

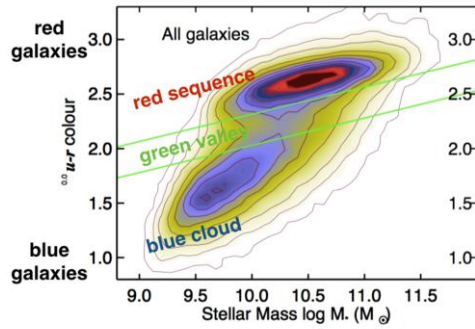
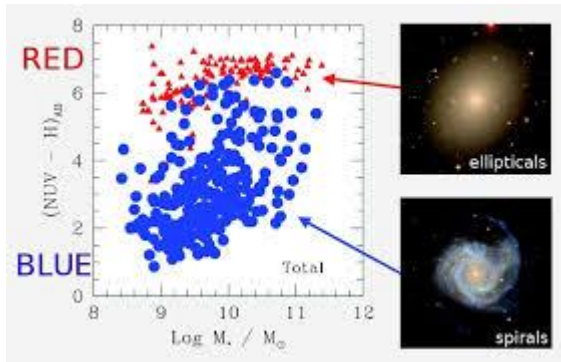
## Αστρονομία 3D

### 3) Γαλαξίες μεγάλης ερυθρολίσθησης.

#### Ο Cosmic Skidmark και η παρακολούθηση μιας γαλαξιακής μετάβασης σε $z = 0.19$ .

Ο γαλαξίας Cosmic Skidmark (κοσμικός <λεκές>) φαίνεται να βρίσκεται στην σπάνια φάση μετάβασης, σε μια ομάδα γαλαξιών με μάζα 10-100 τρις ηλιακές. Η φασματοσκοπία SDSS μας παρέχει καθαρά ίχνη αστρογέννησης σε αυτό το αντικείμενο, ενώ οι σε βάθος οπτικές απεικονίσεις αποκαλύπτουν μια σαφή <ουρά> ύλης μήκους 50 kpc.

Η μελέτη των γαλαξιακών πληθυσμών μας αποκαλύπτει καθαρά τις ιδιότητες όπως η μορφολογία, η διασπορά χρώματος- λαμπρότητας (CMD) και οι αναλογίες αστρογέννησης. Η προέλευση αυτής της διχοτόμησης εμφανίζεται να καθοδηγείται κυρίως από τα γαλαξιακά περιβάλλοντα. Σε σύγκριση με αυτούς που βρίσκονται σε πεδία μικρής πυκνότητας (πιο απομονωμένοι), οι σπειροειδείς γαλαξίες μέσα σε σμήνη παρουσιάζουν υποβαθμισμένη αστρογέννηση, και επίσης μικρότερα αποθέματα αερίου και περικοπή του αεριώδους δίσκου. Η εξέλιξη της CMD στην κόκκινη ακολουθία νωρίς στον κοσμικό χρόνο, η ένδειξη ύπαρξης μιας μεταβατικής (χρώματος- λαμπρότητας) πράσινης κοιλάδας (περιοχή στο διάγραμμα, ανάμεσα στο μπλε σύννεφο και την κόκκινη ακολουθία) και η έλλειψη μπλε σπειρών μεγάλης μάζας, μαρτυρούν την μετάβαση των σπειροειδών μεταγενέστερου (late) τύπου σε ελλειπτικούς προγενέστερου (early) τύπου, μέσα σε περιβάλλον γαλαξιακού σμήνους.



Με 3 <ανιχνευτές> ((OII), (OIII), (Hβ)) βρήκαμε καθαρές ενδείξεις αστρογέννησης στον πυρήνα του γαλαξία. Η αστρογέννηση, ως απόδειξη του κομητοειδές <πτερυγίου>, μας αποκαλύπτει την διπλής μορφής ουρά του. Βρήκαμε αποδείξεις για εκπομπή σε απόσταση 50 κpc από το κέντρο του γαλαξία. Στο τέλος της ουράς του πτερυγίου υπάρχει ένα πλήθος μικρών γαλαξιών και συμπυκνωμάτων, που έχουν σχηματίσει ένα σμήνος.



## Η ανάπτυξη των γαλαξιών νωρίς στον κοσμικό χρόνο, μέσα από τις 3διάστατες μελέτες.

Οι μελέτες χωρικής και φασματικής ανάλυσης αποδείχτηκαν πολύτιμες για την έρευνα των διαδικασιών που καθοδηγούν την συγκέντρωση της βαρυονικής μάζας και την αστρογέννηση την εποχή  $z=1-3$ . Αυτή είναι και η εποχή της μέγιστης αστρογέννησης.

Η νέα άποψη γαλαξιακής εξέλιξης και ο ρόλος της επισκόπησης κοντινού υπέρυθρου IFU.

Στο αναδυόμενο μοντέλο ανάπτυξης σε ισορροπία (equilibrium growth model) οι αρχικοί γαλαξίες τροφοδοτούνται από την απαλή συσσώρευση της άλω και από μικρές συγχωνεύσεις. Έτσι αναπληρώνουν τα αποθέματα αερίων και τροφοδοτούν την αστρογέννησή τους. Η ισορροπία ανάμεσα στην συσσώρευση και την αστρογέννηση διατηρούν τους γαλαξίες σε μια κύρια ακολουθία της αναλογίας αστρικής μάζας με τον ρυθμό της αστρογέννησης, με διασπορά  $0,3dex$ . Η εξέλιξη της ακολουθίας απεικονίζει την ελάττωση του συμπαντικού ρυθμού αστρογέννησης, από την εποχή  $z=2$  της κορύφωσης στην πτωτική εποχή  $z<1$ . Αυτό το σενάριο επιβεβαιώνεται και εμπειρικά, από την εξέλιξη της αναλογίας του μοριακού αερίου και της κυριαρχίας των γαλαξιών με δίσκους στην κατηγορία των γαλαξιών αστρογέννησης, μέχρι  $z=2,5$ . Η ανάπτυξη των γαλαξιών φαίνεται να είναι αυστηρά ρυθμισμένη, μέχρι αυτοί να φτάσουν τα 100 δις ηλιακές μάζες. Σε αυτό το όριο η αστρογέννηση αποσβέστηκε γρήγορα.

Οι χωρικά αναλυμένες κινηματικές, η αστρογέννηση, και οι συνθήκες της μεσοαστρικής ύλης σε γαλαξίες με  $z=1-3$  μας έδωσαν μερικές από τις εμπειρικές αποδείξεις- κλειδιά για την παραπάνω νέα άποψη. Αναδείξαμε τη σημασία των καθολικών δυναμικών διαδικασιών όπως οι βίαιες βαρυτικές αστάθειες σε δίσκους πλούσιους σε αέρια, και της ανάδρασης μέσω της αστρικής εξέλιξης και μέσω των AGN. Χαρτογραφήσαμε τις κινήσεις των αερίων, τις τοποθεσίες αστρογέννησης και τις χωρικές διακυμάνσεις της μεταλλικότητας του αερίου, καθώς και τις διεγέρσεις των νεφελωμάτων στους γαλαξίες. Ανακαλύψαμε τα ίχνη του αερίου που εκρέει από τους γαλαξίες. Καθορίσαμε, εκτός από τις κινηματικές, τις τοποθεσίες, τα μεγέθη και τις γεωμετρίες των εκρών, που αποτελούν παράγοντες του καθορισμού του ρυθμού μάζας που εκτοξεύεται από τους γαλαξίες, κάτι που δεν πετυχαίνουμε με παραδοσιακές μελέτες των UV. Μελετάμε μέχρι τώρα ένα δείγμα 300 γαλαξιών (με  $z=1-4$ ).

Οι κινηματικές και οι δομές των γαλαξιών αστρογέννησης (SFG, star formation galaxies), και οι ιδιότητες των δίσκων σε  $z=1-3$ .

Οι μισοί από του γαλαξίες αστρογέννησης με  $z=1-3$  έχουν δίσκους που κυριαρχούνται από κανονικής ροής περιστροφή, ενώ μια μειοψηφία αποτελείται από διαταραγμένα συστήματα μεγάλης συγχώνευσης, ή ακόμα πιο πυκνά αντικείμενα που κυριαρχούνται από διασπορά ταχύτητας. Η ταχύτητα περιστροφής κλιμακώνεται χονδρικά ομαλά με το μέγεθος του γαλαξία, σε συνέπεια με τον βαρυονικό δίσκο, που υποστηρίζεται από την φυγόκεντρο. Αυτός έχει σταθερή παράμετρο στροφορμής, μέσα σε άλω σκοτεινής ύλης. Οι οπτικοί χάρτες αστρικής μάζας δείχνουν μια πλειοψηφία των δισκοειδών προφίλ και αποκαλύπτουν μια σημαντική δομή ράβδου στους περισσότερους γαλαξίες μεγάλης μάζας. Οι γαλαξίες αστρογέννησης έχουν τυπικά μια δισκοειδή δομή, με συστηματική αύξηση της αναλογίας κοιλιάς/ δίσκου προς τους γαλαξίες με πιο μεγάλες μάζες. Αυτά τα

αποτελέσματα των κινηματικών και αστρικών δομών μας δίνουν την απόδειξη ότι η συσσώρευση της ύλης στους γαλαξίες γίνεται με πιο ομαλό τρόπο, και οι εσωτερικές δυναμικές διαδικασίες σε αυτούς έχουν σημαντικό, αν όχι κυρίαρχο, ρόλο στην ανάπτυξη των γαλαξιών (και όχι οι βίαιες συγκρούσεις με άλλους γαλαξίες).

Οι δίσκοι μεγάλου  $z$  βρέθηκαν να χαρακτηρίζονται από εντυπωσιακά μεγάλη εγγενή διασπορά ταχύτητας (30-100 km/s), μεγάλη αναλογία αερίου/βαρυονικής μάζας (30-50%), και λαμπρά συμπυκνώματα αστρογέννησης με μέγεθος μερικών kpc. Σε  $z=2$ , η διασπορά ταχύτητας είναι 5-10 φορές μεγαλύτερη από ότι στους σημερινούς δίσκους, κάτι που σημαίνει ότι οι δίσκοι μεγάλου  $z$  είναι δυναμικά πιο θερμοί και γεωμετρικά πιο παχιοί, ως συνέπεια της αυξημένης συσσώρευσης ύλης, της μεγαλύτερης αναλογίας αερίου, και του αυξημένου ρυθμού αστρογέννησης. Επίσης μετρήσαμε αυξημένες διασπορές ταχυτήτων σε εκπομπές του (CO) σε δίσκους αστρογέννησης, σε γαλαξίες με  $z=1-2$ , δείχνοντας ότι αυτό αποτελεί μια ιδιότητα του συνολικού ρυθμού αστρογέννησης, και όχι μόνο του στρώματος ιονισμένου αερίου. Αυτές οι ιδιότητες, μαζί με α) την τάση αύξησης της αναλογίας της κεντρικής δυναμικής μάζας και την τάση αύξησης της αναλογίας κοιλιάς/ δίσκου, ανάλογα την γαλαξιακή μάζα και την φάση εξέλιξης, και β) πιθανώς παλαιότερες συμπυκνώσεις σε μικρότερες αποστάσεις από το κέντρο του γαλαξία, έχουν σχέση με τις θεωρητικές διαμάχες για τον δίσκο από διαταραγμένο αέριο, στον οποίο υπάρχουν γιγάντιες συμπυκνώσεις αστρογέννησης. Επίσης βρίσκουμε αποτελέσματα βίαιων βαρυτικών ασταθειών και κοιλίες από δευτερεύοντες διαδικασίες αστρογέννησης χρονικής κλίμακας 1 δις ετών. Η ανάπτυξη των κοιλιών σε δίσκους μεγάλου  $z$  μπορεί να οδηγήσει σε <μορφολογική απόσβεση>, όταν η κεντρική σφαιροειδής περιοχή σταθεροποιήσει τον πλούσιο σε αέρια δίσκο, ώστε να μην κατακερματιστεί. Στα εσωτερικά 2-3 kpc των περισσότερων γαλαξιών μεγάλης μάζας η αστρογέννηση είναι υποβαθμισμένη, και υπάρχει μια μεγάλη αστρική κοιλιά, ως απόδειξη της από μέσα προς τα έξω, ωθούμενη από τη βαρύτητα, απόσβεσης σε γαλαξίες με  $z=2$ .

Έντονη ανάδραση από αστρογέννηση και AGN.

Ανακαλύψαμε ισχυρές, χωρικά εκτεταμένες εκροές ιονισμένου αερίου από την ανίχνευση αστρογέννησης μέσω στενών γραμμών εκπομπής, που συχνά έχουν σχέση με μεμονωμένες λαμπρές συμπυκνώσεις στους δίσκους. Αυτή η ανακάλυψη μας δείχνει την διαδρομή του μη εμφανή ανέμου γαλαξιακής κλίμακας σε μεγάλη ερυθρολίσθηση, που έχει παρατηρηθεί μέχρι τώρα μόνο σε κλίμακες >10 kpc. Γύρω από αυτές τις συμπυκνώσεις έχουν παρατηρηθεί διεγέρσεις από κρουστικά μέτωπα, πιθανώς προερχόμενες από αυτές τις εκροές λόγω της αστρογέννησης. Ο άνεμος φαίνεται να καθορίζει μια επιφανειακή πυκνότητα του ρυθμού αστρογέννησης της τάξης της 1 ηλιακής μάζας το έτος ανά kpc<sup>2</sup>. Αυτή η τιμή είναι 10 φορές μεγαλύτερη από το κατώφλι του ξεσπάσματος σε κοντινούς γαλαξίες αστρογέννησης (starburst), κάτι που αποδίδεται στην αυξημένη πίεση του αερίου σε δίσκους με  $z=2$ . Οι ρυθμοί εκροής από τις συμπυκνώσεις και τους γαλαξίες έχουν πολλές φορές την τιμή του εκεί ρυθμού αστρογέννησης. Αποτελούν τον πρώτο εμπειρικό περιορισμό παροχής μάζας σε  $z>1$ , μια παράμετρος -κλειδί των θεωρητικών μοντέλων ανάδρασης λόγω αστρογέννησης. Η τόσο έντονη ανάδραση μπορεί να διαταράξει εντατικά τις συμπυκνώσεις αστρογέννησης πριν αυτές μεταναστεύσουν προς το κέντρο του γαλαξία.

Τα δεδομένα του SINFONI+AO μας παρείχαν αποδείξεις των λόγω AGN εκροών από τους πυρήνες σε σχεδόν όλους τους γαλαξίες του δείγματος (μεγάλης μάζας). Όλοι τους παρουσιάζουν μια σημαντική κοιλιά. Οι ρυθμοί των εκροών στο υπέρυθρο είναι

μεγαλύτεροι από τους ρυθμούς αστρογέννησης. Η ανακάλυψη της εκπομπής στο (H $\alpha$ ) και στις <απαγορευμένες> (NII),(SII), μαζί με την εγγενή επέκταση των 2-3 kpc και το πλάτος της ταχύτητας, αποτελούν υπογραφές μιας εκροής από AGN τύπου 2. Ενώ έχουν αναφερθεί εκροές από AGN σε πολύ λαμπρά, αλλά σπάνια Κβάζαρ μεγάλου z, η επισκόπησή μας (SINS/zC-SINF) τώρα ανακάλυψε ανέμους που καθοδηγούνται από AGN στους πολύ μεγάλης μάζας γαλαξίες αστρογέννησης. Η συχνότητα των εκροών αυτών μας πληροφορεί ότι έχουν μεγάλο κύκλο δράσης και, βάσει των εκροών στο υπέρυθρο, μπορεί να συνεισφέρουν στην παύση της αστρογέννησης, μέσω αποτελεσματικής αποβολής του αερίου από τις εσωτερικές περιοχές των γαλαξιών.

### Τα επόμενα βήματα με την KMOS

Η επισκόπηση αυτή μπορεί να μας δώσει μια εκτίμηση της σύνδεσης ανάμεσα στην κινηματική των γαλαξιών και των αστρικών δομών, καθορίζοντας τον ρόλο της αστρογέννησης και των AGN στην κυριαρχία της ανάπτυξης της αστρικής μάζας. Θα εξετάζει συστηματικά τα αποτυπώματα της ανάδρασης των γαλαξιών, και της επιρροής από το γαλαξιακό περιβάλλον. Με το δείγμα να εκτείνεται σε όλο το φάσμα  $0,7 < z < 2,7$  θα μπορέσουμε να ανιχνεύσουμε αποτελεσματικά την εξέλιξη των ιδιοτήτων στους γαλαξίες σε εύρος πάνω από 5 δις έτη, κάτι που περιλαμβάνει την εποχή κορύφωσης της κοσμικής δραστηριότητας αστρογέννησης. Τα αποτελέσματα των πρώτων ετών από σε βάθος παρατηρήσεις σχεδόν 250 γαλαξιών, σε εύρος  $0,9 < z < 2,3$  έδειξαν ότι η μέθοδός μας είναι αξιόπιστη. Τα αποτελέσματα αυτά 1) επιβεβαίωσαν τους αναγνωρισμένους από την κινηματική τους δίσκους στους γαλαξίες αστρογέννησης, και έδειξαν μια ελάττωση κατά παράγοντα 2 της εγγενούς διασποράς ταχύτητας, κάτι που είναι συνεπές με την εξέλιξη των αναλογιών του ψυχρού αερίου στα πλαίσια των οριακά σταθερών, πλούσιων σε αέρια, δίσκων. 2) Ισχυροποιήθηκε η θεωρία της πανταχού παρουσίας των εκροών από τα AGN σε μεγάλης μάζας, μεγάλου z, γαλαξίες αστρογέννησης.

### Η αρνητική και η θετική για την αστρογέννηση ανάδραση σε ένα Κβάζαρ με εκροή σε $z=1,6$ .

Η ανάδραση των Κβάζαρ με την μορφή ισχυρών εκροών προτείνεται ως κύριος μηχανισμός καταστολής της αστρογέννησης που δεν αφήνει τους γαλαξίες να αναπτυχθούν υπερβολικά, με αποτέλεσμα να πάρουν το κόκκινο χρώμα των ελλειπτικών. Από την άλλη, κάποια μοντέλα υιοθετούν την θετική ανάδραση των AGN που περιλαμβάνει αστρογέννηση στον γαλαξία, μέσω ενίσχυσης της πίεσης του αερίου στην μεσοαστρική ύλη. Η εύρεση παρατηρησιακών δεδομένων και των δύο επιδράσεων της ανάδραση αποτελεί μια πρόκληση, λόγω μικρού αριθμού διαθέσιμων παρατηρήσεων των μεγάλης ενέργειας και γωνιακής επέκτασης ανέμων των Κβάζαρ. Ο XID2028 είναι ένας <σκιασμένος> χωρίς ραδιοεκπομπή Κβάζαρ με  $z=1,59$ , στον οποίο ανιχνεύουμε μια γρήγορη (1500 km/s) και εκτεταμένη (ως τα 13 kpc από τη μαύρη τρύπα) εκροή, στις γραμμές εκπομπής (OIII) του αερίου. Η μεγάλη ταχύτητα και ο ρυθμός εκροής δεν δικαιολογούνται μόνο με την αστρογέννηση. Οι στενές γραμμές εκπομπής του (H $\alpha$ ) δείχνουν ότι η τοποθεσία εκροής είναι στο κέντρο μιας <κενής> κοιλότητας, που έχει γύρω της (σαν πέταλο) περιοχές αστρογέννησης. Έτσι η εκροή απομακρύνει αέριο από τον γαλαξία (αρνητική ανάδραση), αλλά και κινεί την αστρογέννηση με την αύξηση της πίεσης στα άκρα της κοιλότητας, μέσω της εκροής (θετική ανάδραση). Ο γαλαξίας αυτός είναι το πρώτο δείγμα αυτής της διπλής ιδιότητας της ανάδρασης.

Τα αποτελέσματα της φασματοσκοπίας περιλαμβάνουν την ύπαρξη ενός μπλε <πτερυγίου> σε όλες τις γραμμές εκπομπής, που μας προτείνει την ύπαρξη εκρέουσας ύλης. Οι απαγορευμένες γραμμές εκπομπής του (OIII) αποτελούν τον ιδανικό ανιχνευτή της εκτεταμένης εκροής ιονισμένου αερίου, που δεν μπορεί να παραχθεί σε μια περιοχή μεγάλης πυκνότητας (όπως κοντά στο AGN). Η προεξοχή της εκτεταμένης, πλήρως αναλυμένης εκροής αποδεικνύεται από το μπλε πτερύγιο, στην κατεύθυνση δυτικό-ανατολικά. Αυτό προέρχεται από την περιοχή του Κβάζαρ, και εκτείνεται για 13 kpc από το γαλαξιακό κέντρο. Η ταχύτητα της εκροής είναι πολύ μεγάλη ώστε να έχει να κάνει με περιστροφικές κινήσεις του γαλαξία. Στην περίπτωση της γαλαξιακής περιστροφής, αναμένουμε το πλάτος των γραμμών να κορυφώνεται στο κέντρο του γαλαξία. Εδώ κορυφώνεται στην περιοχή που βρίσκεται το μπλε πτερύγιο. Η εκροή είναι των 300 ηλιακών μαζών το έτος, μόνο για το ιονισμένο αέριο, που μπορεί να σημαίνει συνολική εκροή 1000 ηλιακές μάζες το έτος (με το μοριακό και το ουδέτερο αέριο). Αυτή η τόσο έντονη εκροή δεν μπορεί να δικαιολογηθεί από τη δράση της αστρογέννησης (ισχυρούς αστρικούς ανέμους, σουπερνόβα).

Η περισσότερη αστρογέννηση στον γαλαξία σημειώνεται στον πυρήνα και σε δύο επιπλέον συμπυκνώσεις, με προέκταση προς τα δυτικά από το Κβάζαρ, σε δύο σχεδόν παράλληλους κλάδους στην περιοχή της εκροής. Το ενδιαφέρον είναι ότι η θέση της εκροής συμπίπτει με την κοιλότητα ανάμεσα στις δύο περιοχές αστρογέννησης. Έτσι η αστρογέννηση είναι πολύ υποβαθμισμένη στον πυρήνα της εκροής, όπου το γρήγορης διαστολής αέριο μπορεί να απομακρύνει το μεσοαστρικό (μοριακό) αέριο, που είναι απαραίτητο για την αστρογέννηση. Αυτή είναι μια κλασική αρνητική ανάδραση, που δείχνει ότι η ισχυρή εκροή κατά πορεία της μέσα στον γαλαξία εξαπολύει το περισσότερο από το αέριο και υποβαθμίζει έντονα την αστρογέννηση. Από την άλλη, βρέθηκαν αποδείξεις ενίσχυσης της αστρογέννησης στις δύο έκκεντρες περιοχές που περικυκλώνουν την κοιλιά της εκροής. Η σύνδεση ανάμεσα στην εκροή και την περιοχή αστρογέννησης υποστηρίζεται από το πολύ ασύμμετρο σχήμα των εκεί περιοχών αστρογέννησης που εκτείνεται έξω από τον γαλαξία, ακριβώς κατά μήκος των δύο πλευρών της εκροής, ενώ δεν έχουμε ανιχνεύσει άλλη ουρά ή συμπύκνωση αστρογέννησης σε αυτόν τον γαλαξία.

### Συμπεράσματα.

Αυτές οι παρατηρήσεις μας προτείνουν την ύπαρξη θετικής ανάδρασης από το αέριο, που συμπιέζεται λόγω των κρουστικών μετώπων από την εκροή, ιδίως στις άκρες της εκροής. Αυτό το φαινόμενο έχει προταθεί για την συσχέτιση ανάμεσα στην λαμπρότητα των AGN και τον ρυθμό της αστρογέννησης στον πυρήνα, όπως και ανάμεσα στον βαθμό προσαύξησης της μαύρης τρύπας και τον ρυθμό αστρογέννησης στα AGN. Ακόμα, η λόγω εκροής αστρογέννηση συνήθως δεν ανιχνεύεται στους ιδίους τους γαλαξίες με το AGN, αλλά σε συνοδούς νάνους γαλαξίες που είναι ευθυγραμμισμένοι με τον άξονα εκπομπής των AGN. Ο XID2028 είναι η πρώτη περίπτωση άμεσης ανίχνευσης αστρογέννησης σε ένα Κβάζαρ μη ανιχνεύσιμο στα ραδιοκύματα, όπως και το πρώτο παράδειγμα των δύο τύπων ανάδρασης, της θετικής και της αρνητικής, στον ίδιο γαλαξία. Λόγω του ότι παρατηρούμε το Κβάζαρ στην εποχή της κορύφωσης της δραστηριότητάς του, όπου αναμένουμε το μέγιστο της επίδρασης της ανάδρασης στην εξέλιξη του γαλαξία, τα δεδομένα μας δείχνουν ότι και οι δύο τύποι ανάδρασης είναι σημαντικοί στην διαμόρφωση της εξέλιξης του γαλαξία, ρυθμίζοντας την αστρογέννηση.

## Η εξέλιξη της κινηματικής και της μεταλλικότητας σε $z=0,7$ ως $2,7$ με τις επισκοπήσεις LUCI, SINS/Zc- SINF, KMOS.

Η επισκόπηση KMOS θα μας προσφέρει παρατηρήσεις στο κοντινό υπέρυθρο ενός συνόλου 600 γαλαξιών αστρογέννησης. Θα παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα της έρευνας της κινηματικής των πρώτων 200 γαλαξιών, με επίκεντρο την εξέλιξη της διασποράς της ταχύτητας του αερίου σχετικά με την ερυθρολίσηση. Βρίσκουμε μια εξέλιξη από  $z=4$  ως σήμερα που είναι κατανοητή με την συν- εξέλιξη της αναλογίας αερίου και του ειδικού ρυθμού αστρογέννησης στην εικόνα ισορροπίας της γαλαξιακής εξέλιξης. Χρησιμοποιούμε έναν συνδυασμό επισκοπήσεων ώστε να βρούμε την σχέση ανάμεσα στην αστρική μάζα, τον ρυθμό αστρογέννησης και την αναλογία της ροής (NII)/(H $\alpha$ ), ως ανιχνευτή της μεταλλικότητας της αέριας φάσης του δείγματος. Ανακαλύψαμε μια σταθερή κλίση στο άκρο της μικρότερης μάζας της σχέσης μάζας/μεταλλικότητας, και μπορούμε να περιγράψουμε πλήρως την εξέλιξη στην ερυθρολίσηση μέσα από την εξέλιξη της χαρακτηριστικής μάζας αναδιοργάνωσης, όπου η σχέση αρχίζει να γίνεται ισόπεδη στην ασυμπτωτική μεταλλικότητα. Σε συγκεκριμένη μάζα και ερυθρολίσηση, τα δεδομένα μας δεν δείχνουν σχέση ανάμεσα στην αναλογία (NII)/(H $\alpha$ ) και τον ρυθμό αστρογέννησης. Και οι δύο παράγοντες εξελίσσονται στην ερυθρολίσηση, αλλά δεν υπάρχει κάποια αιτιατή σχέση τους.

Η εξέλιξη στην ερυθρολίσηση της διασποράς ταχύτητας.

Η επισκόπηση KMOS μελέτησε 223 γαλαξίες αστρογέννησης, και ανακάλυψε εκπομπή(H $\alpha$ ) στο 80% από αυτούς. Μετά από προσαρμογές των δεδομένων βρήκαμε έναν μέσο όρο διασποράς ταχύτητας 50 km/s για  $z=2,3$  και 25 km/s για  $z=0,9$  (στους δίσκους των γαλαξιών). Αυτό είναι κατανοητό με το κριτήριο σταθερότητας του Toomre (υπολογίζει τις παραμέτρους της διαφορικής περιστροφής και του δίσκου αερίων, που καθορίζουν την σταθερότητα του συστήματος). Η εξέλιξη στην ερυθρολίσηση της αναλογίας του αερίου εξαρτάται από την εξέλιξη του χρόνου εξάντλησης (του διαθέσιμου αερίου) και τον ειδικό ρυθμό αστρογέννησης (specific star formation rate). Η συμφωνία με τα δεδομένα υποστηρίζει την εικόνα ισορροπίας της γαλαξιακής εξέλιξης, όπου οι αυξημένες διαταράξεις στους δίσκους σε μεγάλη ερυθρολίσηση καθοδηγούνται από τις μεγαλύτερες αναλογίες τους σε αέριο.

## Φασματοσκοπία χωρικής ανάλυσης σε γαλαξίες, μέσω βαρυτικών φακών σε $z=2$ .

Η φασματοσκοπία χωρικής ανάλυσης είναι πιο ισχυρή, αν συνδυαστεί με βαρυτικό φακό. Έχουμε παρατηρήσεις γαλαξιών μέσω βαρυτικού φακού, με χωρική ανάλυση 100 παρσέκ. Η φασματοσκοπία στο κοντινό υπέρυθρο μας αποκαλύπτει την κινηματική, την διασπορά και τις φυσικές ιδιότητες των περιοχών αστρογέννησης, καθώς και τον βαθμό μεταλλικότητας του αερίου. Χονδρικά τα 2/3 των γαλαξιών που παρατηρούμε είναι μεμονωμένα συστήματα με συναφή πεδία ταχύτητας, μεγάλες διασπορές ταχύτητας και πολλές γιγάντιες περιοχές αστρογέννησης. Επίσης παρουσιάζουν αρνητικές βαθμίδες μεταλλικότητας του αερίου, που δείχνει την ανάπτυξη από μέσα προς τα έξω σε βαρυτικά

ασταθείς δίσκους. Οι υπόλοιποι γαλαξίες είναι υπό συγχώνευση και έχουν πιο ρηχές βαθμίδες μεταλλικότητας, κάτι που μας δείχνει ανάμειξη του μεσοαστρικού αερίου μέσω βαρυτικών αλληλεπιδράσεων. Οι βαθμίδες μεταλλικότητας σε μεμονωμένους γαλαξίες συμφωνούν με τις προσομοιώσεις που χρησιμοποιούν σάνταρ συνταγές ανάδρασης, ενώ οι προσομοιώσεις με αυξημένη ανάδραση παράγουν πιο ρηχές βαθμίδες. Έτσι αυτές οι μετρήσεις περιορίζουν τα όρια στην ανάπτυξη των γαλαξιών μέσω συγχωνεύσεων και αστρογέννησης, καθώς και στην εκτίμηση της βαρυτικής ανάδρασης.

Η φασματοσκοπία ολοκληρωμένου πεδίου με τηλεσκόπια 8-10 μέτρων μας έδωσε την δυνατότητα κατανόησης των εσωτερικών δομών γαλαξιών μεγάλης ερυθρολίσθησης ( $z=2-3$ ), όπου οι λαμπρές γραμμές εκπομπής των νεφών έχουν μετατοπιστεί στο κοντινό υπέρυθρο. Οι φασματοσκοπικοί χάρτες 2 διαστάσεων των γραμμών εκπομπής μας δείχνουν την κινηματική και την διασπορά της αστρογέννησης, ενώ οι πολλαπλές αναλογίες γραμμών εκπομπής χρησιμεύουν για τον καθορισμό της μεταλλικότητας του αερίου. Όμως τα δείγματα των γαλαξιών με  $z>2$  που έχουν αναλυθεί από επίγεια τηλεσκόπια είναι λίγα, ακόμα και με την χρήση της προσαρμοστικής οπτικής. Μια λύση αποτελεί η παρατήρηση μέσω των βαρυτικών φακών.

#### Κινηματική και μορφολογία.

Τα δείγματα των γαλαξιών από βαρυτικούς φακούς μας έδωσαν την πληροφορία, ότι η πλειονότητα των γαλαξιών  $z=2-3$  δείχνουν συναφή περιστροφή, ενώ το 1/3 περίπου των γαλαξιών είναι σε διαδικασία συγχώνευσης. Αυτά τα αποτελέσματα είναι σύμφωνα με τις επισκοπήσεις των πολύ μεγάλης μάζας γαλαξιών, που αναλύονται αποτελεσματικά χωρίς τη χρήση βαρυτικού φακού. Σε αντίθεση όμως με τους κοντινούς μας σπειροειδείς, η διασπορά ταχύτητας είναι πολύ μεγάλη σε όλους τους γαλαξίες αστρογέννησης της φασματοσκοπίας ολοκληρωμένου πεδίου με  $z>2$ , τυπικά  $\sigma=50-100$  km/s, και συχνά ξεπερνάει την ταχύτητα περιστροφής του γαλαξία. Μια άλλη ανακάλυψη είναι ότι σχεδόν όλοι αυτοί οι γαλαξίες αστρογέννησης σε  $z>2$  αναλύονται σε πολλαπλές γιγάντιες συμπακνώσεις αστρογέννησης που περιλαμβάνουν (όταν έχουμε την κατάλληλη χωρική ανάλυση). Με τη χρήση βαρυτικών φακών γνωρίζουμε ότι αυτές οι συμπακνώσεις έχουν μέγεθος συγκρινόμενο με τα τεράστια νέφη (HII) σε κοντινούς μας γαλαξίες αστρογέννησης (100 pc διάμετρο). Απλοί υπολογισμοί μας δείχνουν ότι οι κινηματικές ιδιότητες και οι γιγάντιες συμπακνώσεις εξηγούνται φυσικά με το σενάριο όπου η αστρογέννηση εμφανίζεται σε παχιούς, βαρυτικά ασταθείς δίσκους. Η κινηματική μας δείχνει ότι υπάρχει οριακά βαρυτική αστάθεια, που πρέπει να οδηγήσει σε κατάρρευση σε κλίμακες ανάλογες του μεγέθους των παρατηρήσιμων συμπακνώσεων. Οι ιδιότητες των συμπακνώσεων στους γαλαξίες μεγάλης ερυθρολίσθησης συγκρίνονται με αυτές των κλιμακωτών σχέσεων των κοντινών μας δίσκων αστρογέννησης, δεδομένης της ενίσχυσης της αναλογίας του αερίου. Ανακεφαλαιώνοντας, τα δεδομένα μας δείχνουν ότι η πλειονότητα των γαλαξιών με  $z=2-3$  αναπτύσσονται εκ των έσω με αστρογέννηση που εμφανίζεται σε παχιούς, πλούσιους σε αέριο και βαρυτικά ασταθείς δίσκους.

#### Οι βαθμίδες μεταλλικότητας.

Μια άλλη πρόσφατη εργασία επικεντρώθηκε στην μέτρηση της εξέλιξης των βαθμίδων μεταλλικότητας στον χρόνο, ώστε να διαμορφώσουμε μοντέλα γαλαξιακής ανάπτυξης. Οι δίσκοι των γαλαξιών του κοντινού μας σύμπαντος έχουν αρνητικές βαθμίδες στην μεταλλικότητα αερίου, με μεγαλύτερες μεταλλικότητες στις κεντρικές περιοχές τους. Η παρουσία των βαθμίδων εξηγείται από την μέσα προς τα έξω ανάπτυξη των γαλαξιακών



δίσκων. Το μήκος της κλίμακας των δίσκων αυξάνει σε μεταγενέστερους χρόνους. Η εξέλιξη της κλίσης των βαθμίδων είναι ένα ευαίσθητο στον χρόνο δείγμα του πρόσφατου ιστορικού της δυναμικής και της αστρικής ανάδρασης. Οι βαρυτικές αλληλεπιδράσεις και οι γαλαξιακές εκροές μπορούν γρήγορα να αναδιανέμουν την ενισχυμένη σε μέταλλα μεσοαστρική ύλη σε μεγάλες κλίμακες, ισοπεδώνοντας κάθε γωνιακή βαθμίδα.

Οι πρώτες μετρήσεις των βαθμίδων μεταλλικότητας σε μεγάλη ερυθρολίση μας φανέρωσαν μια απότομη αρνητική κλίση, που δεν θα μπορούσε να ανακαλυφθεί χωρίς την χρήση βαρυτικών φακών. Είναι ξεκάθαρο ότι με ανάλυση  $<1\text{krpc}$  μπορούμε να ανακαλύψουμε τις βαθμίδες ακόμα και για γαλαξίες με  $z > 2$ . Οι μεμονωμένοι, χωρίς αλληλεπίδραση γαλαξίες παρουσιάζουν πιο απότομες βαθμίδες.

Οι μετρήσεις των βαθμίδων μεταλλικότητας παραμένουν όμως σποραδικές, και τα αποτελέσματα από διαφορετικά δείγματα δεν συμφωνούν. Ως παράδειγμα, οι χωρίς τη χρήση βαρυτικού φακού γαλαξίες δείχνουν συστηματικά πιο επίπεδες βαθμίδες από αυτούς με τη χρήση βαρυτικού φακού. Αυτό μπορεί να έχει να κάνει με την ανεπιτυχή χωρική ανάλυση των πρώτων, ή μπορεί να είναι πραγματικό γεγονός, που έχει να κάνει με τη φύση των δειγμάτων. Οι χωρίς φακό γαλαξίες που μελετάμε είναι πολύ μεγαλύτεροι, και ως γνωστό έχουν πιο επίπεδες βαθμίδες. Άρα χρειαζόμαστε μεγαλύτερα δείγματα γαλαξιών.

## Οι τοπικές περιοχές αστρογέννησης σε γαλαξίες με $z > 1$ , μέσω ισχυρής ενίσχυσης της λαμπρότητας από βαρυτικό φακό.

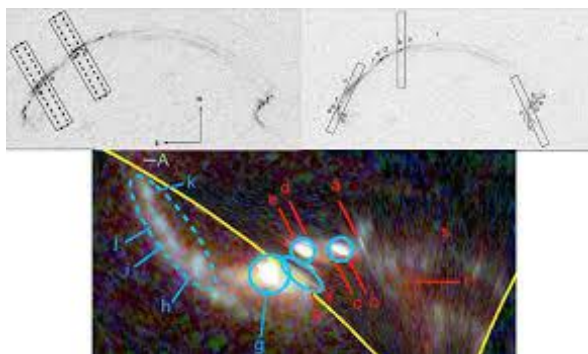
Η αστρογέννηση εμφανίζεται σε φυσικές κλίμακες, που ανταποκρίνονται στις τοπικές περιοχές αστρογέννησης, με τυπικό μέγεθος 1000 pc. Όμως δεν μπορούμε να έχουμε τέτοια ανάλυση σε μακρινούς γαλαξίες. Η ενίσχυση της λαμπρότητας μέσω ισχυρών βαρυτικών φακών μας επιτρέπει να μετρήσουμε σε μακρινούς γαλαξίες τις ιδιότητες αυτών των διακριτών περιοχών αστρογέννησης. Η αστρογέννηση είναι πολύπλοκη κατά την εποχή της μέγιστης δραστηριότητάς της. Οι μεγάλες διακυμάνσεις στην δομή της ταχύτητας και στην ισχύ των γραμμών Lyman- $\alpha$  και ισχυρές γραμμές PCygni όπως τα (CIV), (MgII) μας δίνουν νέες πληροφορίες στις αστροφυσικές σχέσεις ανάμεσα στους ακραία μεγάλης μάζας αστέρες, τις αφθονίες των χημικών στοιχείων και τις φυσικές ιδιότητες του αερίου που ιονίζουν αυτά τα αστέρια, και την γαλαξιακή εκροή που προκαλούν.

Χρησιμοποιούμε το (rest-frame) φάσμα των γαλαξιών στο υπεριώδες για τον περιορισμό της γαλαξιακής ανάδρασης, που εμπλουτίζει με μέταλλα την μεσοαστρική ύλη, για την κατανόηση του ρόλου της ανάδρασης στην παύση της αστρογέννησης. Μέχρι την ολοκλήρωση της κατασκευής των νέων τεράστιων τηλεσκοπίων, σήμερα υπάρχουν 2 τεχνικές να έχουμε διάγνωση μέσω των rest-frame γραμμών στο υπεριώδες, για γαλαξίες με  $z = 1,5$ . Ο ένας είναι το στακάρισμα χαμηλής ποιότητας φάσματα πολλών γαλαξιών. Αυτό μας προσφέρει την καλή δειγματοληψία των μέσων ιδιοτήτων των γαλαξιών αστρογέννησης, αλλά απομακρύνει την πιθανότητα κατανόησης των διακυμάνσεων των τοπικών ιδιοτήτων, και το πώς οι αλλαγές σε μια ή περισσότερες παρατηρήσεις επηρεάζουν τις υπόλοιπες. Ο δεύτερος τρόπος είναι να στοχεύουμε σε γαλαξίες μέσω βαρυτικών φακών. Σε φάσματα με καλή αναλογία σήματος/θορύβου για 4 τέτοιους γαλαξίες υπάρχουν πολλά ισχυρά χαρακτηριστικά, που ανιχνεύουν τις ιδιότητες των μεγάλης μάζας αστεριών και του αερίου που εκρέει από αυτά. Και οι 4 γαλαξίες έχουν εντυπωσιακά όμοια προφίλ PCygni,

αν και ο καθένας έχει διαφορετικές ιδιότητες στις εκροές του. Έτσι δεν γνωρίζουμε ποια είναι η <κανονική> εκροή σε  $z > 1$ . Στην καρδιά του προβλήματος βρίσκεται το γεγονός ότι οι βασικές φυσικές κλίμακες της αστρογέννησης και των αστρικών εκροών δεν είναι η κλίμακα ενός ολόκληρου γαλαξία, αλλά μάλλον η κλίμακα των κατά μέρος περιοχών αστρογέννησης σε κάθε γαλαξία. Οι ισχυροί βαρυτικοί φακοί μας δίνουν μια πολύ καλή εικόνα των μακρινών γαλαξιών, και στις πιο ακραίες περιπτώσεις ενίσχυσης της λαμπρότητας μέσω φακού έχουμε αναλύσει δομές  $< 100$  pc σε γαλαξίες με  $z > 1$ .

#### Ο γαλαξίας RCS2 J0327-1326.

Αυτός ο γαλαξίας με  $z = 1,704$  εμφανίζεται μέσω ενός πολύ ισχυρού βαρυτικού φακού. Σε αυτόν έχουμε αναλύσει τις διακριτές περιοχές αστρογέννησης  $< 100$  pc. Τα φάσματα κάθε μιας από τις 4 περιοχές αστρογέννησης έχουν μεγάλες διαφορές στην ισχύ και στην δομή πολλών επιφανών χαρακτηριστικών των γραμμών τους. Συγκεκριμένα, οι γραμμές (CIV), (MgII) PCygni, που προέρχονται από τις εκροές αερίου, δείχνουν μεγάλη διακύμανση ανάμεσα στις 4 διαφορετικές περιοχές. Ακόμα, δεν υπάρχει αρνητική αναλογία ανάμεσα στην ισχύ των γραμμών (CIV) και (MgII), κάτι που μας δείχνει ότι οι δύο αυτές γραμμές δημιουργούνται με διαφορετικούς μηχανισμούς και/ή σε διαφορετικές τοποθεσίες. Τα δεδομένα αυτά επίσης εμπλουτίζουν την παρατηρήσιμη έλλειψη σχέσης ανάμεσα στις εκπομπές Lyman- $\alpha$  και (MgII)PCygni σε ένα δείγμα γαλαξιών μέσω ισχυρών φακών. Αυτό ενισχύει την θεωρία ότι οι εκπομπές του (MgII) ανιχνεύουν τις εκροές που προκαλούνται από αστρικούς ανέμους, πιθανώς παρέχοντάς μας μια μέτρηση του μηχανισμού μεταφοράς ακτινοβολίας σε αυτές τις εκροές.



#### Ο γαλαξίας SGASJ1050+0017.

Αυτός ο γαλαξίας έχει  $z = 3,625$ . Η αύξησης λαμπρότητας μέσω βαρυτικού φακού είναι μεγάλη. Μας παρουσιάζει εκπομπή από δύο διακριτές περιοχές αστρογέννησης, μεγέθους 100- 200 pc. Τα φάσματα μας πληροφορούν για τις διαφορές των δύο περιοχών, με την δεύτερη να έχει πολύ πιο ασθενή χαρακτηριστικά του (CIV), και ασθενέστερη εκπομπή (HeII). Αυτό σημαίνει ότι οι συνθήκες του ionισμένου πεδίου ακτινοβολίας και οι πληθυσμοί των αστερών μεγάλης μάζας κυμαίνονται κατά πολύ στις διαφορετικές περιοχές του γαλαξία.

#### Συμπεράσματα.

Εξετάζοντας τις τοπικές περιοχές αστρογέννησης σε γαλαξίες μεγάλου  $z$ , μέσω βαρυτικών φακών, βλέπουμε σημαντικές διακυμάνσεις κατά μήκος διαφορετικών γραμμών θέασης, χωρίς ένδειξη συσχέτισης ανάμεσα στα χαρακτηριστικά των (CIV) και (MgII) Cygni. Επίσης

έχουμε ενδείξεις σημαντικών διαφοροποιήσεων στο ιονισμένο πεδίο ακτινοβολίας. Αυτά τα αποτελέσματα ενισχύουν την άποψη ότι η αστροφυσική της μεσοαστρικής ύλης σε μακρινούς γαλαξίες αστρογέννησης είναι πολύπλοκη διαδικασία. Οι γαλαξίες που μελετάμε μέσω βαρυτικών φακών βρίσκονται τυπικά σε  $z=2$ , δηλαδή την εποχή της κορύφωσης της αστρογέννησης στο σύμπαν. Τα δείγματα αυτά μας επιτρέπουν την ανάλυση ως το μέγεθος των συμπυκνώσεων (περιοχών) αστρογέννησης σε αυτούς τους γαλαξίες, ώστε να μπορέσουμε να έχουμε συμπεράσματα για τους ανέμους των μεγάλης μάζας αστεριών τους και την επίδραση που έχουν στην μεσοαστρική ύλη.

## Η ανάλυση και χαρτογράφηση του σχηματισμού των γαλαξιών στην εποχή κορύφωσής της με τα Mahalo- Subaru και Gracias-ALMA

Η έρευνά μας είναι για το πώς οι διεργασίες αστρογέννησης στους γαλαξίες πολλαπλασιάζονται ως συνάρτηση του χρόνου, της μάζας και του περιβάλλοντος. Εκτός από τις δομές νημάτων/συμπυκνώσεων στα πρώτο- σμήνη παρατηρήσαμε και πολύ μεγάλες δραστηριότητες αστρογέννησης, ειδικά σε  $z>2$ . Οι μισές πηγές εκπομπής (Ha) σε αυτήν την ερυθρολίση περιέχουν δομές συμπύκνωσης. Μαζί με αυτές, οι κόκκινες σκονισμένες συμπυκνώσεις (red dusty clumps) έχουν ανακαλυφθεί κοντά ή στο κέντρο μάζας των γαλαξιών. Έτσι πιθανώς συνδέονται με τον σχηματισμό κοιλιάς. Θα αναλύσουμε τα συστατικά των μοριακών αερίων και της σκόνης στην αστρογέννηση, ώστε να γνωρίσουμε αν οι συμπυκνώσεις σχηματίζονται λόγω βαρυτικής αστάθειας του πλούσιου σε αέρια δίσκου, και αν οι κοιλίες σχηματίζονται μέσω της μετανάστευσης συμπυκνώσεων ή συγχώνευσης γαλαξία με γαλαξία.

Mahalo- Subaru, η χαρτογράφηση της αστρογέννησης στην εποχή της κορύφωσης της.

Είναι γνωστό ότι ο κοσμικός ρυθμός πυκνότητας αστρογέννησης και το πλήθος των AGN κορυφώνονται σε  $z=2$ , και ότι η αστρογέννηση εξαρτάται από το περιβάλλον. Οι πρόσφατες παρατηρήσεις μας επιβεβαίωσαν ότι η δραστηριότητα αστρογέννησης σε έναν πυρήνα γαλαξιακού σμήνος με  $z=1,5$  είναι ίδιας ισχύς με αυτή του ευρύτερου πεδίου, και ότι το μέγιστο της δραστηριότητας αστρογέννησης μετατοπίζεται προς τις εξωτερικές περιοχές του σμήνος, με την πάροδο του χρόνου. Θέλουμε να καταλάβουμε πως οι δραστηριότητες αστρογέννησης σε περιοχές μεγάλης πυκνότητας μεγάλου  $z$  έχουν εγγενή προδιάθεση. Πως αυτές δέχονται εξωτερική επίδραση από το γύρω περιβάλλον, πως το μέγιστο της δραστηριότητας μετατοπίζεται προς τα έξω με την πάροδο του χρόνου σε περιβάλλοντα μικρότερης πυκνότητας, και το ποιες φυσικές διαδικασίες ευθύνονται για αυτά τα φαινόμενα.

Ανιχνεύσαμε με επιτυχία πολλούς γαλαξίες που παρουσιάζουν εκπομπή από ιονισμένες περιοχές αστρογέννησης, σε γαλαξιακά σμήνη. Το διάγραμμα χρώματος/ λαμπρότητας και οι φωτομετρικές ερυθρολίσεις επιβεβαιώνουν ότι πρόκειται για γαλαξίες σε σμήνος. Η ανακάλυψη πολύπλοκων υπό- δομών από την εκπομπή (Ha) μας δείχνει ότι αυτά τα συστήματα είναι ακόμα σε φάση εξέλιξης. Η αστρογέννηση είναι πολύ ισχυρή, ακόμα και στις κεντρικές περιοχές των πρώτο- σμηνών. Αντίθετα, σε σμήνη μικρού  $z$  η αστρογέννηση

είναι πολύ πιο ασθενής και το μέγιστό της έχει μετατοπιστεί προς τις εξωτερικές περιοχές. Αυτό μας δείχνει ότι ο σχηματισμός των σμηνών γίνεται από μέσα προς τα έξω.

Μερικές από τις εκπομπές (H $\alpha$ ) δείχνουν πολύ κόκκινα χρώματα, πρόκειται για γαλαξίες αστρογέννησης με πολύ σκόνη. Αυτοί τείνουν να ευνοούν την δημιουργία περιοχών μεγάλης πυκνότητας, όπως τα νήματα και οι συμπυκνώσεις. Αυτοί πρέπει να είναι και οι πληθυσμοί με την περισσότερη εξωτερική επίδραση από το περιβάλλον. Αυτά τα πρώτο-σμήνη είναι πιθανώς οι περιοχές όπου οι γαλαξίες προγενέστερου τύπου, που κυριαρχούν στα σημερινά σμήνη, ήταν ακόμα στην φάση του σχηματισμού τους. Έτσι είναι ιδανικοί στόχοι ώστε να μελετήσουμε με λεπτομέρεια τους φυσικούς μηχανισμούς σχηματισμού γαλαξιών, και την αρχική εξέλιξή τους σε πυκνά περιβάλλοντα.

Το 40% των αντικειμένων εκπομπής (H $\alpha$ ) σε  $z=2$  παρουσιάζει δομές συμπύκνωσης. Οι γαλαξίες μεγάλης μάζας με συμπυκνώσεις έχουν μια κόκκινη συμπύκνωση σκόνης (red dusty clump) κοντά ή στο βαρυτικό κέντρο τους. Αυτοί οι γαλαξίες με συμπυκνώσεις μπορεί να προέρχονται ή από υπό-γαλαξιακές συγχωνεύσεις ή από κατακερματισμό του πλούσιου σε αέριο ταραχώδες δίσκου, που προκαλείται από ψυχρά ρεύματα από αέρια κατά μήκος των γύρω νηματοειδών δομών. Οι κόκκινες συμπυκνώσεις μπορεί να ανταποκρίνονται σε συγχωνεύσεις αυτών των συμπυκνώσεων στα γαλαξιακά κέντρα, αφού μεταναστεύσουν προς αυτό μέσω δυναμικών τριβών. Ίσως να παρακολουθούμε ζωντανά τον σχηματισμό των γαλαξιακών κοιλιών ή την δημιουργία ράβδων.

Ακόμα, λάβαμε σε βάθος φάσματα των περιοχών εκπομπής (H $\alpha$ ) στα δύο πρώτο-σμήνη (PKS1138, USS1558), ώστε να μελετήσουμε τις φυσικές ιδιότητες των γαλαξιών αστρογέννησης σε περιβάλλοντα μεγάλης πυκνότητας, σε μεγάλο  $z$ . Τα δεδομένα μας δείχνουν την μεταλλικότητα του αερίου. Βρήκαμε ότι στα πρώτο-σμήνη οι γαλαξίες είναι χημικά πιο εμπλουτισμένοι από αυτούς του ευρύτερου πεδίου, σε μια δεδομένη γαλαξιακή μάζα 100 δις ηλιακών. Αυτό το αποτέλεσμα έχει 2 σενάρια. Το ένα είναι ότι η μεγαλύτερη πίεση του αερίου στο μεσογαλαξιακό αέριο στα σμήνη κάνει το αέριο που εκτοξεύεται από τους γαλαξίες με τις εκροές να πέφτει ξανά σε αυτούς, ώστε να ανακυκλώνεται για περισσότερη αστρογέννηση, με αποτέλεσμα τον μεγαλύτερο χημικό εμπλουτισμό τους. Το άλλο σενάριο είναι ότι το φτωχό σε μέταλλα αέριο, πιο χαλαρής σύνδεσης, στις εξωτερικές περιοχές των γαλαξιών, απογυμνώνεται πιο έντονα λόγω παλιρροϊκών διαταραχών ή πίεσης εμβολής, με αποτέλεσμα την αύξηση της μεταλλικότητας. Αφού η αναλογία αερίου για ορισμένη μεταλλικότητα είναι διαφορετική στα δύο σενάρια, η μέτρηση του μοριακού αερίου θα μας οδηγήσει στο επικρατέστερο από τα δύο.

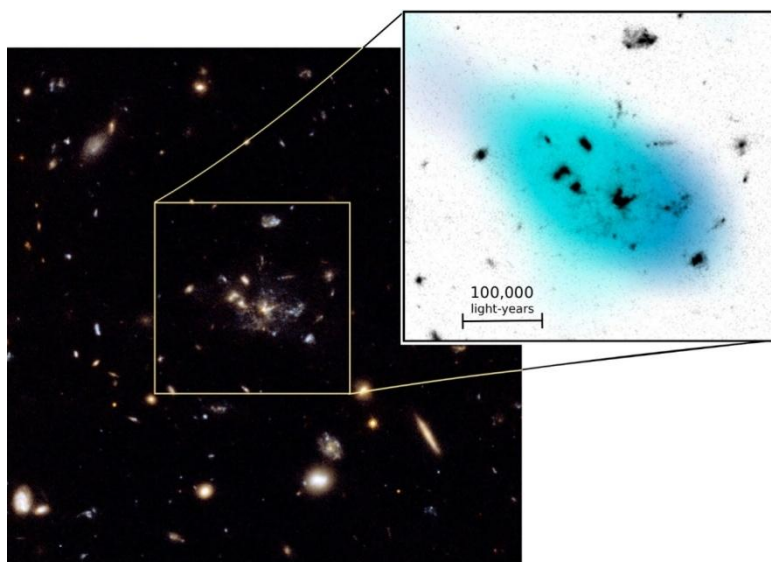
Η ανάλυση του περιεχομένου σε σκόνη και αέριο με το Gracias-ALMA.

Αν και έχουμε αναγνωρίσει πολλούς γαλαξίες αστρογέννησης στη έρευνά μας, δεν γνωρίζουμε τις φυσικές διαδικασίες που δρουν σε αυτούς. Μέσω αυτής της έρευνας θα μπορέσουμε να γνωρίζουμε που είναι καταμερισμένοι οι γαλαξίες αστρογέννησης με σκόνη και που το πυκνό μοριακό αέριο. Για παράδειγμα, αν το μοριακό αέριο περιέχεται στα κεντρικά κόκκινα συμπυκνώματα στους γαλαξίες συμπυκνωμάτων, μπορούμε να ερευνήσουμε την διαδικασία αστρογέννησης και την αποτελεσματικότητά της. Αυτή αναμένεται να είναι διαφορετική σε μια έκρηξη αστρογέννησης (starburst), κάτι που θα μας δώσει γνώσεις για την υπόθεση της δημιουργίας κοιλιάς και ράβδου σε γαλαξίες με συμπυκνώσεις.

## Μια υπέρβαση των γαλαξιών αστρογέννησης με σκόνη σε $z=2,2$ .

Η αναζήτηση μεγάλης μάζας γαλαξιών αστρογέννησης με πολύ σκόνη μας δίνει μια μεγάλη ευκαιρία να ανιχνεύσουμε τις πυκνές σε γαλαξίες περιοχές και το κοσμικό τους δίκτυο στο μακρινό σύμπαν. Η μελέτη μας για το πρώτο- σμήνος του ράδιο- γαλαξία MRC1138-262 ή αλλιώς Spider web Galaxy σε  $z=2,16$  μας αποκαλύπτει πολλούς γαλαξίες υπό-χιλιοστομέτρων (sub mm galaxies, SMG). Το πλήθος τους μας φανερώνει ότι υπάρχει μια υπέρβασή τους στο πεδίο. Θα δείξουμε ότι μια μεγάλη αναλογία αυτών των μεγάλης μάζας και με πολύ σκόνη γαλαξιών αστρογέννησης έχει φυσική σύνδεση με το πρώτο- σμήνος και τις ιδιότητες αυτού του υπερπληθυσμού σε γαλαξίες αστρογέννησης, καθώς και των μελών του.

Η κατανόηση του πως και πότε σχηματίστηκαν τα σημερινά σμήνη γαλαξιών σε μεγάλο  $z$  είναι η αφορμή μιας εκτεταμένης έρευνας που διεξάγεται την τελευταία δεκαετία, ειδικά στο οπτικό και στο κοντινό υπέρυθρο, για τα πρώτο- σμήνη γαλαξιών στο μακρινό σύμπαν. Οι ισχυροί ράδιο- γαλαξίες με μεγάλο  $z$  είναι τα πιο πολλά υποσχόμενα αντικείμενα για την ανεύρεση των υπό σχηματισμό μεγάλης μάζας σμηνών.



Οι γαλαξίες αστρογέννησης με πολύ σκόνη.

Οι τεχνικές που χρησιμοποιούμε στο ορατό /κοντινό υπέρυθρο ανιχνεύουν κυρίως (μάλλον μικρής μάζας) γαλαξίες με μη <σκιασμένη> (δηλαδή ορατή) αστρογέννηση, παρουσιάζοντας έτσι μόνο το 50% της κοσμικής δραστηριότητας αστρογέννησης. Οι επισκοπήσεις στα (υπό) χιλιοστόμετρα την τελευταία δεκαετία έφεραν επανάσταση στις γνώσεις μας για τον σχηματισμό και την εξέλιξη των γαλαξιών, ανακαλύπτοντας ένα πλήθος γαλαξιών μεγάλης ερυθρολίθωσης, σκιασμένους από σκόνη, όπου σχηματίζονται αστέρια με φρενήρη ρυθμό. Οι SMG έχουν εντατική αστρογέννηση, που κυμαίνεται από μερικές εκατοντάδες μέχρι πολλές χιλιάδες ηλιακές μάζες το έτος. Αυτοί οι σκονισμένοι γαλαξίες αστρογέννησης έχουν μεγάλη μάζα, και είναι μάλλον οι προ γεννήτορες των σημερινών ελλειπτικών. Αποτελούν εξαιρετικούς ανιχνευτές περιοχών κορύφωσης της πυκνότητας της μάζας (σε επίπεδο σμηνούς), άρα και των πρώτο- σμηνών. Η μελέτη τους μας δίνει την ευκαιρία να

ερευνήσουμε τα επεισόδια της έκρηξης της αστρογέννησης στην συμπαντικά κρίσιμη εποχή του σχηματισμού των γαλαξιών.

### Γαλαξιακά σμήνη.

Από την κατάρρευση των πρώτων περιοχών μεγάλης πυκνότητας της μάζας, (που είχε ήδη διακυμάνσεις πυκνότητας μετά τον πληθωρισμό), αναδυθήκαν τα γαλαξιακά σμήνη. Αυτά είναι οι κόμβοι του κοσμικού ιστού, που σχηματίστηκε από την ανομοιογενή κατανομή της μάζας σε σχηματισμούς. Όταν κατάρρευσαν οι πρώτες δομές, τα σμήνη εμφανίζονταν ως τα πρώτα ίχνη σχηματισμού και εξέλιξης γαλαξιών. Αυτές οι δομές αναπτύχθηκαν ιεραρχικά μέσω συγχωνεύσεων και προσαύξησης μικρότερων γαλαξιακών αλυσών. Με την μεγάλη πυκνότητά τους αποτελούν ιδανικό περιβάλλον έρευνας των φυσικών διαδικασιών που ενεργοποιούν ή υποβαθμίζουν την αστρογέννηση και την δράση των AGN. Στις δομές μεγάλης κλίμακας με  $z > 1,5$  παρατηρούμε ενίσχυση της δραστηριότητας αστρογέννησης. Γνωρίζουμε ότι η εκτεταμένη δραστηριότητα αστρογέννησης (στα κέντρα αλλά και στις εξωτερικές περιοχές των σμηνών) αποτελεί προϊόν της ανάπτυξης των πιο μακρινών σμηνών, ενώ τα τοπικά σμήνη στερούνται αστρογέννησης στα κέντρα τους. Για να ανακεφαλαιώσουμε, υπάρχει ισχυρή ένδειξη ότι η αστρογέννηση ενεργοποιείται σε γαλαξίες που εισέρχονται στο σμήνος και επηρεάζονται έτσι από το περιβάλλον του, αν και δεν έχουμε ακόμη ξεκαθαρίσει τις λεπτομέρειες αυτών των φυσικών διαδικασιών. Αλλά συνέβη το ίδιο στους γαλαξίες με την μεγαλύτερη μάζα στα σημερινά σμήνη, που σχηματίστηκαν νωρίς στο νεαρό σύμπαν?

Ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό (πεδίο) στο διαγράμματος χρώματος/λαμπρότητας των τοπικών σμηνών είναι η κόκκινη ακολουθία. Οι γαλαξίες της κόκκινης ακολουθίας κυριαρχούν στους πυρήνες των γαλαξιακών σμηνών και είναι μεγάλης μάζας, με παθητική εξέλιξη, γαλαξίες προγενέστερου τύπου (early type). Η κόκκινη ακολουθία υπάρχει σε σμήνη μέχρι  $z=1,5$  και είναι η πιο σημαντική ένδειξη ότι αυτοί σχηματίστηκαν σε μικρή χρονική κλίμακα πριν την εποχή  $z > 2$ . Το ποτέ και πως σχηματίστηκαν οι προ γεννήτορες τους παραμένει ένα ανοιχτό ερώτημα. Τα σχετικά σενάρια περιέχουν σχηματισμό εκ των έσω ή συγχωνεύσεις/εισροές στο γαλαξιακό σμήνος. Οι SMG, με ανάπτυξη της αστρικής μάζας των κοιλιών τους σε μικρό χρονικό διάστημα, είναι υποψήφιοι προ γεννήτορες.

Αυτά τα πρώτα αποτελέσματα δείχνουν ότι μια πλήρη απογραφή των μελών ενός σμήνος είναι εφικτή μόνο αν έχουμε δεδομένα από το οπτικό/κοντινό υπέρυθρο και το μακρινό υπέρυθρο/υπό χιλιοστόμετρα. Οι πηγές εκπομπής Ly $\alpha$  και (H $\alpha$ ) αναμένονται να είναι σχετικά μικρής ή μεσαίας μάζας γαλαξίες, με ρυθμό αστρογέννησης από μερικές ως εκατοντάδες ηλιακές μάζες το έτος, ενώ οι σκονισμένοι γαλαξίες αστρογέννησης έχουν μεγάλη μάζα και πιο έντονη αστρογέννηση.

### MRC 1138-262

Το πρώτο- νέφος που συνδέεται με τον ραδιογαλαξία μεγάλου  $z$  MRC 1138-262, τον γαλαξία <ιστός της αράχνης>, είναι ένα από τα καλύτερα μελετημένα πεδία. Στο πεδίο διακρίναμε συνολικά 16 SMG. Η φασματοσκοπία των Ly $\alpha$  και (H $\alpha$ ) αναδεικνύει μια υπέρβαση των γαλαξιών εκπομπής τους, σε σχέση με το υπόλοιπο πεδίο. Η χωρική ανάλυσή τους μας δίνει ισχυρές αποδείξεις ότι ο κεντρικός γαλαξίας βρίσκεται σε ένα υπό σχηματισμό σμήνος. Συμπεράναμε ότι μαζί με τον ράδιο- γαλαξία και δύο SMG, συνολικά τουλάχιστον 8 γαλαξίες είναι μέλη του πρώτο- σμήνος. Αυτοί βρίσκονται όλοι σε μια περιοχή εύρους 2 Mpc, (τυπική διάμετρος για ένα σμήνος στο τοπικό μας σύμπαν) και

περιέχονται στα κοσμικά νήματα που ανακαλύψαμε σε  $z=2,2$ . Άρα οι μεγάλης μάζας και με πολύ σκόνη γαλαξίες αστρογέννησης είναι και ανιχνευτές του κοσμικού ιστού. Η τοποθεσία τους στην νηματοειδής δομή υποστηρίζει την θεωρία ότι εισέρχονται στο παραπάνω σμήνος. Ακόμα, ανακαλύψαμε SMG με απόσταση 5- 10 από το κέντρο του σμήνος, που μπορεί να μας δείχνουν ένα άλλο νήμα.

Στην κεντρική περιοχή των 2Mpc, η υπέρβαση των SMC είναι κατά παράγοντα 4 μεγαλύτερη από την καλά μελετημένη δομή των 6 SMG σε  $z=1,99$ , που καταλαμβάνει ένα πεδίο 7X7 Mpc. Το πρώτο- σμήνος MRC1138- 262 ανιχνεύεται από γαλαξίες μάζας διαφορετικού εύρους και βαθμού σκίασης (εκπομπής Ly $\alpha$ , εκπομπής (Ha) και SMG). Τα δεδομένα αποκλείουν 3 SMG από μέλη του σμήνος. Για τα υπόλοιπα 6 SMG δεν έχουμε αρκετά δεδομένα ώστε να τα κατατάξουμε ως μέλη. Μετρήσαμε πυκνότητα αστρογέννησης περίπου 1500 ηλιακές μάζες το έτος/Mpc-3, κατά 4 μεγέθη μεγαλύτερη από την συνήθη στο πεδίο, σε αυτήν την ερυθρολίσηση.

## Μια σάρωση μορίων στο Hubble Deep Field North.

Η κατανόηση της εξέλιξης των γαλαξιών καθοδηγείται παραδοσιακά από μια προεπιλογή γαλαξιών προς μελέτη. Αυτή η προεπιλογή βασίζεται στις πλατιές γραμμές εκπομπής τους στο συνεχές φάσμα (broad band continuum emission). Αυτή η προσέγγιση είναι δυνητικά μη αμερόληπτη, γιατί οι μακρινοί πλούσιοι σε αέρια γαλαξίες μπορεί να έχουν σκίαση λόγω της σκόνης τους (άρα να υστερούν σε εκπομπή). Για να ξεπεράσουμε αυτό το εμπόδιο, πρόσφατα ολοκληρώσαμε μια επισκόπηση του (CO) στα 3mm. Η έρευνά μας πέτυχε 1) Την μέτρηση της ερυθρολίσησης του SMG (γαλαξία υπό χιλιοστομέτρων) HDF 850.1 ( $z=5,183$ ). 2) Την ανακάλυψη μιας πλατιάς γραμμής(CO 2-1) από τον γαλαξία BzK με  $z= 1,785$ , και άλλες 6 εκπομπές (CO) από γαλαξίες του πεδίου. 3) Την ανακάλυψη μερικών γραμμών (πιθανώς (CO 3-2) σε  $z=2$ ) χωρίς ομόλογες γραμμές στο οπτικό/κοντινό και μακρινό υπέρυθρο. Αυτά τα αποτελέσματα μας επιτρέπουν να επεκτείνουμε την παράμετρο χώρος στο δείγμα των ιδιοτήτων των γαλαξιών στις έρευνές μας για το μοριακό αέριο σε μεγάλη ερυθρολίσηση. Ακόμη σημαντικότερο, μπορούμε να έχουμε τα πρώτα άμεσα μετρήσιμα όρια της κοσμικής εξέλιξης της περιεκτικότητας σε μοριακό αέριο στο σύμπαν. Αυτή η μελέτη αντιπροσωπεύει ένα πρώτο βήμα για άμεση απογραφή του μοριακού αερίου σε <κανονικούς> γαλαξίες μεγάλου  $z$ , μια επιτυχία της εξωγαλαξιακής αστρονομίας με το ALMA.

Η κατανόησή μας για τον σχηματισμό των γαλαξιών βασίζεται κυρίως σε βάθος παρατηρήσεις των αστρικών συνεχών εκπομπών στο ορατό και κοντινό υπέρυθρο, και σε μικρότερο βαθμό στο ιονισμένο αέριό τους και στην συνεχή εκπομπή της σκόνης. Οι λαμπρότητες και τα χρώματα του αστρικού συνεχές χρησιμοποιούνται για την αναγνώριση των μεγάλης ερυθρολίσησης γαλαξιών, και της εκτίμησης της αστρικής μάζας και των ρυθμών αστρογέννησής τους. Οι παρατηρήσεις στενής γραμμής αποκαλύπτουν την παρουσία ενός πληθυσμού γαλαξιών αστρογέννησης με λαμπρές γραμμές εκπομπής από το ιονισμένο αέριό τους, αλλά ισχύο αστρικά συνεχές. Οι παρατηρήσεις ευρύ πεδίου του συνεχές της σκόνης παρουσιάζουν την μάζα της ύλης που σκιάζει (δηλαδή την σκόνη), από την διαδικασία αστρογέννησης. Συνολικά αυτές οι παρατηρήσεις μας έδειξαν την εξέλιξη της πυκνότητας του ρυθμού αστρογέννησης στο σύμπαν σε σχέση με τον χρόνο. Αυτές οι

έρευνες είχαν ως στόχο να μελετήσουν τις διαδικασίες αστρογέννησης <ζωντανές> (μέσω του ιονισμένου αερίου ως ανιχνευτή ή της εκπομπής της σκόνης) ή στο παρελθόν (μέσω των ηλικιών και των μαζών των αστέρων). Από την άλλη, οι παρατηρήσεις του μοριακού αερίου, που αποτελεί το <καύσιμο> της αστρογέννησης, περιορίστηκαν σε μελέτες υποστήριξης των γαλαξιών.

Μια μοριακή σάρωση στο βόρειο βαθύ πεδίο του Hubble.

Διαλέξαμε το πεδίο μας ώστε να περιλαμβάνει τον λαμπρό SMG,HDF850.1. Ανακαλύψαμε 2 γραμμές, τις (CO 5-4) και (CO 6-5) που μας δίνουν  $z= 5,183$  για τον γαλαξία, κάτι που επιβεβαιώθηκε από παρατηρήσεις υποστήριξης των (CO2 -1) και (CII). Ήταν η πρώτη φασματοσκοπική μέτρηση της ερυθρολίσθησης του γαλαξία, 14 έτη μετά την ανακάλυψή του από το Hubble. Ανακαλύψαμε 7 γραμμές του (CO), που σχετίζονται χωρικά με ανάλογες παρατηρήσεις στο ορατό/κοντινό υπέρυθρο. Ένας από αυτούς τους γαλαξίες είναι ο μεγάλης μάζας (250 δις ηλιακές μάζες) γαλαξίας αστρογέννησης (με ρυθμό 38 ηλιακές μάζες το έτος) BzK, με  $z=1,784$ .

Μια όμοιας έντασης με τις παραπάνω γραμμή (CO) σχετίζεται με έναν γαλαξία με μια τάξη μεγέθους μικρότερη αστρική μάζα, σε  $z=2,044$ . Αυτό το παράδειγμα μας δείχνει ότι τα μεγάλα αποθέματα μοριακού αερίου μπορούν να βρεθούν σε γαλαξίες με πολύ διαφορετικές ιδιότητες στην εποχή  $z=2$ . Βρήκαμε και άλλες εκπομπές που δεν έχουν καμία ομόλογη εκπομπή στο ορατό/υπέρυθρο, παρά το εξάισιο βάθος των δεδομένων. Το πιο εντυπωσιακό παράδειγμα, το ID.18, έχει γραμμή (CO 3-2) σε  $z= 2,071$ . Μια δευτερεύουσα μετάβαση (CO 4-3) ανακαλύφθηκε διστακτικά, επιβεβαιώνοντας την ανίχνευση της παραπάνω γραμμής.

Οι συνιστώσες της έντασης της γραμμής του (CO) και του μοριακού γαλαξιακού μέρους.

Περιορίσαμε τα δεδομένα μας ως εξής. Αποθηκεύσαμε τις ανιχνεύσεις του (CO) βάσει έντασης των γραμμών, και τις προσαρμόσαμε στο μέγεθος του σύμπαντος σε κάθε ερυθρολίσθηση. Για κάθε διαφορετική ένταση των γραμμών θέσαμε ένα κατώτερο όριο, που ανταποκρίνεται σε ασφαλή δεδομένα (αυτά που μπορέσαμε να διασταυρώσουμε με άλλες ανεξάρτητες μετρήσεις), και ένα ανώτερο όριο, που ανταποκρίνεται στην παραδοχή ότι όλες οι υποψήφιες εκπομπές είναι πραγματικές. Έτσι αποκτήσαμε ένα εύρος έντασης του (CO) κοντά στον κόμβο των προβλεπόμενων συνισταμένων έντασης των γραμμών του (CO). Υπολογίσαμε την ποσότητα του μοριακού αερίου ανά μονάδα συν-κινουμένου όγκου. Οι συνισταμένες έντασης από εμπειρικές προβλέψεις ή ημι- αναλυτικά μοντέλα μας πληροφορούν την μάζα του (H2).

Συμπεράσματα.

Η σάρωση των μοριακών γραμμών στο παραπάνω πεδίο μας επέτρεψε να καθορίσουμε τα όρια στις συνισταμένες έντασης του (CO) και της πυκνότητας του μοριακού αερίου σε <κανονικούς> γαλαξίες μεγάλης ερυθρολίσθησης, χωρίς σχετικές μετρήσεις στο ορατό και υπέρυθρο. Τα δεδομένα μας έδειξαν ότι υπάρχει μια κορύφωση της αστρογέννησης σε  $z= 1-3$ , όπου οι γαλαξίες έχουν πολύ περισσότερο αέριο από σήμερα. Αυτή η εξέλιξη συμφωνεί και ενισχύει την υπάρχουσα κατανόηση των ιδιοτήτων των γαλαξιών.



## Ψυχρές ροές. Η δυνατότητα ανίχνευσης, η σχέση με την δομή και τα χαρακτηριστικά τους.

Το ψυχρό αέριο που ρέει κατά μήκος των νημάτων της σκοτεινής ύλης αποτελεί μάλλον την βασική πηγή προμήθειας ύλης για την ανάπτυξη των δίσκων και της αστρογέννησης στους μεγάλης μάζας γαλαξίες, κατά το αρχικό σύμπαν. Χρησιμοποιήσαμε υδροδυναμικές προσομοιώσεις ώστε να μελετήσουμε ποιες εκτάσεις από αυτές τις ψυχρές ροές είναι ανιχνεύσιμες στα εκτεταμένα περί-γαλαξιακά περιβάλλοντα μέσω της εκπομπής Ly $\alpha$ , της απορρόφησης Ly $\alpha$  και των γραμμών απορρόφησης μετάλλων χαμηλού ιονισμού. Τα χαρακτηριστικά των εκπομπών Ly $\alpha$  των γαλαξιών στις προσομοιώσεις μας είναι όμοια σε λαμπρότητα, μορφολογία και διασπορά με τα αντίστοιχα από παρατηρήσεις με διακριτές κινηματικές δομές, σε μεγάλη ερυθρολίσθηση. Θα αναλύσουμε τα χαρακτηριστικά των ψυχρών ροών στις προσομοιώσεις και θα παρουσιάσουμε τις κλιμακωτές σχέσεις των τιμών για τις εισροές, ταχύτητες, διασπορές και συμπυκνώσεις, και θα συγκρίνουμε τα αποτελέσματα με τις παρατηρήσεις.

Η εικόνα μας για το πώς σχηματίστηκαν οι γαλαξίες έχει αλλάξει τα τελευταία χρόνια. Πριν μια δεκαετία νομίζαμε ότι οι γαλαξίες συλλέγουν την βαρυονική τους μάζα από διάχυτα νέφη που συσσωρεύονται συμμετρικά μέσα στις άλω από σκοτεινή ύλη, και θερμαίνονται μέσω κρουστικών κυμάτων (shocks), όταν συγκρουστούν με το εκεί υπάρχον αέριο. Αυτός είναι ο λεγόμενος τρόπος καυτής συσσώρευσης (hot mode accretion). Όταν το αέριο είχε επικαθήσει στο ισημερινό γαλαξιακό επίπεδο, η δημιουργία γαλαξιακών δίσκων εξαρτιόταν από μάζα της σκοτεινής άλως. Κάτω από μια κρίσιμη μάζα, το αέριο μπορούσε να ψυχθεί αποτελεσματικά, σχηματίζοντας έναν δισκοειδή γαλαξία, ενώ για μεγαλύτερες μάζες ο χρόνος ψύξης ξεπερνάει την ηλικία του σύμπαντος, οδηγώντας σε δομές που μοιάζουν με γαλαξιακά σμήνη, με μεγάλη αναλογία βαρυονικής μάζας σε καυτό, διάχυτο μεσογαλαξιακό αέριο.

Οι πρόσφατες θεωρητικές μελέτες και προσομοιώσεις έδειξαν όμως ότι σε  $z=2$  ή περισσότερο, οι γαλαξίες αποκτήσαν την βαρυονική μάζα τους κυρίως μέσω ψυχρών ροών από σχετικά πυκνό αέριο με θερμοκρασία στους 10000 K, που εισχώρησε στο θερμασμένο από κρουστικά μέτωπα διάχυτο βαρυονικό μέσο. Αυτός είναι ο αποκαλούμενος τρόπος ψυχρής προσαύξεσης. Αυτές οι ροές κορυφωθήκαν σε  $z=3$ .

Οι προσομοιώσεις N-body προτείνουν ότι περίπου η μισή μάζα στην σκοτεινή άλω χτίστηκε <μαλακά>, και τα βαρυόνια επίσης συσσωρεύτηκαν ημι-συνεχόμενα, όσο αναπτύσσονταν οι γαλαξίες. Οι υδροδυναμικές κοσμολογικές προσομοιώσεις επίσης δείχνουν μαλακή συσσώρευση, περιλαμβάνοντας μικρές συγχωνεύσεις με αναλογία μάζας κάτω από 1/10, που προμήθευσαν τα 2/3 της μάζας ενός τυπικού γαλαξία. Οι μεγάλης μάζας δίσκοι αστρογέννησης με συμπυκνώσεις, που παρατηρούμε σε  $z=2$ , μπορεί να σχηματίστηκαν αρχικά από μαλακή και συνεχής συσσώρευση προερχόμενη από τις ψυχρές ροές, με μικρότερη συνεισφορά από τις μεγάλες συγχωνεύσεις. Το μυστικό για να μην καταρρεύσει ένας γαλαξιακός δίσκος είναι η μαλακή (ομαλή) συσσώρευση κυρίως αερίου, αντί για απότομη εισροή αστρικής ύλης, όπως συμβαίνει στις μεγάλες γαλαξιακές συγχωνεύσεις.

Τα προφίλ των γραμμών απορρόφησης.

Σε αυτό το δείγμα θεωρήσαμε ότι εμφανίζονται οι γραμμές απορρόφησης Ly $\alpha$  και των μετάλλων ως UV ακτινοβολία, που εκπέμφθηκε από τον κέντρο του γαλαξία του

παραδείγματος και απορροφήθηκε από το αέριο στο περί-γαλαξιακό περιβάλλον, μια σφαιρική περιοχή έξω από τον δίσκο. Οι παρατηρήσεις των απορροφήσεων στο κέντρο του γαλαξία έχουν το πλεονέκτημα ότι ξεχωρίζουν οι εκροές από τις εισροές, επειδή η απορρόφηση εμφανίζεται μόνο στην μπροστινή προς εμάς ύλη. Η ακτινοβολία που εκπέμφθηκε ή σκεδάστηκε από περιοχές πίσω από τον γαλαξία έχει μπλοκαριστεί από τον ίδιο τον γαλαξία. Όμως, αυτή η απορρόφηση δεν μας δίνει χωρικές πληροφορίες για την απόσταση από το κέντρο του γαλαξία. Κατά μήκος μιας δεδομένης γραμμής θέασης το αέριο έχει πυκνότητα, θερμοκρασία και γωνιακή ταχύτητα με διακυμάνσεις, ως συνέπειες της γωνιακής θέσης προς το κέντρο του γαλαξία. Οι περιελίξεις των διαφορετικών πυκνοτήτων και γωνιακών ταχυτήτων στο αέριο κατά την γραμμή θέασης είναι τα κύρια συστατικά για τον υπολογισμό του προφίλ των γραμμών απορρόφησης. Οι πιθανότητες ανακάλυψης μιας ψυχρής ροής, εξετάζοντας έναν μοναδικό γαλαξία από μια κατεύθυνση, είναι για το (MgII) μια εισροή >150km/s στο 1,3% όλων των παρατηρήσεων. Παράγουμε στακαρισμένα φάσματα χρησιμοποιώντας τις προσομοιώσεις μας, προσθέτοντας τα προφίλ των γραμμών πολλών χιλιάδων διαφορετικών κατευθύνσεων για κάθε έναν από τους 3 γαλαξίες. Καθορίζουμε το προφίλ των γραμμών απορρόφησης για ένα σφαιρικό κέλυφος ανάμεσα στην εξωτερική και την εσωτερική διάμετρο. Η προβλεπόμενη γραμμή απορρόφησης των μετάλλων εμφανίζεται λεπτή. Πιθανώς οι πιο ταιριαστές γραμμές για την ανακάλυψη της ψυχρής ροής στην απορρόφηση είναι οι (CII) και (MgII), αφού έχουν το δυνατότερο σήμα.

#### Οι ψυχρές ροές ως <σταγόνες> Ly $\alpha$

Οι υδροδυναμικές κοσμολογικές προσομοιώσεις μας δείχνουν ότι οι μεγάλης μάζας γαλαξίες τροφοδοτούνται από ροές ψυχρού αερίου που εισρέει στις άλως σκοτεινής ύλης, σε μεγάλο βαθμό στον κοσμικό ιστό. Αυτές οι ροές θα έπρεπε να είναι παρατηρήσιμες ως λαμπρές πηγές Ly $\alpha$ , με επιμήκεις δομές που να εκτείνονται για πάνω από 100 kpc. Η απελευθέρωση της δυναμικής βαρυτικής ενέργειας από το αέριο που εισρέει μέσα στην άλω είναι η πηγή της λαμπρότητας της γραμμής Ly $\alpha$ . Οι προβλεπόμενες μορφολογίες και λαμπρότητες της εκπομπής αυτής θέτουν αυτές τις ροές υποψήφιες πηγές των παρατηρήσιμων <σταγόνων> (drops) Ly $\alpha$  μεγάλου z. Το περισσότερο από το αέριο στις ψυχρές ροές έχει θερμοκρασία 10000- 50000 K, όπου κορυφώνεται η εκπομπή Ly $\alpha$ . Με την χρήση των κοσμολογικών προσομοιώσεων με ανάλυση 70 pc και ψύξη κάτω από 10000K, και εφαρμόζοντας μια απλή ανάλυση της ικανότητας εκπομπής Ly $\alpha$  μέσω ερεθισμού των ηλεκτρονίων λόγω σύγκρουσης, κατασκευάσαμε χάρτες της εκπομπής Ly $\alpha$  από προσομοιωμένους, μεγάλης μάζας γαλαξίες με z=3. Υπολογίσαμε τον μέσο όρο της λαμπρότητας του Ly $\alpha$  για ορισμένη μάζα της άλω και τον μέσο όρο της επίδρασης της λαμπρότητας αυτών των εκτεταμένων πηγών Ly $\alpha$ . Οι ιδιότητες των μεμονωμένων εικόνων συμφωνούν με τις παρατηρήσεις στην κινηματική και στην μορφολογία. Η προβλεπόμενη επίδραση της λαμπρότητας είναι κοντά στην παρατηρήσιμη.

#### Η σχέση με την μορφολογία.

Γνωρίζουμε ότι οι δορυφόροι γαλαξίες που περιέχουν αέριο, και πιο ειδικά για τον σκοπό μας, άλως σκοτεινής ύλης, εισρέουν στην κύρια άλω με απαλές ροές συσσώρευσης. Ας υποθέσουμε ότι οι γαλαξίες και οι δορυφόροι τους σχηματίζονται στο επίκεντρο από τυχαίου προσανατολισμού ψυχρές ροές. Ποια είναι τότε η πιθανότητα ένα μέρος των δορυφόρων να βρίσκεται μέσα σε ένα λεπτό επίπεδο γύρω από τον κεντρικό γαλαξία της κυρίας άλω? Οι 15 από τους 27 δορυφόρους γαλαξίες της Ανδρομέδας βρίσκονται σε ένα

επίπεδο με ακτίνα 200 kpc. Αφού υποθέσαμε ότι όλες οι ροές περνάνε από την περιοχή του κεντρικού γαλαξία, δύο ροές θα είναι πάντα στο ιδανικό επίπεδο. Σε ένα σενάριο ελεύθερων ροών αναμένουμε τουλάχιστον το 67% των δορυφόρων γαλαξιών να βρίσκονται σε ένα επίπεδο. Αφού συνήθως παρατηρούμε δύο, τρεις ή τέσσερις διαμορφώσεις ροών στις προσομοιώσεις μας, μπορούμε να πούμε ότι δεν αποτελεί έκπληξη η διαμόρφωση των δορυφόρων γύρω από τον γαλαξία της Ανδρομέδας. Από την άλλη, το γεγονός ότι οι τόσο μικροί γαλαξίες βρίσκονται σε ένα λεπτό επίπεδο ταιριάζει σε ένα σενάριο δύο η τριών ροών για την Ανδρομέδα, εκτός αν μια δευτερεύουσα εξέλιξη από άλλες διαδικασίες μετακίνησε τους δορυφόρους έξω από αυτό το επίπεδο. Το γεγονός ότι παρατηρούμε μια μεγάλη αναλογία των δορυφόρων σε ένα λεπτό επίπεδο μπορεί να ερμηνευτεί ως έμμεση παρατηρησιακή απόδειξη του σεναρίου ψυχρού τρόπου συσσώρευσης, και ότι η διασπορά των δορυφόρων δεν είναι αποτελεσματική, τουλάχιστον στην τοπική μας ομάδα.

Οι ρυθμοί των ροών σε γαλαξίες μεγάλης ερυθρολίσθησης. Απαλές εισροές και συγχωνεύσεις.

Θα δούμε τους ρυθμούς εισροής των ψυχρών ροών συσσώρευσης, το εύρος των ταχυτήτων τους, τις διασπορές των ρυθμών ταχυτήτων και τον ρόλο των συγχωνεύσεων έναντι της απαλής ροής. Για αυτόν τον σκοπό αναλύσαμε την δημιουργία συμπυκνώσεων των ροών αερίου. Αξιολογήσαμε την μάζα κάθε συμπύκνωσης και εκτιμήσαμε μια αναλογία μάζας για τις αναμενόμενες συγχωνεύσεις, αγνοώντας τη μάζα που χάνεται από τις συμπυκνώσεις κατά την εισροή τους. Βρήκαμε ότι 1) τα προφίλ ταχυτήτων των ψυχρών ροών είναι πολύ σταθερά και δεν δείχνουν σημάδια ελεύθερης πτώσης. 2) Η σταθερή ταχύτητα εισροής ακολουθεί τους φυσικούς νομούς, με υπολογισμό της μάζας της άλως και της ερυθρολίσθησης. 3) Η διασπορά εισροής μπορεί να περιγραφεί ως διπλή Γκαουσιανή διασπορά ( το άθροισμα 2 Γκαουσιανών καμπυλών). 4) Το μεγαλύτερο μέρος της εισροής (75%) εισέρχεται της άλως με χαμηλό ρυθμό, και μόνο ένα μικρό ποσοστό (25%) με μεγάλο ρυθμό (γεγονότα μεγάλης συσσώρευσης). 5) Οι ρυθμοί συσσώρευσης για ορισμένη μάζα και ερυθρολίσθηση ακολουθούν μια στιβαρή συμπεριφορά διπλού λογαρίθμου (η περιέλιξη της δράσης 2 λογαρίθμων). Είναι ενδιαφέρον, ότι οι παρατηρήσεις έδειξαν επίσης μια διπλή Γκαουσιανή διασπορά, όταν εξετάζουμε μια συγκεκριμένη διασπορά ρυθμού αστρογέννησης για ορισμένη αστρική μάζα. Αυτές ερμηνεύονται ως συνεισφορά της δραστηριότητας της κυρίας ακολουθίας και της αστρογέννησης. Η αναλογία ανάμεσα σε αυτές τις παρατηρήσεις και τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων μας δείχνουν ότι πρέπει να υπάρχει σύνδεση ανάμεσα στην απαλή συσσώρευση από την μια και της συσσώρευσης από συγχωνεύσεις καπό την άλλη, με την δραστηριότητα αστρογέννησης.

Συμπεράσματα.

Οι υπογραφές (ίχνη) των ψυχρών εισροών είναι λεπτές, και όταν στακάρονται κατακλύζονται από τα ίχνη των εκροών. Το προτεινόμενο προφίλ της γραμμής απορρόφησης Ly $\alpha$  συμφωνεί με τις παρατηρήσεις, ενώ η στακαρισμένη γραμμή απορρόφησης των μετάλλων από τις εισροές είναι πολύ πιο ασθενής από ότι παρατηρούμε στις εκροές. Τα αποτελέσματά μας υποστηρίζουν την άποψη ότι οι παρατηρήσιμες αντίστοιχες γραμμές αποτελούν άμεσες ανιχνεύσεις της ψυχρής ροής, που καθοδηγεί την εξέλιξη των μεγάλης μάζας γαλαξιών σε μεγάλη ερυθρολίσθηση. Η μέσω βαρύτητας θέρμανση που συσχετίζεται με τις εισερχόμενες ψυχρές ροές είναι ένας φυσικός μηχανισμός που καθοδηγεί την εκτεταμένη παρατηρήσιμη ακτινοβολία ψύξης του Ly $\alpha$ , και

αυτή η εκτεταμένη εκπομπή Ly είναι αναπόφευκτη στους περισσότερους γαλαξίες μεγάλου z.

Συμπεραίνουμε ότι η ιδιαίτερη χωρική ευθυγράμμιση των δορυφόρων της Ανδρομέδας μπορεί να εξηγηθεί από τις συσσωρεύσεις ψυχρής ροής, και την απλή γεωμετρία. Οι υδροδυναμικές προσομοιώσεις παράγουν όμοιες δομές δορυφόρων γαλαξιών, μέσω ροής ψυχρής συσσώρευσης. Οι ευθυγραμμίσεις των δορυφόρων γύρω από τους γαλαξίες μπορούν να ερμηνευτούν ως έμμεση παρατηρησιακή απόδειξη παραδείγματος ψυχρής ροής και προσφέρουν σημαντικές πληροφορίες του ιστορικού συσσώρευσης των γαλαξιών. Το αέριο που εισρέει στην γαλαξιακή αλω είναι κυρίως απαλής ροής, και η μειοψηφία του προέρχεται από συγχωνεύσεις. Το προφίλ της ταχύτητάς του είναι σταθερό και όχι ελεύθερης πτώσης. Η δυναμική ενέργεια του αερίου, που χάνεται στην διαδρομή, πρέπει να διαχέεται από άλλους μηχανισμούς, όπως η εκπομπή Ly $\alpha$ . Οι αναλογίες των εξισώσεων χρησιμοποιούνται για να περιγράψουμε την διασπορά της εισροής του αερίου στις προσομοιώσεις. Μια συγκεκριμένη διασπορά του ρυθμού αστρογέννησης στις παρατηρήσεις μας δείχνει την σύνδεση ανάμεσα στην απαλή συσσώρευση και την αστρογέννηση, και ανάμεσα στην συσσώρευση μέσω συγχωνεύσεων και τον ρυθμό αστρογέννησης.

## Η συνέλευση αστρικής μάζας με τα τηλεσκόπια VLT και HST, και θέματα για τα μελλοντικά τηλεσκόπια E-ELT/ MOSAIC.

Η αναλογία των μακρινών γαλαξιακών δίσκων/ συγχωνεύσεων είναι ακόμα υπό συζήτηση, ενώ η 3διάστατη φασματοσκοπία φέρνει επανάσταση στο πεδίο. Σε ερυθρολίση  $z = 0,4-0,8$  παρατηρούμε ότι οι μισοί προ γεννιότερες των σπειροειδών γαλαξιών ήταν σε φάση συγχώνευσης, πριν 6 δις έτη. Η εξαιρετική ανταπόκριση ανάμεσα στην, βάσει μεθοδολογίας, κατηγοριοποίηση των μορφολογιών και της κινηματικής αποδεικνύει την βίαιη προέλευση των δίσκων. Οι μελέτες των εξωτερικών περιοχών των κοντινών γαλαξιών αναδεικνύουν αποτυπώματα τέτοιων αρχαίων συγχωνεύσεων, υπο τη μορφή καλά οργανωμένων αστρικών ροών. Ίσως ο γείτονάς μας, ο γαλαξίας της Ανδρομέδας, είναι η καλύτερη απεικόνιση αρχαίων συγχωνεύσεων. Υπάρχουν ακόμη πολλά να ανακαλύψουμε με το E-ELT.

Μεθοδολογία της διερεύνησης της κινηματικής μακρινών γαλαξιών.

Οι γαλαξίες συσσωρεύουν την μάζα τους από συγχωνεύσεις και εισροές αερίων, αλλά η αναλογία ανάμεσα σε αυτούς τους 2 μηχανισμούς μένει αβέβαιη. Οι χωρικά αναλυμένες κινήσεις έχουν παρατηρηθεί πρόσφατα σε κλίμακες από 3 ως 7 kpc, για γαλαξίες μέχρι  $z = 2,5$ . Οι μετρήσεις σε διάφορα μήκη κύματος οδηγούν σε διαφορετικά, πολλές φορές αντίθετα αποτελέσματα. Η πρώτη δυσκολία για την 3διάστατη φασματοσκοπία, ειδικά για γαλαξίες με  $z > 1$ , είναι να αποκτήσουμε πλήρη δείγματα γαλαξιών κατά μάζα. Δεύτερον, οι μακρινοί αυτοί γαλαξίες έχουν μικρή ανάλυση. Ευτυχώς το ιονισμένο αέριο εκτείνεται πέρα από το συνεχές φάσμα. Με αυτές τις συνθήκες η ερμηνεία της κινηματικής είναι πολύπλοκη, αφού παραμένει η μοναδική τεχνική για να ξεχωρίσουμε δομές, όπως έναν περιστρεφόμενο γαλαξιακό δίσκο από συγχωνεύσεις. Μικρότερες διαταραχές, όπως στήμονες (warps), μπάρες ή βρόγχοι, ανακαλύπτονται δύσκολα ή καθόλου. Πρέπει να επεξεργαστούμε μια ολοκληρωμένη, αποτελεσματική μέθοδο. Οι περιστρεφόμενοι δίσκοι

έχουν εντυπωσιακές γεωμετρικές ιδιότητες, που μας βοηθάνε να τους αναγνωρίσουμε εύκολα. Οι συγχωνεύσεις μπορεί να οδηγήσουν σε μεγάλη διαταραχή της ευθυγράμμισης ανάμεσα στο ιονισμένο αέριο και την διασπορά των παλαιότερων αστέρων, αλλά όχι και οι περιστρεφόμενοι δίσκοι. Η ανάλυση της κινηματικής προϋποθέτει καλή γνώση του κέντρου μάζας, του PA και της κλίσης του υποψήφιου δίσκου. Η διαδικασία κατηγοριοποίησης ενός περιστρεφόμενου δίσκου προϋποθέτει να καθορίσουμε, στα πλαίσια των αβεβαιοτήτων της παρατήρησης, αν

A) Το κέντρο μάζας συμπίπτει με το κέντρο του πεδίου ταχύτητας.

B) Η διαφορά στο PA ανάμεσα στην κόκκινη εικόνα και στο πεδίο ταχύτητας είναι λιγότερη από 20 μοίρες.

Γ) Η «κινημετρία» ή το κεντράρισμα του  $\sigma$  να συμπίπτει με μια κυρίαρχος κίνηση περιστροφής.

Αυτά τα τρία βήματα πρέπει να καθοριστούν, και προϋποθέτουν να γνωρίζουμε το κέντρο της μάζας, την PA και την κλίση. Η κινηματική μέθοδος χρησιμοποιεί μια αρμονική αποδόμηση των κινηματικών χαρτών που βασίζονται σε ασυμμετρίες. Η μεγάλη και οξεία αναλογία ανάμεσα σε ακραίες ταχύτητες είναι σχεδόν χωρίς ανάλυση, και όταν συμπλέκονται με τυχαίες κινήσεις, ο χάρτης του  $\sigma$  δείχνει αναγκαστικά μια κορυφή στο κέντρο του περιστρεφόμενου δίσκου. Να σημειώσουμε ότι η κινημετρία μπορεί να εφαρμοστεί μόνο σε μια μικρή αναλογία γαλαξιών με  $z=2$ , και όχι για δίσκους με διαταραχές από συγχωνεύσεις. Η κινηματική και η εικόνα πρέπει να χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό, όταν χρησιμοποιούνται ανεξάρτητα τα αποτελέσματα είναι αβέβαια (υπάρχουν παραδείγματα που δείχνουν αντίθετα αποτελέσματα για το ίδιο αντικείμενο). Μαζί μας παρέχουν την μορφο-κινηματική κατηγοριοποίηση, ενώ ένα από τα δύο μπορεί να μας δώσει μόνο ένα ανώτερο όριο της αναλογίας του περιστρεφόμενου δίσκου.

Η επισκόπηση IMAGES.

Ο στόχος της επισκόπησης αυτής είναι να πετύχει άμεση σύνδεση ανάμεσα στους γαλαξίες με  $z=0,4-0,8$  και τους σημερινούς γαλαξίες. Οι γαλαξίες επιλεχτήκαν από 4 διαφορετικά πεδία, ώστε να αποφύγουμε επιδράσεις κοσμολογικής διακύμανσης. Δεν επηρεάζεται από την κοσμολογική εξασθένηση, επειδή η βαθειά απεικόνιση μας εξασφαλίζει την ανακάλυψη των οπτικών δίσκων σε γαλαξίες όμοιους του δικού μας, σε ερυθρόλιση  $z=0,5$ .

Κατά την κοσμολογική αρχή, οι προ γεννήτορες των σημερινών τεράστιων σπειροειδών έχουν όμοιες ιδιότητες με τους γαλαξίες που σήμερα βλέπουμε την εκπομπή του φωτός τους από πριν 6 δις έτη. Η μορφολογική ανάλυση 143 μακρινών γαλαξιών μας δείχνει ταύτιση των ιδιοτήτων με αυτές στην ακολουθία του Hubble, από τους γαλαξίες της επισκόπησης SDSS. Οι στατιστικές διασπορές (αστρική μάζα, αστρογέννηση) των γαλαξιών μικρού και μεγάλου  $z$  συμφωνούν με τα αποτελέσματα των μεγάλων επισκοπήσεων. Η μεθοδολογία της κατηγοριοποίησης της μορφολογίας ακολουθεί ένα ημι-αυτόματης κρίσης <δέντρο>, την ακολουθία Hubble, που περιλαμβάνει το χρώμα των γαλαξιών. Για παράδειγμα, ένας μπλε, αλλά με ισχυρό κέντρο γαλαξίας μπαίνει στην κατηγορία των ιδιόρρυθμων. Μια τόσο συντηρητική μέθοδος είναι ο μόνος τρόπος για μια στιβαρή κατηγοριοποίηση. Η αστρογέννηση μπορεί όμως να επηρεάσει την μορφολογική εμφάνιση, και η μορφολογική κατηγοριοποίηση πρέπει να συγκριθεί με την χωρικά αναλυμένη κινηματική. Η κατηγοριοποίηση των πεδίων ταχύτητας κυμαίνεται από περιστρεφόμενο

δίσκο, διαταραγμένη περιστροφή, ή σύνθετες κινηματικές. Οι διαταραγμένες μορφολογίες σχετίζονται πολύ καλά με ανώμαλες κινηματικές και αντίστροφα.

Διατηρείται αυτή η σχέση όταν χρησιμοποιούμε αυτόματη κατηγοριοποίηση που βασίζεται στην συγκέντρωση και ασυμμετρία του προφίλ γαλαξιακής λαμπρότητας? Η απάντηση είναι όχι, και αυτές οι μέθοδοι υπερεκτιμούν τον αριθμό των σπειρών κατά παράγοντα 2. Οι αυτόματες κατηγοριοποιήσεις έχουν ενδιαφέρον και είναι εικαστικές επειδή μπορούν να εφαρμοστούν σε πλήθος γαλαξιών. Όμως μας παρέχουν πολύ απλουστευμένα αποτελέσματα ώστε να περιγράψουμε πολύπλοκα αντικείμενα όπως είναι οι μακρινοί γαλαξίες. Ο περιορισμός τους στην διάκριση των γαλαξιών σε ανώμαλες και σπειροειδείς μορφολογίες οδηγεί σε μεγάλα στατιστικά σφάλματα.

Τα απολιθώματα των αρχαίων συγχωνεύσεων στο κοντινό σύμπαν.

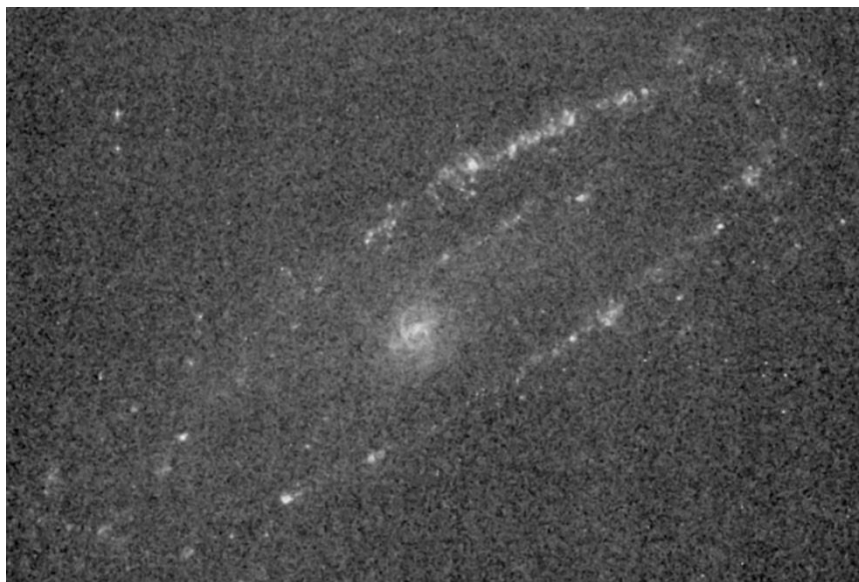
Αν πολλοί από τους γαλαξίες έχουν περάσει κάποια φάση μεγάλης συγχώνευσης, θα πρέπει να υπάρχουν σχετικά αποτυπώματα στις άλω τους. Οι συγχωνεύσεις προκαλούν πολλές φορές τεράστιες παλιρροϊκές ουρές, από τις οποίες πολλά αστέρια συλλαμβάνονται στα δυνητικά βαρυτικά υπολείμματα στις άλω των γαλαξιών. Επειδή τα ανεξάρτητα αστέρια δεν επηρεάζονται από την δυναμική ή από το καυτό αέριο της άλω, σχηματίζουν αστρικές ροές που μπορούν να διατηρηθούν για αρκετό χρόνο. Τα περίχωρα των κοντινών, μεμονωμένων σπειροειδών γαλαξιών παρουσιάζουν συχνά αστρικές ροές χαμηλής επιφανειακής λαμπρότητας, που μοιάζουν με απομεινάρια συγχωνεύσεων. Αυτές δεν μπορεί να προέρχονται από μικρές πρόσφατες συγχωνεύσεις, λόγω της ροής κόκκινου χρώματος και της απουσίας κάποιου υπόλοιπου γαλαξιακού πυρήνα (από τον μικρότερης μάζας γαλαξία που συγχωνεύτηκε). Ο γαλαξίας NGC 5907 και οι σχετικοί βρόγχοι του έχουν μοντελοποιηθεί πλήρως (δίσκος, κοιλιά και παχύς δίσκος) με την παραδοχή μιας μεγάλης συγχώνευσης αναλογίας 3/1 (μεγάλου- μικρού γαλαξία) για την μάζα του αερίου σε αυτούς.



Ο NGC 5907.

Ο γαλαξίας της Ανδρομέδας παρουσιάζει μια κλασική κοιλιά και άλω με μεγάλη μεταλλικότητα, κάτι που μας πληροφορεί ότι προέρχεται από μια μεγάλη συγχώνευση. Αυτή δικαιολογεί και την παρουσία της αστρικής γιγάντιας ροής (Giant Stream), που μπορεί να δημιουργήθηκε από αστέρια παλιρροϊκής ουράς, που συνελήφθησαν από την βαρύτητα του γαλαξία μετά την εποχή της συγχώνευσης. Κάποια αστέρια της μεγάλης ροής έχουν

ηλικίες μεγαλύτερες από τα 5,5 δις έτη. Μια πλούσια σε αέρια συγχώνευση 3/1 (αναλογίες μαζών των γαλαξιών που συγχωνεύονται) αναπαράγει αυτή την ροή, όπως και τον δίσκο, την κοιλιά, τον δακτύλιο αστρογέννησης των 10 kpc (απόσταση από το κέντρο του γαλαξία) και τον παχύ δίσκο, με την παραδοχή ότι η αλληλεπίδραση και η συγχώνευση των γαλαξιών συνέβησαν αντίστοιχα πριν 8,75 δις και 5,5 δις έτη.



Ο γαλαξίας της Ανδρομέδας

Οι χωρικές τοποθεσίες των δορυφόρων του γαλαξία της Ανδρομέδας δημιουργούν το σχέδιο δύο συστημάτων βρόγχων, παρομοίους με αυτούς του NGC5907, και αποτελούν τυπικές υπογραφές αρχαίων μεγάλων συγχωνεύσεων. Εκτός από την παροχή μιας πρόβλεψης, το μοντέλο της συγχώνευσης στον M31 είναι το μόνο που μπορεί να υπολογίσει το πάχος του επιπέδου στο οποίο βρίσκονται οι δορυφόροι, την φαινόμενη περιστροφή του επιπέδου, και την υπέρβαση των νάνων γαλαξιών, προς τον δικό μας Γαλαξία (λόγω βαρυτικής αλληλεπίδρασης). Ο Γαλαξίας μας και αυτός της Ανδρομέδας κατέχουν παλαιά συστήματα δορυφόρων. Οι δίσκοι των δορυφόρων δείχνουν (έχουν ευθυγραμμιστεί) προς τον Γαλαξία μας. Αυτό αποτελεί άλλη μια ένδειξη αρχαίας συγχώνευσης στο μοντέλο του M31, και η κύρια παλιρροϊκή ουρά μπορεί να έφτασε στον δικό μας Γαλαξία. Αυτό το σενάριο μπορεί να περιγράψει την προέλευση του απέραντου επιπέδου δορυφόρων που παρατηρούμε γύρω από τον Γαλαξία μας, και σε αυτήν την περίπτωση πολλοί νάνοι σπειροειδείς γαλαξίες (dSphs) του τοπικού σμήνος μπορεί να είναι απομεινάρια παλλιροϊκών νάνων, και για αυτό να παρατηρούμε ότι σχεδόν δεν έχουν σκοτεινή ύλη.

#### Συζήτηση και συμπεράσματα.

Οι σπειροειδείς γαλαξίες εμφανίζονται να είναι αποτέλεσμα συγχωνεύσεων φτωχών, αλλά και πλούσιων σε αέρια γαλαξιών. Εδώ να σημειώσουμε ότι οι μεγάλες συγχωνεύσεις (γαλαξιών μάζας συγκρίσιμη με αυτή του Γαλαξία μας) έχουν ως αποτέλεσμα την κατάρρευση του γαλαξιακού δίσκου και την δημιουργία ελλειπτικού γαλαξία. Έχουμε περιγράψει τις ανασχηματίσεις των δίσκων μετά από μεγάλες συγχωνεύσεις, υποθέτοντας ότι οι προ γεννήτορες είχαν μικρή αναλογία αερίου (12%). Με πολύ μεγαλύτερη αναλογία αερίου, ένας δίσκος που σχηματίζεται ξανά θα είναι περισσότερο προεξέχων, και μετά την φάση αστρογέννησης θα κυριαρχήσει στον εναπομείναντα γαλαξία. Οι αναλογίες του

αερίου στην μάζα των γαλαξιών είχε τιμές πάνω από 50%, σε  $z=1,5-2$ . Έτσι μπορούσε να υπάρξει αστρογέννηση σε σπειροειδείς μεταγενέστερου (late) τύπου με μικρή αναλογία B/T. Ίσως το μεγάλο πλήθος κοιλιών με μικρούς δείκτες Sersic (αποκαλούμενες και ψευδο-κοιλίες) που βρίσκονται στους τοπικούς γαλαξίες να μην ταιριάζουν σε ιστορικό μεγάλων συγχωνεύσεων. Ο σχηματισμός των ψευδο-κοιλιών είναι όμως αναμενόμενος, μέσω των αρχαίων μεγάλων συγχωνεύσεων. Η διασπορά της σχέσης αστρικής μάζας/ρυθμού αστρογέννησης, σχετικά με τις φασματικές εκπομπές των <συγχωνευτών> γαλαξιών, μπορεί να είναι πολύ στενή για την φιλοξενία τεράστιων συγχωνεύσεων, που αναμένονται να παρουσιάσουν ισχυρή και βραχύχρονη έκρηξη αστρογέννησης, κατά την συγχώνευση. Η συγχώνευση όμως δεν είναι μια στιγμιαία διαδικασία, και ο ρυθμός αστρογέννησης σε 400 εκατομμύρια έτη κυμαίνεται κατά 4 τάξεις μεγέθους. Το σχήμα της κορύφωσης του ρυθμού αστρογέννησης εξαρτάται από την ανάδραση.

Επειδή η τρισδιάστατη φασματοσκοπία στερείται την απαραίτητη για τις δυνατότητές της συλλογή φωτονίων, αναμένουμε το τηλεσκόπιο E-ELT. Ο συνδυασμός των δεδομένων του με αυτά του JWST θα ενισχύσει σημαντικά την έρευνα για την φυσική του σχηματισμού των πρώτων γαλαξιών (όταν το σύμπαν ήταν ακόμα μόνο μερικώς ιονισμένο).

## Οι αφθονίες του οξυγόνου των γαλαξιών της επισκόπησης z COSMOS σε $z=1,4$ , με βάση τα δεδομένα από 5 φασματικές γραμμές, και οι επιπτώσεις τους στην σχέση βασικής μεταλλικότητας των γαλαξιών.

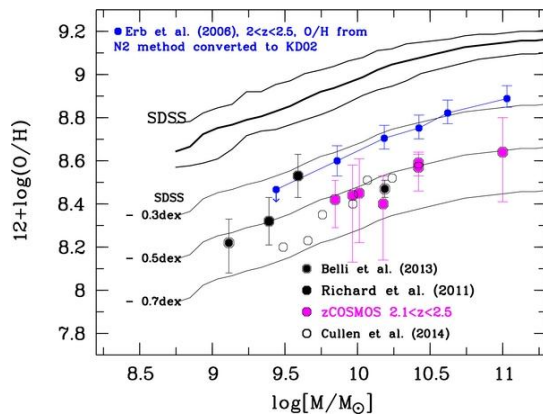
Η σχέση ανάμεσα στην αστρική μάζα M και στην μεταλλικότητα αέριας φάσης Z των γαλαξιών, η MZR, έχει γίνει αντικείμενο παρατήρησης, μέχρι και σε γαλαξίες μεγάλης ερυθρολίσθησης. Όμως είναι θέμα συζήτησης αν ο ρυθμός αστρογέννησης είναι μια δευτερεύουσα παράμετρος στην MZR. Για την έρευνα αυτού του θέματος μελετήσαμε φασματοσκοπικά 8 γαλαξίες της επισκόπησης με  $1,3 < z < 1,4$ . Αποκομίσαμε τις μεταλλικότητες (O)/(H) και την αστρογέννηση από μετρήσεις του (H $\alpha$ ). Βρήκαμε ότι η MZR αυτών των γαλαξιών αστρογέννησης είναι χαμηλότερη από την τοπική, των γαλαξιών της επισκόπησης SDSS (πιο κοντινοί), κατά παράγοντα 3 ως 5.

Στο τοπικό μας σύμπαν, η μεταλλικότητα για ορισμένη γαλαξιακή μάζα εξαρτάται και από τον ρυθμό αστρογέννησης του γαλαξία. Έτσι η αστρογέννηση εμφανίζεται ως δευτερεύον παράμετρος της σχέσης μάζας- μεταλλικότητας. Η σχέση αυτή εμφανίζεται και σε γαλαξίες μεγαλύτερου z. Η F (fundamental) MR εκφράζει την βασική μεταλλικότητα, ώστε να τονίσει ότι η σχέση δεν έχει διακυμάνσεις στον χρόνο. Η σχέση αυτή είναι φυσική απόρροια ενός απλού μοντέλου των γαλαξιών, όπου η αστρογέννηση ρυθμίζεται από την μάζα του αερίου ενός γαλαξία. Οι περισσότερες μελέτες του Z (M,SFR) σε  $z=1,4$  βασίζονται σε μικρά δείγματα ή δείγματα με περιορισμένη φασματοσκοπική πληροφορία, με αποτέλεσμα να παρουσιάζουν αντικρουόμενα αποτελέσματα.

### Αποτελέσματα

Συγκρίναμε τις MZR γαλαξιών με z από 1,3 ως 1,7 με την σχέση στην επισκόπηση SDSS. Σε  $z > 1$  η σχέση παρουσιάζει 2-3 φορές μεγαλύτερες τιμές μεταλλικότητας.





## Ερευνώντας την εξέλιξη των υπολειμμάτων των συγχωνεύσεων από τον σχηματισμό γαλαξιακών δίσκων αερίου.

Η νέα συλλογή μας από συμβολομετρικά δεδομένα του (CO) μας δείχνει ότι οι δίσκοι ατομικού και μοριακού αερίου αποτελούν σύνθετο αποτέλεσμα της τελικής φάσης γαλαξιακής συγχώνευσης. Συγκρίνοντας τα μεγέθη των δίσκων μοριακού αερίου και τις αναλογίες αερίου των γαλαξιών προγενέστερου και μεταγενέστερου τύπου (early and late type), περίπου οι μισοί δίσκοι του δείγματος παρουσίασαν όμοιες ιδιότητες με τους προγενέστερου τύπου γαλαξίες, που έχουν συμπαγή δίσκο αερίων και χαμηλή αναλογία αερίου/μάζας. Ακόμα βρήκαμε ότι οι πηγές με εκτεταμένο δίσκο αερίων και μεγάλη αναλογία αερίου/μάζας θα εξελιχθούν σε γαλαξίες που κυριαρχούνται από τους δίσκους τους.

Η κυρίαρχη θεωρία λέει ότι οι μεγάλες συγχωνεύσεις ανάμεσα σε 2 σπειροειδείς γαλαξίες έχουν ως αποτέλεσμα την δημιουργία γαλαξιών προγενέστερου τύπου, που κυριαρχούνται από τις κοιλίες τους. Κόντρα σε αυτό το κλασσικό σενάριο, πρόσφατες προσομοιώσεις με πιο ρεαλιστική φυσική αερίων μας δείχνουν ότι κάποιες συγχωνεύσεις θα σχηματίσουν εκτεταμένους δίσκους αερίων και θα εξελιχθούν σε γαλαξίες μεταγενέστερου τύπου, με κυρίαρχους τους δίσκους τους. Για να ελέγξουμε αυτό το σενάριο, μελετήσαμε με συμβολομετρική φασματοσκοπία του (CO) χάρτες από 37 επιλεγμένα απομεινάρια συγχωνεύσεων. Βρήκαμε ότι το 80% από τις πηγές με στιβαρή ανίχνευση του (CO) (24 από τους 30 γαλαξίες) έχουν κινηματικές υπογραφές (ίχνη) του μοριακού δίσκου αερίων στο πεδίο ταχυτήτων τους. Συγκρίναμε τις ιδιότητες των μερών μοριακού αερίου και αστρικής μάζας αυτών των υπολειμμάτων συγχώνευσης με γαλαξίες προγενέστερου και μεταγενέστερου τύπου, ώστε να δούμε την εξέλιξη των υπολειμμάτων. Η πλειονότητα των υπολειμμάτων συγχώνευσης μας παρουσιάζουν έναν συμπαγή δίσκο μοριακού αερίου, ανάλογο με την αστρική τους μάζα. Αν ο δίσκος δεν μεγαλώσει σημαντικά, για παράδειγμα από την συσσώρευση του μοριακού αερίου που εκτινάχτηκε από τον γαλαξία (από τη συγχώνευση ή το ενεργό κέντρο του) ή το παλιρροϊκό (επηηρεασμένο βαρυτικά από τη συγχώνευση) ατομικό υδρογόνο, θα εξελιχθούν σε γαλαξίες προγενέστερου τύπου. Διστακτικά προτείνουμε ότι οι πηγές με εκτεταμένο δίσκο αερίων και μεγάλη αναλογία αερίου/μάζας θα γίνουν γαλαξίες μεταγενέστερου τύπου με κυρίαρχο δίσκο, αν δεν υπάρξει άλλος μηχανισμός μεταφοράς του μοριακού αερίου στην κεντρική γαλαξιακή περιοχή, ώστε να μειώσει έτσι το μέγεθος του δίσκου.

## Το περιεχόμενο σε αέριο των τυπικών γαλαξιών αστρογέννησης L.

Παρατηρήσαμε την εκπομπή (CO) πέντε γαλαξιών με ισχυρό βαρυτικό φακό, ώστε να επεκτείνουμε τις μετρήσεις του μοριακού αερίου των γαλαξιών αστρογέννησης L σε  $z = 1,5-3$ . Φαίνεται να υπάρχει μεγάλη διασπορά στην αποτελεσματικότητα αστρογέννησης (star formation efficiency, SFE). Βρήκαμε ότι αυτό το εύρος της SFE έχει να κάνει με διακυμάνσεις πολλών φυσικών παραμέτρων, κυρίως τον ειδικό ρυθμό αστρογέννησης, αλλά και την αστρική μάζα και ερυθρολίσθηση. Στους γαλαξίες παρατηρούμε μια αύξηση της αναλογίας του μοριακού αερίου ανάλογα το  $z$ , από  $z = 0,2$  ως  $1,2$ . Σε μεγαλύτερο  $z$  δεν έχουμε εξέλιξη. Παρέχουμε τις πρώτες μετρήσεις της αναλογίας μοριακού αερίου για γαλαξίες αστρογέννησης με  $z > 1$ , στο άκρο της ελάχιστης γαλαξιακής αστρικής μάζας (4 -9 δις ηλιακές μάζες).

Ξεκινήσαμε μια απογραφή του περιεχόμενου σε μοριακή μάζα, σε γαλαξίες αστρογέννησης κοντά στην κορύφωση της κοσμικής δραστηριότητας αστρογέννησης. Όμως το δείγμα των ανιχνευμένων στο (CO) αντικειμένων σε  $z = 1-3$  είναι ακόμα μικρό και κυρίως περιορισμένο στους γαλαξίες μεγάλου ρυθμού αστρογέννησης και αστρικής μάζας, της ακολουθίας των γαλαξιών αστρογέννησης. Μπορέσαμε να επεκτείνουμε το παρατηρήσιμο δυναμικό εύρος των ρυθμών αστρογέννησης και αστρικών μαζών των γαλαξιών αστρογέννησης με παρατηρήσεις περιορισμένου περιεχομένου μοριακού αερίου. Δηλαδή σε γαλαξίες με ρυθμό αστρογέννησης μικρότερο των 40 ηλιακών μαζών το έτος, και λαμπρότητας 25 δις ηλιακές.

Οι γαλαξίες αστρογέννησης στο γενικό πλαίσιο των γαλαξιών με μετρήσεις του (CO).

Ο συνδυασμός των δειγμάτων των L γαλαξιών αστρογέννησης με τους γαλαξίες αστρογέννησης από ανίχνευση του (CO) σε  $z > 1$  από την βιβλιογραφία, μας δείχνουν μια μεγάλη διασπορά της SFE, τόσο ώστε αυτή εκτείνεται πολύ κάτω από τις χαμηλές τιμές των τοπικών σπειροειδών γαλαξιών, και να ξεπερνάει την διασπορά των γαλαξιών υπό-χιλιοστομέτρων με  $z > 1$ . Τι καθοδηγεί αυτήν την μεγάλη διασπορά της αποτελεσματικότητας της αστρογέννησης, ή ισοδύναμα, του χρονοδιαγράμματος εξάλειψης (κατανάλωσης από την αστρογέννηση) του μοριακού αερίου? Βρήκαμε ότι έχει να κάνει με τις διακυμάνσεις κυρίως του ειδικού ρυθμού αστρογέννησης, την αστρική μάζα και την ερυθρολίσθηση. Οι συσχετισμοί της SFE με το αποτύπωμα της κύριας ακολουθίας των γαλαξιών και το πόσο συμπαγής είναι η αστρογέννηση σε αυτούς, δεν είναι ξεκάθαροι. Η ελάττωση του χρονοδιαγράμματος της εξάλειψης του μοριακού αερίου ανάλογα με την αστρική μάζα επαληθεύεται από τους γαλαξίες αστρογέννησης μικρής αστρικής μάζας σε  $z > 1$ , και έχει παρατηρηθεί στο τοπικό μας σύμπαν. Η ελάττωση αυτή είναι αντίθετη με το σταθερό χρονοδιάγραμμα ελάττωσης μοριακού αερίου γενικής παραδοχής, και διαψεύδει την γραμμική σχέση Kennicutt- Schmidt (εμπειρική σχέση ανάμεσα στην πυκνότητα του αερίου και τον ρυθμό αστρογέννησης για μια ορισμένη γαλαξιακή περιοχή).

Η αναλογία μοριακού αερίου των γαλαξιών μεγάλης ερυθρολίσθησης.

Οι διακυμάνσεις των φυσικών διαδικασιών στην διάρκεια της εξέλιξης των γαλαξιών (συσσώρευση, αστρογέννηση, ανάδραση) έχουν άμεση επίπτωση στην αναλογία του μοριακού αερίου. Ένας καλός τρόπος να επιλέξουμε τα μοντέλα γαλαξιακής εξέλιξης είναι να υπολογίσουμε στις προβλέψεις τους και την αναλογία του μοριακού αερίου.

Παρατηρούμε μια αύξηση της αναλογίας μοριακού αερίου σε  $z$  από 0,2 ως 1,2 που δεν εξελίσσεται άλλο με την ερυθρολίσθηση, σε αντίθεση με την σταθερή αύξηση που αναμέναμε. Σε κάθε τιμή ερυθρολίσθησης η αναλογία αερίου παρουσιάζει μεγάλη διακύμανση, λόγω της εξάρτησης της αναλογίας του μοριακού αερίου από την αστρική μάζα. Έτσι έχουμε την αύξηση της αναλογίας του μοριακού αερίου με την ελάττωση της αστρικής μάζας του γαλαξία. Η άνοδος της αναλογίας του μοριακού αερίου εξαρτάται πολύ από τα ρεύματα εκροής/εισροής/ανάδρασης στον γαλαξία.

## Οι παρατηρήσεις του Jansky VLA (Very large Array) S-band των πηγών εκπομπής (H $\alpha$ ) (HAE) σε σχέση με το πρώτο-σμήνος 4C23.56 σε $z=2,5$ .

Το πρώτο-σμήνος αυτό είναι γνωστό για την υπερ-πυκνότητά του (5 φορές αυτή των σμηνών) σε γαλαξίες αστρογέννησης, που παρουσιάζουν λαμπρή εκπομπή (H $\alpha$ ). Τώρα ανακαλύψαμε 25 HAE που σχετίζονται με το πρώτο-σμήνος. Αυτοί οι HAE αστρογέννησης είναι πιθανό να εξελιχτούν σε ελλειπτικούς σε  $z=0$ . Σε αυτό το πρώτο-σμήνος υπάρχουν και πολλοί άλλοι γαλαξιακοί πληθυσμοί, κάνοντάς το πολύ σημαντικό για την κατανόηση της εξέλιξης των γαλαξιών σε μια υπερ-πυκνή περιοχή. Πολλοί λαμπροί στα υπό-χιλιοστά γαλαξίες (SMG) συμπίπτουν με τους HAE, δείχνοντας ότι αυτοί παρουσιάζουν αστρογέννηση σε περιβάλλον σκόνης. Επειδή οι ρυθμοί αστρογέννησης των HAE μπορεί να έχουν υποτιμηθεί (από την επίδραση της σκόνης), χρησιμοποιήσαμε μήκος κύματος που δεν επηρεάζεται από την εξάλειψη λόγω της σκόνης. Ερευνήσαμε τη σχέση ανάμεσα στον ρυθμό αστρογέννησης στα 1,4 GHz και στην γραμμή (H $\alpha$ ), ώστε να δούμε αν αυτή ισχύει για τις πηγές εκπομπής, και για να ελέγξουμε το πλήθος των γαλαξιών αστρογέννησης με σκόνη. Τα αποτελέσματα θα μας βοηθήσουν να δούμε πως ο σχηματισμός γαλαξιών διαφέρει σε συνθήκες υπερ-πυκνότητας.

Τα γαλαξιακά σμήνη, οι μεγαλύτερες βαρυτικά δεμένες δομές του σύμπαντος, μας δίνουν μια εξαιρετική δυνατότητα έρευνας του σχηματισμού και της εξέλιξης των γαλαξιών σε υπερ-πυκνό περιβάλλον. Οι προ-γεννητόρες των σμηνών, τα πρώτο-σμήνη, που είναι ακαθόριστα συστήματα με υπερ-πυκνότητα, εξελίσσονται σε σημερινά σμήνη, μάλλον μέσω συγχωνεύσεων και εντατικής αστρογέννησης. Μόνο λίγα έχουν ανιχνευτεί μέχρι σήμερα. Το πρώτο-σμήνος 4C23.56 με  $z=2,28$  φιλοξενεί μια ομάδα HAE (έχουμε ανακαλύψει τους 25 της ομάδας). Το πρώτο-σμήνος αυτό είναι πολύ ξεχωριστό γιατί έχει και πολλούς άλλους πληθυσμούς γαλαξιών, όπως μακρινοί κόκκινοι γαλαξίες (distant red galaxies, DRG), ακραία κόκκινα αντικείμενα (extreme red objects, ERO) και πηγές μέσου υπέρυθρου. 4 γαλαξίες υπό-χιλιοστών επικαλύπτονται από HAE. Αυτό μας δείχνει ότι μπορεί να εμφανιστεί σε αυτούς έκρηξη αστρογέννησης με την έντονη παρουσία σκόνης, υποβαθμίζοντας ακόμα και την εκπομπή (H $\alpha$ ), με αποτέλεσμα την υποτίμηση του ρυθμού αστρογέννησης.

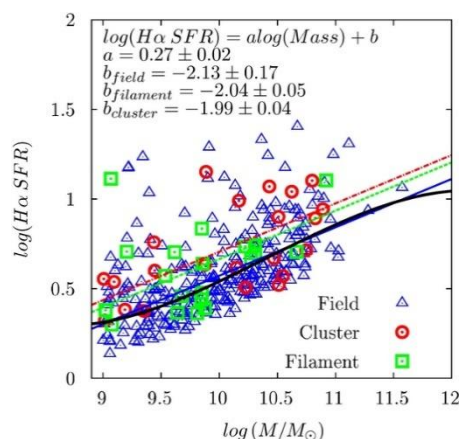
### Αποτελέσματα και συμπεράσματα.

Οι μετρήσεις μας έδειξαν ότι 5 από τους HAE παρουσιάζουν αστρογέννηση με σκόνη, και είχαμε υποτιμήσει τον ρυθμό της. Αλλιώς θα παρουσίαζαν AGN (ενεργούς γαλαξιακούς πυρήνες). Ένας από τους γαλαξίες HAE φαίνεται να συγχωνεύεται με έναν πολύ <σκιασμένο> γαλαξία αστρογέννησης. Ο διαχωρισμός της αστρογέννησης με σκόνη και των

AGN από τους υπόλοιπους γαλαξίες εκκρεμεί. Το ALMA θα μας δώσει τις ιδιότητες του κάθε γαλαξία του πρώτο- σμήνος ξεχωριστά, ώστε να κατανοήσουμε πως επηρεάζεται ο σχηματισμός και η εξέλιξη των γαλαξιών μεγάλης μάζας από το γύρω περιβάλλον τους.

## Υπάρχει εξάρτηση της εξέλιξης της μεταλλικότητας από τις γαλαξιακές δομές?

Ερευνήσαμε την εξάρτηση της σχέσης μάζας/μεταλλικότητας (MZ) από το γαλαξιακό περιβάλλον και την σύνδεση με τις αστρικές δομές των γαλαξιών και τις μορφολογίες τους. Στις μελέτες μας αναλύσαμε γαλαξίες σε μεγάλης μάζας σμήνη με  $z=0,4$  από επισκοπήσεις, και μετρήσαμε τις μεταλλικότητες των αερίων τους, τους ρυθμούς αστρογέννησης, τις αστρικές δομές και τις μορφολογίες τους. Εκτιμήσαμε την σχέση MZ για 90 γαλαξίες σε σμήνη και 40 γαλαξίες του πεδίου, χωρίς να βρούμε σημαντικές διαφορές στην διασπορά των 4 διακριτών μορφολογικών τύπων της κατηγοριοποίησής μας (λείος- με κανονικές δομές (smooth), δισκοειδής, ιδιόρρυθμος, συμπαγής). Κάποιες διακυμάνσεις της MZ ανάμεσα στα σμήνη και τους γαλαξίες του πεδίου γίνονται ορατές στο όριο μέγιστης γαλαξιακής μάζας. Λείπουν όμως οι εμφανείς τάσεις για ειδικές αλληλεπιδράσεις στα σμήνη (ενίσχυσης ή καταστολής της αστρογέννησης). Συγκεκριμένα, οι γαλαξίες με ιδιόρρυθμες αστρικές δομές που φέρουν σημάδια γαλαξιακών αλληλεπιδράσεων έχουν διασπαρθεί στο σμήνος όπως οι δισκοειδείς- γαλαξίες σε ρυθμό αστρογέννησης. Η διασπορά αυτή ισχύει και για τις γαλαξιακές μάζες και τις αφθονίες της αναλογίας (O)/(H). Θα δείξουμε ότι το δείγμα μας τοποθετείται γύρω από μια παρέκταση της κύριας ακολουθίας αστρογέννησης (ή σχέση αστρογέννησης/αστρικής μάζας) σε αυτήν την ερυθρολίσηση, δείχνοντας ότι τα δείγματα που επιλέγουμε βάσει των γραμμών εκπομπής δεν έχουν ειδικά μεγάλους ρυθμούς αστρογέννησης. Βρήκαμε όμως ότι τα μισά από τα μέλη των σμηνών μεγάλης μάζας ( $>10$  δις ηλιακές μάζες) τοποθετούνται κάτω από την κύρια ακολουθία, κάτι που αντιστοιχεί στα αντικείμενα μεγάλης μάζας, που φτάνουν τις αφθονίες μεταλλικότητας του Ηλίου μας στο διάγραμμα MZ.



Ο καθορισμός των μορφολογιών και των αφθονιών του αερίου.

Σε πολλές μελέτες της σχέσης ανάμεσα στη αστρική μάζα και τις μεταλλικότητες των γαλαξιών αστρογέννησης έχει τονιστεί η σημασία της παραπάνω σχέσης για την κατανόηση της κοσμικής εξέλιξης των ρυθμών αστρογέννησης και των ιδιοτήτων των γαλαξιών. Στην έρευνά μας στοχεύουμε στην συλλογή περισσότερων πληροφοριών για τις γαλαξιακές

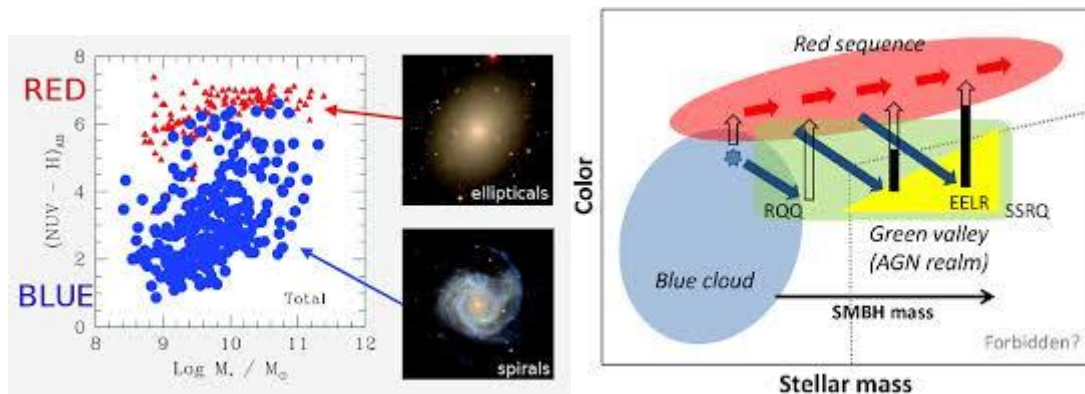
δομές και μορφολογίες σε διαφορετικά περιβάλλοντα, σε  $z=0,4$ . Αναλύσαμε γαλαξίες από το πεδίο 3 σημνών πολύ μεγάλης μάζας (MACS1206, MACS0329, MACS 0416). Μετρήσαμε τους ρυθμούς αστρογέννησης και τις αφθονίες του οξυγόνου (μεταλλικότητα του αερίου) με 5 ισχυρές γραμμές εκπομπής ((OII), (Hb), (OIII), (Ha), (NII)). Για να αναλύσουμε τυχόν μορφολογικές εξαρτήσεις, κατατάξαμε τους γαλαξίες στις παραπάνω 4 κατηγορίες.

Η εξάρτηση της σχέσης MZ από τα περιβάλλοντα και τις μορφολογίες.

Οι μεταλλικότητες των αερίων εξαρτώνται από τις αστρικές μάζες τους. Οι μελέτες της MZ σε ένα εύρος ερυθρολίσησης μας έδειξαν ότι οι γαλαξίες με μεγαλύτερες μάζες σχηματίζουν ένα πλατό υψηλής (όμοιας με του Ηλίου μας) αφθονίας, ενώ όσο μειώνεται η μάζα εμφανίζεται μια αρνητική κλίση της MZ. Και το σημείο 0 και η κλίση αυτή εξελίσσονται με την ερυθρολίσηση. Η μελέτη μας είναι η πρώτη που εξετάζει την εξάρτηση από το περιβάλλον σε σμήνη πολύ μεγάλης μάζας ( $>1$  τετράκις ηλιακές μάζες). Για γαλαξίες με  $z=0,4$  μετρήσαμε ένα εύρος της εξέλιξης της MZ κατά παράγοντα 2, αλλά παρατηρήσαμε ότι το κατώφλι της μάζας, κάτω από το οποίο βρίσκουμε χαμηλές μεταλλικότητες, μετατοπίζεται σε χαμηλότερες μάζες για τα περιβάλλοντα σημνών. Ακόμα παρατηρήσαμε ότι για  $z=0,4$  οι γαλαξίες διαφόρων τύπων έχουν όμοια διασπορά της MZ, αλλά είναι ορατές κάποιες ήπιες διάφορες για μεγαλύτερες αστρικές μάζες και μεγαλύτερα μεγέθη. Αυτή η περιοχή κατέχεται κυρίως από πληθυσμό δισκοειδών γαλαξιών αστρογέννησης στο δείγμα μας, στο πεδίο, αλλά και στα σμήνη. Οι διαφοροποιήσεις από επιδράσεις του περιβάλλοντος είναι πιο εμφανείς. Κατά μέσο όρο, ενώ οι πιο μεγάλης μάζας γαλαξίες του πεδίου του δείγματος ακολουθούν την τοπική σχέση, μερικά μέλη σημνών υπερβαίνουν τις αφθονίες του Ηλίου μας. Αυτό συμβαίνει ανεξάρτητα από τον μορφολογικό τύπο αυτών των γαλαξιών. Είναι οι ίδιοι γαλαξίες που είδαμε να τοποθετούνται κάτω από την κύρια ακολουθία στο διάγραμμα ρυθμού αστρογέννησης/μάζας. Αφού έχουμε βρει ιδιόρρυθμους γαλαξίες χαμηλής και υψηλής μεταλλικότητας, μπορούμε να πούμε ότι οι χρονικές κλίμακες κάθε είδους επίδρασης του περιβάλλοντος στην αστρογέννηση πρέπει να είναι μικρές.

## Η κατανόηση του ρόλου του περιβάλλοντος στην δημιουργία γαλαξιών προγενέστερου τύπου.

Ένα από τα χαρακτηριστικά στις κατατάξεις στα γαλαξιακά σμήνη είναι η κόκκινη ακολουθία (red sequence, RS) των προγενέστερου τύπου (early-type) γαλαξιών. Αφού αυτοί οι γαλαξίες έχουν απολέσει, κατά κύριο λόγο, το αέριο και τη σκόνη τους, το κόκκινο χρώμα οφείλεται στην παθητική τους φύση. Οι φυσικοί μηχανισμοί που έφεραν την παύση της αστρογέννησης και την είσοδο αυτών των γαλαξιών στην κόκκινη ακολουθία, δεν έχουν κατανοηθεί αρκετά. Οι επιδράσεις από το περιβάλλον πρέπει να είχαν σημαντικό ρόλο στον σχηματισμό της κόκκινης ακολουθίας γαλαξιών, μετατρέποντας τις ιδιότητες που παρατηρούμε στους γαλαξίες, από μεταγενέστερου σε προγενέστερου τύπου. Μελετήσαμε τις κινηματικές ιδιότητες σε σμήνη γαλαξιών  $0,8 < z < 1,7$ , ώστε να αποκαλύψουμε τους φυσικούς μηχανισμούς που ευθύνονται για την εξέλιξη των γαλαξιακών σημνών και τον σχηματισμό της κόκκινης ακολουθίας.



Οι παρατηρήσεις μας δείχνουν ότι η RS αρχίζει να διαμορφώνεται σε  $z = 2,5$ . Σε  $z = 1,4$  έχει εγκατασταθεί καλά, με αποτέλεσμα να είναι πιο συνήθης σε σμήνη, παρά στο ευρύτερο πεδίο. Όμως παραμένει ασαφές πως γίνεται αυτό. Σχηματίζονται οι γαλαξίες προγενέστερου τύπου άμεσα σε πρώτο- σμήνη ή σε περιβάλλοντα του πεδίου μέσω μηχανισμών αυτό- απόσβεσης, που ρυθμίζονται από τη μάζα της άλως (φυσικά, nature)? Η εισέρχονται αυτοί οι γαλαξίες στην RS όταν βρίσκονται στις εξωτερικές περιοχές των σμηνών ή των περιβαλλόντων γαλαξιακών ομάδων, σε νήματα εισρέουσας μάζας (αναστροφικά, nature)? Πότε και που οι επιδράσεις της απογύμνωσης από το αέριο, μέσω πίεσης εμβολής, και οι αλληλεπιδράσεις ανάμεσα στους γαλαξίες (διαταράξεις, συγχωνεύσεις, συμπλοκές χαμηλής ταχύτητας) γίνονται ο κυρίαρχος λόγος που κάνει τους γαλαξίες παθητικούς και τους φέρνει στην κόκκινη ακολουθία? Όλες αυτές οι διαδικασίες, ανεξάρτητα της σχετικής σημασίας τους, πρέπει να επηρεάζουν την κινηματική, την χωρική διασπορά και το περιεχόμενο σε μοριακό και ιονισμένο αέριο στους γαλαξίες. Οι παρατηρήσιμες αποδείξεις που έχουμε στη διάθεσή μας δείχνουν ότι είναι πιθανό, όταν τις συγκρίνουμε με ποσοτικά μοντέλα, να θέσουμε την πιο πιθανή αιτία κάθε παρατηρήσιμης κινηματικής και δομικής ανωμαλίας. Αυτές οι αναλύσεις έγιναν όμως περισσότερο για γαλαξίες πεδίου, έτσι είναι λίγες οι συστηματικές και ολοκληρωμένες μελέτες των κινηματικών και των λεπτομερειών των δομών των βαρυονίων στα σμήνη.

Τα σμήνη γαλαξιών που επιλέξαμε για αυτό το πρόγραμμα έχουν ήδη εκτεταμένα φασματοσκοπικά, και σε πολλά μήκη κύματος φωτομετρικά δεδομένα. Οι παρατηρήσεις μας έδειξαν ότι ο πιο πιθανός τόπος όπου μπορεί να εμφανιστεί η καταστολή της αστρογέννησης και η γαλαξιακή μεταμόρφωση είναι οι ενδιάμεσες πυκνές περιοχές στα σμήνη. Οι γαλαξίες αστρογέννησης αυτών των περιοχών δείχνουν τις επιρροές των περιβαλλοντικών αλληλεπιδράσεων στο περιεχόμενό τους σε αέριο, και έτσι μας παρέχουν χρήσιμες πληροφορίες για το πώς οι γαλαξίες μπορούν να επιταχύνουν την κατανάλωση (στην αστρογέννηση) ή την απώλεια αερίου. Χρησιμοποιήσαμε την εκπομπή (H $\alpha$ ) υπόλοιπου πλαισίου (rest- frame) ως πιο στιβαρό ανιχνευτή του ρυθμού αστρογέννησης. Οι πληροφορίες από την κινηματική δομή του καυτού ιονισμένου αερίου των γαλαξιών θα ολοκληρωθεί με αυτήν από το ψυχρό μοριακό αέριο, που θα μας παρέχει το ALMA. Όλες αυτές οι πληροφορίες θα χρησιμοποιηθούν για να έχουμε μια καλή εικόνα της απόσβεσης των γαλαξιακών σμηνών και του σχηματισμού της κόκκινης ακολουθίας.

**Εντοπίσθηκε γαλαξίας που «γεννά» 800 άστρα τον χρόνο.**



Μία εξαιρετικά σπάνια ανακάλυψη ανακοίνωσε διεθνής ομάδα αστρονόμων από τις ΗΠΑ, τη Βρετανία, τη Γερμανία και την Κίνα, **εντοπίζοντας έναν γαλαξία όπου κάθε χρόνο δημιουργούνται περίπου 800 καινούριοι αστέρες. Το εντυπωσιακό κοσμικό «εργοστάσιο» άστρων βρίσκεται σε ένα τεράστιο σμήνος γαλαξιών, 9,8 δισεκατομμύρια έτη φωτός από τη Γη, και βρέθηκε με τη βοήθεια του διαστημικού τηλεσκοπίου Hubble της NASA.**

Πρόκειται για την πρώτη φορά που οι επιστήμονες έχουν στα χέρια τους παρατηρησιακά δεδομένα τα οποία δείχνουν πως τέτοιες συμπαντικές δομές, στο κέντρο μεγάλων σμηνών, μπορούν να αναπτύσσονται αντλώντας σημαντικές ποσότητες αερίων από άλλους γαλαξίες. Κατά κανόνα, οι γαλαξίες οι οποίοι βρίσκονται κοντά στο κέντρο ενός σμήνους φιλοξενούν υπολείμματα άστρων, όπως ερυθρούς γίγαντες. Η περίπτωση όμως του γαλαξία που βρήκε η ερευνητική ομάδα, και ο οποίος βρίσκεται κοντά στο κέντρο του σμήνους **SrARCS1049+56**, φαίνεται πως αποτελεί εξαίρεση. Κι αυτό γιατί στη συγκεκριμένη περιοχή «γεννιούνται» νέοι αστέρες με εντυπωσιακό μεγάλο ρυθμό. Η ομάδα περιγράφει την ανακάλυψή της σε άρθρο στο επόμενο τεύχος του περιοδικού The Astrophysical Journal. **«Πιστεύουμε πως ο υψηλός ρυθμός σχηματισμού καινούριων άστρων οφείλεται στη συγχώνευση του τεράστιου γαλαξία με έναν μικρότερο γαλαξία που βρισκόταν σε μικρή απόσταση»**, δήλωσε η Τρέισι Γουέμπ, αναπληρώτρια καθηγήτρια στο πανεπιστήμιο McGill του Καναδά και από τους επικεφαλής συντάκτες της μελέτης.

Οι επιστήμονες αξιοποίησαν αρχικά το διαστημικό τηλεσκόπιο Spitzer της NASA και το επίγειο τηλεσκόπιο CFHT (Canada-France-Hawaii Telescope), το οποίο βρίσκεται στη Χαβάη. Στη συνέχεια, με τη βοήθεια του διαστημικού τηλεσκοπίου Hubble, μπόρεσαν να μελετήσουν τις φυσικές ιδιότητες του γαλαξία.

**Η απόσταση του SrARCS1049+56 σημαίνει πως το φως του χρειάστηκε 9,8 δισεκατομμύρια χρόνια για να φθάσει στη Γη. Το σμήνος «φιλοξενεί» τουλάχιστον 28 γαλαξίες, έχοντας συνολική μάζα περίπου 400 τρισεκατομμύρια φορές τη μάζα του Ήλιου.**

Το αστρικό «εργοστάσιο» στο κέντρο του είναι ο φωτεινότερος γαλαξίας. Για να γίνει αντιληπτός η εντυπωσιακή ταχύτητα δημιουργίας νέων άστρων, αρκεί κανείς να λάβει υπόψη του πως στον Γαλαξία μας κάθε χρόνο σχηματίζονται το πολύ δύο αστέρες.

**«Τα δεδομένα από το Spitzer υποδείκνυαν μια πραγματικά έντονη δραστηριότητα στην «καρδιά» του σμήνους. Κάτι που παρατηρείται σπάνια, και δεν έχει συμβεί ποτέ άλλοτε σε ένα τόσο μακρινό σμήνος»**, σημειώνει ο Άνταμ Μούζιν από το πανεπιστήμιο του Κέιμπριτζ και μέλος της ομάδας.

Το τηλεσκόπιο Spitzer ανιχνεύει υπέρυθρη ακτινοβολία, επομένως μπορεί να εντοπίσει τη θερμότητα που εκπέμπουν περιοχές «γέννησης» νέων άστρων. Οι έρευνες που έγιναν στη συνέχεια με το Hubble, το οποίο ανιχνεύει ορατή ακτινοβολία, έδωσαν τη δυνατότητα να εξακριβωθεί το είδος της αστρικής «πρώτης ύλης».

**Έτσι, φαίνεται πως πρόσφατα ένας μικρότερος γαλαξίας συγχωνεύθηκε με το κοσμικό «εργοστάσιο», στο κέντρο του σμήνους, «δανειζοντας» τα αεριά του στον μεγαλύτερο αστέρα και πυροδοτώντας επομένως το φαινόμενο.**

Αυτό που τώρα απομένει ως ερωτηματικό για τους επιστήμονες, και το οποίο θα μπορέσουν να απαντήσουν επεκτείνοντας τις έρευνές τους, είναι κατά πόσο υπάρχουν αρκετοί ακόμη παρόμοιοι γαλαξίες που εμφανίζουν τόσο μεγάλο ρυθμό σχηματισμού άστρων ή η ανακάλυψή τους αποτελεί εξαίρεση, η οποία οφείλεται στο γεγονός ότι το συγκεκριμένο σμήνος ήρθε στη «ζωή» σε μια πρώιμη εποχή του σύμπαντος.

## Σημείωση 2

Η κοσμική οδοντόβουρτσα.

Στα χαμηλής συχνότητας ραδιοκύματα έχουμε ανακαλύψει τα λεγόμενα ράδιο-λείψανα (radiorelics). Πρόκειται για τεράστιες διάχυτες ράδιο-πηγές, μεγέθους εκατομμυρίων ετών φωτός, που βρίσκονται αποκλειστικά στις εξωτερικές περιοχές των γαλαξιακών σμηνών. Η μικρή επιφανειακή τους λαμπρότητα κάνει δύσκολη την ανακάλυψή τους. Από το φάσμα

τους συμπεραίνουμε ότι πρόκειται για σχετικιστικές εκπομπές στα ραδιοκύματα, που προέρχεται από σχετικιστικά ηλεκτρόνια σε μαγνητικά πεδία. Η προέλευση των ηλεκτρονίων, που κινούνται σχεδόν με την ταχύτητα του φωτός, και των μαγνητικών πεδίων μερικών  $\mu\text{Gauss}$  δεν έχει διευκρινιστεί. Μάλλον πρόκειται για τεράστια κρουστικά κύματα που παράγονται κατά την σύγκρουση γαλαξιών, όπου μπορεί να επιταχυνθούν τα σωματίδια. Αυτός ο μηχανισμός υπάρχει και στα υπολείμματα των σουπερνόβα.

Το μεγαλύτερο ράδιο- λείψανο είναι στο γαλαξιακό σμήνος RXJ0603.3+4214, με  $z=0,225$  και ονομάζεται λείψανο της οδοντόβουρτσας. Έχει πολύ ομαλό ίσιο σχήμα και εκτείνεται για 10 εκατομμύρια έτη φωτός. Με την συμβολομετρία LOFAR πετύχαμε την καλύτερη ανάλυσή του.

Αυτή μας επιτρέπει την αναλυτική μελέτη των συνθηκών επιτάχυνσης σε αραιό πλάσμα, που λαμβάνει χώρα στα γαλαξιακά σμήνη. Σε μικρότερα μήκη κύματος τα ράδιο- λείψανα εκπέμπουν πολύ λιγότερο. Με το LOFAR θα ανακαλύψουμε εκατοντάδες τέτοια αντικείμενα.

