται με τον αριθμό των περιφορών τους γύρω από τον Γαλαξία. Σημασία για την αρχική τροχιά τους έχουν η μάζα του δορυφόρου, η τροχιά του και ο χρόνος που χρειάζεται ώστε να αποδεσμευτούν αστέρια από αυτόν.

Το ανακάτεμα των αστεριών του δορυφόρου με αυτά του γαλαξία γίνεται σε φάσεις. Τα αστέρια (θραύσματα) ξεκινάνε από την ίδια φάση (ή θέση) τροχιάς από τον προγεννήτορα τους αλλά με μικρή αντιστάθμιση των ιδιοτήτων της τροχιάς τους με την τροχιά του δορυφόρου. Η περίοδος της τροχιάς των θραυσμάτων διαφέρει από αυτή του δορυφόρου, με αποτέλεσμα τα θραύσματα να προηγούνται ή να έπονται του προγεννήτορα, σχηματίζοντας κελύφη ή ρεύματα.

Ενώ ο χρόνος της περιόδου εξαρτάται περισσότερο από την ενέργεια παρά την στροφορμή ενός θραύσματος, η γωνία μετατόπισης (precession angle) εξαρτάται πιο πολύ από την στροφορμή. Οι τροχιές 2 θραυσμάτων με την ίδια στροφορμή αλλά διαφορετικές ενέργειες διαχωρίζονται σε τροχιακή φάση (οι θέσεις κατά μήκος των ταλαντώσεών τους σε ακτίνα ανάμεσα σε απόκεντρο και περίκεντρο), ενώ αυτές με την ίδια ενέργεια αλλά διαφορετική στροφορμή διαχωρίζονται σε γωνία μετατόπισης (η γωνία ανάμεσα σε απόκεντρο και περίκεντρο). Ο φυσικός διαχωρισμός είναι πολύ πιο έντονος για διαφορές στην ενέργεια παρά για διαφορές στην στροφορμή, επειδή ο βαθμός μετατόπισης είναι πολύ ασθενέστερος παράγοντας των ιδιοτήτων μιας τροχιάς από την συχνότητα των τροχιών.

Η γωνιακή έκταση των κελυφών που σχηματίζονται από τις πολύ έκκεντρες τροχιές παράγεται από διαφορές στην στροφορμή, ενώ η γωνιακή έκταση των ρευμάτων από διαφορές στην ενέργεια. Έτσι οι ιδιότητες των τροχιών καθορίζουν αν θα σχηματιστεί ρεύμα ή κέλυφος.

Μορφολογίες των δομών θραυσμάτων

Η μορφολογία μιας δομής αστρικών θραυσμάτων (debris structure) εξαρτάται από 1) την τροχιά του προγεννήτορα δορυφόρου, που καθορίζει την μορφολογία μεγάλης κλίμακας της δομής. 2) Την μάζα του δορυφόρου, που καθορίζει την κλίμακα διασποράς των αστεριών- θραυσμάτων. 3) Το χρονοδιάγραμμα από την έναρξη απώλειας αστεριών από τον δορυφόρο, που καθορίζει τον βαθμό ανάμειξης των θραυσμάτων με τα υπόλοιπα αστέρια.

Νεαρά θραύσματα

Όσο τα θραύσματα γερνάνε, διασπείρονται και περισσότερο έξω από την τροχιά του προγεννήτορα, και μειώνεται η πυκνότητα της δομής με τον αριθμό των γαλαξιακών περιφορών του προγεννήτορα. Κάποτε τα θραύσματα θα γεμίσουν όλη την περιοχή που κινείται ο προγεννήτορας και θα ονομάζονται πλήρης ανάμειξης (fully phase- mixed). Ο χρόνος και ο τρόπος που θα συμβεί αυτό εξαρτάται από την τροχιά και την μάζα του προγεννήτορα. Αν έχει εκκεντρική τροχιά τα θραύσματα θα γεμίσουν την περιοχή στο επίπεδο της τροχιάς του, από το περίκεντρο ως το

απόκεντρο. Αν έχει τροχιά με σχήμα βρόγχου, θα γεμίσουν τον τριαξονικό, σχήματος σαμπρέλας χώρο της τροχιάς του προγεννήτορα.

Ο όρος νεαρό θραύσματα αναφέρεται σε δομές που δεν είχαν αρκετό χρόνο για να εξελιχτούν σε πλήρης ανάμειξης, και ξεχωρίζουν λόγω εμφανής αστρικής συμπύκνωσης, όπως τα ρεύματα του Τοξότη και το Ορφανό, και τα ρεύματα σφαιρωτών σημνών GD-1 και Pal 5. Αυτά ανακαλύφθηκαν σε απόσταση 10 – 100 Kpc από τον Ήλιο, όπου το αστρικό υπόβαθρο είναι αρκετά αραιό ώστε να ξεχωρίσει μια συμπύκνωση αστεριών, και οι περίοδοι τροχιών πολύ μεγάλες, με αποτέλεσμα να μην προλάβει ως σήμερα μια δομή θραυσμάτων να εξελιχτεί σε πλήρης ανάμειξης στην διάρκεια ζωής του Γαλαξία.

Το πλάτος ενός ρεύματος μας πληροφορεί για την μάζα του προγεννήτορα. Αν γνωρίζουμε την μάζα του προγεννήτορα, συμπεραίνουμε την ηλικία των αστεριών ως θραύσματα (τον χρόνο εκκίνησης της απώλειας αστεριών από τον προγεννήτορα) από το μήκος του ρεύματος.

Οι διαταραχές προγεννήτορων με πολύ έκκεντρες τροχιές δημιουργούν κελύφη αντί ρεύματα. Αυτό εξαρτάται και από τον χρόνο αλλά και την μάζα του προγεννήτορα. Ο ίδιος προγεννήτορας μπορεί να δημιουργήσει και τα 2 είδη δομών. Ένας προγεννήτορας έχει περισσότερες πιθανότητες να δημιουργήσει ρεύματα στην αρχική φάση της συσσώρευσής του. Αν έχει πολύ έκκεντρη τροχιά, το σύντομο πέρασμα των θραυσμάτων από το περίκεντρο του Γαλαξία ελαττώνει σημαντικά την αστρική πυκνότητα, δημιουργώντας σταδιακά δομή κελύφους.

Θραύσματα πλήρης ανάμειξης (fully phase- mixed debris)

Αν και αυτά τα θραύσματα έχουν μικρή πυκνότητα, μπορούμε να τα εντοπίσουμε. Η διασπορά ταχύτητας σε μια δομή πλήρης ανάμειξης παραμένει χαμηλότερη από ότι στο αστρικό υπόβαθρο. Οι κοντινές μας ομάδες όμοιας κινηματικής (moving groups) μπορεί να προέρχονται από τέτοιες δομές. Μπορούμε να υπολογίσουμε τις ηλικίες τέτοιων ομάδων με την διάκριση υπό- δομών τους. Αρχικά τα θραύσματα θα σχηματίζουν μια παραμόρφωση (warp) ενώ σταδιακά η διασπορά τους θα τα οδηγήσει σε διαφορετικές τροχιές και πολλαπλές παραμορφώσεις της αρχικής δομής. Κάθε μια θα έχει διαφορετικές ιδιότητες τροχιάς και θα αποτελεί μια υπό-δομή, που μας βοηθάει στην εκτίμηση της ηλικίας της αρχικής δομής.

Τα θραύσματα ως δείκτες της σκοτεινής ύλης και η εξέλιξη των γαλαξιών

Το κοσμολογικό μοντέλο που επικρατεί σήμερα λέει ότι οι γαλαξίες σχηματίζονται ιεραρχικά. Αρχικά σχηματίζονται γαλαξίες μικρής μάζας μέσα σε άλως σκοτεινής ύλης και σταδιακά συσσωρεύονται σε μεγαλύτερους γαλαξίες σε μεγαλύτερες άλως σκοτεινής ύλης. Το αέριο στην διάρκεια αυτής της συσσώρευσης μπορεί να διασκορπιστεί προς το κέντρο της κύριας άλως ώστε να πυροδοτήσει νέα αστρογέννηση. Αντίθετα, τα αστερία παραμένουν στις τροχιές τους, με αποτέλεσμα ο αστρικός πληθυσμός ενός νάνου που συγχωνεύεται από έναν μεγάλης μάζας

γαλαξία μπορεί να παραμείνει μακριά σχηματίζοντας την γαλαξιακή άλω (αυτό εξηγεί την προέλευση της άλως και την εξάλειψη του αερίου σε αυτήν). Βέβαια, οι τροχιές αυτών των αστεριών αντιμετωπίζουν την δυναμική τριβή από την άλω, με αποτέλεσμα τα αστέρια μεγαλύτερης μάζας να είναι πιθανό να αλλάξουν τροχιές μπαίνοντας στο εσωτερικό του κυρίως γαλαξία.

Αυτά τα αστέρια (που έχουν το χημικό αποτύπωμα κάθε προγεννήτορα) μας δίνουν την δυνατότητα να μελετήσουμε την συχνότητα και τον χρόνο συσσώρευσης σκοτεινής ύλης, που σχημάτισαν τις δομές (συμπυκνώματα) σκοτεινής ύλης στην γαλαξιακή άλω.

Τα μοντέλα προβλέπουν την ομαλή ανάμειξη των αστεριών - θραυσμάτων με τα υπόλοιπα αστέρια στο εσωτερικό της άλω και τον σχηματισμό διακριτών δομών στην εξωτερική άλω. Τα κελύφη εμφανίζονται σε μεγαλύτερες γαλαξοκεντρικές αποστάσεις από τα αστρικά ρεύματα.

Για τον Γαλαξία μας, συμπεραίνουμε ότι τα περισσότερα επεισόδια συσσώρευσης συνέβησαν πριν από 7-8 δις έτη, με ποικιλία μεγεθών και τροχιών των νάνων που συσσωρεύτηκαν. Τα τμήματα της άλως με παλαιότερα θραύσματα έχουν λιγότερες διακριτές δομές από αυτά με πιο πρόσφατα θραύσματα. Οι μεγαλύτερες δομές προέρχονται από μεγαλύτερης λαμπρότητας (αστρική μάζα) νάνους.

Στην τοπική ομάδα γαλαξιών παρατηρούμε ότι οι πιο μεγάλης λαμπρότητας νάνοι είναι εμπλουτισμένοι σε μέταλλα, και όλα τα μέλη της ομάδας περιέχουν αστρικούς πληθυσμούς φτωχούς σε στοιχεία α (με πολλαπλάσιο πυρήνα του ατόμου του στοιχείου ήλιου). Μόλις ένας νάνος συσσωρευτεί στον Γαλαξία, διακόπτεται η αστρογέννηση σε αυτόν (λόγω ταχείας απογύμνωσης του αερίου του). Η ομαλή, χωρίς πολλές δομές περιοχή της άλως είναι σχετικά εμπλουτισμένη σε στοιχεία α. Ενώ οι εκρήξεις SN II (αστεριών μεγάλης μάζας) παράγουν στοιχεία α, οι SN Ia (έκρηξη λευκού νάνου λόγω συσσώρευσης ύλης από συνοδό αστέρα) παράγουν κυρίως σίδηρο. Όμως σημειώνονται πολλά εκατομμύρια έτη μετά την αστρογέννηση, πολύ αργότερα από τις SN II. Έτσι ο μεγαλύτερης ηλικίας αστρικός πληθυσμός των νάνων που συσσωρεύτηκαν πρέπει να παρουσιάζεται εμπλουτισμένος σε στοιχεία α (σε σχέση με το σίδηρο), αφού δεν πρόλαβε να <μολυνθεί> από τις SN Ia. Αντίθετα με τον νεαρότερο πληθυσμό που γεννήθηκε από μεσοαστρική ύλη εμπλουτισμένη από SN Ia. Αυτός ο νεαρότερος πληθυσμός δεν έχει αναμειχθεί με τα αστέρια της άλω και προέρχεται από πιο πρόσφατες συγχωνεύσεις. Τα αστέρια πλήρως ανάμειξης είναι εμπλουτισμένα σε στοιχεία α αφού οι προγεννήτορες τους δεν πρόλαβαν να δημιουργήσουν γενιά αστεριών από εμπλουτισμένη σε σίδηρο, μέσω των SN Ia, μεσοαστρική ύλη.

Τα παραπάνω μας βοηθάνε να κατανοήσουμε το ιστορικό του χτισίματος του Γαλαξία μας. Ένα μειονέκτημα σε αυτή την μελέτη είναι ότι όσο αυξανόταν η μάζα του Γαλαξία μέσω των συσσωρεύσεων άλλαζε και η δυναμική του, με αποτέλεσμα την μετατόπιση των τροχιών των δομών θραυσμάτων. Για αυτό μας είναι πολύ σημαντικό το χημικό αποτύπωμα των θραυσμάτων. Έτσι μπορούμε να διακρίνουμε αστέρια της άλω που γεννήθηκαν στο ίδιο νεφέλωμα. Μπορεί να μην είναι εύκολο να αντιστοιχίσουμε τα θραύσματα με συγκεκριμένους προγεννήτορες, αλλά

μπορούμε να συμπεράνουμε το πλήθος των προγεννήτορων για ένα εύρος λαμπροτήτων (αστρικής μάζας) τους κατά την συσσώρευσή τους, σε διαφορετικές χρονικές φάσεις της εξέλιξης του Γαλαξία.

Ο αστρικός πληθυσμός της άλως προέρχεται από γεγονότα συσσώρευσης διαφορετικής ηλικίας, δείχνοντάς μας την εξέλιξη της βαρυονικής μάζας σχετικά με την σκοτεινή ύλη. Μας δίνει πληροφορίες για τους πιο αρχαίους προγεννήτορες των αστρικών δομών. Οι νάνοι που συσσωρεύτηκαν αργότερα παρουσιάζουν μεγαλύτερη ποικιλία περιβαλλόντων, αφού προέρχονται από ένα μεγαλύτερο χωρικό και χρονικό εύρος στην τοπική ομάδα γαλαξίων. Η διαφορά στις χημικές ιδιότητες στα αστέρια μικρής μεταλλικότητας στην άλω με αυτά των πολύ αμυδρών (ultra faint) νάνων δορυφόρων του Γαλαξία οφείλεται στον βαθμό που οι νάνοι εμπλουτιστήκαν από το περιβάλλον τους ή παρέμειναν απομονωμένοι στο νεαρό σύμπαν. Η μελέτη των χημικών ιδιοτήτων δεν μας δείχνει μόνο την εξέλιξη του Γαλαξία μας, αλλά και την εξέλιξη στις ιδιότητες των αστρικών πληθυσμών των νάνων γαλαξίων.

Παλιρροϊκά θραύσματα ως δείκτες σκοτεινή ύλης

Τα θραύσματα (Debris, αστέρια που έχουν απομακρυνθεί από τον προγεννήτορα για να συσσωρευτούν στον Γαλαξία) αποτελούν καλό δείκτη σκοτεινής ύλης, επειδή δίνουν περισσότερες πληροφορίες από τα τυχαία αστέρια της άλω.

Οι κοσμολογικές προσομοιώσεις του μοντέλου Λ CDM προβλέπουν την ύπαρξη ενός κελύφους σκοτεινής ύλης γύρω από την ορατή ύλη, την σκοτεινή άλω. Αυτή περιέχει υπό- άλως, πολύ περισσότερες από τους νάνους γαλαξίες που παρατηρούμε στην (ορατή) γαλαξιακή άλω. Ο ακριβής υπολογισμός της σκοτεινής ύλης σε έναν γαλαξία είναι δύσκολος, επειδή αυτή αλληλεπιδράει μόνο βαρυτικά. Γνωρίζουμε ότι εκτείνεται πολύ περισσότερο στον χώρο από την ορατή ύλη.

Τα αστέρια μιας δομής θραυσμάτων προέρχονται από έναν κοινό προγεννήτορα, άρα έχουν αρκετά κοινά στοιχεία, όπως η μεταλλικότητα και οι ιδιότητες των τροχιών τους. Ιδίως τα αστέρια ενός ρεύματος βρίσκονται σε πολύ παρόμοιες τροχιές. Έχουν μικρές διασπορές ταχυτήτων και ξεχωρίζουν ως δομές στην γαλαξιακή άλω. Όταν δεχτούν βαρυτική επίδραση από μια δομή σκοτεινής ύλης, μπορούμε να υπολογίσουμε την μάζα αυτής της δομής.

Μοντέλα πρόβλεψης

Το πιο προφανές παράδειγμα μοντέλου πρόβλεψης είναι η προσομοίωση N-body, που υποθέτει ότι ένας σφαιρικός νάνος μπορεί να εξελιχτεί βάσει της ίδιας βαρύτητας και της επίδρασης δυνάμεων από το περιβάλλον του γαλαξία στον οποίο περιφέρεται. Αυτό το μοντέλο περιλαμβάνει την φυσική της απογύμνωσης ενός δορυφόρου λόγω παλλιρροϊκών δυνάμεων, προσφέροντας την πιο ρεαλιστική διασπορά των θραυσμάτων. Τα θραύσματα αποκτούν δικές τους τροχιές που δεν συμπίπτουν με την τροχιά του δορυφόρου.

Τα θραύσματα ως δείκτες δομών της σκοτεινής ύλης.

Το μοντέλο Λ CDM προβλέπει την ύπαρξη μιας τάξης μεγέθους περισσότερων δομών σκοτεινής ύλης από τους γνωστούς δορυφόρους- γαλαξίες του Γαλαξία μας. Οι δορυφόροι που δεν έχουμε ανακαλύψει μπορεί να είναι πολύ διάχυτοι. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχουν και πολλές δομές θραυσμάτων που δεν έχουμε ανακαλύψει ακόμα. Τα ρεύματα μεγάλου αστρικού πλήθους και μεγάλης διασποράς κρύβουν τις μικρότερες δομές θραυσμάτων. Οι διακυμάνσεις πυκνότητας ενός αστρικού ρεύματος σε πολύ μικρότερη κλίμακα από την τροχιά του είναι αποτέλεσμα βαρυτικής επίδρασης από δομή (συμπύκνωση) σκοτεινής ύλης. Ένα αποτέλεσμα αυτής της επίδρασης είναι η δημιουργία κενών (περιοχών στο ρεύμα με μειωμένη αστρική πυκνότητα) και συμπυκνώσεων.

Οι παλιρροϊκές διαταραχές σε σφαιρωτά σμήνη είναι πολύ σημαντικές για αυτή τη μελέτη, αφού τα σφαιρωτά δεν περιέχουν δική τους σκοτεινή ύλη, που θα μπορούσε να μπερδέψει τις μετρήσεις. Οι προσομοιώσεις μας δείχνουν ότι το εύρος στροφορμής σε ένα ρεύμα από σφαιρωτό σμήνος είναι μικρό. Αυτό δείχνει ότι υπάρχει μια γενική σχέση ανάμεσα στον χρόνο αποδέσμευσης των αστεριών από ένα σφαιρωτό και την απόσταση αυτών των θραυσμάτων από το σφαιρωτό.

Οι μικρές δομές σκοτεινής ύλης δημιουργούν μικρά κενά (gaps) στις δομές θραυσμάτων. Έτσι αναμένουμε να βρούμε ένα εύρος κενών στα αστρικά ρεύματα, που στο ελάχιστο του εύρους να εξομοιώνεται από τυχαίες αστρικές κινήσεις, όταν το κενό είναι μικρότερο από το πλάτος του ρεύματος. Οι μεγαλύτερες δομές σκοτεινής ύλης δημιουργούν κενά μεγέθους αρκετών Kpc με αποτέλεσμα να αποσταθεροποιούν τα αστρικά ρεύματα.

Ένα συμπέρασμα είναι ότι τα ρεύματα που έχουν εξωτερικές τροχιές στην άλω διαταράσσονται πολύ λιγότερο από αυτά που βρίσκονται στις πιο πυκνές εσωτερικές περιοχές.

Αστρικές δομές και ρεύματα στον Γαλαξία της Ανδρομέδας

Ο κοντινότερος γαλαξίας, της Ανδρομέδας, μας επιτρέπει πολλές φορές την μελέτη της γαλαξιακής εξέλιξης καλύτερα από τον δικό μας Γαλαξία. Βρίσκεται 780 Kpc μακριά και έχει παρόμοια μάζα με τον Γαλαξία μας, παρόμοιο τύπο και είναι και αυτός σχετικά απομονωμένος από άλλους μεγάλους γαλαξίες. Μπορούμε να ξεχωρίσουμε μεμονωμένα αστέρια που εξελικτικά βρίσκονται στην κορυφή του κλάδο των γιγάντων. Αυτό μας επιτρέπει να ξεχωρίσουμε τις αστρικές συμπυκνώσεις που προέρχονται από αστρικά θραύσματα. Αυτές οι συμπυκνώσεις πρέπει να έχουν μεγαλύτερη πυκνότητα από αυτές που μπορούμε να ξεχωρίσουμε στον δικό μας Γαλαξία. Η μεγάλη κλίση του μας βοηθάει να μελετήσουμε καλά την άλω του. Έχοντας εικόνα όλου του γαλαξία, μπορούμε να παρατηρήσουμε την εξέλιξη των δομών των θραυσμάτων σε όλη τους την έκταση. Επίσης παρατηρούμε το πλήθος των νάνων γαλαξιών και των σφαιρωτών σμηνών του, που μας οδηγούν

στα σχετικά συμπυκνώματα αστεριών. Γνωρίζουμε περισσότερα για την εξωτερική άλω (>50Kpc) του γαλαξία της Ανδρομέδας από ότι για την ίδια περιοχή του Γαλαξία μας.

Ο γαλαξίας της Ανδρομέδας παρουσιάζει μια παραμόρφωση στην εξωτερική περιοχή του δίσκου του. Ενώ η παραμόρφωση είναι προς την ίδια κατεύθυνση για την αστρικό πληθυσμό και το ουδέτερο υδρογόνο, η παραμόρφωση για τον αστρικό πληθυσμό αρχίζει πιο εσωτερικά του δίσκου από ότι αυτή για το ουδέτερο υδρογόνο.

Τα αστέρια του κλάδου των ερυθρών γιγάντων (RGB stars) είναι αστέρια μικρής και μεσαίας μάζας που εξελίχτηκαν μετά την κυρία ακολουθία και έχουν ηλικία πάνω από 1 δις έτη. Ενώ τα αστέρια του ασυμππτωτικού κλάδου και τα αστέρια μεγάλης μάζας στην κύρια ακολουθία μπορεί να είναι πιο λαμπρά, τα αστέρια RGB είναι πιο κατάλληλα για την ανίχνευση αστρικών θραυσμάτων επειδή έχουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής. Με αυτά μπορούμε να ανιχνεύουμε παλαιότερους αστρικούς πληθυσμούς που προέρχονται από παλαιότερα επεισόδια συγχώνευσης. Τα αστέρια RGB αποτελούν και ανιχνευτές μεταλλικότητας, αφού το χρώμα τους εξαρτάται από την μεταλλικότητα (για αστέρια ίδιας ηλικίας). Ανακαλύψαμε πληθώρα από δομές και ρεύματα στον γαλαξία της Ανδρομέδας.

Οι κύριες παλιρροιακές δομές της Ανδρομέδας

Το γιγάντιο αστρικό ρεύμα (GSS, Giant Stellar Stream). Αποτελεί την κύρια αστρική συμπύκνωση της άλως του γαλαξία. Εμφανίζεται σε ακτίνα 100 Mpc από το κέντρο του Γαλαξία και έχει πλάτος 25 Kpc. Υπολογίζουμε ότι οι συνολικές διαστάσεις του είναι διπλάσιες από αυτές που παρατηρούμε. Περιέχει ένα πλήθος αστρικών πληθυσμών και η κεντρική περιοχή του έχει πιο πλούσια σε μέταλλα αστέρια από τις εξωτερικές περιοχές του. Η γωνιακή ταχύτητά του είναι αυξανόμενα θετική με την απόσταση από το κέντρο του M31. Έχουμε ανακαλύψει και μια δευτερεύον αστρική δομή, με μικρή ταχύτητα, στο ρεύμα. Είναι άγνωστο αν πρόκειται για διαταραχή του δίσκου ή για αστέρια του ρεύματος.

Φαίνεται ο προγεννήτορας δορυφόρος του ρεύματος να προσέγγισε τον γαλαξία μετωπικά από την πίσω πλευρά του, όπως τον βλέπουμε. Η αρχική μάζα του πρέπει να ήταν 1- 5 δις ηλιακές και το πρώτο περιγαλαξιακό πέρασμά του να συνέβη πριν 1- 2 δις έτη. Λόγω της μετωπικής σύγκρουσης ο προγεννήτορας διαλύθηκε από το πρώτο περιγαλαξιακό πέρασμα. Το μεγαλύτερο μέρος της μάζας του σχημάτισε το ρεύμα που προπορεύεται και αυτό που ακολουθεί (leading and trailing stream). Τα αστέρια- θραύσματα εμπλούτισαν το μεγαλύτερο μέρος της εσωτερικής άλω.

Ενώ αρχικά οι δορυφόροι M32 και NGC 205, που έχουν βιώσει παλιρροϊκές διαταραχές, θεωρήθηκαν υποψήφιοι προγεννήτορες, δεν ταιριάζουν με τα σημερινά θεωρητικά μοντέλα. Ο προγεννήτορας παρουσίασε αστρογέννηση που κορυφώθηκε πριν από 8-9 δις έτη (βάσει αστρικών πληθυσμών του ρεύματος), η οποία διακόπηκε απότομα πριν από 6 δις έτη. Μάλλον πρόκειται για την πρώτη

επαφή του προγεννήτορα με την άλω του γαλαξία της Ανδρομέδας, που τον απογύμνωσε από αέριο. Τα τελευταία αστέρια που δημιούργησε έφτασαν την μεταλλικότητα του Ηλίου μας. Η μεγάλη διασπορά μεταλλικότητας παραπέμπει σε προγεννήτορα νάνο ελλειπτικό.

Συμπύκνωμα G1. Πρόκειται για ένα σφαιρικό συμπύκνωμα αστεριών σε ακτίνα 30 Kpc στον βασικό νοτιοδυτικό άξονα του M31. Οι διαστάσεις του είναι 7X 10 Kpc. Πήρε το όνομά του από το γειτονικό του σφαιρωτό G1, το λαμπρότερο του γαλαξία της Ανδρομέδας. Αυτό το σφαιρωτό έχει και διασπορά μεταλλικότητας αλλά και μια μαύρη τρύπα μεσαίου μεγέθους (ανάμεσα σε αστρική και γαλαξιακή). Μάλλον πρόκειται για απομεινάρι του πυρήνα ενός νάνου ελλειπτικού γαλαξία που συγχωνεύτηκε στον M31. Θεωρούμε ότι υπάρχει σίγουρα σύνδεση ανάμεσα στο σφαιρωτό και το (πολύ πιο εκτεταμένο) συμπύκνωμα.

Το Βορειοανατολικό συμπύκνωμα. Σε ακτίνα 40 Kpc στον βορειοανατολικό βασικό άξονα αποτελεί την πιο νεφελώδη δομή στην εσωτερική άλω. Έχει διάμετρο 14 Kpc και συνδέεται με το κυρίως σώμα του γαλαξία με ένα λεπτό νήμα. Μάλλον δεν πρόκειται για απομεινάρι νάνου γαλαξία, αφού ο αστρικός πληθυσμός του χαρακτηρίζεται πληθυσμός του δίσκου.

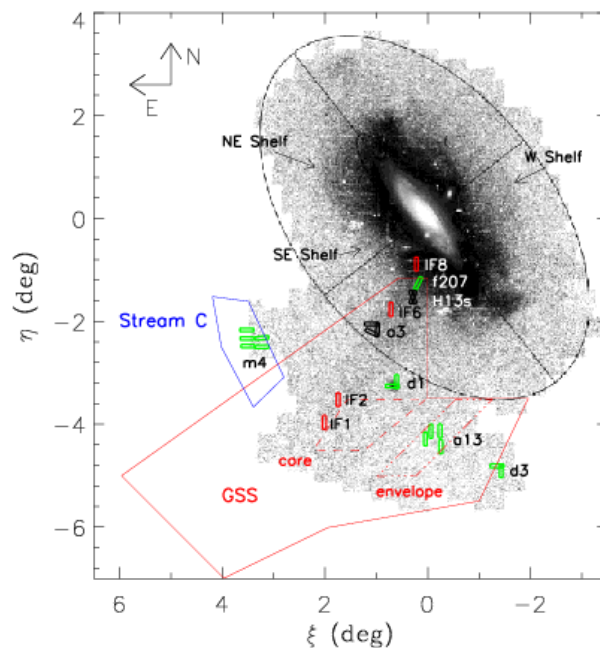
Τα 2 παραπάνω συμπυκνώματα παρουσιάζουν κινηματική όμοια με αυτή των αστεριών του δίσκου. Έτσι υπάρχει η εναλλακτική θεωρία που προβλέπει ότι πρόκειται για αστέρια του δίσκου που εκσφενδονίστηκαν στην άλω, όταν συσσωρεύτηκε ένας δορυφόρος μικρής μάζας από τον γαλαξία. Μια τέτοια συσώρευση σημαίνει διαταραχή του δίσκου. Παρατηρούμε ότι αυτός ο αστρικός πληθυσμός (των θραυσμάτων που δεν ανήκουν στο GSS) έχει σχετικά νεαρή ηλικία με συνεχόμενη αστρογέννηση (απουσία έντονου κλάδου γιγάντων). Το 65% τους σχηματίστηκε τα τελευταία 8 δις έτη, όπως τα αστέρια του εξωτερικού δίσκου του γαλαξία. Τα αστέρια των συμπυκνωμάτων και αυτά του εξωτερικού δίσκου δείχνουν ότι σημειώθηκε μια αύξηση αστρογέννησης στον εξωτερικό δίσκο πριν από 2 δις έτη, ενώ τα παλαιότερα αστέρια αυτής της περιοχής έχουν προέλευση από τον δίσκο ή αποτελούν θραύσματα. Αυτή η έξαρση αστρογέννησης οφείλεται σε ένα κοντινό πέρασμα του M33.

Βορειοανατολικός και δυτικός ύφαλος (Shelves). Το πρώτο είναι μια διάχυτη αλλά με σαφή όρια προεξοχή αστεριών ενώ το δεύτερο είναι πιο αμυδρό, ίδιας μορφολογίας και μεγέθους, στην αντίθετη πλευρά του γαλαξία. Έχουν μεγάλη μεταλλικότητα και μπορεί να είναι προέκταση του GSS. Ίσως να πρόκειται για υλικό που απογυμνώθηκε από τον προγεννήτορα του GSS κατά τις περικεντρικές του διαβάσεις. Στην πρώτη τέτοια διάβαση μπορεί να σχηματίστηκε το GSS και στις επόμενες οι 2 ύφαλοι. Οι πληθυσμοί των υφάλων έχουν μεγάλη ομοιότητα στα ιστορικά αστρογέννησης (SFR, star formation histories) και στη διασπορά μεταλλικότητας με το ρεύμα GSS, που δείχνει κοινή προέλευση. Αυτή η <μόλυνση> της εσωτερικής άλως με αστέρια μεγάλης μεταλλικότητας από τους υφάλους και το ρεύμα εξηγεί γιατί αυτή η περιοχή εμφανίζεται πιο πλούσια σε μέταλλα από την αντίστοιχη του Γαλαξία μας.

Ρεύματα B, C, D. Τα B, C είναι σχεδόν παράλληλα ρεύματα που διασχίζουν τον νότιο δευτερεύον άξονα σε ακτίνα 100 Kpc. Και τα 3 ρεύματα τερματίζουν πάνω στο GSS. Το ρεύμα C παρουσιάζει 2 αστρικούς πληθυσμούς διαφορετικής μεταλλικότητας, με τον πιο πλούσιο να αποτελεί τον πιο πλούσιο σε μέταλλα πληθυσμό της εξωτερικής άλως. Ενώ η εσωτερική άλω έχει εμπλουτιστεί από αστρικά θραύσματα με ποικιλία μεταλλικότητας, η εξωτερική άλω κυριαρχείται από στενά ρεύματα και αψίδες που, με εξαίρεση το ρεύμα C, είναι φτωχά σε μέταλλα.

Τα ρεύματα της εξωτερικής άλως (> 100 Kpc). Υπάρχουν μερικά αραιά ρεύματα, όπως το ρεύμα A, το Βορειοδυτικό ρεύμα, το Νοτιοδυτικό νέφος και το Ανατολικό νέφος, που βρίσκονται στην εξωτερική άλω και αποτελούν τα πιο αμυδρά ρεύματα που ανακαλύψαμε στην Ανδρομέδα. Έχουν παρόμοια μεταλλικότητα. Το A τέμνει τον δευτερεύον άξονα του γαλαξία στα 120 Kpc, ενώ το Ανατολικό και το Νοτιοδυτικό νέφος εμφανίζονται ως αστρικές αψίδες σε λίγο μικρότερη απόσταση από το κέντρο του γαλαξία. Το Νοτιοδυτικό ρεύμα είναι το πιο λαμπρό. Το Βορειοδυτικό ρεύμα είναι μακρόστενο, με μήκος 100 Kpc και πλάτος μόλις 3 Kpc. Δεν ξέρουμε αν προέρχονται από διαφορετικούς ή από τον ίδιο προγεννήτορα με το GSS. Η μεταλλικότητά τους είναι χαμηλότερη από αυτή του GSS, αλλά μπορεί να πρόκειται για εξωτερικές περιοχές του.

Ο νάνος σφαιροειδής And XXVII βρίσκεται σε προέκταση του Βορειοδυτικού ρεύματος. Μπορεί να είναι ο προγεννήτορας του.

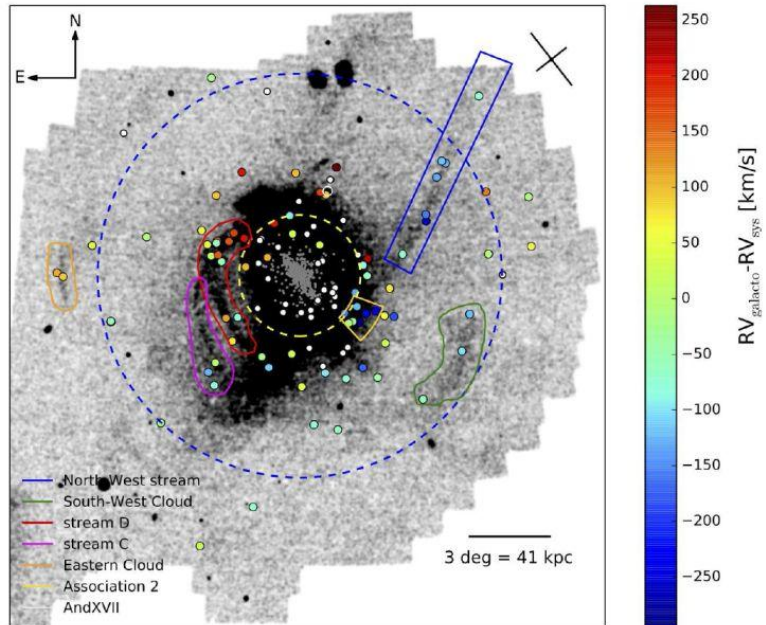


Σφαιρωτά σμήνη ως ανιχνευτές των αστρικών ρευμάτων του M31

Έχει ενδιαφέρον να δούμε κατά πόσο οι δομές (αστρικές συμπυκνώσεις) στην άλω του M31 συνδέονται με σφαιρωτά του σμήνη. Στον Γαλαξία μας δεν ισχύει πάντα κάτι τέτοιο, αλλά φαίνεται όλα τα σφαιρωτά να αφήνουν ένα ίχνος αστεριών πίσω τους. Ένας σημαντικός αριθμός σφαιρωτών στον Γαλαξία μας προέρχεται από νάνους γαλαξίες που συγχωνεύτηκαν με τον δικό μας. Παρατηρούμε περισσότερα σφαιρωτά στον γαλαξία της Ανδρομέδας παρά στον δικό μας. Η αναλογία σε σφαιρωτά μέχρι 25 Kpc ακτίνα είναι 3/1 και στις εξωτερικές περιοχές των αλεών 7/1 υπέρ της Ανδρομέδας.

Στην εξωτερική άλω του M31 υπάρχει μεγάλη σύνδεση (50%- 80%) των σφαιρωτών με τα αστρικά συμπυκνώματα. Στο Βορειοδυτικό ρεύμα, στο Νοτιοδυτικό νέφος και στο Ανατολικό νέφος υπάρχουν πολλά σφαιρωτά, όπως και στα ρεύματα C, D. Υπάρχει και μια πυκνή περιοχή σφαιρωτών κοντά στην βάση του Βορειοδυτικού ρεύματος (Association 2), που δεν ταιριάζει σε κανένα γνωστό αστρικό ρεύμα. Οι πιθανότητες να είναι τυχαία η ευθυγράμμιση των σφαιρωτών με τις αστρικές δομές είναι ελάχιστη, κάτι που δίνει στα σφαιρωτά του M31 εξωγαλαξιακή προέλευση, που είναι σύμφωνο με τις κινηματικές των σφαιρωτών. Τα σφαιρωτά του M31 παρουσιάζουν σύμφωνη περιφορά με την γαλαξιακή κοιλιά (αρνητική τιμή ταχύτητας στα δυτικά και θετική στα ανατολικά του γαλαξία όπως τον βλέπουμε). Η διασπορά ταχυτήτων τους μειώνεται από μέσα προς τα έξω.

Η κατανόηση της προέλευσης της στροφορμής των εξωτερικών σφαιρωτών του M31 δεν είναι εύκολη. Μπορεί ένα μεγάλο ποσοστό των σφαιρωτών να ήρθαν στον γαλαξία από έναν μοναδικό προγεννήτορα, σε τροχιά με χαμηλή κλίση. Αυτό το σενάριο δεν εξηγεί τον πληθυσμό σφαιρωτών με χαμηλή ταχύτητα και την παρουσία ρευμάτων με πολύ μικρό πλάτος. Ένα άλλο σενάριο προβλέπει ότι τα σφαιρωτά ήρθαν από πολλούς νάνους γαλαξίες, αλλά όλοι τους συγχωνεύτηκαν στον M31 από την ίδια κατεύθυνση. Αυτό το σενάριο είναι σύμφωνο με τις σημερινές παρατηρήσεις που δείχνουν ότι πολλοί νάνοι γύρω από τον Γαλαξία μας και γύρω από τον γαλαξία της Ανδρομέδας περιφέρονται σε ένα επίπεδο, σαν να έχουν παρόμοια στροφορμή. Όλοι αυτοί οι νάνοι έχουν αρκετή μάζα ώστε να φιλοξενούν σφαιρωτά σμήνη. Επίσης έτσι εξηγείται ότι ο άξονας περιφοράς του γαλαξία της Ανδρομέδας έχει κλίση 45 μοίρες προς τον άξονα της περιφοράς των εξωτερικών σφαιρωτών σμηνών.

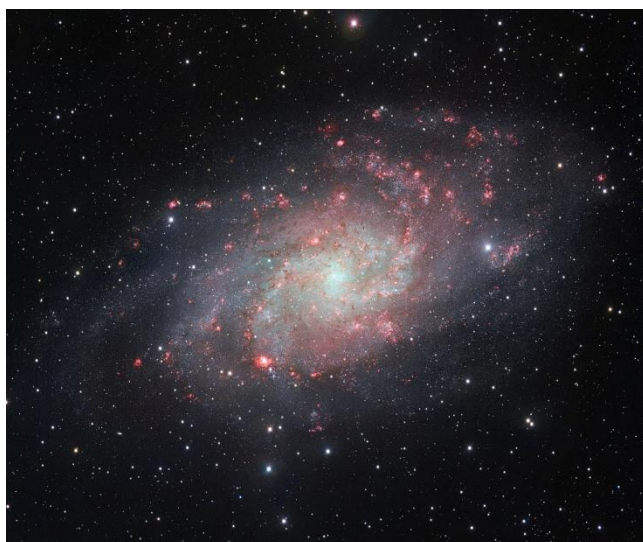


Παλιρροϊκά ρεύματα στους δορυφόρους του M31

Ο γαλαξίας της Ανδρομέδας έχει πλουσιότερο περιβάλλον δορυφόρων γαλαξιών. Και ο συνολικός αριθμός των νάνων, αλλά και οι λαμπροί δορυφόροι του υπερτερούν του Γαλαξία μας. Έχει τον M33 και 4 ελλειπτικούς τύπου dEs (M32, NGC 205, NGC 147, NGC 185). Οι πιο εσωτερικοί δορυφόροι είναι οι M31 και NGC 205, σε αποστάσεις από το κέντρο του γαλαξία 25Kpc και 42Kpc αντίστοιχα. Επικαλύπτουν την εικόνα του γαλαξία στις περιοχές όπου βρίσκονται, κάνοντας δύσκολη την μελέτη των εξωτερικών περιοχών τους. Φαίνεται να παρουσιάζουν απότομη ελάττωση της λαμπρότητάς τους στα εξωτερικά τους όρια και παρέκκλιση από την τυπική λαμπρότητα ελλειπτικού σχήματος, που παραπέμπει σε γαλαξίες υπό παλιρροϊκή διαταραχή και απογύμνωση της ύλης τους. Υπάρχει μια αψίδα αστεριών μήκους 15 Kpc από τον NGC 205 στον M31. Κάτι ανάλογο δεν έχει παρατηρηθεί για τον M32. Αυτή η αψίδα ξεχωρίζει επειδή περιέχει αστέρια RGB που είναι λίγο πιο μπλε από αυτά στην εσωτερική άλω. Η κινηματική αυτής της δομής είναι σύμφωνη με την κινηματική της γαλαξιακής κοιλιάς. Όμως η (υπολογισμένη) πιθανή τροχιά του NGC 205 δεν ταιριάζει με αυτήν την αψίδα αστεριών.

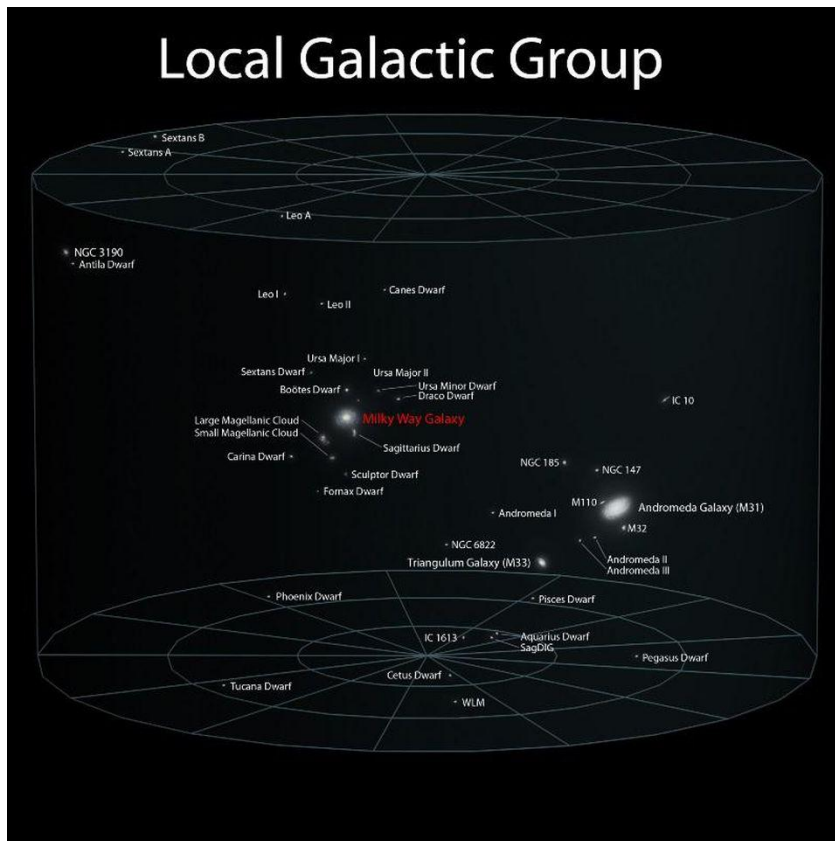
Οι δορυφόροι NGC 147, 185 φαίνονται να είναι στα 100 Kpc βόρεια του M31 και σε 120 Kpc και 180 Kpc αντίστοιχα απόσταση από το κέντρο του. Αυτό διευκολύνει την μελέτη τους. Ο NGC 185 διατηρεί το κανονικό σχήμα του ενώ ο NGC 147 παρουσιάζει μακριές συμμετρικές παλιρροϊκές ουρές, επειδή δέχεται 3 φορές ισχυρότερη βαρυτική διαταραχή από τον M31 (λόγω εγγύτητας). Ο NGC 147 δεν δείχνει διαφορές μεταλλικότητας στα αστέρια του, αντίθετα με τον NGC 185.

Ο μεγαλύτερος δορυφόρος του γαλαξία της Ανδρομέδας είναι ο M33, στα 210 Kpc απόσταση από το κέντρο του. Παρουσιάζει μια γιγάντια δομή S γύρω από το κυρίως σώμα του, με ακτίνα 40 Kpc, που χαρακτηρίζεται ως παλιρροϊκή διαταραχή από την περιφορά του γύρω από τον M31. Οι 2 γαλαξίες πλησίασαν στα 40- 50 Kpc πριν από 2,5 δις έτη, με αποτέλεσμα οι εξωτερικοί δίσκοι τους να βίωσαν ισχυρή αστρογέννηση, που άφησε ορατά τα ίχνη της στους 2 γαλαξίες.



Συμπεράσματα

Όπως αναφέραμε, μπορούμε να παρατηρούμε λεπτομέρειες για τα αστρικά ρεύματα του M31 που ξεπερνούν τις γνώσεις μας για τα αντίστοιχα ρεύματα του Γαλαξία μας. Αυτό ισχύει για την εξωτερική αλλά και την εσωτερική άλω του M31. Αντίθετα με ότι συμβαίνει στον Γαλαξία μας, η εσωτερική άλως του M31 εμπλουτίστηκε σε αστέρια πλούσια σε μέταλλα. Φαίνεται να ανακατεύτηκε υλικό από έναν νάνο γαλαξία με υλικό που εκσφενδονίστηκε από τον δίσκο σε αυτήν την περιοχή. Επίσης παρατηρούμε περισσότερα αστρικά ρεύματα στην εξωτερική άλω του από ότι σε αυτήν του Γαλαξία μας. Η άλως του M31 έχει μεγαλύτερο ποσοστό της συνολικής λαμπρότητας του γαλαξία από την άλω του δικού μας. Ακόμη, ο γαλαξίας της Ανδρομέδας έχει περισσότερα σφαιρωτά σμήνη. Αυτές οι διαφορές απεικονίζουν τα διαφορετικά ιστορικά συγχωνεύσεων των 2, κατά τα άλλα πολύ όμοιων, γαλαξιών. Ο M31 έχει βιώσει περισσότερες συγχωνεύσεις από τον δικό μας Γαλαξία. Αξιοσημείωτη είναι η ομοιότητα υπολογισμένης μάζας του προγεννήτορα του GSS στην Ανδρομέδα και του νάνου του Τοξότη στον Γαλαξία μας (1 δις ηλιακές μάζες). Μπορεί τα δομικά υλικά (νάνοι γαλαξίες) των αλεών των 2 γαλαξιών να ήταν ίδιας τάξης μεγέθους, αλλά οι τροχιές τους και οι χρόνοι συσσώρευσης να ήταν διαφορετικοί.



Αστρικά ρεύματα σε μακρινούς γαλαξίες

Αρχικά ανακαλύψαμε διάχυτα αστρικά ρεύματα και κελύφη γύρω από ελλειπτικούς γαλαξίες μεγάλης μάζας που οφείλονται σε συσσωρεύσεις μικρότερων σπειροειδών γαλαξιών, ή ακόμα και στην αστρογέννηση που οφείλεται στην απορρόφηση μεσογαλαξιακού αερίου. Εξετάζοντας τα αστρικά ρεύματα σε μακρινούς γαλαξίες μπορούμε να συμπεράνουμε αν το ιστορικό γαλαξιακής εξέλιξης της τοπικής ομάδας είναι αντιπροσωπευτικό. Είναι λογικό ότι σε μακρινούς γαλαξίες ξεχωρίζουμε μόνο παλιρροϊκές δομές σε μεγάλες γαλαξοκεντρικές αποστάσεις. Τυπικά οι δομές αυτές εμφανίζονται από ακτίνα 15 Kpc ως ακτίνα 100-300 Kpc, καλύπτοντας ένα σημαντικό εύρος της ακτίνας εξισορρόπησης (Virial radius) ενός γαλαξία. Έτσι χρειάζονται επισκοπήσεις μεγάλου εύρους για να καλύψουν αυτή την περιοχή στους κοντινούς γαλαξίες. Έχουμε ανακαλύψει πάνω από 50 παλιρροϊκές δομές σε γαλαξίες ως απόσταση 80 Mpc. Ακόμη και αυτοί που έχουν παρόμοιους δίσκους παρουσιάζουν μεγάλη διασπορά γαλαξοκεντρικών αποστάσεων των αστρικών θραυσμάτων. Οι δομές που παρατηρούμε περιλαμβάνουν μεγάλους κύκλους γύρω από έναν γαλαξία, όπως το ρεύμα του Τοξότη στον Γαλαξία μας, κελύφη, γιγάντια νέφη θραυσμάτων που χύνονται στην γαλαξιακή άλω, πιδακοειδής μορφές από τους γαλαξιακούς δίσκους και μεγάλες διάχυτες δομές, πιθανά απομεινάρια παλαιών, ήδη διαλυμένων δορυφόρων νάνων

γαλαξιών. Στα παραπάνω ταιριάζουν και οι σχετικές προσομοιώσεις. Παρατηρούμε και δορυφόρους που δεν έχουν ακόμη διαλυθεί αλλά ήδη βιώνουν παλιρροϊκή διαταραχή, σχηματίζοντας μακριές ουρές.

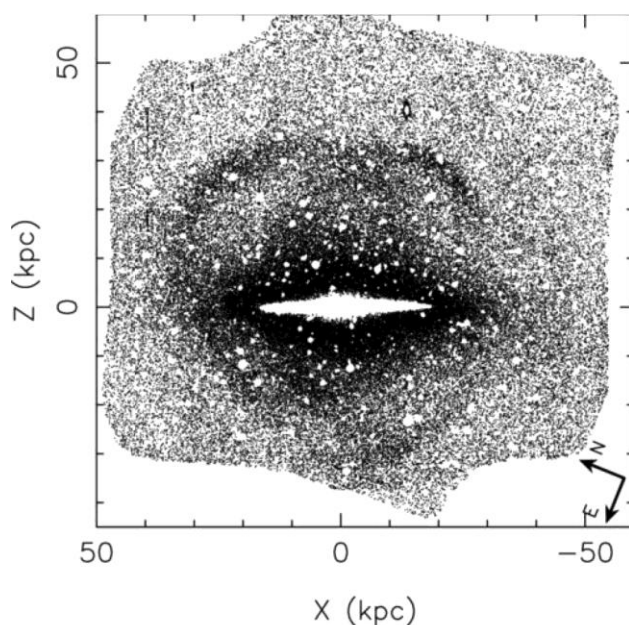


Ο γαλαξίας της φωτογραφίας, NGC 5907 (50 Mly) έχει ένα μεγάλο ρεύμα σε σχήμα ροζέτας. Αυτό φαίνεται να προέρχεται από έναν μόνο προγεννήτορα μικρής μάζας. Το σχήμα της δομής απεικονίζει τις 2 πλήρεις περιφορές του προγεννήτορα. Αυτό το τόσο εκτεταμένο αστρικό ρεύμα μας δείχνει ότι αυτές οι δομές μπορούν να επιβιώσουν για δις έτη. Η πιο αμυδρή εξωτερική περιοχή του ρεύματος πρέπει να προέρχεται από ύλη που αποδεσμεύτηκε του προγεννήτορα πριν 3,6 δις έτη. Κάπως έτσι πρέπει να είναι και η πλήρη εικόνα του ρεύματος του Τοξότη γύρω από τον Γαλαξία μας. Σε άλλους γαλαξίες παρατηρούμε δομές σχήματος ομπρέλας σε μήκος δεκάδων Kpc. Υπάρχουν συχνά και στις 2 πλευρές του γαλαξία και τερματίζουν σε τεράστια κελύφη αστρικών θραυσμάτων. Στον NGC 4651 αυτές οι δομές έχουν 400 εκατομμύρια ηλιακές μάζες. Η μάζα του προγεννήτορα έφτανε το 15% της μάζας του γαλαξία, όμοια με την αρχική μάζα του νάνου του Τοξότη στον Γαλαξία μας και του προγεννήτορα του GSS στην Ανδρομέδα. Ο NGC 1097 παρουσιάζει διαφορετική δομή ομπρέλας, σαν να λείπει το ένα σκέλος της. Σε μελέτες σχετικά με παλιρροϊκές δομές βρέθηκε ότι αυτές παρουσιάζονται στο 6%-12% των γαλαξιών.

Έχουμε την δυνατότητα να αναλύσουμε τα αστέρια σε παλιρροϊκές δομές σε μερικούς κοντινούς γαλαξίες πέρα από τον Γαλαξία μας και τον γαλαξία της Ανδρομέδας. Ο NGC 891, ένας πολύ όμοιος με τον δικό μας γαλαξίας σε απόσταση

3 Mpc, περιέχει αστρικές δομές που τυλίγονται γύρω του. Τις ανακαλύψαμε από την μελέτη των αστεριών στον κλάδο των κόκκινων γιγάντων (RGB). Η άλως του παρουσιάζει ομοιγένεια ως τα 50 Kpc, με εξαίρεση ένα κέλυφος πλάτους 20 Kpc στα 28 Kpc απόσταση από το επίπεδο του δίσκου, που είναι αποτέλεσμα πρόσφατης παλαιορικής αλληλεπίδρασης. Για τον NGC 253 ανακαλύψαμε ότι η αστρική λαμπρότητα της άλως του είναι διπλάσια από ότι στον Γαλαξία μας. Παρουσιάζει μια κελυφοειδής δομή στα νότια.

Οι κοντινές διαβάσεις των νάνων υπό συγχώνευση προκαλούν δομές (συμπυκνώματα) στην σκοτεινή ύλη. Το πλήθος τέτοιων δομών ελαττώνεται από την εποχή $Z=2$ ως σήμερα, σβήνωντας τα ίχνη παλαιότερων συγχωνεύσεων.



Τα παλιρροϊκά ρεύματα και η γαλαξιακή εξέλιξη

Τα ρεύματα στους σπειροειδείς γαλαξίες συγκρίνονται με τα σχετικά μοντέλα γαλαξιακής εξέλιξης, όσον αφορά την συχνότητα εμφανισής τους και την επιφανειακή λαμπρότητά τους. Οι δυσκολίες σε αυτό είναι ότι απαιτείται μεγάλη ανάλυση των δομών και μεγάλο πλήθος παρατηρήσεων ώστε να είναι στατιστικά βέβαιο το δείγμα των γαλαξιών. Η θεωρία προβλέπει ότι αστρικά θραύσματα ως 8 δις ετών εμφανίζονται ακόμα ως δομές στις άλως των γαλαξιών. Από την μορφή των δομών μπορούμε να συμπεράνουμε βασικές ιδιότητες των προγεννήτορων. Ανάλογα την εκκεντρικότητα της τροχιάς του προγεννήτορα κυμαίνεται και το χρονοδιάγραμμα που δημιουργούνται οι δομές, και η επιφανειακή λαμπρότητα μιας δομής μας πληροφορεί για την λαμπρότητα και τον χρόνο συσσώρευσης του προγεννήτορα.

Οι παρακάτω κατηγορίες προτάθηκαν για την κατάταξη των αστρικών θραυσμάτων. Μεγάλοι κύκλοι, ρεύματα από προγεννήτορες δορυφόρους που είχαν σχεδόν κυκλικές τροχιές και συγχωνεύτηκαν πριν από 6- 10 δις έτη. Νέφη ή κελύφη αστεριών από πρόσφατες (ως πριν από 8 δις έτη) συγχωνεύσεις από προγεννήτορες

με ακτινικές (radial) τροχιές. Και μεικτού τύπου αστρικά θραύσματα, από παλαιές συγχωνεύσεις (>10 δις έτη). Όμως παρατηρούμε και άλλες δομές, ακόμα και στο κοντινό (άρα με πρόσφατη εικόνα) σύμπαν. Μην ξεχνάμε ότι έχουμε μόνο περιορισμένη δυνατότητα διάκρισης των αμυδρών ρευμάτων.

Οι νάνοι γαλαξίες

Σημαντική είναι και η μελέτη των δομών στους νάνους γαλαξίες, τα δομικά υλικά των μεγάλων γαλαξιών. Οι μεγαλύτερης μάζας νάνοι έχουν και αυτοί δορυφόρους γαλαξίες (dSphs σφαιροειδείς νάνους) και σφαιρωτά σμήνη. Τα Μαγγελανικά νέφη αποτελούν σύστημα νάνων γαλαξιών. Σε αυτά υπάρχει ένα γνωστό ρεύμα (HI). Από τις μελέτες φαίνεται το 25% των νάνων να έχει συνοδό νάνο γαλαξία. Έτσι μπορούμε να συμπεράνουμε ότι συχνά συγχωνεύονται ομάδες νάνων από έναν γαλαξία και όχι μεμονωμένοι νάνοι.

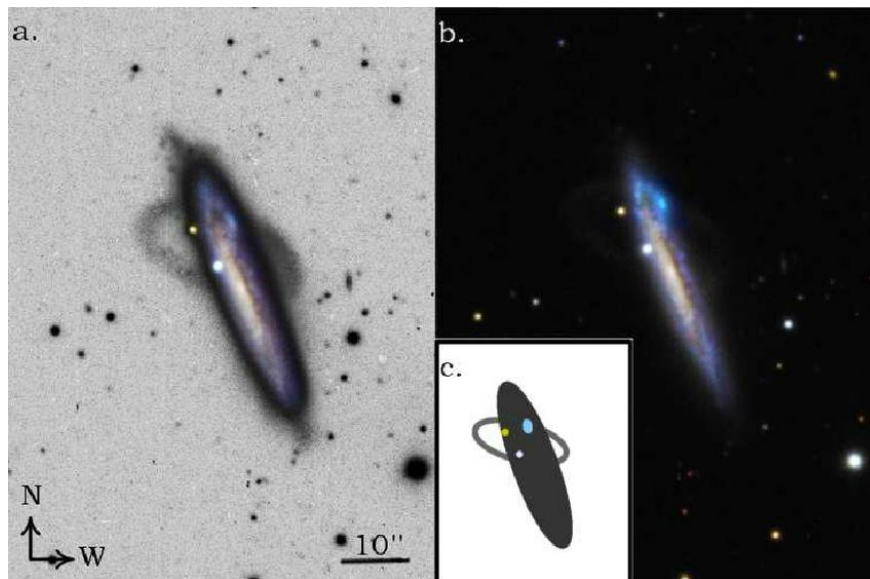
Η εύρεση παλαιοιικών δομών είναι ευκολότερη σε απομονωμένους νάνους παρά σε αυτούς που αλληλεπιδρούν βαρυτικά με τον Γαλαξία μας. Σε πολλούς νάνους έχουμε ανακαλύψει αστρική άλω, που ίσως να δημιουργείται από αστρικά θραύσματα συνοδού νάνου. Ο NGC 4449 είναι ένας ανώμαλος νάνος αστρογέννησης (starburst) με όμοια λαμπρότητα του μικρού Μαγγελανικού νέφους αλλά πολύ πιο έντονη αστρογέννηση. Η κινηματική του αερίου του δείχνει ότι αλληλεπιδράσε πρόσφατα με άλλον γαλαξία. Ο γαλαξίας με τον οποίο αλληλεπιδράει (NGC 4449B) έχει σχήμα S, χαρακτηριστικό για γαλαξιακή αλληλεπίδραση. Υπάρχουν δομές στην άλω του NGC 4449 που μπορεί να είναι αστρικές αψίδες από την αλληλεπίδραση των 2 νάνων. Ο NGC 4449B είναι στο πρώτο περιγαλαξιακό πέρασμα και βρέθηκε στην πιο κοντινή του απόσταση από τον NGC 4449 πριν από 100 εκατομμύρια έτη. Ο γαλαξίας αυτός είναι το πρώτο δείγμα ιεραρχικού κτισίματος γαλαξιών σε επίπεδο νάνων.



Οι περισσότερες ανάλογες δομές σε νάνους είναι πιο αμυδρές ή πιο εκτεταμένες, άρα δύσκολο να παρατηρηθούν. Δεν ξέρουμε κατά πόσο η περίπτωση του NGC 4449 είναι κλασική ή εξαίρεση. Ίσως οι σφαιροειδείς νάνοι να εξελίχθηκαν μετά από αλληλεπιδράσεις με άλλους νάνους. Μπορεί να ήταν πλούσιοι σε αέριο και να απογυμνώθηκαν από συνοδό. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται μετάβαση των νάνων (dwarf transition), δηλαδή υπάρχουν νάνοι με ιδιότητες ανάμεσα σε αυτές των dIrr (ανώμαλων) και dSph (σφαιροειδών). Το αστρικό ρεύμα και οι δομές στον δίσκο του νάνου- δορυφόρου του γαλαξία της Ανδρομέδας IC 10 πρέπει να προέρχονται από αλληλεπίδραση με άγνωστο νάνο. Γενικά, οι νάνοι με μάζα μικρότερη από 1 εκατομμύριο ηλιακές ή αυτοί που είναι κοντά στον Γαλαξία μας είναι πιο πιθανό να έχουν δεχτεί παλαιοροική διαταραχή από νάνο πριν αλληλεπιδράσουν με τον Γαλαξία μας.

Η αστρογέννηση, η δομή του γαλαξιακού δίσκου και τα αστρικά ρεύματα

Ένα παράδειγμα αστρογέννησης που προκλήθηκε από πρόσφατη συγχώνευση σε γαλαξία όμοιο με τον δικό μας αποτελεί ο NGC 5387. Το ευδιάκριτο αστρικό ρεύμα έχει μάζα 600 εκατομμύρια ηλιακές, με χαρακτηριστικό ένα μπλε συμπύκνωμα που παράγει μεγάλης έντασης ροή υπεριώδους ακτινοβολίας. Παραπέμπει σε πολύ πρόσφατη (8 εκατομμύρια έτη) αστρογέννηση 10 εκατομμύρια ηλιακών μαζών. Αποτελεί σύμπλεγμα περιοχών (HII) αστρογέννησης στον δίσκο ή στον προγεννήτορα που εισέβαλλε σε αυτόν. Η μάζα του προγεννήτορα ήταν 1/50 της μάζας του γαλαξία. Από αυτό το παράδειγμα συμπεραίνουμε την διαδικασία παραμόρφωσης του δίσκου από γαλαξιακή συγχώνευση.



Παρόμοια φαινόμενα έχουμε και στον NGC 4013. Ο προγεννήτορας του αστρικού ρεύματος σε αυτόν τον γαλαξία ήταν μικρής μάζας και συγκρούστηκε με τον γαλαξία σε τροχιά μικρής κλίσης πριν από 2,8 δις έτη.

Οι (πάντα μικρές) συσσωρεύσεις γαλαξιών οδηγούν σε παραμορφώσεις και αύξηση του πάχους των γαλαξιακών δίσκων. Παρατηρούμε μακρόβιες αστρικές δομές να εκτείνονται από τους δίσκους προς τις άλως των γαλαξιών.