

- Πως οι μάζες των γαλαξιών οριοθετούν τα θεωρητικά μοντέλα σχηματισμού γαλαξιών.
- Η δυναμική της ίδιας κίνησης της τοπικής ομάδας γαλαξιών
- Οι γνώσεις μας για τις δυναμικές και τις μάζες των γαλαξιών της τοπικής ομάδας ήταν περιορισμένες για πολύ καιρό από το γεγονός ότι μετρούσαμε μόνο ταχύτητες στην γραμμή θέασής μας. Αυτό επηρέαζε αρνητικά τα μοντέλα μας. Έπρεπε να μπορούμε να μετρήσουμε και τις ταχύτητες κάθετα στην γραμμή θέασης. Η κινήσεις αυτές όμως ήταν πολύ μικρές για να μετρηθούν. Την τελευταία δεκαετία, κυρίως χάρη στην γωνιακή ανάλυση του τηλεσκοπίου Hubble, μπορούμε να μετρήσουμε τις ίδιες κινήσεις στην τοπική μας ομάδα γαλαξιών.
- Η σημασία των ιδίων κινήσεων και η δυναμική της τοπικής ομάδας.
- Ο Γαλαξίας μας (MW) ανήκει στην τοπική ομάδα (LG). Οι κυρίαρχοι γαλαξίες της LG είναι ο δικός μας και αυτός της Ανδρομέδας (M31). Κάθε ένας από αυτούς έχει σημαντικούς συνοδούς, ο δικός μας τα Μαγγελανικά νέφη (LMC, SMC) και ο M31 τον M33. Οι MC και M31 έχουν επίσης τα δικά τους συστήματα νάνων γαλαξιών, πολύ μικρότερης μάζας από αυτούς. Γνωρίζουμε ότι το σύμπαν εξελίχτηκε ιεραρχικά, με τις μικρές δομές να συγχωνεύονται σε μεγάλες. Λόγω εγγύτητας, η τοπική ομάδα είναι το καλύτερο μέρος να μελετήσουμε τέτοιες διαδικασίες με λεπτομέρεια, όπως συμβαίνει την τελευταία δεκαετία. Για παράδειγμα, η σε εξέλιξη διαταραχή του σφαιροειδούς νάνου γαλαξία Sgrd Sph δημιούργησε ένα γιγαντιαίο ρεύμα αστεριών γύρω από τον Γαλαξία μας. Ανιχνεύτηκαν και άλλα παρόμοια ρεύματα, και ένα γιγάντιο γύρω από τον M31. Έτσι η τοπική ομάδα και οι 2 κυρίαρχοι γαλαξίες της αποτελούν σημεία αναφοράς για τον έλεγχο των θεωριών δημιουργίας γαλαξιών και των κοσμολογικών θεωριών.
- Για την κατανόηση της τοπικής ομάδας είναι απαραίτητο να μελετήσουμε τις δυναμικές των γαλαξιών και των αστεριών της. Η δυναμική περιέχει ένα αποτύπωμα των τοπικών συνθηκών και αντικατοπτρίζει την ακολουθία της γαλαξιακής εξέλιξης. Ακόμα, οι μετρήσεις των δυναμικών είναι απαραίτητες για τον προσδιορισμό του εύρους της σκοτεινής μάζας, αφού οι δυναμικές, οι δομές και οι μάζες των γαλαξιών αλληλεξαρτώνται μέσω των νόμων της βαρύτητας και της δυναμικής ισορροπίας.
- Σχεδόν ότι γνωρίζουμε για τις δυναμικές της τοπικής ομάδας, και των γαλαξιών στο σύμπαν γενικότερα, βασίζεται σε παρατηρήσεις ταχυτήτων της γραμμής θέασής μας. Αυτές οι παρατηρήσεις δείχνουν μόνο το ένα μέρος της κίνησης, υποχρεώνοντάς μας να κάνουμε πολλές παραδοχές. Αυτό περιορίζει την διορατικότητα που μπορούμε να κερδίσουμε, για παράδειγμα, από τον καλά γνωστό εκφυλισμό ανάμεσα σε μάζα και ανισοτροπία της διασποράς ταχύτητας. Η προσπάθειά μας είναι να έχουμε μια τρισδιάστατη εικόνα των ιδίων κινήσεων.
- Παρατηρησιακές προσεγγίσεις.
- Οι παρατηρήσεις σχετικά με την τοπική ομάδα είναι 2 ειδών. Οι σχετικές ίδιες κινήσεις και οι απόλυτες κινήσεις στον χώρο. Οι σχετικές υπολογίζονται πιο εύκολα, για παράδειγμα αν θέλουμε να μετρήσουμε την συνολική κινηματική ενός αστρικού

συστήματος. Για την τοπική ομάδα όμως πρέπει να γνωρίζουμε την απόλυτη δυναμική, μετρώντας την κίνηση των αστεριών του πεδίου σχετικά με αντικείμενα του υποβάθρου. Πιο πρόσφατες μελέτες επικεντρώνονται σε πεδία κεντραρισμένα σε ένα κβάζαρ υποβάθρου, που έχει το πλεονέκτημα να εμφανίζεται ως σημειακή πηγή, και μπορεί να μετρηθεί με τις ίδιες μεθόδους όπως τα αστέρια στο πεδίο. Όμως αυτό περιορίζεται σε μικρό αριθμό πεδίων. Τώρα πια μπορούμε να χρησιμοποιούμε γαλαξίες (μη σημειακές πηγές) ως πηγές αναφοράς, κάτι που είναι πολύ πιο πολύπλοκο. Επίσης πρέπει να γίνονται πολλοί έλεγχοι διάφορων παραμέτρων γιατί τα σφάλματα στον υπολογισμό των απόλυτων κινήσεων είναι συχνά.

- Ο πληθυσμός του Γαλαξία μας.
- Οι μελέτες της δυναμικής του δίσκου του Γαλαξία μας από τις ίδιες κινήσεις των γειτονικών αστεριών του Ηλίου ξεκίνησαν εδώ και ένα αιώνα. Τώρα έχουμε συμπεράσματα για τις δυναμικές των πιο μακρινών μερών του Γαλαξία μας.
- Τα σφαιρωτά σμήνη. Οι απόλυτες ίδιες κινήσεις πολλών σφαιρωτών έχουν χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό των τρισδιάστατων τροχιών τους, της δυναμικής ισορροπίας του αστρικού τους πληθυσμού ως ένα σύνολο, τις δυναμικές διαφορές ανάμεσα σε σμήνη της άλω και αυτά του δίσκου, την πιθανότητα της εξωγαλαξιακής προέλευσής τους, ή την σύνδεσή τους με παλιρροϊκά αστρικά εξωγαλαξιακά ρεύματα. Όμως οι αβεβαιότητες στον υπολογισμό των ταχυτήτων παραμένουν μεγάλες για να έχουμε οριστικά συμπεράσματα.
- Η Γαλαξιακή κοιλία. Μελετώντας την δυναμική της κοιλιάς, βρήκαμε σχεδόν ισότροπη διασπορά ταχύτητας. Μελέτες με το HST έδειξαν πιο σύνθετα κινηματικά ίχνη, όπως περιστροφή και γωνιακές (σε βάθος) διακυμάνσεις μέσα στην κοιλία. Αυτά μας βοηθάνε στην κατανόηση της κοιλιάς και της σύνδεσής της με την ράβδο.
- Η φτωχή σε μέταλλα άλω. Πάλι με το HST μετρήσαμε τις ίδιες κινήσεις των αστεριών της άλω. Ανιχνεύσαμε αστέρια της κυρίας ακολουθίας σε τυχαία πεδία, συνδυάζοντας τις ίδιες κινήσεις τους με πληροφορίες από το διάγραμμα χρώματος-λαμπρότητας. Μετρήσαμε τις ίδιες κινήσεις από 13 αστέρια σε απόσταση  $26 \pm 6$  kpc στο τοπικό συμπύκνωμα της άλως προς το Andromeda- Triangulum, και μας έδειξαν μια χονδρικά ισότροπη ελλειψοειδής ταχύτητα. Αυτή είναι πιο εφραπτόμενη από την ελλειψοειδής ταχύτητα των αστεριών της άλω κοντά στον Ήλιο, που είναι πολύ γωνιακά ανισότροπη. Αυτά τα αποτελέσματα είναι σύμφωνα με την υπόθεση ότι το παραπάνω συμπύκνωμα αποτελεί ένα κέλυφος στην άλω, μάλλον με προέλευση από μια πολύ παλαιά γαλαξιακή συγχώνευση.
- Άστρα με μεγάλες ταχύτητες. Οι δυναμικές αλληλεπιδράσεις κοντά στην κεντρική μαύρη τρύπα του Γαλαξία μας μπορούν να εκτινάξουν αστέρια με μεγάλες ταχύτητες. Τέτοια υπερ-ταχέα αστέρια έχουν εντοπιστεί στην άλω. Η ίδια κίνησή τους δείχνει ότι προέρχονται από το Γαλαξιακό κέντρο, ενώ η απόκλιση από καθαρά γωνιακή κίνηση μπορεί να μας καθορίσει το σχήμα της σκοτεινής άλως.
- Παλιρροϊκά ρεύματα. Η άλω του Γαλαξία μας περιέχει πολλά αστρικά ρεύματα, που αποτελούνται από το υλικό που συσώρευσε ο Γαλαξίας μας από σφαιρωτά σμήνη και νάνους δορυφόρους του. Αυτές οι ροές είναι σημαντικές για τον καθορισμό του σχήματος και της πυκνότητας της άλω, ειδικά αν έχουμε διαθέσιμες μετρήσεις για τις ίδιες κινήσεις μαζί με τις θέσεις τους στον ουρανό, τις αποστάσεις

τους και τις ταχύτητες στη γραμμή θέασης. Έχουμε καταφέρει να μετρήσουμε στην ροή Sgr (Τοξότη), που αποτελείται από υλικό που αφαιρέθηκε από τον SgrdSph, ροή που φτάνει σε έκταση τα 100 kpc. Μπορέσαμε να ξεχωρίσουμε κινηματικά τα αστέρια της ουράς και του μπροστινού τμήματος της ροής στο ίδιο πεδίο, από τις ίδιες κινήσεις τους. Οι ίδιες κινήσεις στο ρεύμα ταιριάζουν με το μοντέλο που θέλει την Γαλαξιακή σκοτεινή άλω να είναι ορθογώνια προσανατολισμένη προς τον Γαλαξιακό δίσκο.

- Δορυφόροι νάνοι γαλαξίες
- Οι ίδιες κινήσεις σχεδόν όλων των κλασικών dSph δορυφόρων του Γαλαξία μας έχουν μετρηθεί από το HST. Οι μετρήσεις αυτές μας δίνουν τις τροχιές τους. Αυτές μπορούν να μας δείξουν την προέλευσή τους, το ιστορικό αστρογέννησής τους, και την σχέση τους με άλλους δορυφόρους γαλαξίες. Για παράδειγμα, για πολύ καιρό είχαμε ενδείξεις ότι πολλοί δορυφόροι βρίσκονται σε ένα επίπεδο. Μετρώντας τις ίδιες κινήσεις είναι εφικτό να δούμε ότι τα διανύσματα της τροχιακής στροφορμής είναι χονδρικά κάθετα με αυτό το επίπεδο, όπως αναμένεται για μακροχρόνιους σχηματισμούς. Ακόμα, οι τροχιές των δορυφόρων μπορούν να μοντελοποιηθούν ως σύνολο υπό την παραδοχή της υδροστατικής ισορροπίας, ώστε να καθορίσουν το προφίλ της μάζας του Γαλαξία μας.
- Ο Leo I είναι από τους πιο ασυνήθιστους γαλαξίες- δορυφόρους μας, λόγω της μεγάλης απόστασής του από το Γαλαξιακό κέντρο (261 kpc) και της ταχείας απομάκρυνσης από τον Γαλαξία (168 km/s). Οι μετρήσεις της ίδιας κίνησής του περιλαμβάνουν μια σημαντική εφαιπόμενη ταχύτητα 101 km/s. Αυτό μας δείχνει ότι δεν βρίσκεται σε γωνιακή τροχιά μέσω αλληλεπίδρασης με άλλο δορυφόρο. Οι ολοκληρωμένες τροχιές του μας δείχνουν ότι μάλλον μπήκε σε τροχιά στον Γαλαξία μόλις πριν 2,3 δις έτη, με την πρώτη περικεντρική διάβαση μόλις πριν 1 δις έτη στα 91 kpc. Συγκριτικές μελέτες για τις ιδιότητες του Leo I και για αυτές της υπό- άλλως σε κοσμολογικές προσομοιώσεις αποδίδουν σημαντικές πληροφορίες για τον καθορισμό της Γαλαξιακής μάζας. Αν υποθέσουμε ότι ο Leo I είναι στα όρια του κλασικού δορυφόρου, η μάζα του Γαλαξία μας είναι 1,6 τρις ηλιακές. Για μικρότερη μάζα θα ήταν απίθανο να υπάρχει υπό- άλλω τόσο μακριά από το Γαλαξιακό κέντρο και με την μεγάλη ταχύτητα του Leo I. Πολλοί άλλοι δορυφόροι είναι υπό σχετική έρευνα. Ακόμα γίνονται μελέτες για τον καθορισμό των συνολικών κινήσεων των δορυφόρων. Αυτές θα μπορέσουν να σπάσουν την εκφυλιστική ανισοτροπία της σχέσης μάζας/ ταχύτητας. Αυτό μπορεί να μας βοηθήσει στην κατανόηση της φύσης της σκοτεινής ύλης.
- Τα Μαγγελανικά νέφη
- Από τις ίδιες κινήσεις τους συμπεραίνουμε ότι κινούνται πιο γρήγορα σχετικά με τον Γαλαξία μας από ότι πιστεύαμε βάσει των μοντέλων του Μαγγελανικού ρεύματος. Σε αυτά τα μοντέλα υποθέταμε ότι τα Μαγγελανικά νέφη είναι μακροχρόνιοι δορυφόροι σε σχεδόν κυκλικές τροχιές. Αντίθετα, οι υπολογισμοί των τροχιών βάσει των ιδίων κινήσεων που μετρήθηκαν από το HST δείχνουν ή πολύ πιο μεγάλης περιόδου έκκεντρες τροχιές, ή ότι βρίσκονται στην πρώτη διάβασή τους (πρώτη προσέγγιση στον Γαλαξία μας). Μόνο στην τελευταία περίπτωση τα 2 νέφη εμφανίζονται ως ζευγάρι, σύμφωνα με τις δομές τους και τα ιστορικά αστρογέννησής τους. Η πιθανότητα αυτή υποστηρίζεται και από τις κοσμολογικές

προσομοιώσεις, και το ότι είναι ακόμα πλούσια σε αέριο. Σε αυτήν την περίπτωση το Μαγγελανικό ρεύμα σχηματίστηκε καθαρά από την αλληλεπίδραση ανάμεσα στα νέφη, χωρίς βοήθεια από τις παλιρροϊκές δυνάμεις ή τις δυνάμεις πίεσης εμβολής (ram pressure) του Γαλαξία μας.

- Σχεδόν όλες οι γνώσεις μας για τις τροχιές των γαλαξιών βασίζονται στις μετρήσεις ταχυτήτων στην γραμμή θέασης. Μπορούμε να μετρήσουμε πια τις ίδιες κινήσεις για κάθε γαλαξία. Μετρώντας τα πεδία των τροχιών των ιδίων κινήσεων και τις τροχιακές καμπύλες του μεγάλου Μαγγελανικού νέφους με λεπτομέρεια βρήκαμε ότι τα αποτελέσματα συμφωνούν με ότι γνωρίζουμε από τις κινήσεις στην γραμμή θέασης μεμονωμένων αστεριών του.
- Το σύστημα της Ανδρομέδας
- Ο M31 ήταν ο πρώτος γαλαξίας που μετρήσαμε την ταχύτητά του στην γραμμή θέασης, και γνωρίζουμε εδώ και έναν αιώνα ότι μας πλησιάζει. Για να γνωρίσουμε την μελλοντική τροχιά και την εξέλιξη του M31, άρα και της τοπικής ομάδας, πρέπει να ξέρουμε τις ίδιες κινήσεις του. Τα αποτελέσματα των ιδίων κινήσεων συμφωνούν με αυτά στην γραμμή θέασης. Ο συνδυασμός των μετρήσεων μας δείχνει ότι το διάλυμα των ταχυτήτων του M31 συμφωνεί με γωνιακή του τροχιά (κατά μέτωπο μελλοντική σύγκρουση) με τον Γαλαξία μας.
- Ο M31 και ο δικός μας ως πρώτο-γαλαξίες άρχισαν να απομακρύνονται μεταξύ τους μετά την δημιουργία τους, αλλά υπερίσχυσε η βαρύτητα και τώρα προσεγγίζονται. Η συνδυασμένη μάζα τους είναι  $4,93 + 1,63$  τρις ηλιακές. Οι προσομοιώσεις μας δείχνουν ότι θα συγχωνευτούν σε  $5,86$  δις έτη. Το πρώτο περίκεντρο θα συμβεί σε  $3,87$  δις έτη, σε περικεντρική απόσταση  $31$  kpc. Μάλλον θα συγχωνευτούν πρώτα ο Γαλαξίας μας και ο M31 και μετά ο M33 που θα τεθεί σε τροχιά γύρω τους. Υπάρχουν λίγες πιθανότητες να συγχωνευτεί πρώτα ο M33 ή να εκτιναχτεί μακριά από το σύστημα, προσωρινά ή μόνιμα. Η συγχώνευση θα δημιουργήσει έναν ελλειπτικό γαλαξία. Ο Ήλιος θα βρεθεί σε μεγαλύτερη απόσταση από το νέο κέντρο του συγχωνευμένου γαλαξία, στα  $50$  kpc.
- **Κατασκευή μοντέλων της γαλαξιακής μάζας από τις αστρικές ροές στον Γαλαξία μας**
- Δύο από τα σημαντικότερα ερωτήματα στην αστροφυσική είναι το από τι αποτελείται το σύμπαν (οι αναλογίες μάζας και ενέργειας) και το πώς σχηματίστηκαν και εξελίσσονται οι γαλαξίες. Είναι αρκετά εντυπωσιακό πως γνωρίζουμε τις ιδιότητες μόλις του 5% της μάζας του σύμπαντος (βαρυονική μάζα), ενώ δεν γνωρίζουμε την φύση της κυρίαρχης σκοτεινής ύλης (χωρίς να επεκταθούμε στην σκοτεινή ενέργεια). Η σκοτεινή ύλη είναι πολύ σημαντική στην δυναμική των αστεριών και γαλαξιών, καθώς και στην δημιουργία και εξέλιξη των τελευταίων.
- Οι προσομοιώσεις της δημιουργίας της δομής του σύμπαντος πετυχαίνουν πολύ συγκεκριμένες προβλέψεις για την διασπορά της μάζας, το σχήμα και την εξέλιξη της σκοτεινής ύλης στον χρόνο (σκοτεινή ύλη γύρω από έναν γαλαξία). Αυτές οι προβλέψεις εξαρτώνται πολύ από την φύση της σκοτεινής ύλης. Για παράδειγμα, στην ψυχρή σκοτεινή ύλη (μοντέλο  $\Lambda$ CDM) οι άλως έχουν τριαξονικό σχήμα και

ακολουθούν συγκεκριμένα προφίλ πυκνότητας που ελαττώνεται με συγκεκριμένο ρυθμό από το γαλαξιακό κέντρο προς τα έξω. Επίσης περιέχουν χιλιάδες μικρούς δορυφόρους ή υπό-άλως σκοτεινής ύλης. Τα χαρακτηριστικά των γαλαξιών που βρίσκονται μέσα στην σκοτεινή ύλη, όπως η μάζα τους και η κλίμακα μεγέθους τους, εξαρτώνται επίσης μερικώς από την φύση της σκοτεινής ύλης. Αν τα συστήματα γαλαξιών σχηματιστούν σε ψυχρή σκοτεινή ύλη (κυρίαρχο σενάριο) έχουν μεγαλύτερη συγκέντρωση από ότι στην θερμή σκοτεινή ύλη. Ακόμα, πολλές από αυτές τις προβλέψεις πηγάζουν από προσομοιώσεις που δεν λαμβάνουν υπόψη την βαρυονική μάζα, που όμως κυριαρχεί στις κεντρικές περιοχές των αλεών (εσωτερικές γαλαξιακές περιοχές), με αποτέλεσμα να είναι ακριβέστερες για τις εξωτερικές γαλαξιακές περιοχές. Οι παλιρροϊκές ροές είναι ιδανικές για την επαλήθευση αυτών των κοσμολογικών προβλέψεων της διασποράς της σκοτεινής ύλης, όπως και εναλλακτικών θεωριών της βαρύτητας. Αυτό συμβαίνει επειδή τα άστρα των ροών ακολουθούν σχεδόν παράλληλες τροχιές που μας βοηθάνε στην χαρτογράφηση του βαρυτικού πεδίου.

- Για τον Γαλαξία μας, τέτοιες επαληθεύσεις είναι εφικτές με μεγάλη ακρίβεια. Τα αποτελέσματα όμως δεν είναι ακόμα ικανοποιητικά. Για παράδειγμα, η μάζα της άλως του Γαλαξία δεν μας είναι γνωστή (αβεβαιότητα 100%). Υπάρχουν μόνο ασθενής περιορισμοί (εύρους) για το προφίλ της πυκνότητας. Για το σχήμα της άλως δεν υπάρχει επικρατέστερη άποψη. Αυτό συμβαίνει γιατί είναι ικανοποιητικά γνωστά, με πληροφορίες για την θέση τους στον χώρο, μόλις 2 ρεύματα άστρων. Αυτό αναμένεται να αλλάξει με το δεδομένα από το τηλεσκόπιο Gaia.
- Το τηλεσκόπιο αυτό θα μας δώσει έναν κατάλογο με την δυναμική από 100 εκατομμύρια αστέρια του Γαλαξία μας. Θα ανακαλύψουμε εκατοντάδες νέες αστρικές ροές από διαταραγμένους δορυφόρους του Γαλαξία μας. Η δυναμική αυτών των ροών θα οδηγήσει στην ακριβή εκτίμηση της διασποράς της μάζας της σκοτεινής άλως.
- Ο καθορισμός της δυναμικής μάζας και οι κλιμακωτές σχέσεις στους γαλαξίες προγενέστερου τύπου (early type, ETG, οι <κόκκινοι> γαλαξίες).
- Αναφερόμαστε στην κατανόηση της κλασσικής δυναμικής κλιμακωτής σχέσης ανάμεσα στην σχετική λαμπρότητα, το μέγεθος και την κινηματική των γαλαξιών προγενέστερου τύπου. Με την χρήση ασφαλών καθορισμών των προφίλ γαλαξιακής μάζας από μοντέλα αστρικής δυναμικής προέκυψε μια απλή εικόνα, με τις κλιμακωτές σχέσεις να κυριαρχούνται από ισορροπία που συνοδεύεται από μια τάση στην αναλογία μάζας/ φωτός. Η τάση έχει να κάνει περισσότερο με τον συνδυασμό της ηλικίας, της μεταλλικότητας και της συνιστώσας αστρικής αρχικής μάζας (initial mass function). Αυτή αντικατοπτρίζει την διασπορά της (αστρικής) μάζας σε έναν νέο αστρικό πληθυσμό, που καθορίζει την θέση του πληθυσμού στο H/R και την εξέλιξή του (αναλογία μεγάλων- μικρών νεαρών αστεριών). Οι συστηματικές διακυμάνσεις ταιριάζουν με τις διασπορές ταχυτήτων σε έναν γαλαξία, που μας δείχνουν την αναλογία της γαλαξιακής μάζας που περιέχεται στην

κοιλιά του. Αυτό σημαίνει μια σύνδεση ανάμεσα στην ανάπτυξη της κοιλιάς και του περιορισμού της δημιουργίας αστέρων. Η σκοτεινή ύλη είναι ασήμαντη στην ακτίνα του μισού φωτός (half-light radius, η ακτίνα ενός γαλαξία στην οποία εκπέμπεται το μισό από το συνολικό φως του), όπου το συνολικό προφίλ μάζας είναι σχεδόν ισόθερμο.

- Οι δυναμικές κλιμακωτές σχέσεις των γαλαξιών προγενέστερου τύπου (Ελλειπτικοί E, φακοειδής S0) συσχετίζουν το μέγεθος, την λαμπρότητα και την αστρική κινηματική των γαλαξιών. Τα μεγέθη περιγράφονται από την ακτίνα μισού φωτός, ενώ η κινηματική κατατάσσεται γενικά από την διασπορά των αστρικών ταχυτήτων, που μας δείχνει την αναλογία της γαλαξιακής μάζας στην κοιλιά. Επειδή η λαμπρότητα και το μέγεθος εξαρτώνται από την απόσταση, αντίθετα με την κινηματική, παλαιότερα οι δυναμικές κλιμακωτές σχέσεις βοηθούσαν ώστε να καθοριστούν οι αποστάσεις των γαλαξιών. Η πολύ καλή κατανόηση της σχέσης της ερυθρολίσθησης με την απόσταση και οι τεχνικές που βασίζονται στα χαρακτηριστικά ενός γαλαξιακού πληθυσμού έχουν κάνει την μέτρηση αποστάσεων να μην είναι πια η πρώτη χρησιμότητα των δυναμικών κλιμακωτών σχέσεων. Τώρα τις χρησιμοποιούμε για την μελέτη της δημιουργίας των γαλαξιών. Αυτό συμβαίνει γιατί μας παρέχουν μια στατιστική περιγραφή για εύκολα μετρήσιμα χαρακτηριστικά των γαλαξιών ως αποτέλεσμα της παρόδου του χρόνου (ερυθρολίσθηση) και το γεγονός ότι αναμένουμε τους κλιμακωτούς παράγοντες να εξελιχθούν πολύ διαφορετικά, ανάλογα με τον μηχανισμό σχηματισμού των γαλαξιών.
- Κλασσικές κλιμακωτές σχέσεις.
- Η πρώτη που ανακάλυψαν οι αστρονόμοι ήταν ανάμεσα στην λαμπρότητα και την διασπορά αστρικής ταχύτητας. Υπήρχε μια σύνδεση της αναλογίας μάζας/ φωτός και γαλαξιακής λαμπρότητας. Μετά βρέθηκε και μια σχέση ανάμεσα στην γαλαξιακή επιφανειακή φωτεινότητα και το γαλαξιακό μέγεθος. Αυτό οδήγησε σε σχέση ανάμεσα στην ακτίνα του γαλαξία και την λαμπρότητα. Το χαρακτηριστικό αυτής της σχέσης είναι ότι δεν περιέχει κανέναν κινηματικό προσδιορισμό. Αυτές οι 2 σχέσεις ονομάστηκαν θεμελιώδες επίπεδο (fundamental plane, FP).
- Η διακύμανση της σχέσης μάζας/ λαμπρότητας (M/L) του αστρικού πληθυσμού αναγνωρίστηκε γρήγορα ως δυνητική πηγή για την παρέκκλιση του θεμελιώδους επιπέδου. Αυτό συνέβη επειδή οι συστηματικές αλλαγές του γαλαξιακού πληθυσμού ήταν ήδη γνωστές, με τους γαλαξίες να είναι πιο γερασμένοι και εμπλουτισμένοι σε μέταλλα όσο μεγαλύτερη μάζα έχουν. Αυτή η σχέση μπορεί να εξηγήσει μεγάλο μέρος της παρέκκλισης και διατάραξης του θεμελιώδους επιπέδου, με την παρουσία μεγαλύτερου M/L ως συνιστώσα της διασποράς αστρικής ταχύτητας. Τα προφίλ επιφανειακής φωτεινότητας είναι πιο συγκεντρωμένα με αυξανόμενη γαλαξιακή λαμπρότητα. Για συγκεκριμένη μάζα, ένα απότομο προφίλ σημαίνει μεγαλύτερη διασπορά ταχυτήτων στις κεντρικές περιοχές. Μια τρίτη αιτία διατάραξης του θεμελιώδους επιπέδου είναι το κλάσμα της σκοτεινής ύλης μέσα σε περιοχή που έχει μετρηθεί η κινηματική της. Η αναλογία της σκοτεινής ύλης αναμένεται να αυξάνεται συστηματικά με την αύξηση της μάζας. Αυτό σημαίνει διακυμάνσεις στην σχέση M/L. Βρέθηκε ότι ένα μέρος αυτής της παρέκκλισης οφείλεται σε διακυμάνσεις του αστρικού πληθυσμού.

- Η σχέση ανάμεσα την ολική M/L και την M/L του αστρικού πληθυσμού παρουσιάζει σημαντικές συστηματικές αποκλίσεις. Αυτές μπορούν να εξηγηθούν μόνο με διακυμάνσεις της σκοτεινής ύλης ή της συνιστώσας αρχικής μάζας (initial mass function, IMF) ανάμεσα στους γαλαξίες. Αποκλίσεις ανάμεσα στον ακριβή καθορισμό της αστρικής και της συνολικής γαλαξιακής μάζας επιβεβαιώθηκαν και με την χρήση βαρυτικών φακών. Για να διαχωρίσουμε την επίδραση της σκοτεινής ύλης ή/ και της συνιστώσας αρχικής μάζας ως αίτια της παρατηρήσιμης απόκλισης μάζας πρέπει να έχουμε δυναμικά μοντέλα που να ισχύουν για την ορατή και την σκοτεινή ύλη. Η σκοτεινή ύλη αποτελεί το μικρότερο μέρος της συνολικής μάζας μέχρι μια συγκεκριμένη γαλαξιακή ακτίνα, και το ολικό προφίλ μάζας παρουσιάζεται σχεδόν ισόθερμο και παράγει σχεδόν κυκλικές καμπύλες περιστροφής, όπως και παρατηρούμε στους σπειροειδείς γαλαξίες. Η μελέτη ATLAS έδειξε ότι η συστηματική απόκλιση στην παραπάνω σχέση δεν μπορεί να εξηγηθεί από τις διακυμάνσεις της αναλογίας της σκοτεινής ύλης. Άρα πρόκειται για διακυμάνσεις της συνιστώσας αρχικής αστρικής μάζας. Η συνιστώσα αστρικής μάζας επηρεάζει κατά πολύ την σχέση αστρικής μάζας/ λαμπρότητας, επειδή πρέπει να γνωρίζουμε την κατανομή των αστρικών μαζών (ένα αστέρι 100 ηλιακών μαζών έχει 1 εκατομμύριο ηλιακές λαμπρότητες!) Αυτό τεκμηριώθηκε για μάζες από αυτή του Γαλαξία μας ως τους πιο μεγάλης μάζας γαλαξίες και υποστηρίζεται από θεωρητικά μοντέλα.
- Η συνιστώσα αρχικής μάζας στους ελλειπτικούς γαλαξίες μεγάλης μάζας διαμορφώνεται από την κεντρική μαύρη τρύπα ή είναι βαριού πυθμένα (Bottom- Heavy, περισσότερα μικρά αστέρια)?
- Έχουμε ένα πλήθος από 9 μεγάλης μάζας ελλειπτικούς γαλαξίες με  $\sigma$  (διασπορά ταχύτητας) = 300 km/s. Σε αυτούς υπολογίσαμε την αστρική συνιστώσα αρχικής (στην δημιουργία τους) μάζας (initial mass function, IMF) βάσει της σύγκρισης της δυναμικής και της αστρικής μάζας τους με την σχέση δυναμικής αστρικής μάζας/ φωτός στο κέντρο κάθε γαλαξία. Έτσι μετρήσαμε την IMF σε γαλαξιακές περιοχές όπου η αστρική μάζα κυριαρχεί της σκοτεινής ύλης, κάτι που σημαίνει ότι η τελευταία δεν είχε επιρροή στις μετρήσεις μας. Στους 6 από τους γαλαξίες μας, αυτούς που είχαν εξαντλημένους, αποτελούμενους σχεδόν αποκλειστικά από αστέρια πυρήνες με ελάχιστο αέριο, βρήκαμε την IMF παρόμοια με αυτήν του Γαλαξία μας, όπου την μετράμε με άμεσο υπολογισμό των αστεριών του πεδίου. Οι 3 άλλοι (λιγότερο λαμπροί) power law γαλαξίες έχουν αστρική μάζα δύο φορές μεγαλύτερη από την αναμενόμενη με IMF του Γαλαξία μας. Αυτό σημαίνει ότι έχουν IMF με βαρύ πυθμένα (Bottom- Heavy, BH, περισσότερα μικρής μάζας αστέρια που λάμπουν λιγότερο) τύπου Salpeter ή διαταραχή από σκοτεινή ύλη που ανακατεύεται με την αστρική μέχρι βαθιά στους γαλαξιακούς πυρήνες (και οι 2 περιπτώσεις εμφανίζουν αυξημένη μάζα για συγκεκριμένη λαμπρότητα). Η Bottom-Light, BL (ελαφριού πυθμένα, με περισσότερα μεγάλης μάζας αστέρια) IMF των γαλαξιών μας με ενισχυμένο πυρήνα έρχεται σε αντίθεση με προηγούμενες μελέτες που προτείνουν μια συστηματική διακύμανση της IMF στην οποία οι

προγενέστερου τύπου (Early type, ET) γαλαξίες με  $\sigma = 300 \text{ km/s}$  έχουν IMF τύπου Salpeter ή IMF που είναι ακόμα περισσότερο κυριευμένη από νάνους αστέρες. Οι γαλαξίες ενισχυμένου πυρήνα (core galaxies) είναι σημαντικοί γιατί η μοναδική δομή των αστρικών τροχιών κοντά στους πυρήνες τους μας προσφέρει μια επιβεβαίωση των δυναμικών μοντέλων. Τα μοντέλα μας με BL IMF συμφωνούν με τις διασπορές των παραπάνω τροχιών από ανάλογα μοντέλα. Τα συμπεράσματά μας είναι ότι η IMF σε μεγάλης μάζας γαλαξίες ή κυμαίνεται σε μεγάλο εύρος με διαφορά σε γαλαξίες ενισχυμένου πυρήνα και ελλειπτικούς power law, ή ότι υπάρχουν συστηματικές διακυμάνσεις στην διασπορά της σκοτεινής ύλης στους γαλαξίες προγενέστερου τύπου.

- Οι αναλύσεις που προτείνουν την IMF να κυμαίνεται συστηματικά με την γαλαξιακή μάζα στους ελλειπτικούς γαλαξίες βασίζονται σε 2 προσεγγίσεις. Η μία είναι μια έμμεση μέθοδος, όπου οι αστρική μάζα του γαλαξία καθορίζεται από μοντέλα σύνθεσης του αστρικού πληθυσμού που στην πράξη δεν μας δίνουν την IMF, γιατί σε αυτήν την μέθοδο η IMF προσαρμόζεται μέχρι η σύνθεση του πληθυσμού μάζας/ φωτός συμφωνεί με ανεξάρτητες μετρήσεις μάζας, μέσω αστρικής δυναμικής και / ή μετρήσεις μέσω βαρυτικών φακών. Η δεύτερη, άμεση μέθοδος χρησιμοποιεί δομές του φάσματος του γαλαξία που έχουν ευαισθησία, π.χ., στην παρουσία νάνων αστεριών για τον καθορισμό της IMF. Και οι 2 προσεγγίσεις δίνουν τα ίδιο αποτέλεσμα. Αν και υπάρχει μεγάλη απόκλιση από γαλαξία σε γαλαξία, οι μικρότερης μάζας ET με  $\sigma = 200 \text{ km/s}$  φαίνεται να έχουν χονδρικά σύμφωνη IMF με αυτήν του Γαλαξία μας. Σε μεγαλύτερο  $\sigma$  ελλειπτικούς η αναλογία αστρικής μάζας/ φωτός είναι 2 φορές μεγαλύτερη από την αναμενόμενη. Οι άμεσες μελέτες μας δείχνουν ότι κυριαρχείται περισσότερο από νάνους αστέρες από ότι ο Γαλαξίας μας και περιγράφεται ως Salpeter IMF.
- Και οι δύο μέθοδοι επηρεάζονται από συστηματικά σφάλματα. Ενώ οι άμεσες μέθοδοι έχουν ως αδύναμο σημείο την μη κατανοητή αφθονία των ευαίσθητων στην IMF δομών του φάσματος, οι υπολογισμένες μέσω αστρικής δυναμικής και / ή μέσω βαρυτικών φακών μάζες μπορούν να καθορίσουν μόνο την συνολική βαρυτική μάζα ενός γαλαξία, δεν μπορούν με ακρίβεια να διαχωρίσουν την σκοτεινή από την βαρυτική ύλη. Οι έμμεσες μετρήσεις μέσω αστρικής δυναμικής βασίζονται σε κινηματικά μοντέλα που δεν αναλύουν την επιρροή της κεντρικής μαύρης τρύπας του γαλαξία σε αυτά. Η μελέτη μας επέτρεψε τον υπολογισμό της IMF στις πιο εσωτερικές περιοχές των γαλαξιών, υπολογίζοντας τις επιρροές από τις μαύρες τρύπες. Πλέον, εκεί δεν υπάρχει επίδραση της σκοτεινής ύλης.
- Βρήκαμε μια σημαντική διαφορά ανάμεσα στους ελλειπτικούς ενισχυμένου πυρήνα με τους power-law. Οι πρώτοι παρουσιάζουν IMF όμοια με αυτή του Γαλαξία μας ενώ οι δεύτεροι 2 φορές μεγαλύτερη από την αναμενόμενη. Ο σχηματισμός των <εξαντλημένων>, αποτελούμενων σχεδόν αποκλειστικά από αστέρια πυρήνων των ελλειπτικών γαλαξιών μεγάλης μάζας είναι μάλλον αποτέλεσμα από γαλαξιακή συγχώνευση χωρίς διαμελισμό. Οι δυο μαύρες τρύπες των προ γεννητόρων γαλαξιών σχηματίζουν ένα διπλό σύστημα, που εκτοξεύει αστέρια μακριά μέσω βαρυτικής σφενδόνης. Αυτή η διαδικασία αφήνει ένα μοναδικό αποτύπωμα στην δομή των αστρικών τροχιών των γαλαξιών αυτών. Μόνο τα αστέρια με κυκλικές τροχιές περνάνε αρκετά κοντά από τον πυρήνα ώστε να εκτιναχτούν, ενώ αυτά με



έκκεντρες τροχιές παραμένουν ανεπηρέαστα. Οι μεγαλύτερες αναλογίες μάζας/ φωτός που σημαίνουν BH IMF δεν προκύπτουν μόνο από τα κινηματικά δεδομένα, αλλά απαιτούν και μια δομή των τροχιών.

- Η μέσω ακτίνων X (υδροστατική μελέτη του καυτού αερίου) μέτρηση των προφίλ μάζας σε απομονωμένους, μεγάλης μάζας ελλειπτικούς γαλαξίες.
- Τα προφίλ μάζας των ελλειπτικών γαλαξιών είναι σημαντικά για τα μοντέλα σχηματισμού γαλαξιών και την κοσμολογία, μέσω της μέτρησης της συνολικής βαρυονικής μάζας και της σχέσης της συγκέντρωσης της άλω με την μάζα. Λεπτομερείς μετρήσεις ακτίνων X υπάρχουν μόνο για μερικούς ελλειπτικούς. Έχουμε ένα δείγμα 11 πλούσιων σε καυτό αέριο ελλειπτικών που μελετήσαμε στις ακτίνες X.
- Υδροστατική ισορροπία.
- Το βασικό εργαλείο για τον καθορισμό προφίλ μάζας από τις ακτίνες X είναι η προσέγγιση της υδροστατικής ισορροπίας (για ένα συγκεκριμένο ρευστό η υδροστατική ισορροπία είναι η ισορροπία ανάμεσα στην βαρύτητα και την θερμική πίεση). Σε ιδανικές συνθήκες, η μη θερμική κίνηση ενός αερίου μπορεί να μετρηθεί με την μετατόπιση Ντόπλερ και την πλάτυνση των ισχυρών γραμμών εκπομπής στις ακτίνες X. Αυτό θα είναι μελλοντικά εφικτό με τον δορυφόρο ASTRO- H. Τα κινηματικά συμπεράσματα με τα σημερινά δεδομένα δείχνουν ότι η κινήσεις των αερίων κοντά στους πυρήνες των ελλειπτικών είναι υπό- ηχητικής ταχύτητας. Αν και σήμερα δεν μπορούμε να βασιστούμε σε άμεσα συμπεράσματα κινηματικής μιας μη θερμικής κίνησης αερίου, μπορούμε να μετριάσουμε την επίδραση αυτών των κινήσεων στις μελέτες σχετικά με τα προφίλ μάζας. Για την προσέγγιση υδροστατικής ισορροπίας πρέπει να επικεντρωθούμε στους γαλαξίες που έχουν μεγάλη κανονικότητα στην μορφολογία τους. Αν υπάρχουν διαταραχές, όπως από την ανάδραση ενός AGN (ενεργού γαλαξιακού πυρήνα) πρέπει να αναλυθεί η διαταραχή σε μικρότερη χωρική κλίμακα από την περιοχή μελέτης. Μετά είναι σημαντικό να κυριαρχεί η εκπομπή ακτίνων X από το καυτό αέριο σε αυτήν του υποβάθρου. Πολλές φορές, σε ελλειπτικούς σε που βρίσκονται σε γαλαξιακά σμήνη, η εκπομπή ακτίνων X από μη διευκρινισμένες πηγές στο υπόβαθρο μας ξεγελάει και την μετράμε ως καυτό αέριο. Η τρίτη προϋπόθεση είναι να εξετάσουμε αν ένα λογικό υδροστατικό μοντέλο μπορεί να δώσει αποδεκτή περιγραφή των δεδομένων από τις ακτίνες X. Τέλος, η καλύτερη μέθοδος να μετρήσουμε την αξιοπιστία της υδροστατικής ισορροπίας είναι να συγκρίνουμε τις μάζες που προκύπτουν από άλλες μεθόδους όπως οι αστρικές δυναμικές και οι βαρυτικοί φακοί. Οι διαφορές που βρέθηκαν στην παραπάνω σύγκριση οφείλονται πάντα στις μη θερμικές κινήσεις (μια μελέτη έδειξε σημαντικές μετατοπίσεις που σημαίνουν 30% αναλογία της μη θερμικής πίεσης).
- Το δείγμα απομονωμένων ελλειπτικών γαλαξιών.
- Η απομόνωση ενός Γαλαξία εγγυάται ότι μελετάμε μια μόνο άλω σκοτεινής ύλης, με την προϋπόθεση ότι η αναλογία της εκπομπής ακτίνων X με την οπτική

- λαμπρότητα δεν είναι υπερβολική (αλλιώς θα είχαμε μια συμπαγή γαλαξιακή ομάδα). Στους περισσότερους απομονωμένους ελλειπτικούς η προσέγγιση υδροστατικής ισορροπίας αναμένεται να έχει πολύ ακρίβεια, επειδή το αέριο είχε τον χρόνο να ηρεμήσει μετά από τις γαλαξιακές συγχωνεύσεις (που προηγούνται της δημιουργίας ελλειπτικού γαλαξία). Αυξήσαμε το δείγμα μας σε 35 ελλειπτικούς σε ακτίνα 100 Mpc. Από αυτούς οι 11 φέρουν ουσιώδη υπό-άλω ακτίνων Χ.
- Ο NGC 720 μελετήθηκε σε διαφορετικές ακτίνες του. Είδαμε ότι σε μεγαλύτερη ακτίνα το υπόβαθρο ξεπερνάει την πηγή. Ακόμα όμως και στις πιο εξωτερικές περιοχές του μπορούμε να υπολογίσουμε την αναλογία του αερίου λόγω ανωμαλίας στο φάσμα κοντά στο 1 KeV (γραμμές Fe- L). Για τον υπολογισμό της μάζας εφαρμόσαμε στα μοντέλα πίεσης και θερμοκρασίας υδροστατικά μοντέλα. Προέκυψε ένα μοντέλο χωρίς καθόλου σκοτεινή ύλη.
  - Η υδροστατική ισορροπία μπορεί να εφαρμοστεί με πολλούς τρόπους. Για τους NGC 720 και NGC 1521 παρατηρήσαμε πολύ καλή συμφωνία με την μάζα από προηγούμενα δεδομένα (κάτω από 10 τρις ηλιακές μάζες συνολική μάζα για τον καθένα). Βρήκαμε και καλή συμφωνία της βαρυονικής με την συνολική μάζα, στις γνωστές κοσμικές τιμές. Το ενδιαφέρον είναι ότι η ελλείπουσα βαρυονική μάζα μπορεί να υπάρχει ως καυτό αέριο σε εξωτερική άλω, τουλάχιστον στους ελλειπτικούς (η βαρυονική που μετράμε συνήθως είναι μικρότερη από ότι στα μοντέλα). Ακόμα μας δείχνει ότι οι μη βαρυτική θέρμανση δεν απομακρύνει πολύ αέριο εκτός συνολικής γαλαξιακής ακτίνας. Επίσης έχουμε διαφορές στα αποτελέσματα ανάλογα το προφίλ σκοτεινής ύλης που χρησιμοποιούμε.
  - **Αναπαράσταση του ιστορικού της συνάθροισης της μάζας με τα προφίλ κινηματικής και φωτός (λαμπρότητας) του πυρήνα.**
  - Με τον συνδυασμό των εικόνων και της φασματοσκοπίας ολοκληρωμένου πεδίου μπορούμε να μελετήσουμε τις εσωτερικές δομές των γαλαξιών. Υπάρχουν φωτομετρικές και κινηματικές αποδείξεις για την ύπαρξη δίσκων στους ETG, που συνδέονται με αυτούς μέσω των αστρικών στροφορμών. Και οι ταχέως περιστρεφόμενοι με πλούσιο πυρήνα, και οι αργά περιστρεφόμενοι με λιγότερο λαμπρό πυρήνα μας δείχνουν καινούργιους δρόμους συνάθροισης μάζας.
  - Γνωρίζαμε ότι οι ETG (early type galaxies, γαλαξίες προγενέστερου τύπου) παρουσιάζουν διαφορετικές κινηματικές, από τους αμυδρότερους που υποστηρίζονται από την περιστροφή του γαλαξία μέχρι τους λαμπρότερους που κυριαρχούνται από την διασπορά. Μελετήσαμε ένα δείγμα 260 ETG που είναι λαμπρότεροι από -21,5 mag, σε ακτίνα 42Mpc.
  - Η κανονικότητα της κινηματικής και οι μορφές των ETG.
  - Οι ETG μπορούν να χωριστούν σε ταχείς και αργούς περιστροφείς, ένας διαχωρισμός που αρχικά ακολουθεί την λαμπρότητα (ή μάζα). Ο διαχωρισμός ανάμεσα στις 2 κατηγορίες καθορίζεται εμπειρικά από την στροφορμή υπολογισμένη σε μια ορισμένη ακτίνα και την παρατηρήσιμη ελλειπτικότητα. Αυτός ο εμπειρικός διαχωρισμός ακολουθείται από το συμπέρασμα ότι οι χάρτες ταχυτήτων των ETG παρουσιάζουν κανονικές ή μη κανονικές δομές ταχυτήτων. Η μέτρηση της κανονικότητας ενός χάρτη ταχυτήτων γίνεται με την κινηματική, μια

γενίκευση της μεθόδου της ισοφωτομετρίας σε μεγαλύτερη κλίμακα της διασποράς ταχυτήτων στην γραμμή θέασης. Είδαμε ότι περισσότεροι από το 80% των γαλαξιών έχουν κανονικούς χάρτες ταχυτήτων και το 86% είναι ταχέως περιστρεφόμενοι.

- Οι χάρτες ταχυτήτων μπορούν να μας παρέχουν αποδείξεις για την εντυπωσιακά κανονική δομή που βρήκαμε στην πλειοψηφία των ETG. Οι γαλαξίες με κανονικούς χάρτες ταχυτήτων είναι σχεδόν συμμετρικοί στον άξονα (μέχρι 5% ασυμμετρία), ενώ αυτοί με μη κανονικούς χάρτες ταχυτήτων (αργοί περιστροφείς) παρουσιάζουν μεγάλη ασυμμετρία (μέχρι 90 μοίρες), που σημαίνει ότι πολλοί από αυτούς είναι τριαξονικοί.
- Φωτομετρικές και κινητικές αποδείξεις της ύπαρξης δίσκων.
- Αποτελούν οι χάρτες κανονικών ταχυτήτων και οι συμμετρικές στους άξονες δομές στην πλειονότητα των ETG αποδείξεις κρυμμένων δίσκων? Ποια αναλογία του πληθυσμού των AGN μπορεί να θεωρηθεί ότι κυριαρχείται από δίσκο? Αναλύσαμε τις εικόνες σε μοντέλα με 2 συστατικά μέρη, την περιοχή ανάδρασης (κοιλιά) και την περιοχή εκθετικής δράσης, τον δίσκο. Εξαιρέσαμε τους γαλαξίες με ράβδο, γιατί έχουν πιο πολύπλοκη δομή. Τα αποτελέσματα δείχνουν μια γενική ανταπόκριση στον διαχωρισμό ανάμεσα σε ταχέως και αργά περιστρεφόμενους, και την ύπαρξη δίσκων, που κυριαρχούν στους ταχέως περιστρεφόμενους. Τα προφίλ φωτός μερικών αργών περιστρεφόμενων υποδηλώνουν και σε αυτούς την ύπαρξη δίσκου, αλλά μικρού και εμβαπτισμένου. Ένα εντυπωσιακό αποτέλεσμα της μελέτης είναι ότι η διασπορά της αναλογίας του φωτός του δίσκου στο ολικό γαλαξιακό φως στους ταχέως περιστρεφόμενους καλύπτει όλο το εύρος τους, από μικρές δομές δίσκων μέχρι αυτούς που έχουν υποβαθμισμένη κοιλιά και ισχυρά κυρίαρχο δίσκο. Και η κινηματική και η φωτομετρία έδειξαν τα παραπάνω αποτελέσματα.
- Στροφορμή και προφίλ φωτός του πυρήνα.
- Τα προφίλ επιφανειακής λαμπρότητας των πυρήνων των γαλαξιών μεγάλης μάζας παρουσιάζουν μια καμπύλωση ή ένα έλλειμμα λαμπρότητας σε μεγάλη ακτίνα. Οι γαλαξίες με τέτοιο προφίλ χαρακτηρίζονται ως γαλαξίες με πυρήνα (core) και αυτοί με σταθερό προφίλ ή ακόμα και αύξηση (υπέρβαση) του φωτός μακριά από τον πυρήνα ονομάζονται core less. Οι πρώτοι είναι μεγαλύτερης μάζας και αργοί περιστροφείς, και θέτουν το ερώτημα αν υπάρχει καθαρή σχέση της αργής περιστροφής με τον πυρήνα (core). Γενικά ισχύει αυτή η σχέση, αλλά υπάρχουν και εξαιρέσεις. Υπάρχει ένας πληθυσμός ταχέως περιστρεφόμενων με λαμπρούς πυρήνες, που βρίσκονται κοντά στο όριο αργών- ταχέως περιστρεφόμενων. Υπάρχουν και κάποιοι αργοί περιστροφείς χωρίς πυρήνα, και κάποιοι με άγνωστο πυρήνα. Άρα δεν έχουμε απόλυτη ταύτιση ανάμεσα σε πυρήνα και περιστροφή.
- Τι είναι οι χωρίς πυρήνα αργοί περιστροφείς και πως δημιουργούνται?
- Πως μπορεί να υπάρχει ισχυρός πυρήνας σε ταχέως περιστρεφόμενο ETG που κυριαρχείται από τον δίσκο? Αυτές οι περιπτώσεις γαλαξιών χρειάζονται διαφορετική οδό σχηματισμού. Αν οι πυρήνες δημιουργούνται από την συγχώνευση μαύρων τρυπών, ενώ οι <χωρίς πυρήνα> coreless (με υπέρβαση φωτός) παρουσιάζουν προφίλ φωτός που οφείλεται στην αστρογέννηση στον πυρήνα, είναι απαραίτητη μια ισορροπία στην χρονική διάρκεια της αστρογέννησης και αυτή της συγχώνευσης των μαύρων τρυπών, για να έχουμε τις 2 παραπάνω

εξαιρέσεις. Η δημιουργία πυρήνων στους ταχέως περιστρεφόμενους χρειάζεται περισσότερο χρόνο για την συγχώνευση των μαύρων τρυπών από την διάρκεια της αστρογέννησης, ενώ οι πυρήνες στους αργούς περιστροφείς χρειάζονται να τροφοδοτούνται από νέο υλικό μετά τη συγχώνευση των μαύρων τρυπών. Αυτό σημαίνει ότι οι αργοί περιστροφείς μπορούν να δημιουργηθούν σε συγχωνεύσεις διαμελισμού των γαλαξιών, ενώ οι ταχέως περιστρεφόμενοι σε συγχωνεύσεις μικρότερου διαμελισμού.

- Η σύνδεση ανάμεσα στις ιδιότητες του αστρικού πληθυσμού και σε κανονικότητα της IMF.
- Η σύνδεση των ιδιοτήτων του αστρικού πληθυσμού και της κανονικότητας της IMF (initial mass function, συνιστώσα αρχικής μάζας), έγινε με τη μέτρηση της αστρικής δυναμικής σε ένα δείγμα 260 ETG. Η κανονικότητα της IMF σημαίνει ικανότητα δημιουργίας μεγάλων αστεριών, δηλαδή την διασπορά αστρικής μάζας σε νεαρά αστρικά σμήνη, με συνέπεια την μεγαλύτερη αντιστοιχία αστρικού φωτός/αστρικής μάζας. Η κανονικότητα της IMF βρέθηκε να κυμαίνεται μη ομαλά με την ισχύ των γραμμών απορρόφησης που είναι ευαίσθητες στην ηλικία και στην μεταλλικότητα. Υπάρχουν μικρές αλλά μετρήσιμες τάσεις της IMF με την ηλικία και την αφθονία των στοιχείων. Υπολογίζοντας και την εξάρτηση των αστρικών παραμέτρων από την διασπορά ταχυτήτων αυτές οι τάσεις απομακρύνονται. Όμως η βαριά IMF (μεγάλα αστέρια) συνδέεται με μικρή μεταλλικότητα. Η σχέση αυτή βρέθηκε να είναι πιο ασθενής από ότι σε προηγούμενες μελέτες άμεσης ανίχνευσης αστεριών μικρής μάζας, δείχνοντας ότι υπάρχει διαφορά ανάλογα την προσέγγιση που χρησιμοποιούμε.
- Πολλά χρόνια γίνεται συζήτηση για μια γενική μορφή της IMF που να μας βοηθήσει στην κατανόηση των διαδικασιών αστρογέννησης και γενικά στην ερμηνεία του συνολικού φωτός που παρατηρούμε να προέρχεται από μη αναλυμένους αστρικούς πληθυσμούς σε γαλαξίες και αστρικά σμήνη. Από την μία, τα περιβάλλοντα (φυσικές συνθήκες) της αστρογέννησης και οι διαδικασίες εξέλιξης μπορεί να κυμαίνονται σημαντικά από γαλαξία σε γαλαξία, προτείνοντας να μην καταλήξουμε σε μια γενική IMF. Από την άλλη, μέχρι πρόσφατα είχαμε λίγες αποδείξεις που μπορούσαν να απομονώσουν αποτελεσματικά τις IMF σε αυτά τα μη αναλυμένα συστήματα. Πρόσφατα με ανεξάρτητες τεχνικές (βαρυτικοί φακοί, αστρική δυναμική, φασματοσκοπία) αποδείχτηκε η μη καθολικότητα μιας IMF. Εμείς χρησιμοποιήσαμε την IMF που υπολογίσαμε από τα μοντέλα αστρικής δυναμικής, για να δούμε αν αυτή παρουσιάζει συστηματικές διακυμάνσεις ανάλογα με τις παραμέτρους του αστρικού πληθυσμού σε έναν γαλαξία, που προκύπτουν από την ισχύ των γραμμών και τα μοντέλα αστρικών πληθυσμών. Υπολογίσαμε την κανονικότητα της μάζας της IMF συγκρίνοντάς την με την IMF Salpeter (αυτή που ισχύει για τον Γαλαξία μας από άμεσες μετρήσεις του αστρικού πληθυσμού του). Η παρουσία της σκοτεινής ύλης ερευνήθηκε με πολλές προσεγγίσεις ώστε η αναλογία μάζας/ φωτός να περιλαμβάνει μόνο βαρυονική ύλη και να αποτελεί καθαρή μέτρηση της δυναμικής των αστεριών. Η ηλικία και η μεταλλικότητα χρησιμοποιήθηκαν ως ελεύθεροι παράμετροι. Έτσι όλη η

πληροφορία του φάσματος χρησιμοποιήθηκε για να καθορίσουμε την διασπορά σε πιθανές ηλικίες και μεταλλικότητες, που μπορούν να μας δείξουν την διακύμανση στο ιστορικό σχηματισμού αστέρων ανάμεσα σε διαφορετικούς γαλαξίες. Τέλος, οι παράμετροι των αστρικών πληθυσμών μετρήθηκαν με την χρήση της ισχύος των γραμμών και τα αστρικά μοντέλα. Αυτά τα μοντέλα έχουν κυμαινόμενες αφθονίες στοιχείων, περιλαμβάνοντας αναλογίες στοιχείων α προς σίδηρο σε σχέση με την ηλικία προς μεταλλικότητα.

- Η τάση από την βαριά IMF μικρής μεταλλικότητας στην ελαφριά IMF μεγάλης μεταλλικότητας δεν είναι μονότονη, με αντικείμενα μικρής μεταλλικότητας να παρουσιάζουν σχετικά βαριές IMF. Οι παράμετροι του αστρικού πληθυσμού σχετίζονται θετικά με την διασπορά ταχυτήτων. Αυτό μπορεί να επηρεάσει την αντίληψή μας για το τι καθοδηγεί αρχικά τις διακυμάνσεις στην IMF.
- **Οι βαθμίδες αστρικού πληθυσμού του ATLAS**
- Οι βαθμίδες των αστρικών πληθυσμών της επισκόπησης ATLAS των γαλαξιών ETG αναφέρονται σε 260 τέτοιους γαλαξίες σε χώρο 42 Mpc. Με την χρήση φασμάτων εφαρμόσαμε μοντέλα αστρικού πληθυσμού ώστε να αντλήσουμε τιμές όπως η αστρική ηλικία, η μεταλλικότητα και η αφθονία σε στοιχεία α σε σχέση με την γαλαξιακή ακτίνα. Για όλους τους γαλαξίες βρήκαμε βασικές γραμμικές βαθμίδες πληθυσμού ανάλογα της ακτίνας στον γαλαξία. Βρήκαμε μια σχέση ανάμεσα στις θετικές βαθμίδες ηλικίας (νεαρότεροι γαλαξιακοί πυρήνες) και πιο απότομες αρνητικές βαθμίδες μεταλλικότητας. Οι πιο μεγάλης μάζας γαλαξίες παρουσιάζουν πιο ομαλά προφίλ. Ενώ δεν υπάρχει σαφής διαχωρισμός ανάμεσα σε ταχείς και αργούς περιστροφείς ή σημάδια επίδρασης από το περιβάλλον, ανιχνεύσαμε ένα σημαντικό μεγαλύτερο εύρος των βαθμίδων Z/H (απόλυτη μεταλλικότητα προς ηλικία).
- Η χωρική διασπορά των ιδιοτήτων των αστρικών πληθυσμών (ηλικία, μεταλλικότητα και πιο λεπτομερείς πληροφορίες για την χημική σύσταση) στους γαλαξίες περιέχει σημαντικά στοιχεία για τους μηχανισμούς σχηματισμού και εξέλιξης που διαμόρφωσαν αυτούς τους γαλαξίες. Η ολοκλήρωση των σεναρίων σχηματισμού και των σχετικών φυσικών διαδικασιών απαιτούν σημαντικές διαφορικές ακτινικές διασπορές. Έτσι έχουμε την ευκαιρία να χρησιμοποιήσουμε βαθμίδες αστρικού πληθυσμού που παρατηρήσαμε σε γαλαξίες ως μέθοδο διάκρισης ανάμεσα στα ποικίλα σενάρια σχηματισμού και εξέλιξης.
- Για τη κατανόηση της σχέσης των βαθμίδων αστρικού πληθυσμού με άλλες καθολικές παραμέτρους των γαλαξιών ερευνούμε την σχέση ανάμεσα σε βαθμίδες ηλικίας του πυρήνα και της μεταλλικότητας. Σε προηγούμενες μελέτες βρέθηκαν σημαντικές συσχετίσεις για τις βαθμίδες μεταλλικότητας όπως και τις βαθμίδες της ηλικίας, με την μεταλλικότητα του πυρήνα. Υπάρχει και μια αντίθετη συσχέτιση της βαθμίδας ηλικίας με την ηλικία στο γαλαξιακό κέντρο όπου οι νεότεροι γαλαξίες παρουσιάζουν πιο θετικές βαθμίδες. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί με το ιεραρχικό μοντέλο σχηματισμού γαλαξιών, στο οποίο οι συγχωνεύσεις και προσαυξήσεις σημαίνουν την έντονη αστρογέννηση ειδικά στις κεντρικές περιοχές των γαλαξιών. Η συσχέτιση είναι πιο εμφανής στα νεότερα συστήματα (με την πιο πρόσφατη

δημιουργία αστεριών) αλλά μόνο για γαλαξίες με ηλικίες βάσει λαμπρότητας μεγαλύτερες από 6 δις έτη. Μια πιθανή εξήγηση για τις βαθμίδες μεταλλικότητας έναντι της συσχέτισης μεταλλικότητας της κεντρικής περιοχής προέρχεται από το ίδιο σενάριο με το οποίο το εμπλουτισμένο αέριο οδηγεί σε σχηματισμό νεαρότερων, πλούσιων σε μέταλλα περιοχών. Το αέριο πέφτει προς το κέντρο, σημαίνοντας αστρογέννηση στην περιοχή. Αν είναι σωστό αυτό το σενάριο, πρέπει να αναμένουμε μια συσχέτιση ανάμεσα σε θετικές βαθμίδες ηλικίας και πιο απότομες (πιο αρνητικές) βαθμίδες μεταλλικότητας. Πράγματι αυτό το ανακαλύψαμε πρόσφατα.

- Υπάρχει μια γενική τάση πιο ρηχών βαθμίδων μεταλλικότητας με την αυξανόμενη μάζα. Βρέθηκαν σημαντικές διακυμάνσεις σε όλες τις γαλαξιακές μάζες που ίσως αντανακλούν διαφορετικές διαμορφώσεις από τις συγχωνεύσεις, και διαφορετικές αναλογίες αερίων από συγχωνεύσεις, αλλά υπάρχει μια αυξανούσα διακύμανση προς το άκρο της μικρότερης μάζας. Δεν υπάρχει φανερή σχέση με ταχείς και αργούς περιστροφείς, εκτός της γενικής τάσης της μάζας, στην οποία τα συστήματα με την μεγαλύτερη μάζα έχουν πιο ρηχές βαθμίδες και ταιριάζουν περισσότερο στην κατηγορία των αργών περιστροφών.
- Για γαλαξίες με σημάδια ακραίας αστρογέννησης η παραδοχή των γραμμικών βαθμίδων αστρικού πληθυσμού μπορεί να καταρρεύσει. Έτσι περιορίσαμε το δείγμα μας σε γαλαξίες με ηλικίες στα κέντρα τους μεγαλύτερες από 4 δις έτη (190 γαλαξίες). Με αυτόν τον περιορισμό έγιναν οι βασικές σχέσεις πιο πυκνές (η διακύμανση περιορίστηκε), ειδικά η σχέση των μεταλλικών βαθμίδων με την δυναμική μάζα έγινε σημαντικά πιο ξεκάθαρη.
- Υπάρχει ένα σημαντικά μεγαλύτερο εύρος βαθμίδων Z/H στους γαλαξίες μικρής μάζας, που σημαίνει ότι οι πλούσιες σε αέρια συγχωνεύσεις επικρατούν στις μικρές μάζες.
  
- Τα τελευταία στάδια αστρικής εξέλιξης σε μοντέλα πληθυσμών.
- Η έρευνα των τελευταίων φάσεων αστρικής εξέλιξης περιλαμβάνει από τα τοπικά αστρικά σμήνη ως μακρινούς γαλαξίες μεγάλης ερυθρολίσθησης. Επικεντρωθήκαμε στον ασυμπτωτικό κλάδο στο διάγραμμα H/R, όπου τα αστέρια παρουσιάζουν θερμικούς παλμούς. Τα μοντέλα αστρικής εξέλιξης αποτελούν το μαγικό εργαλείο για κατανόηση της φυσικής των γαλαξιών βάσει του φωτός που εκπέμπουν.
- Τα τελευταία στάδια αστρικής εξέλιξης περιλαμβάνουν την σχετικά ταχέα καύση υδρογόνου και ηλίου σε φλοιούς των αστέρων. Ακολουθεί η εξάντληση των πυρηνικών αυτών καυσίμων. Η εμφάνιση και διάρκεια αυτής της φάσης εξαρτάται από την αρχική αστρική μάζα. Τα αστέρια με μάζα μεγαλύτερη από 8 ηλιακές μάζες φτάνουν γρήγορα στην καύση του ηλίου στον πυρήνα, και μετά από μια σύντομη φάση ως ερυθροί ή μπλε υπεργίγαντες καταλήγουν σε έκρηξη σουπερνόβα II (καύση στον πυρήνα και σε φλοιούς των στοιχείων ως το σίδηρο). Στην κατηγορία της μεσαίας μάζας (2-8 ηλιακές) η εξέλιξη τα φέρνει στον ασυμπτωτικό κλάδο (πυρήνας από άνθρακα (εξάντληση του ηλίου χωρίς καύση του άνθρακα) και καύση ηλίου και υδρογόνου σε φλοιούς, AGB), ενώ τα πιο μικρής μάζας αστέρια φτάνουν τον κλάδο των κόκκινων γιγάντων (πυρήνας από ήλιο και μόνο καύση υδρογόνου

σε φλοιό, RGB) και τον οριζόντιο κλάδο (καύση ηλίου στον πυρήνα και υδρογόνου σε φλοιό, HB). Οι τελευταίες φάσεις της αστρικής εξέλιξης χαρακτηρίζονται από την μικρή διάρκειά τους (1 δις έτη στα 10 δις συνολικής ζωής αστέρα με μια ηλιακή μάζα) και την μεγάλη λαμπρότητα των αστέρων, ενώ οι επιφανειακές θερμοκρασίες των αστέρων φτάνουν σε ακραίες μεταβολές (από 4000K στον ασυμπτωτικό και στον κλάδο των γιγάντων ως 10000 στον οριζόντιο κλάδο). Όλα αυτά συνοδεύονται με απώλεια μάζας και αστάθειας της περιστροφής και του σχήματος των εξωτερικών στρωμάτων. Η απώλεια μάζας συνδέεται με τους παλμούς στα τελευταία στάδια της αστρικής εξέλιξης στο μεγαλύτερο μέρος του ασυμπτωτικού κλάδου (ασυμπτωτικός κλάδος θερμικών παλμών γιγάντων, TP- AGB) και στον οριζόντιο κλάδο και μας δυσκολεύει στην ακριβή κατανόηση των μηχανισμών της. Για να μπορέσουμε να υπολογίσουμε μοντέλα που να εφαρμόζονται στους γαλαξίες με κάποια βεβαιότητα πρέπει να αντιμετωπίσουμε τα κενά στην γνώση μας για τα παραπάνω. Χρησιμοποιούμε σχετικές παραμέτρους όπως η αποτελεσματικότητα της απώλειας μάζας και οι λεπτομέρειες της πυρηνικής καύσης, που μπορούν να βοηθήσουν στην κατασκευή θεωρητικών αστρικών μοντέλων. Μια παρόμοια προσέγγιση εφαρμόστηκε σε μοντέλα αστρικού πληθυσμού με την χρήση ολόκληρων σημών. Αν και τα σμήνη στον Γαλαξία μας και στα Μαγγελανικά νέφη παρουσιάζουν ποικιλία από κύριες ακολουθίες (σημείο εκτροπής κ.λπ.), η μελέτη τους είναι πολύ πιο απλή από τους ολόκληρους γαλαξίες. Το μειονέκτημα των σημών είναι ο σχετικά μικρός αριθμός αστεριών (10000- 1 εκατομμύριο) που δυσκολεύει την ανίχνευση αστέρων στα τελευταία στάδια της εξέλιξής τους έναντι των διακυμάνσεων της λαμπρότητάς τους. Οι γαλαξίες μεγάλης μάζας φιλοξενούν αστρικούς πληθυσμούς σχεδόν ίδιας ηλικίας και δεν επηρεάζονται από αυτές τις διακυμάνσεις. Αυτό το γεγονός αποτελεί το αίτιο να χρησιμοποιήσουμε γαλαξίες μεγάλης μάζας με μεγάλη ερυθρολίθση ως δείγματα για τον έλεγχο πολλών παραδοχών σχετικά με την διάρκεια και την κατανάλωση του πυρηνικού καυσίμου στον ασυμπτωτικό κλάδο θερμικών παλμών, που αποτελεί την πιο σύντομη (10 εκατομμύρια έτη) και λαμπρή φάση στο τέλος της αστρικής εξέλιξης.

- Αστέρια μεγάλης μάζας, κόκκινοι ή μπλε υπεργίγαντες?
- Εξαρτάται από παραδοχές για το μέγεθος της συναγωγής, την περιστροφή και την απώλεια μάζας. Πολλά μοντέλα περιλαμβάνουν αυτή την μεταγενέστερη φάση αστρικής εξέλιξης των αστεριών μεγάλης μάζας με διαφορετικές θερμοκρασίες, που αντικατοπτρίζεται σε διαφορετικό φάσμα αστρικών πληθυσμών. Η επίδραση της θερμοκρασίας στην φάση του υπεργίγαντα αποτελεί απόδειξη του μοντέλου που προβλέπει διάρκεια της φάσης μέχρι 10 εκατομμύρια έτη. Τα νεαρότερα σμήνη φτάνουν σε πιο κόκκινα χρώματα, που ταιριάζουν καλά με τα μοντέλα ερυθρών υπεργιγάντων.
- Η θερμοκρασία του κλάδου των κόκκινων γιγάντων.
- Τα διάφορα μοντέλα προβλέπουν διαφορετικές θερμοκρασίες για τον RGB. Οι πιο χαμηλές θερμοκρασίες σημαίνουν μικρότερη μεταλλικότητα ή νεαρότερη ηλικία. Η θερμοκρασία του RGB επίσης επηρεάζει την διασπορά της συνιστώσας αρχικής μάζας (IMF).
- Η μορφολογία του HB.

- Γνωρίζουμε ότι η φάση του οριζόντιου κλάδου έχει πολλές μορφές που σχετίζονται κυρίως με την μεταλλικότητα. Τα πολλά σχετικά μοντέλα μπορούν να πειραματιστούν με τις παρατηρήσεις. Η απώλεια μάζας στον οριζόντιο κλάδο επιτρέπει να αυξηθεί η θερμοκρασία χωρίς την επίδραση της ηλικίας στο μοντέλο. Έτσι έχουμε ένα εύρος μορφών οριζόντιων κλάδων για διαφορετικές μεταλλικότητες, από το μπλε ως το κόκκινο, για παρόμοιες ηλικίες (και αρχική αστρική μάζα). Τα μοντέλα αστρικών πληθυσμών ταιριάζουν καλύτερα με την μορφολογία των HB να έχει προσαρμοστεί στα παραπάνω, <παιίζοντας> με την αποτελεσματικότητα της απώλειας μάζας.
  - Η φάση ασυμπτωτικού κλάδου θερμικών παλμών γιγάντων TP-AGB και οι γαλαξίες μεγάλης ερυθρολίσθησης (z).
  - Η επίδραση της παραπάνω φάσης σε μοντέλα αστρικού πληθυσμού και γαλαξιών έχει συζητηθεί πολλές φορές. Αντίθετα με τα άλλα στάδια αστρικής εξέλιξης, υπάρχει μια ενδιαφέρουσα ασυμφωνία ανάμεσα στα αστρικά σμήνη και τους μεγάλης μάζας γαλαξίες για την φάση TP-AGB, όπου φαίνεται οι γαλαξίες να βιώνουν μεγάλη επίδραση από αυτήν την φάση αστρικής εξέλιξης.
- 
- **Οι αναλογίες της αφθονίας των στοιχείων στα μοντέλα αστρικών πληθυσμών**
  - Θα εξετάσουμε την επίδραση των κυμαινόμενων αναλογιών αφθονίας των χημικών στοιχείων στα μοντέλα αστρικού πληθυσμού επικεντρώνοντας στα στοιχεία α και στα στοιχεία της κορυφής του σιδήρου ((Fe) peak). Τα στοιχεία α είναι εκείνα που προέρχονται από σύντηξη στοιχείων με πυρήνες ηλίου (α) και τα στοιχεία της κορυφής του σιδήρου είναι τα γειτονικά του στον περιοδικό πίνακα.
  - Τα φάσματα των γαλαξιών και των σφαιρωτών σμηνών περιέχουν πολλές πληροφορίες για το αέριο και τις συνθήκες των αστρικών πληθυσμών. Ο γραμμές εκπομπής χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό της κινηματικής του αερίου, της δραστηριότητας σχηματισμού αστεριών και της συσσώρευσης ύλης στην κεντρική μαύρη τρύπα. Οι γραμμές απορρόφησης και τα συνεχή αστρικά φάσματα περιλαμβάνουν ιδιότητες των αστρικών πληθυσμών και μπορούν να χρησιμεύσουν στον καθορισμό της ηλικίας, της εποχής σχηματισμού και του ιστορικού σχηματισμού των αστεριών, και της αφθονίας των στοιχείων. Οι γραμμές απορρόφησης μετριούνται εύκολα και καλιμπράρονται σε ένα σύστημα, δεν επηρεάζονται πολύ από την σκόνη και επιτρέπουν την διάκριση της μεταλλικότητας σε αφθονία των στοιχείων, που μας βοηθάει να βάλουμε σε όρια το ιστορικό του χημικού εμπλουτισμού. Η συμπερίληψη των παραπάνω έχει βοηθήσει τα αστρικά μοντέλα να κάνουν ένα μεγάλο βήμα εμπρός στο πεδίο του αστρικού πληθυσμού και αποτελούν κλειδί για την πρόοδο στην ερμηνεία των γαλαξιακών δεδομένων που λαμβάνουμε.
  - Την δεκαετία του 1980 καθορίστηκαν οι δείκτες των οπτικών γραμμών απορρόφησης που χρησιμοποιούνται συνήθως στις αναλύσεις γραμμών απορρόφησης των παλαιών αστρικών πληθυσμών. Σχεδιάστηκαν για γαλαξίες



μεγάλης μάζας με σημαντική πλάτυνση των γραμμών από τυχαίες κινήσεις των αστεριών. Το πλεονέκτημα του μεγάλου εύρους συχνοτήτων είναι ότι αυξάνεται η αναλογία σήματος/ θορύβου, και οι μετρήσεις είναι αρκετά αυθεντικές. Το μειονέκτημα είναι ότι υπάρχει συσσώρευση μεγάλων αριθμών γραμμών απορρόφησης από διάφορα χημικά στοιχεία, που δεν μας επιτρέπει τον εύκολο διαχωρισμό τους. Ενώ την δεκαετία του 1990 δημιουργήθηκαν πολλά μοντέλα αστρικού πληθυσμού μέσω των αναλυτικών γαλαξιακών φασμάτων, είδαμε ότι οι απορροφήσεις του (Mg) και του (Fe) στους ETG (early type galaxies) δεν αντιπροσωπεύονται σε αυτά τα μοντέλα, κάτι που ξεπεράστηκε αργότερα. Δημιουργήθηκαν τα πρώτα μοντέλα αστρικού πληθυσμού με κυμαινόμενες αφθονίες των στοιχείων. Μας βοήθησε το καλιμπράρισμα με δεδομένα από σφαιρωτά σμήνη. Πρόσφατα νέα μοντέλα αύξησαν τον αριθμό των επιβεβαιωμένων χημικών στοιχείων. Σε αυτό βοήθησε η μεγαλύτερη φασματική ανάλυση, ιδίως σε γαλαξίες μεγάλης ερυθρολίθωσης, στους οποίους δεν έχουμε αστέρια καλιμπράρισμα. Τα μοντέλα πάλι καλιμπράρονται με σφαιρωτά σμήνη του Γαλαξία μας. Μας προσφέρουν ηλικίες, απόλυτες μεταλλικότητες και μερικές αφθονίες στοιχείων, ενώ άλλες παραμένουν αβέβαιες. Το θετικό είναι ότι τα διαφορετικά μοντέλα μας δίνουν τις ίδιες αφθονίες στοιχείων.

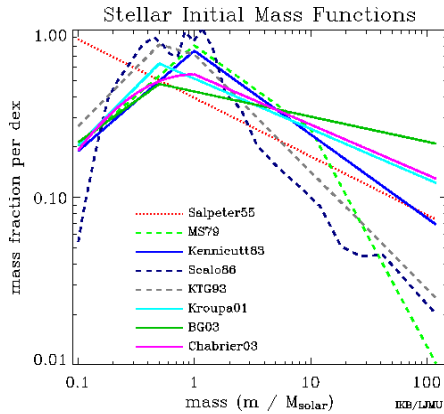
- Για πρώτη φορά υπολογίστηκαν τα σφάλματα των μοντέλων. Αυτό έγινε εφικτό χάρη στην χρήση του μεγέθους της ισχύς των γραμμών απορρόφησης σε συνδυασμό με συνιστώσες προσαρμογής. Οι τελευταίες επιτρέπουν την παρεμβολή στις αστρικές παραμέτρους περιοχών με αρκετό πληθυσμό, που αυξάνει την ακρίβεια των μοντέλων. Ακόμα, κάθε μορφή απορρόφησης αντιπροσωπεύεται από ανεξάρτητη συνιστώσα προσαρμογής. Τα σφάλματα των μοντέλων είναι γενικά πολύ μικρά και κάτω από το σφάλμα παρατήρησης για τα σφαιρωτά σμήνη και τους γαλαξίες με μεταλλικότητα όμοια του Ηλίου. Τα σφάλματα των μοντέλων αυξάνονται και κορυφώνονται σε ακραίες μεταλλικότητες, φτάνοντας τα σφάλματα παρατήρησης. Αυτό αποτελεί μια άμεση συνέπεια της εμπειρικής αστρικής βιβλιογραφίας, όπου το εύρος των παραμέτρων στις ακραίες τιμές της μεταλλικότητας αναπόφευκτα προέρχονται από λίγα δείγματα.
- Τα μοντέλα αστρικού πληθυσμού με ευαισθησία στην αναλογία των στοιχείων μας δίνουν την ικανότητα να καθορίσουμε τις αναλογίες αφθονίας για πολλά χημικά στοιχεία σε μη αναλυμένους αστρικούς πληθυσμούς. Αναπτύχθηκαν κωδικοί που ταιριάζουν τις αφθονίες των στοιχείων με τις πιο δυνατές γραμμές απορρόφησης όπως των (C), (N), (Mg), (Ca), (Ti), (Fe). Η αφθονία του οξυγόνου δεν μπορεί να καθοριστεί άμεσα από τα φάσματα απορρόφησης, αλλά μπορεί να υπολογιστεί μέσω του ρόλου του ως κυρίαρχο στοιχείο σχετικά με τα ελαφρύτερα τέτοια στοιχεία.
- Ένα σημαντικό αποτέλεσμα όλων αυτών των μελετών είναι ότι η αναλογία ελαφριών στοιχείων/ σίδηρο ((C/Fe), (N/Fe), (O/Fe), (Mg/Fe), (Si/Fe)) αυξάνεται με την διασπορά ταχυτήτων και την μάζα ενός γαλαξία, φτάνοντας σε σημαντικές υπερ- ηλιακές αναλογίες στους μεγάλης μάζας γαλαξίες. Τα βαρύτερα του ασβεστίου και του (Ti) στοιχεία δεν ακολουθούν αυτήν την τάση. Η (Ca/Fe) είναι κοντά σε αυτήν του Ηλίου σε όλες τις γαλαξιακές μάζες με μια μικρή αύξηση της αφθονίας του (Ca) και του (Ti) στους γαλαξίες μεγάλης μάζας, επειδή αυτά τα

στοιχεία παράγονται κυρίως κατά τις εκρήξεις σουπερνόβα Ia. Όμως το (Ti) παρουσιάζεται ελαττωμένο σχετικά με το (Ca) στους γαλαξίες μεγάλης μάζας, κάτι αντίθετο με την παραπάνω θεωρία. Αυτό μπορεί να έχει να κάνει με την ευαισθησία του οπτικού φάσματος στο (Ti).

- Τα αντικείμενα με υπέρβαση της γραμμής NaD και ο ρόλος τους στην συνιστώσα αρχικής μάζας (initial mass function, IMF).
- Θεωρούμε πιθανή μια ανάμειξη της γραμμής NaI 8200A στις IMF βαριού πυθμένα (bottom heavy, με πολλούς νάνους αστέρες στα νεαρά σμήνη) των λαμπρών ελλειπτικών γαλαξιών. Χρησιμοποιήσαμε την καλύτερα μετρήσιμη γραμμή NaD 5900A. Ένα σημαντικό μέρος των γαλαξιών (10%) προγενέστερου και μεταγενέστερου τύπου (early-late type) παρουσιάζουν ισχυρές γραμμές NaD.
- Το φαινομενικά βαρετό φάσμα των ελλειπτικών γαλαξιών περιέχει πολλές πληροφορίες για το ιστορικό σχηματισμού τους. Η γραμμή NaD έγινε ενδιαφέρουσα όταν διαπιστώθηκε ότι η ισχύ της είναι μεγαλύτερη στους λαμπρούς ελλειπτικούς από ότι αναμένουμε για <κανονικούς> αστρικούς πληθυσμούς. Και η γραμμή NaI 8200A στο κοντινό υπέρυθρο παρουσιάζεται ενισχυμένη στους λαμπρούς ελλειπτικούς, και η ισχύ της εξηγείται αν η κοιλιά του αστρικού πληθυσμού έχει ακραία bottom heavy IMF.
- Η IMF είναι μια από τις μυστήριες έννοιες όπως οι μαύρες τρύπες, η σκοτεινή ύλη κ.λπ. Όποτε δεν μπορούμε να εξηγήσουμε κάτι καταφεύγουμε σε μια από αυτές τις έννοιες, όμως σαν τελευταία επιλογή. Αυτό γιατί αν και η ύπαρξή τους δεν αμφισβητείται πια, η επίδρασή τους δεν έχει κατανοηθεί καλά.
- Η γραμμή NaD 5900A είναι πολύ πιο δυνατή από την Na 8200A και εύκολα μετρήσιμη επειδή βρίσκεται στο οπτικό φάσμα. Μια μεγάλη φασματοσκοπική επισκόπηση όπως η SDSS μας παρέχει την ισχύ της γραμμής για εκατομμύρια γαλαξίες. Έτσι ελέγξαμε αν τα ίδια μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν για να ταιριάξουν τις NaI 8200 στους λαμπρούς ελλειπτικούς μπορούν να αντιστοιχίσουν τις NaD 5900 σε αυτούς.
- Τα αντικείμενα υπέρβασης της NaD (NaD excess objects, NEOs), είναι τα αντικείμενα με εντονότερη την γραμμή NaD από ότι προβλέπουν τα μοντέλα. Βρήκαμε ότι πολλοί γαλαξίες της επισκόπησης δείχνουν ενισχυμένες γραμμές NaD 5900. Αυτούς τους 1603 γαλαξίες τους ονομάσαμε NEOs και κατηγοριοποιήσαμε τους 963 σε 553 προγενέστερου και 410 σε μεταγενέστερου τύπου.
- Οι NEOs μεταγενέστερου τύπου (LT). Οι περισσότεροι από αυτούς παρουσιάζουν δραστηριότητα αστρογέννησης και περιέχουν πολύ σκόνη. Η ισχύς της γραμμής NaD τους είναι υπερβολική ώστε να προέρχεται από αστρικές πηγές και οφείλεται σε μεσοαστρικές πηγές.
- Οι NEOs προγενέστερου τύπου (ET). Οι μορφολογικά ιδιόρρυθμοι NEOs. Συχνά παρουσιάζουν δομές σχετικές με συγχωνεύσεις ή γραμμές σκόνης. Εμφανίζονται πιο επίπεδοι και σκονισμένοι, κάτι που παραπέμπει σε παρουσία δίσκου. Περιλαμβάνουν μεγάλο εύρος αστρικής μάζας χωρίς ξεκάθαρη προτίμηση μάζας. Από την σκόνη συμπεραίνουμε ότι παρουσιάζουν αστρογέννηση με ανάλογες

γραμμές εκπομπής πάνω από τον μέσο όρο του δείγματος. Οι ηλικίες τους με βάση την λαμπρότητά τους (γραμμές Balmer) είναι πολύ πιο νεαρές (3 δις έτη) από το δείγμα (10 δις έτη). Όπως στους μεταγενέστερου τύπου NEOs, η ισχύς της γραμμής NaD ξεπερνάει το όριο των μοντέλων αστρικού πληθυσμού. Ουσιαστικά μοιάζουν με τους μεταγενέστερου τύπου NEOs.

- Οι μορφολογικά ομαλοί NEOs προγενέστερου τύπου. Είναι κανονικοί σε σχέση με όλο το δείγμα χωρίς ιδιορρυθμίες στην μορφολογία τους. Φαίνονται σφαιρικοί. Όσο μεγαλύτερη μάζα έχουν, τόσο πιο ισχυρή είναι η γραμμή απορρόφησης NaD. Μόνο ένα 10% τους παρουσιάζει γραμμές εκπομπής, αλλά και αυτή βασικά δεν προέρχεται από δραστηριότητα δημιουργίας άστρων. Επίσης είναι πιο κόκκινοι. Οι γραμμές απορρόφησης μας δείχνουν υπερ-ηλιακές τιμές στα μέταλλα και στα στοιχεία α. Οι ηλικίες τους είναι οι μέσες ως μεγάλες ηλικίες του δείγματος. Δεν μετρήθηκαν σημαντικές μετατοπίσεις Ντόπλερ στις γραμμές NaD, που σημαίνει ότι δεν έχουμε σχετικές εισροές ή εκροές ύλης. Παρουσιάζουν τυπικά παλιό αστρικό πληθυσμό. Αυτό σημαίνει ότι η ισχύ των γραμμών του (Na) μπορεί να έχει αστρική προέλευση. Είναι ενισχυμένοι σε (Fe) και στοιχεία α, αλλά αυτό δεν αρκεί για την ισχύ της NaD που μετράμε σε αυτούς. Η χρήση του bottom heavy IMF μας βοηθάει εδώ, ενισχύοντας ελάχιστα την ισχύ της γραμμής.
- Δεν υπάρχει αμφιβολία ότι η ισχύ των γραμμών του Νατρίου περιέχει σημαντικές πληροφορίες για την IMF και άλλες λεπτομέρειες της διαδικασίας σχηματισμού των γαλαξιών, αλλά είναι αμφίβολο αν αποτελούν ένδειξη ακραίων bottom heavy IMF.



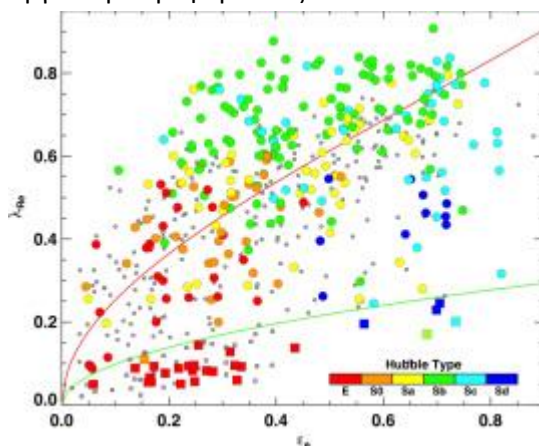
- 
- Κλιμακωτοί νόμοι για τις άλως σκοτεινής ύλης σε μεταγενέστερου τύπου (late type) και νάνους σφαιροειδείς γαλαξίες.
- Οι άλως σκοτεινής ύλης (DM) των γαλαξιών τύπου Sc-Im ικανοποιούν νόμους κλιμάκωσης, ανάλογους με τις σχέσεις βασικού επιπέδου των ελλειπτικών γαλαξιών. Οι άλως στους λιγότερο λαμπρούς γαλαξίες έχουν μικρότερη διάμετρο, μεγαλύτερες πυκνότητες και χαμηλότερες διασπορές ταχυτήτων ( $\sigma$ ) στα κέντρα τους. Αν οι σφαιροειδείς νάνοι (dSph) και οι ανώμαλοι νάνοι τύπου Μαγγελανικών

νεφών (dlm) βρίσκονται στην παρέκταση αυτής της σχέσης, τότε μπορούμε να εκτιμήσουμε την απώλεια βαρυονικής μάζας τους σχετικά με αυτήν των Sc- Im γαλαξίες. Βρήκαμε ότι αν δεν υπήρχε αυξημένη απώλεια βαρυονικής μάζας σχετικά με τους Sc-Im γαλαξίες, οι τυπικοί γαλαξίες dSph και dIm θα ήταν λαμπρότεροι κατά -4 και -3,5 mag αντίστοιχα. Αντίθετα, οι γαλαξίες αυτοί απώλεσαν βαρυονική αέρια μάζα που θα μπορούσε να είχε δημιουργήσει αστέρια. Επίσης, οι dSph και οι dIm έχουν μεγαλύτερης μάζας άλως DM από ότι νομίζαμε, με  $\sigma = 30$  km/s και ταχύτητες κυκλικής τροχιάς 42 km/s. Η σύγκριση των παραμέτρων της DM και της ορατής ύλης επιβεβαιώνει ότι οι dSph και dIm γαλαξίες με λαμπρότητα  $> -18$  σχηματίζουν μια ακολουθία ελάττωσης της αναλογίας της βαρυονικής ύλης έναντι της σκοτεινής που υπάρχει σε μικρότερους νάνους. Είδαμε ότι η συνεισφορά της βαρυονικής στην ύλη σχεδόν μηδενίζεται σε ταχύτητες κυκλικής τροχιάς  $< 42$  km/s. Πρέπει να υπάρχει μεγάλος πληθυσμός αλεών σκοτεινής ύλης που δεν έχει ανακαλυφτεί. Αυτό βοηθάει να λύσουμε το πρόβλημα ότι το φάσμα αρχικής διακύμανσης (initial fluctuation spectrum) της ψυχρής σκοτεινής ύλης προβλέπει περισσότερους νάνους γαλαξίες από όσους παρατηρούμε.

- Επικεντρωθήκαμε σε γαλαξίες που περιέχουν μόνο 2 κύρια μέρη, έναν βαρυονικό δίσκο ή κυρίως σώμα (κοιλιά) και την άλω DM. Οι συσχετίσεις των παραμέτρων των γαλαξιών Sph είναι συνεχείς με τους δίσκους των S0 γαλαξιών, αλλά όχι με τις κοιλίες τους. Στην ουσία οι Sph είναι S0 χωρίς κοιλίες. Ακόμα, οι Sph και οι S+ Im γαλαξίες έχουν παρόμοια δομή σε κάθε λαμπρότητα βαρυονικής μάζας ( $M_V$ ). Η ενεργή λαμπρότητα μειώνεται δραματικά σε  $M_V > -18$ . Οι άλως DM των γαλαξιών Sc-Im ικανοποιούν τους κλιμακωτούς νόμους, οι οποίοι θέτουν νέα όρια στην δημιουργία των γαλαξιών. Για παράδειγμα, η πυκνότητα των αλεών ( $\rho$ ) εξαρτάται από την ερυθρολίση κατά την κατάρρευση της εσωτερικής άλω σε γαλαξία. Η ( $\rho$ ) αυξάνεται προς τις μικρότερες λαμπρότητες επειδή οι εσωτερικές άλως στους πιο αμυδρούς γαλαξίες κατέρρευσαν νωρίτερα. Οι σχέσεις της DM δείχνουν ότι οι νάνοι γαλαξίες δημιουργήθηκαν νωρίτερα από τους γιγάντιους σπειροειδείς. Οι διορθώσεις της βαρυονικής συμπίεσης από την DM κάνει την αρχέγονη ( $\rho$ ) μικρότερη για τους γιγάντιους γαλαξίες. Οι μικρότεροι νάνοι έχουν μικρότερη αναλογία αστρικής/ σκοτεινής ύλης. Αυτό συσχετίζεται μάλλον με απώλεια βαρυονικής ύλης (από συσσωρεύσεις των μεγαλύτερων γαλαξιών).
- Σύγκριση των κλιμακωτών σχέσεων για ορατή και σκοτεινή ύλη.
- Οι γαλαξίες S+Im+Sph με  $M_V > -18$  σχηματίζουν μια διαδοχή ελάττωσης της αναλογίας πυκνότητας βαρυονικής ύλης /DM όσο μειώνεται η λαμπρότητα. Προτείνουμε ότι σχηματίζουν μια διαδοχή ελάττωσης βαρυονικής συγκράτησης (μέσω ανέμων από σουπερνόβα) ή ελάττωσης βαρυονικής κυριαρχίας (μετά τον κοσμικό επαναϊονισμό), στους μικρότερους γαλαξίες αυτών των τύπων. Για γαλαξίες με σημερινή  $M_V = -10 \pm 3$ , η βαρυονική εξάλειψη υπολογίζεται βάσει σχετικών πινάκων. Αυτοί οι νάνοι είναι σχεδόν σκοτεινοί, μάλλον επειδή έχασαν περισσότερη βαρυονική μάζα από ότι οι Sc- Im. Στους dIm μερική βαρυονική μάζα είναι ακόμα στην μορφή ψυχρού αερίου, αλλά αυτή είναι ελάχιστη. Ουσιαστικά η λαμπρότητα είναι ανεξάρτητη από την πυκνότητα της DM. Οι κοιλίες και οι ελλειπτικοί γαλαξίες έχουν μεγαλύτερη αναλογία βαρυονικής ύλης από σκοτεινή

- ύλη, αυξανόμενη σε μικρές λαμπρότητες. Σχηματίζουν μια διαδοχή αυξανόμενης διάλυσης στον σχηματισμό μικρότερων γαλαξιών.
- Το πιο συναρπαστικό αποτέλεσμα της μελέτης είναι ότι η αποδόμηση της καμπύλης περιστροφής αποκαλύπτει μια σταθερή, γραμμική σχέση ανάμεσα στην μέγιστη ταχύτητα περιστροφής του βαρυονικού δίσκου και της εξωτερικής κυκλικής ταχύτητας μερών στην DM άλω. Είναι εκπληκτικό ότι δείχνει μέγιστη ταχύτητα περιστροφής =0 σε εξωτερική κυκλική ταχύτητα >0. Αυτό σημαίνει ότι η βαρυονική ύλη γίνεται ασήμαντη σε εξωτερική κυκλική ταχύτητα  $42 \pm 4$  km/s. Αυτή η αναχαιτίση της μέγιστης ταχύτητας περιστροφής =0 συμφωνεί πολύ καλά με την τυπική διασπορά ταχύτητας ( $\sigma$ ) της άλως. Οι μικρότεροι γαλαξίες είναι αμυδροί ή σκοτεινοί. Για παράδειγμα, οι 2 πιο αμυδροί γαλαξίες του δείγματός μας, Segue 1 και Coma έχουν μέγιστες ταχύτητες περιστροφής στα 16 km/s.
  - Υπάρχει μεγάλος πληθυσμός σκοτεινών γαλαξιών? Από τα παραπάνω αποτελέσματα συμπεραίνουμε ότι το εύρος περιεχομένου σε ορατή ύλη σε ( $\sigma$ )= 30 km/s σε άλως DM είναι μεγάλο. Αυτοί με την περισσότερη βαρυονική ύλη περιστρέφονται αρκετά ώστε να επιτρέψουν την αποκλιμάκωση της καμπύλης περιστροφής. Αυτοί με την λιγότερη βαρυονική ύλη δύσκολα ανιχνεύονται. Πρέπει να διατηρήσουν το 1% της βαρυονικής ύλης τους ώστε να είναι ανιχνεύσιμοι μετά από 14 σχεδόν δις έτη. Ακόμα, όσο η λαμπρότητα μειώνεται στους μόλις ανιχνεύσιμους γαλαξίες, τόσο αυτοί οι νάνοι είναι πολύ περισσότεροι από αυτούς που οριακά κυριαρχούνται από σκοτεινή ύλη. Και η διαδικασία εξάλειψης της βαρυονικής ύλης είναι πολύ πιο αποτελεσματική στους μικρούς γαλαξίες (μικρότερη ταχύτητα διαφυγής). Όλα αυτά συνηγορούν στο ότι πρέπει να υπάρχει μεγάλος πληθυσμός αντικειμένων που είναι πολύ σκοτεινά για να τα ανακαλύψουμε με τα σημερινά μέσα. Αυτό λύνει το πρόβλημα ότι αυτά τα αντικείμενα προβλέπονται από την θεωρία της ψυχρής σκοτεινής ύλης αλλά δεν τα παρατηρούμε στη τοπική γαλαξιακή ομάδα.
  - Οι στροφορμές στην ακολουθία Hubble (γαλαξιακή κατάταξη) από την επισκόπηση CALIFA
  - Ερευνήσαμε τις αστρικές στροφορμές σε γαλαξίες που έχουν καταταγεί στην ακολουθία του Hubble. Η διασπορά των ελλειπτικών και φακοειδών γαλαξιών στο διάγραμμα της CALIFA συμφωνεί με την επισκόπηση ATLAS. Τα δεδομένα μας δείχνουν όμως ότι οι τοποθετήσεις των σπειροειδών γαλαξιών στο διάγραμμα της CALIFA διαφέρουν σημαντικά. Βρήκαμε 2 οικογένειες σπειροειδών με ξεχωριστές ιδιότητες. Α) σπειροειδείς γαλαξίες με πολύ μεγαλύτερη αστρική στροφορμή ( $\lambda$ ) από αυτήν στους ελλειπτικούς και φακοειδείς, και β) σπειροειδείς μικρής μάζας με ( $\lambda$ ) πολύ μικρότερη από την φαινόμενη ομαλότητά τους. Οι δύο αυτές οικογένειες μας δείχνουν ότι 1) η αποδόμηση (fading) των γαλαξιών δεν αρκεί από μόνη της για την μετατροπή των σπειροειδών σε φακοειδείς και 2) Αυτοί οι μικρής μάζας σπειροειδείς στην ουσία κυριαρχούνται από σκοτεινή ύλη, που δικαιολογεί την ασυνήθιστα μικρή αστρική στροφορμή (για να υποστηριχτεί ο γαλαξιακός δίσκος απαιτείται κάποια ελάχιστη στροφορμή των αστεριών του).

- Η επισκόπηση CALIFA μας προσφέρει μια στατιστικά καλά καθορισμένη εικόνα των αστεριών χωρίς μορφολογικές επιρροές και των ιδιοτήτων του ιονισμένου αερίου για 600 γαλαξίες σε εύρος ερυθρολίθωσης  $0,005 < z < 0,03$ .
- Οι στροφορμές στην ακολουθία του Hubble
- Ο συνδυασμός της εμφανής ειδικής αστρικής στροφορμής ( $\lambda$ ) και της ελλειπτικότητας ( $\epsilon$ ) είναι ένα συχνό διαγνωστικό εργαλείο για να θέσουμε όρια στην δυναμική δομή και την εξέλιξη των γαλαξιών. Αν όλοι οι γαλαξίες ήταν απλά πεπλατυσμένοι και ισότροπα περιστρεφόμενοι θα ακολουθούσαν την κόκκινη καμπύλη (στο ανάλογο διάγραμμα χρώματος- μάζας των γαλαξιών) ή θα ήταν στα αριστερά του διαγράμματος, αν τους παρατηρούσαμε σε τέτοια γωνία που να είναι μακριά από την κόψη τους. Η πράσινη καμπύλη υποδηλώνει την διαχωριστική γραμμή ανάμεσα σε γρήγορα και αργά περιστρεφόμενους γαλαξίες από την επισκόπηση ATLAS. Με την επισκόπηση CALIFA μπορούμε να εξερευνήσουμε για πρώτη φορά με ομοιογενή τρόπο όλους τους τύπους γαλαξιών του Hubble. Οι σπειροειδείς, όπως αναμέναμε, είναι σχεδόν όλοι ταχέως περιστρεφόμενοι. Όμως σε σχέση με τους ελλειπτικούς και τους S0, ειδικά οι Sb φτάνουν σε πολύ υψηλές τιμές του ( $\lambda$ ), ενώ οι Sc και οι Sd παρουσιάζουν χαμηλές τιμές ( $\lambda$ ) και ανήκουν στους αργά περιστρεφόμενους.



- Οι φακοειδείς είναι γαλαξίες με αποσυνθεμένους δίσκους?
- Η στροφορμή καθορίζεται πολύ νωρίς στην ζωή ενός γαλαξία, δίνοντάς μας ένα σημαντικό εργαλείο να επιλέξουμε ανάμεσα στα σενάρια γαλαξιακής εξέλιξης. Για παράδειγμα, μια πιθανή εξήγηση της παρατηρήσιμης σχέσης μορφολογίας-πυκνότητας είναι η μετατροπή από σπειροειδείς σε ταχέως περιστρεφόμενους φακοειδείς γαλαξίες μέσω της αποσύνθεσης των αστρικών πληθυσμών. Με αυτό το σενάριο η συγκέντρωση φωτός και η στροφορμή δεν αναμένεται να αλλάξουν σημαντικά.
- Μετρήσαμε την φαινόμενη ειδική αστρική στροφορμή με την ακτίνα μισού φωτός (half-light radius, η ακτίνα του γαλαξία από την οποία προέρχεται το μισό φως του) στο δείγμα μας των 300 γαλαξιών της CALIFA. Η συγκέντρωση του φωτός είναι μια προσέγγιση για την σχετική ροή σε ένα σφαιροειδές μέρος (κοιλία και μπάρα) και μέρος δίσκου. Παρατηρήσαμε ότι οι Sa γαλαξίες επικαλύπτουν τους S0/FR. Οι Sc και οι Sd έχουν επίσης χαμηλή τιμή ( $\lambda$ ), αλλά η συγκέντρωσή τους είναι τόσο μικρή, που σε συνδυασμό με τα μεγάλα αποθέματα σε αέριο που έχουν τους είναι δύσκολο να μεταμορφωθούν σε S0/FR γαλαξίες της κόκκινης ακολουθίας μέσω μόνο της

αποσύνθεσης αστρικού πληθυσμού. Οι περισσότεροι από τους Sb βρίσκονται στην πράσινη κοιλάδα και το περισσότερο αέριό τους έχει εξαντληθεί. Όμως οι τιμές του ( $\lambda$ ) τους είναι διπλάσιες και η συγκέντρωση του φωτός (στον πυρήνα) είναι σημαντικά μικρότερη από τους S0/FR. Αυτό μας δείχνει μια εικόνα όπου η κόκκινη ακολουθία χτίζεται με τον χρόνο από γαλαξίες με δίσκους, που είναι ουσιαστικά μεγαλύτεροι και έχουν μεγαλύτερες στροφορμές.

- Κυριαρχούνται οι μικρής μάζας σπειροειδείς από την σκοτεινή ύλη?
- Η εσωτερική διασπορά μάζας ενός γαλαξία είναι μία από τις πιο σοβαρές ιδιότητες για την δομή και την εξέλιξή του. Όμως η αλληλεπίδραση βαρυονίων- σκοτεινής ύλης είναι ακόμα υπό συζήτηση. Συμπεράναμε την ολική (βαρυονική και σκοτεινή) μάζα των γαλαξιών του δείγματός μας για όλους τους μορφολογικούς τύπους με την κατασκευή συμμετρικών στον άξονα μοντέλων Jeans που συμφωνούν με τις παρατηρήσιμες κινήσεις των αστεριών τους. Οι αστρικές μάζες ξεχώρισαν με την προσαρμογή των γαλαξιακών φασμάτων στα μοντέλα αστρικών πληθυσμών στην παραδοχή ορισμένης συνιστώσας αρχικής μάζας (initial mass function, IMF). Στο διάγραμμα ολικής/ αστρικής μάζας σε ορισμένη γαλαξιακή ακτίνα, στο άκρο μέγιστης μάζας, παρατηρούμε ανάκαμψη της εκεί ομάδας γαλαξιών. Αυτή μπορεί να συμβαίνει μέσω της παρουσίας της σκοτεινής ύλης ή την μεταβολή της IMF. Για μικρής μάζας Sc- Sd δεν υπάρχουν ενδείξεις σημαντικής διαφοροποίησης της IMF, έτσι η μεγάλη αναλογία ολικής/ βαρυονικής μάζας πρέπει να είναι αποτέλεσμα της σκοτεινής ύλης, αν και αναφερόμαστε στο εσωτερικό των γαλαξιών. Αυτό επιβεβαιώνεται από τις χαμηλές τιμές του ( $\lambda$ ) που παρατηρούμε εκεί, αφού η παρουσία σχετικά μεγάλης άλως σκοτεινής ύλης θα υποστήριζε έναν δυναμικά καυτό αλλά γεωμετρικά λεπτό αστρικό δίσκο.
- Η αστρική μάζα του M31 όπως παρουσιάζεται από την επισκόπηση Andromeda Optical and Infrared Disk Survey (ANDROIDS).
- Η προσέγγισή μας κάνει τον M31 ιδανικό πεδίο δοκιμής για την κατανόηση της δομής των σπειροειδών γαλαξιών. Η επισκόπηση χαρτογράφησε την κοιλιά και τον δίσκο του M31 ως την ακτίνα των 40 kpc. Χρησιμοποιήσαμε μοντέλα της διασποράς ενέργειας του φάσματος στο οπτικό- υπέρυθρο για την εκτίμηση του προφίλ του αστρικού πληθυσμού (integrated spectral energy distributions, SEDs) και της μάζας στον άξονα του γαλαξία, και αστέρια που αναλύονται ως μεμονωμένα. Αυτή η ανάλυση μας προσφέρει αποδείξεις για τον από μέσα προς τα έξω σχηματισμό του δίσκου και για έναν φθίνων βαθμό μεταλλικότητας από την κοιλιά προς στον δίσκο. Υπολογίσαμε την αστρική μάζα των 30 kpc της κοιλιάς και του δίσκου σε 100 δις ηλιακές. Αυτό το αποτέλεσμα συμφωνεί με παλαιότερες μελέτες. Συνδυάζουμε τους χάρτες αστρικής μάζας με δυναμικούς ανιχνευτές αερίων και αστεριών ώστε να κατασκευάσουμε ένα μοντέλο μάζας για τα αστέρια, το αέριο, και την σκοτεινή ύλη του M31.
- Το καλιμπράρισμα της επιφανειακής λαμπρότητας του M31.

- Η αφαίρεση του υποβάθρου αποτελεί την σημαντικότερη πρόκληση για τις μελέτες που βασίζονται στην παρατήρησης της δομής του M31, μιας και δεν μπορούμε να παρατηρήσουμε τον δίσκο του χωρίς να κοιτάξουμε μέσα από το υπόβαθρο. Το υπόβαθρο στις κοντινές υπέρυθρες μπορεί να υπολογιστεί με ακρίβεια ως 2%. Ανακαλύψαμε δομές μικρής επιφανειακής λαμπρότητας στον εξωτερικό δίσκο του γαλαξία, όπως το βόρειο πέταλο.
- Τα μοντέλα αστρικής μάζας SED.
- Μοντελοποιήσαμε την SED για κάθε γωνιακή ακτίνα ώστε να εκτιμήσουμε τον αστρικό πληθυσμό, άρα και την αναλογία μάζας/ λαμπρότητας M/L. Με διαφορετικές παραμετροποιήσεις ιστορικών σχηματισμού αστεριών βρήκαμε ότι ένα απλό μοντέλο, περιλαμβάνοντας σταθερή αλλά και εκθετική μείωση του ρυθμού αστρογέννησης, βελτιώνει τα αποτελέσματα. Στην απόσβεση της σκόνης, η αθέτηση απόσβεσης με διαχωρισμό των γαλαξιακών μερών σε νεότερο και παλαιότερο αστρικό πληθυσμό επίσης βελτιώνει τα μοντέλα σχετικά με αυτά του Γαλαξία μας και της απόσβεσης της εκρηκτικής αστρογέννησης (starburst attenuation models). Η SED από ένα φτωχό δείγμα μπορεί να παραποιήσει τα αποτελέσματα. Μπορεί να παραποιήσει την διασπορά αστρικού πληθυσμού, με υποτίμηση της σκόνης και χαμηλότερες αναλογίες μάζας/ φωτός. Αυτό μας υπενθυμίζει ότι η εκτίμηση της αστρικής μάζας κυριαρχείται από βασικές παραδοχές όπως η επιλογή της IMF, της αναλογίας σκόνης, και λεπτομέρειες του AGB (ασυμπτωτικού κλάδου γιγάντων). Το αποτέλεσμα μας είναι η εκτίμηση της αστρικής μάζας του M31, σε 30 kpc, στις 100 δις ηλιακές. Αυτό το αποτέλεσμα είναι σύμφωνο με παλαιότερες μετρήσεις (101 δις ηλιακές μάζες το 2013).
  
- Οι μάζες των αλεών των γαλαξιών από μετρήσεις με ασθενείς βαρυτικούς φακούς.
- Θα αναλύσουμε την χρήση του ασθενούς βαρυτικού φακού γαλαξία- γαλαξία (ο ισχυρός είναι γαλαξιακό σμήνος- γαλαξία) για να μετρήσουμε τις μάζες των αλεών σκοτεινής ύλης των γαλαξιών. Οι μετρήσεις μας χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό της σχέσης ανάμεσα στους οπτικούς ανιχνευτές γαλαξιακής μάζας, όπως η αστρική μάζα ή η λαμπρότητα, και της μάζας των αλεών σκοτεινής ύλης.
- Το πεδίο μελέτης σχηματισμού και εξέλιξης των γαλαξιών επιδιώκει να εξηγήσει το ιστορικό εξέλιξης των γαλαξιών, αλλά μειονεκτεί λόγω των δυσκολιών της παρατήρησης της σκοτεινής ύλης μέσα στην οποία σχηματίζονται και εξελίσσονται οι γαλαξίες. Η σύνδεση των γαλαξιών και των αλεών σκοτεινής ύλης που τους φιλοξενούν αποτελεί βασικό τομέα της φυσικής του σχηματισμού των γαλαξιών. Μια πολύ χρήσιμη μέθοδο υπολογισμού της σύνδεσης του γαλαξία με την σκοτεινή ύλη είναι ο ασθενής βαρυτικός φακός γαλαξία- γαλαξία.
- Οι βαρυτικοί φακοί, δηλαδή η εκτροπή του φωτός από την μάζα, προκαλούν στρεβλώσεις στα σχήματα των γαλαξιών του υποβάθρου γύρω από τους γαλαξίες στο προσκήνιο (είδωλα του πίσω γαλαξία γύρω από τον μπροστά), επιτρέποντας την άμεση μέτρηση της συνιστώσας της ύλης των γαλαξιών που προβάλλονται. Αυτή η προσέγγιση έχει το πλεονέκτημα να είναι ευαίσθητη για όλη την μάζα (σκοτεινή και ορατή), ανεξάρτητα από την δυναμική της κατάσταση (αντίθετα με τις

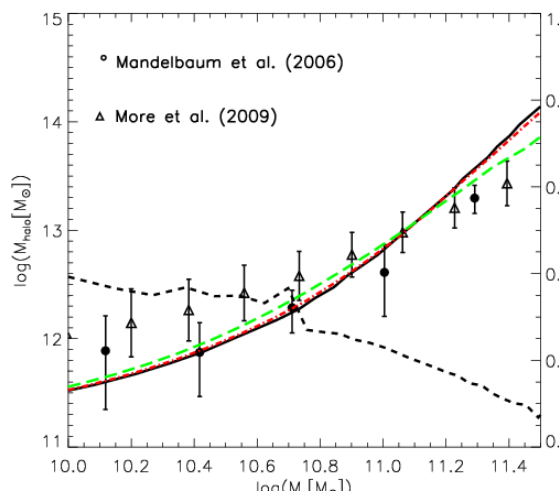


φωτομετρικές και φασματικές παρατηρήσεις). Οι μεμονωμένες στρεβλώσεις είναι μικρές (0,1%). Με τον μέσο όρο όλων των γαλαξιών που βρίσκονται στο προσκήνιο (αυτοί που αποτελούν τους φακούς) σε ένα υποσύνολο που επιλέχτηκε βάσει των ιδιοτήτων τους (μια διαδικασία που ονομάζουμε stacking) και όλων των γαλαξιών πίσω τους, είναι δυνατό να πετύχουμε μια μέτρηση με μεγάλη αναλογία σήματος/ θορύβου των στρεβλώσεων ως συνιστώσα του γωνιακού διαχωρισμού από τον γαλαξία, γνωστή ως σήμα βαρυτικού φακού γαλαξία- γαλαξία.

- Τα τελευταία 15 χρόνια η ποσότητα των δεδομένων υψηλής ποιότητας για τα σχήματα των γαλαξιών με πληροφορίες για την ερυθρολίσθησή τους (φασματοσκοπική ή φωτομετρική) έχει αυξηθεί δραματικά, κυρίως χάρη σε επισκοπήσεις όπως οι RCS, RCS2, SDSS κλπ. Η αύξηση της ποσότητας και ποιότητας των δεδομένων, αλλά και η μέθοδος άμεσης μέτρησης της σκοτεινής ύλης οδήγησε σε μεγάλη πρόοδο στην χρήση του φακού γαλαξία- γαλαξία για την μελέτη της αναλογίας ύλης στους γαλαξίες.
- Ο ασθενής βαρυτικός φακός, δηλαδή η απόκλιση των ακτίνων φωτός από την μάζα κατά μήκος της γραμμής θέασης, έχει αποτέλεσμα τις συναφείς παραμορφώσεις των εικόνων των γαλαξιών του υποβάθρου. Ο βαθμός της παραμόρφωσης μέσω του φακού εξαρτάται από την μάζα του αντικειμένου που αποτελεί τον φακό (γαλαξίας ή σμήνος), τον διαχωρισμό στον ουρανό ανάμεσα στον φακό και το αντικείμενο που προβάλλεται και την απόσταση των 2 αντικειμένων στην γραμμή θέασης. Οι τυπικές μετρήσεις ασθενούς φακού απαιτούν ικανό αριθμό φακών και γαλαξιών που προβάλλονται ώστε να εκτιμήσουμε το τυχαίο συστατικό του σχήματός του, που αποτελεί την τυπική πηγή θορύβου στις μετρήσεις.
- Υπάρχουν συμπληρωματικές συνεισφορές για τους γαλαξίες που είναι δορυφόροι, για τους οποίους η κυρίαρχη άλως σκοτεινής ύλης οδηγεί σε μια συνεισφορά στον διαχωρισμό σε εύρος εκατοντάδων kpc ως 1 Mpc. Σε ακόμα μεγαλύτερες κλίμακες, υπάρχει μια μικρή αλλά σημαντική συνεισφορά μέσω της ύλης στις δομές που συσχετίζονται φυσικά μεταξύ τους αλλά δεν είναι μέσα στην άλω στην οποία φιλοξενείται ο φακός. Ως αποτέλεσμα, η ερμηνεία του σήματος μέσω φακού μπορεί να είναι πολύπλοκη, κάτι που εξαρτάται από το περιβάλλον των γαλαξιών (ανάμειξη απομακρυσμένων και κεντρικών γαλαξιών έναντι δορυφόρων). Ακόμα, το φαινόμενο του στακαρίσματος μπορεί να επηρεάσει το προφίλ που υπολογίζουμε.
- Η σχέση ανάμεσα στην μάζα της άλως και την λαμπρότητα μας δείχνει ότι για γαλαξίες προγενέστερου τύπου (early type) η αναλογία σκοτεινής/ αστρικής μάζας είναι κατά παράγοντα 2 μεγαλύτερη από ότι στους μεταγενέστερου (late) τύπου. Η αποτελεσματικότητα της μετατροπής βαρυονίων σε αστέρια βρέθηκε να είναι 33% για τους προγενέστερου και 14% για τους μεταγενέστερου τύπου γαλαξίες. Με τα δεδομένα από την φασματοσκοπική επισκόπηση SDSS αναλύθηκε η μάζα της κυρίαρχης άλως των προγενέστερου και μεταγενέστερου τύπου κεντρικών γαλαξιών των σμηνών ως συνιστώσα της αστρικής τους μάζας και λαμπρότητας, για γαλαξίες με  $z = 0,1$ . Σε αυτήν την μελέτη ο διαχωρισμός σε προγενέστερου και μεταγενέστερου τύπου γαλαξίες έγινε με την χρήση μορφολογικών εκτιμήσεων (όχι βάσει χρώματος). Σε αυτήν την μελέτη υπολογίστηκαν οι αναλογίες των δορυφόρων μόνο από τα δεδομένα των φακών. Η αναλογία αστρικής μάζας/ μάζας της άλως που προέκυψε είναι σύμφωνη με τα παραπάνω για αστρικές μάζες  $>10$

δισ ηλιακές. Για μικρότερες αστρικές μάζες οι γαλαξίες προγενέστερου και μεταγενέστερου τύπου βρέθηκαν να έχουν στατιστικά συνεπείς επιδράσεις μετατροπής, που σημαίνει ότι η αστρική μάζα είναι καλός ανιχνευτής της μάζας της άλως για αυτό το μέγεθος. Σε μεγαλύτερες μάζες πρέπει να γίνεται διαχωρισμός ανάμεσα σε προγενέστερου και μεταγενέστερου τύπου γαλαξίες, που παρουσιάζουν διαφορές στην μάζα της άλως, όπως θα δούμε παρακάτω. Τα μοντέλα των αλεών μέσω φακών προτείνουν τιμή για την μάζα της άλως/ λαμπρότητα = 79 φορές την τιμή της αναλογίας ηλιακής μάζας/ηλιακή λαμπρότητα για προγενέστερου και 41 φορές για μεταγενέστερου τύπου γαλαξίες, με μεγαλύτερες τιμές για μεγαλύτερες λαμπρότητες. Σε μεγαλύτερες ερυθρολίσεις παρατηρούμε λίγο μεγαλύτερη αναλογία μάζας της αναλογίας άλως/ αστρική μάζα με ανώτερο όριο αύξησης κατά παράγοντα 2,5 από  $z = 0,8$  ως σήμερα.

- Η εξέλιξη της σχέσης της μάζας της άλως/ αστρική μάζα με την ερυθρολίση μας δείχνει ότι η μετατροπή βαρυονικής ύλης (αέριο) σε αστρική μειώνεται σε μικρότερη ερυθρολίση. Το εύρος της αναλογίας της αστρικής μάζας σχετικά με την μάζα της άλως κυμαίνεται από 0,2-0,25. Για γαλαξίες μεγάλης μάζας (>10 δισ ηλιακές) οι γαλαξίες αστρογέννησης (ύστερου τύπου) σχηματίζουν αστέρια με ρυθμό που χονδρικά ταιριάζει με την αύξηση της σκοτεινής ύλης τους μέσω συγχωνεύσεων από  $z = 1$  ως 0, ενώ για γαλαξίες χωρίς δραστηριότητα αστρογέννησης (προγενέστερου τύπου) η ανάπτυξη των αλεών της σκοτεινής ύλης ξεπερνάει την δημιουργία αστεριών, μειώνοντας την αναλογία τους στη ολική γαλαξιακή μάζα. Αντίθετα, για γαλαξίες μικρότερης μάζας, οι σχέση αστρικής/ μάζας άλως είναι παρόμοια για γαλαξίες αστρογέννησης και μη σε  $z < 1$ .



- Λόγω της ευαισθησίας του σε όλα τα είδη ύλης (αστέρια, αέριο και σκοτεινή ύλη) και της μη επιρροής από τις δυναμικές καταστάσεις της, ο ασθενής βαρυτικός φακός εξελίχθηκε σε σημαντικό εργαλείο της μελέτης της σχέσης ανάμεσα στους γαλαξίες και την σκοτεινή ύλη που τους φιλοξενεί, με στατιστικό σφάλμα μόλις 5%.
- Καλιμπράρισμα των αστρικών μαζών των γαλαξιών με κβάζαρ μικρό- βαρυτικών φακών.

- Μετρήσαμε τις επιφανειακές πυκνότητες αστρικών μαζών γαλαξιών προγενέστερου τύπου (early type) μέσω παρατήρησης των μικρό- φακών των κβάζαρ (που απεικονίζονται μέσω μακρό- βαρυτικών φακών) από ανεξάρτητα αστέρια των παραπάνω γαλαξιών. Συμπεριλάβαμε στην μάζα τα αστρικά απομεινάρια, τους καφέ νάνους και τους κόκκινους νάνους, που είναι πολύ αμυδροί για να ανιχνευτούν φωτομετρικά ή φασματοσκοπικά. Η μέθοδος μέτρησής μας είναι η διάκριση της δυνητικής βαρύτητας σε αντίθεση με μεθόδους που αναλύουν την δυνητική βαρύτητα σε 2 μέρη, την αστρική και την σκοτεινή.
  - Οι αστρικές μάζες των προγενέστερου τύπου γαλαξιών σχεδόν πάντα καθορίζονται ή από την εκτίμησή τους βάσει φάσματος ή από τον υπολογισμό της συνεισφοράς τους (αφαίρεση) στην ολική μάζα μαζί με την σκοτεινή ύλη, από κινηματικές μετρήσεις. Χρησιμοποιήσαμε μια τρίτη μέθοδος. Καθορίσαμε την επιφανειακή πυκνότητα της αστρικής μάζας (stellar mass surface density) ενός γαλαξία προγενέστερου τύπου από τις διακυμάνσεις της λαμπρότητας των τεσσάρων ειδώλων ενός κβάζαρ, που υπάρχει στο παρασκήνιο, που εμφανίζονται μέσω μακρό- φακό του (μπροστινού του) παραπάνω γαλαξία. Ακόμα χρησιμοποιήσαμε το είδωλό του από μικρό -φακό μέσω μεμονωμένων αστεριών αυτού του γαλαξία (λειτουργούν και αυτοί ως ένας μικρός βαρυτικός φακός). Αυτή η μέθοδος, αντίθετα με τις φασματοσκοπικές, είναι ευαίσθητη και στην αστρική μάζα στο τέλος και μετά την καύση του υδρογόνου στα αστέρια, και στα αστρικά απομεινάρια. Και ενώ οι μέθοδοι αφαίρεσης από την σκοτεινή ύλη περιέχουν παραδοχές για το προφίλ της σκοτεινής ύλης, η βαρυτική τεχνική μικρό- φακών κάνει μόνο μια παραδοχή για την ολική δυνητική βαρύτητα. Το ιδανικό είναι να παρατηρήσουμε ένα σύστημα αρκετό χρόνο ώστε να δούμε πολλές διακυμάνσεις λαμπρότητας και να εισάγουμε μια επιφανειακή πυκνότητα αστρικής μάζας. Ο χρόνος των διακυμάνσεων είναι πάνω από 10 έτη για φακούς σε  $z = 0,5$ , έτσι μελετάμε 10 συστήματα ταυτόχρονα και συνδυάζουμε τα αποτελέσματα.
  - Καλιμπράροντας το θεμελιώδες επίπεδο αστρικής μάζας.
  - Με αυτό θέλουμε να παρουσιάσουμε τις πυκνότητες αστρικής μάζας στις θέσεις των 4 ειδώλων, που παρουσιάζουν διαφορές ανάμεσα στις παρατηρήσιμες ροές φωτός του κβάζαρ και αυτές που προβλέπει ένα μακρό- μοντέλο. Χρησιμοποιήσαμε την συνιστώσα αρχικής μάζας (IMF) Salpeter (αυτή που ισχύει για τον Γαλαξία μας) με χαμηλότερη μάζα 0,1 ηλιακές ώστε να υπολογίσουμε τις αστρικές μάζες από γαλαξίες φακών σε  $z = 0,2$  και  $0,5$ .
  - Για έναν γαλαξία με διασπορά ταχύτητας 266 km/s και ενεργή ακτίνα 6,17 kpc η καλιμπραρισμένη δυνητική πυκνότητα αστρικής επιφάνειας μας δείχνει ότι η αναλογία της αστρικής στην συνολική γαλαξιακή μάζα είναι 0,25.
- 
- **MaNGA (Mapping near galaxies at Apache Point Observatory), χαρτογράφηση κοντινών γαλαξιών.**
  - Η παραπάνω καινούργια φασματοσκοπική επισκόπηση ολοκληρωμένου πεδίου περιέχει γαλαξίες μέσου  $z = 0,3$  και τυπικής χωρικής ανάλυσης 1-2 kpc. Για κάθε

γαλαξία του δείγματος η επισκόπηση θα μας παρέχει χάρτες και μετρήσεις των συστατικών μερών και της δυναμικής του αερίου και των αστεριών. Η επισκόπηση έχει την δυνατότητα να διαφωτίσει τον εμπλουτισμό, σε ιονισμό και χημικό, του αερίου των γαλαξιών, τα βήματα του ιστορικού αστρογέννησης και την εσωτερική εικόνα του αστρικού πληθυσμού.

- Την τελευταία δεκαετία έχει αναβαθμιστεί η κατανόησή μας για τον σχηματισμό των γαλαξιών, χάρη στην επισκόπηση SDSS σε μικρή ερυθρολίσθηση, πλήθος επισκοπήσεων και παρατηρήσεων σε μεγαλύτερη ερυθρολίσθηση και τις βελτιώσεις των προσομοιώσεων μη γραμμικών σχηματισμών.
- Ενώ σήμερα οι μεγαλύτερες άλως σκοτεινής ύλης συνεχίζουν να μεγαλώνουν bottom-up (από μέσα προς τα έξω) μέσω συσσωρεύσεων μικρότερων αλυσών, οι γαλαξίες μέσα σε αυτές έφτασαν το μέγιστο του σχηματισμού αστεριών σε  $z=1-3$ . Από τότε η δραστηριότητα αστρογέννησης σταδιακά μειώνεται ενώ οι γαλαξίες ακόμα μεγαλώνουν μέσω των συγχωνεύσεων μικρότερων, με αποτέλεσμα η αστρογέννηση να τροφοδοτείται με καινούργιο αέριο. Τελικά ο σχηματισμός αστεριών έπαυσε σε κάποιους (μεγάλους) γαλαξίες (εξαντλήθηκε το διαθέσιμο αέριο). Αυτός ο <γαλαξιακός θάνατος> θα επηρεάσει και τους γαλαξίες μικρότερης μάζας, και τον δικό μας. Οι σημερινοί γαλαξίες μικρότερης μάζας από τον δικό μας σχηματίζουν αμείωτα αστέρια από τότε που υπάρχουν. Η πλειονότητα των αστεριών στους γαλαξιακούς δίσκους σχηματίστηκε πριν 7-9 δις έτη.
- Σε πείσμα της σημαντικής προόδου της σκιαγράφησης αυτής της βασικής εικόνας που έχουμε, μας λείπουν σημαντικά κομμάτια για την ολοκλήρωση του πάζλ. Είναι πολύ σημαντικό ότι ακόμα ψάχνουμε την φυσική προέλευση των πρότυπων της εξέλιξης που αναφέραμε. Η βαρυτική κατάρρευση είναι μόνο μια από τις πολλές διαδικασίες στην εξέλιξη των γαλαξιών. Η απώλεια του αερίου και η πτώση του στο εσωτερικό του γαλαξία, ο σχηματισμός αστεριών, η θέρμανση και εκτίναξη αερίων από τις εκρήξεις σουπερνόβα, οι συγχωνεύσεις γαλαξιών, η αναδιανομή της ύλης λόγω εσωτερικών διαδικασιών και η αύξηση της μάζας της κεντρικής γαλαξιακής μαύρης τρύπας αποτελούν σημαντικές διαδικασίες που όμως παραμένουν όχι καλά κατανοητές.
- Η επισκόπηση γαλαξιών SAMI.
- Πρόκειται για μια επισκόπηση χωρικά αναλυμένων φασματοσκοπικών παρατηρήσεων 3400 γαλαξιών μέχρι τα μισά του 2016. Έχουμε τα αποτελέσματα για τους πρώτους 1000 γαλαξίες που περιλαμβάνουν την ανακάλυψη και ανάλυση γαλαξιακών ανέμων, την διασπορά των αργά και ταχέως περιστρεφόμενων γαλαξιών προγενέστερου (early) τύπου και την ενοποίηση των γαλαξιακών κλιμακωτών σχέσεων.
- Οι πολυσύνθετες φασματοσκοπικές γαλαξιακές επισκοπήσεις, όπως οι 2dF Galaxy Survey, SDSS, GAMA αποτελούν ισχυρά εργαλεία για την έρευνα της γαλαξιακής εξέλιξης. Περιορίζονται όμως λόγω του ότι παρατηρούν μόνο ένα κομμάτι στο κέντρο κάθε γαλαξία, με αποτέλεσμα να μην μπορούν να ερευνήσουν τις χωρικά διανεμημένες ιδιότητες των γαλαξιών. Η φασματοσκοπία ολοκληρωμένου πεδίου (integral field spectrographs, IFS) συμπληρώνει αυτό το κενό. Τα χωρικά αναλυμένα

φασματοσκοπικά δεδομένα μιας IFS μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την μέτρηση πολλών ποσοτήτων, όπως η κινηματική του αερίου και των άστρων, οι χωρικά κυμαινόμενες καταστάσεις ιονισμού, η διασπορά αστρικών ηλικιών και μεταλλικότητας, οι περιοχές αστρογέννησης και πολλές άλλες.

- Τα βασικά ερωτήματα για την επισκόπησή μας.
- Ποιοι είναι οι βασικοί φυσικοί μηχανισμοί που προκαλούν περιβαλλοντική υποβάθμιση της αστρογέννησης και μορφολογικές αλλαγές στους γαλαξίες? Πόσο συνηθισμένες είναι οι εισροές και εκροές αερίων και πως επηρεάζουν τις ιδιότητες των γαλαξιών? Πως διανέμεται η στροφορμή στον γαλαξιακό πληθυσμό και πως <χτίστηκε> η γαλαξιακή μάζα? Οι γαλαξίες του δείγματος χωρίστηκαν σε 2 ομάδες. Μια περιορισμένου πεδίου και με δείγματα ομάδων γαλαξιών της επισκόπησης GAMA, και ένα δείγμα 8 σημνών. Η προσθήκη των σημνών επέκτεινε το εύρος των περιβαλλοντικών πυκνοτήτων σε μεγαλύτερα μεγέθη.
- Τα πρώτα αποτελέσματα δείχνουν ότι σε έναν απομονωμένο γαλαξία με δίσκο υπάρχει ένας άνεμος που δημιουργεί ο σχηματισμός αστεριών. Στον γαλαξία παρατηρούμε 3 είδη κινηματικής, μια (φασματικά) <στενή > κινηματική, σχετική με περιοχές (HII), μια <πλατιά> κινηματική σχετική με ερεθίσματα μέσω κρουστικών μετώπων, και μια μεσογαλαξιακή κινηματική, σχετική με μείγμα από κρουστικά μέτωπα και φωτιονισμό. Οι τρεις αυτές κινηματικές έχουν διακριτά πεδία ταχυτήτων, διασποράς ταχυτήτων, εύρος γραμμών, και πυκνότητας ηλεκτρονίων. Οι διπολικοί γαλαξιακοί άνεμοι δημιουργούν κρουστικά μέτωπα και αποτελούν την αιτία των αυξημένου εύρος γραμμών και διασπορών ταχυτήτων.
- Μπορούμε να μελετήσουμε το πώς οι τάσεις της στροφορμής κυμαίνονται με τα γαλαξιακά περιβάλλοντα, τις μάζες και άλλα χαρακτηριστικά. Βρήκαμε ότι οι αργά περιστρεφόμενοι είναι διασπαρμένοι σε εύρος περιβαλλόντων στα σμήνη και ότι οι ομάδες που πέφτουν μέσα σε σμήνη περιέχουν αργά περιστρεφόμενους γαλαξίες.
- Οι γαλαξιακές κλιμακωτές σχέσεις, όπως η Tully- Fisher για τους σπειροειδείς (λαμπρότητα/ ταχύτητα περιστροφής), ή η Faber- Jackson για προγενέστερου τύπου γαλαξίες (λαμπρότητα/ διασπορά ταχύτητας στο γαλαξιακό κέντρο) μας προμηθεύουν βασικές γνώσεις για τις γαλαξιακές δομές. Μέχρι τώρα τέτοιες σχέσεις προέκυπταν από ένα υποσύνολο γαλαξιών, επιλεγμένο βάσει μορφολογικών τάσεων και άλλων χαρακτηριστικών. Με την επισκόπηση SAMI μπορέσαμε να μελετήσουμε την σχέση ανάμεσα στην κινηματική του αερίου και των αστεριών, και την αστρική μάζα γειτονικών γαλαξιών, άσχετα από την μορφολογία τους. Βρήκαμε ότι ανεξάρτητα από την μορφολογία, όλοι οι γαλαξίες υπόκεινται σε στενή σχέση της αστρικής μάζας με την εσωτερική ταχύτητα υπολογισμένη με μια παράμετρο, που συνδέει την διασπορά ταχύτητας και την γωνιακή ταχύτητα. Οι γαλαξίες παρουσιάζουν την ίδια σχέση είτε μελετάμε την αστρική κινηματική, είτε την κινηματική των αερίων. Η σχέση φαίνεται να είναι πιο καθολική και τουλάχιστον τόσο στενή όσο η σύνδεση ανάμεσα στην γαλαξιακή κινηματική και το βαρυονικό συστατικό μέρος ενός γαλαξία.
- Το πλάνο KMOS Galaxy Clusters

- Πρόκειται για μια κρυογονική φασματοσκοπική μελέτη υπέρυθρου που μας ανοίγει ένα νέο παράθυρο στην κρίσιμη εποχή γαλαξιακής εξέλιξης, 7- 10 δις έτη πριν, όταν είχαν καθιερωθεί οι βασικές παράμετροι των γαλαξιακών σμηνών. Θέλουμε να ερευνήσουμε το μέγεθος, την μάζα, την μορφολογία και το ιστορικό αστρογέννησης στα γαλαξιακά σμήνη.
- Οι <κόκκινοι και νεκροί> (red and dead) προγενέστερου (early) τύπου γαλαξίες (ETG) αφθονούν στις εσωτερικές περιοχές των τοπικών μεγάλων σμηνών, όπου οι σπειροειδείς γαλαξίες αστρογέννησης σπανίζουν. Σε  $z = 0,5$  η αναλογία των γαλαξιών αστρογέννησης με δίσκο αυξάνεται. Αυτό είναι σύμφωνο με εξέλιξη των σπειροειδών σε  $S0$  σε χρόνο 4,5 δις έτη. Αναμένουμε τον διαχωρισμό της ακολουθίας του Hubble να καθιερώνεται σε  $0,5 < z < 2$ , κατά το μέγιστο της εποχής σχηματισμού αστεριών. Μελετώντας τα περιβάλλοντα μεγάλης πυκνότητας αυτής της εποχής (ερυθρολίσθησης) μας βοηθάει να αναγνωρίσουμε τους μηχανισμούς που υποβάθμισαν την αστρογέννηση και δημιούργησαν την διασπορά των μορφολογικών τύπων που παρατηρούμε στα τοπικά σμήνη σήμερα. Οι μηχανισμοί που προτείνονται είναι η απογύμνωση (αερίου) μέσω πίεσης εμβολής (σύγκρουση γαλαξία με γαλαξία), η βαρυτική <παρενόχληση> γαλαξία από γαλαξία, και ο <στραγγαλισμός>, δηλαδή η εξάλειψη του διαθέσιμου αερίου.
- Η εξέλιξη των γαλαξιών προγενέστερου τύπου μπορεί να μελετηθεί με την μέτρηση των κλιμακωτών τους σχέσεων ως συνέπεια της ερυθρολίσθησης (χρόνος). Πολλές μελέτες δείχνουν ότι σε  $z = 2$  υπάρχουν μεγάλης μάζας ETG, αλλά είναι μικρότεροι σε μέγεθος και με μεγαλύτερες διασπορές αστρικών ταχυτήτων σε σχέση με τους τοπικούς (σημερινούς).
- Ακόμα τοπικά παρατηρούμε ότι τα αστέρια στους πιο μεγάλης μάζας γαλαξίες είναι παλαιότερα, και λόγω της υπέρβασης της αναλογίας  $\alpha/Fe$  που παρουσιάζουν, δημιουργήθηκαν σε μικρά χρονοδιαγράμματα από αέρια μεγάλης μεταλλικότητας. Αυτή η αλλαγή του ενεργού σχηματισμού αστέρων από τους μεγάλης μάζας γαλαξίες στους μικρότερης μάζας ονομάζεται downsizing (συρρίκνωση). Ενώ δυναμική εξέλιξη M/L (μάζας/ λαμπρότητας) μέχρι  $z = 1$  συμφωνεί με την παθητική γαλαξιακή εξέλιξη στο βασικό μοντέλο (Fundamental Plane, FP), η συρρίκνωση αμφισβητείται έντονα.
- Έχει προταθεί ότι η εξέλιξη των ETG καθοδηγείται από έναν συνδυασμό του ιστορικού συγχωνεύσεων και της εξέλιξης της μάζας προς το παρατηρήσιμο φως (mass to light evolution). Πολλοί μηχανισμοί έχουν προταθεί, όπως η ανάπτυξη των γαλαξιών μέσω μικρών/ μεγάλων και στεγνών/ υγρών συγχωνεύσεων (dry/ wet mergers, συγχωνεύσεις κόκκινων χωρίς αέριο γαλαξιών / συγχωνεύσεις μπλε σπειροειδών πλούσιων σε αέριο), ακόμα και <ξεφούσκωμα> (puffing) μέσω ανάδρασης AGN. Η κατανόηση για το ποιοι μηχανισμοί καθοδηγούν την εξέλιξη των κλιμακωτών σχέσεων σε μικρό  $z$  βρίσκεται στα γαλαξιακά μεγέθη και στις διασπορές ταχυτήτων ενός ικανού δείγματος γαλαξιών μεγάλου  $z$ . Σήμερα δεν έχουμε ακόμη τέτοιο επαρκώς αναλυμένο δείγμα, κάτι που θέλουμε να αλλάξουμε με το KMOS. Με το δείγμα 80 γαλαξιών της φασματοσκοπικής αυτής επισκόπησης θέλουμε 1) να επεκτείνουμε την μελέτη του βασικού μοντέλου και της δυναμικής μελέτης του M/L σε  $z = 1,5$  για να περιλάβουμε τις ηλικίες σχηματισμού γαλαξιών. 2) Να μετρήσουμε την εξέλιξη των μεγεθών και της διασποράς ταχυτήτων των

- γαλαξιών σε μεγάλο δείγμα, ώστε να διαχωρίσουμε τα διάφορα μοντέλα ιστορικών συγχώνευσης. 3) Να χρησιμοποιήσουμε καλά κατανοητά μοντέλα των οπτικών ενδείξεων για την μέτρηση των αστρικών ηλικιών και μεταλλικότητας, σε μια εποχή πριν την σημερινή αστρογέννηση, και 4) να χαρακτηρίσουμε την εξέλιξη στον χρόνο, την μεταλλικότητα και το μέγεθος των γαλαξιών στο βασικό μοντέλο, ώστε να κατανοήσουμε πως συναθροίστηκαν οι ETG στα περιβάλλοντα των σμηνών.
- Επιλέξαμε 3 σμήνη (XMUUJ2235-2257,  $z=1,39$ , XMMXCSJ2215.9-1738,  $z=1,46$ , CIO332-2741,  $z=1,61$ ), το καθένα με σημαντικό αρχείο δεδομένων, όλα πλούσια σε ETG.
  
  - Η σκοτεινή άλως στους σφαιροειδείς γαλαξίες και η εξέλιξη με την ερυθρολίωση ( $z$ ) (εξέλιξη στον χρόνο).
  - Ενώ οι παρατηρήσεις μέσω ισχυρών βαρυτικών φακών δείχνουν την κλίση των προφίλ ολικών πυκνοτήτων να γίνονται πιο επίπεδα με την αύξηση του  $z$ , πολλές προσομοιώσεις παρουσιάζουν το αντίθετο. Από τις δικές μας προσομοιώσεις (Magneticum pathfinder simulations, ένα πλήθος υδροδυναμικών κοσμολογικών κουτιών (πεδίων) με διαφορετική ανάλυση και διαφορετικά μεγέθη) προκύπτει ότι η επιπεδότητα της κλίσης της απόλυτης πυκνότητας συνδέεται με το πόσο συμπαγές είναι το αστρικό μέρος του γαλαξία στην ακτίνα μισής μάζας (half-mass radius, η ακτίνα του γαλαξία με την μισή του μάζα) και ότι οι σφαιροειδείς ήταν πιο πυκνοί σε μεγάλο  $z$  από τους σημερινούς. Ενώ αυτά τα 2 αποτελέσματα συμφωνούν με τις παρατηρήσεις, παραμένει η αντίθεση με τις προσομοιώσεις.
  - Σε μικρό  $z$ , οι ελλειπτικοί γαλαξίες περιέχουν κυρίως ένα παλαιό σφαιρικό αστρικό μέρος (αντίθετα από τους δίσκους) που είναι εμβαπτισμένο σε μια άλω σκοτεινής ύλης. Η ζώνη μετάβασης, όπου η σκοτεινή ύλη αρχίζει να κυριαρχεί έναντι της βαρυονικής, μας παρέχει πληροφορίες για το ιστορικό σχηματισμού αστεριών. Όμως η κινηματική σε αυτήν την περιοχή παρατηρείται δύσκολα. Είναι γνωστό ότι στους σπειροειδείς η καμπύλη περιστροφής είναι επίπεδη μέχρι σε μεγάλη ακτίνα του γαλαξία. Αυτή η διατήρηση της ισορροπίας στην καμπύλη ονομάζεται <συνομωσία> σκοτεινής άλως- δίσκου (dark halo-disk conspiracy). Πρόσφατα δυναμικά μοντέλα έδειξαν ότι υπάρχει μια παρόμοια <συνομωσία> ανάμεσα στις σκοτεινές άλως και το σφαιροειδές μέρος των μεγάλης μάζας, αργά περιστρεφόμενων γαλαξιών. Βρέθηκε ότι τα προφίλ ολικής (βαρυονικής και σκοτεινής ύλης) πυκνότητας και διασποράς ταχυτήτων των σφαιροειδών γαλαξιών μπορούν να εφαρμοστούν απλά με ορισμένη κλίση της καμπύλης για την πυκνότητα και ορισμένη για την διασπορά ταχύτητας. Επίσης υπάρχει ισχυρή σύνδεση της αύξησης της κλίσης με το  $z$ .
  - Η συνομωσία της σκοτεινής άλως με το σφαιροειδές αστρικό μέρος των ελλειπτικών γαλαξιών ανάλογα το  $z$ .
  - Τα εσωτερικά μέρη των ολοκληρωμένων προφίλ κυριαρχούνται από την αστρική μάζα, ενώ τα εξωτερικά από τη σκοτεινή ύλη. Βρήκαμε ότι οι κλίσεις των καμπυλών δεν δείχνουν μια ισότροπη σφαίρα (ή μια σφαίρα με σταθερή ανισοτροπία) σε υδροστατική ισορροπία. Επειδή τα σφαιροειδή μέρη των ελλειπτικών είναι πιο

συμπαγή σε μεγάλο  $z$  από σήμερα, η παρατηρήσιμη αύξηση της επιπεδότητας της κλίσης της ολικής πυκνότητας που παρατηρούμε με την ερυθρολίσθηση παραμένει αντίθετη με τις προσομοιώσεις. Αντίθετα, δείξαμε ότι η κλίση της ολικής διασποράς ταχύτητας είναι σταθερή ανεξάρτητα της πυκνότητας της αστρικής μάζας και των κλίσεων της ολικής πυκνότητας, σε συμφωνία με τις προσομοιώσεις.

- Εφαρμόζοντας γαλαξιακή αρχαιολογία στους μεγάλης μάζας γαλαξίες με την χρήση επισκοπήσεων βαθιάς απεικόνισης.
- Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην ανακάλυψη και ανάλυση του διάχυτου φωτός που εκπέμπεται από τα <συντρίμμια> από συγκρούσεις (από διαδικασίες συγχώνευσης γαλαξιών) ή εκτεταμένες αστρικές άλως. Οι διαδικασίες που αποτελούν τα αίτια της γαλαξιακής εξέλιξης, ανάπτυξης και θανάτου μπορούν να μελετηθούν ή με δείγματα διαφορετικών εποχών μέσω επισκοπήσεων ερυθρολίσθησης, ή με την διερεύνηση των σημερινών (τοπικών) γαλαξιών ώστε να κατανοήσουμε την παρελθοντική τους συνάθροιση μάζας. Η επιτυχία της τελευταίας μεθόδου εξαρτάται πολύ από τη ικανότητά μας να ανακαλύψουμε δομές στις πολύ εξωτερικές περιοχές των γαλαξιών. Οι εκτεταμένες αστρικές άλως και τα συντρίμμια (collisional debris) αποθηκεύουν τις μνήμες των τελευταίων συγχωνεύσεων. Ο αριθμός και τα σχήματά τους μας πληροφορούν για τον μηχανισμό ανάπτυξης ενός γαλαξία. Αν είναι <υγρός> (σύγκρουση με γαλαξία πλούσιο σε αέριο) ή ξηρός, μεγάλες ή μικρές συγχωνεύσεις, κοσμικές διαδικασίες, κλπ. Δυστυχώς αυτές οι δομές είναι μικρής επιφανειακής λαμπρότητας και ανιχνεύονται δύσκολα, εκτός αν μπορούν να αναλυθούν σε ξεχωριστά αστέρια, όπως πετυχαίνουμε για την τοπική ομάδα γαλαξιών. Η μέθοδος είναι ακόμα περιορισμένη για γαλαξίες απόστασης μερικών Mpc. Οι πιο μεγάλης μάζας, εν μέρει φακοειδείς και ελλειπτικοί, η προέλευση των οποίων παραμένει αντικείμενο διαφωνιών, βρίσκονται πολύ μακριά για να χαρτογραφηθούν τα αστέρια τους. Με τα σημερινά τηλεσκόπια η μόνη μέθοδος να ανακαλύψουμε τις εξωτερικές τους δομές είναι μέσω του διάχυτου φωτός τους. Ευτυχώς η διαθεσιμότητα μεγάλων πεδίων από τις οπτικές κάμερες και η εξέλιξη έξυπνων τεχνικών παρατήρησης και επεξεργασίας δεδομένων έχουν βελτιώσει την ικανότητα παρατήρησης κατά μερικά mag για την επιφανειακή λαμπρότητα, επιτρέποντάς μας την παρατήρηση του διάχυτου φωτός.
- Σε αντίθεση με τα κλασσικά προβλήματα των διακυμάνσεων μεγάλης κλίμακας του υποβάθρου, οι επισκοπήσεις βαθιάς απεικόνισης εμποδίζονται από 2 παράγοντες που περιορίζουν την ικανότητα εύρεσης εκτεταμένων διάχυτων δομών. Οι τεχνικές άλως, μέσω εσωτερικών αντανάκλασεων στο όργανο παρατήρησης, και η Γαλαξιακή διάχυτη εκπομπή *circus*. Το φως των λαμπρών αστεριών, αλλά και των πυρήνων των γαλαξιών αντανάκλαται ανάμεσα στην CCD και στα διαφορετικά οπτικά στοιχεία της κάμερας, παράγοντας εικόνες πολλαπλών, λιγότερο ή περισσότερο ομόκεντρων αλεών. Αυτές οι άλως μπορούν να κρύψουν λεπτές δομές όπως παλιρροϊκές ουρές ή να μπερδευτούν με τις αστρικές άλως των εξωτερικών περιοχών των γαλαξιών. Η χρήση ειδικών φίλτρων ή μια τελείως διαφορετική οπτική κατασκευή βελτιώνει την κατάσταση. Πιο σοβαρό πρόβλημα δημιουργεί η



μόλυνση από το διάχυτο φως του Γαλαξία μας. Τα νέφη σκόνης του διαχέουν το φως. Αυτό εμφανίζεται στις βαθιές απεικονίσεις ως σύνθετες, εκτεταμένες νηματοειδείς δομές που μπορεί να εκτιμηθούν ως αστρικές παλιρροϊκές ουρές.

- Πέρα από αυτά τα προβλήματα, η χρησιμότητα της βαθιάς απεικόνισης των γαλαξιών είναι πολύτιμη. Μας παρουσιάζει ένα πλήθος άγνωστων μέχρι τώρα δομών που μας πληροφορούν για τα σημαντικά γεγονότα που έχτισαν τους γαλαξίες, αλλά και θέτει ερωτήματα για την κατηγοριοποίησή τους. Η κατηγοριοποίηση γίνεται παραδοσιακά με μορφολογικά κριτήρια (αναλογία δίσκου/ κοιλιάς, ανάπτυξη της ράβδου) που ελέγχουμε μέσω οπτικών εικόνων. Όμως η ανακάλυψη περισσότερων γαλαξιακών δομών εξαρτάται από το βάθος των διαθέσιμων εικόνων. Έτσι μερικοί κόκκινοι γαλαξίες που κατατάχθηκαν ως προγενέστερου (early) τύπου παρουσιάζουν στις βαθιές απεικονίσεις μπλε δισκοειδείς δομές. Αυτό δεν σημαίνει ότι η μορφολογική κατηγοριοποίηση είναι άκυρη, αλλά μας προβληματίζει για τα δεδομένα βάσει των οποίων γίνεται.
- Επηρεάζονται οι κλιμακωτές σχέσεις από τις βαθιές απεικονίσεις?
- Η αστρική μάζα και το μέγεθος αποτελούν άλλες βασικές παραμέτρους στην κατηγοριοποίηση των γαλαξιών και/ ή καθορίζουν τις γενικές κλιμακωτές σχέσεις που δείχνουν τις διαφορές τους (για παράδειγμα η σχέση μάζας/ μεγέθους των ETG). Οι τιμές τέτοιων παραμέτρων εξαρτώνται πάλι από το βάθος της απεικόνισης που χρησιμοποιούμε. Το επιπλέον διάχυτο φως αποτελεί το 5- 20%, ανάλογα την γαλαξιακή μάζα. Είναι περισσότερο σε πυκνά περιβάλλοντα όπως το σμήνος της Παρθένου, αλλά εκεί το φως των πολύ εκτεταμένων αστρικών αλφών ανακατεύεται με το φως που προέρχεται από τις περιοχές ανάμεσα στους γαλαξίες του σμήνος, και υπολογίζεται δύσκολα. Για γαλαξίες μικρότερους από 100 δις ηλιακές μάζες δεν βρίσκουμε σημαντικές αποκλίσεις ανάμεσα στην ενεργή ακτίνα των προγενέστερου τύπου (ETG) γαλαξιών της επισκόπησης βαθέως απεικόνισης ATLAS και των άλλων μετρήσεων. Για μεγαλύτερους γαλαξίες έχουμε διαφορά μετρήσεων ακτίνας ως και κατά παράγοντα 1,7. Αυτές οι αναβαθμισμένες μετρήσεις της μάζας και του μεγέθους δεν επηρεάζουν σημαντικά τις συμπαντικές κλιμακωτές σχέσεις. Όμως η διακύμανση της υπέρβασης της αναλογίας μάζας/ μεγέθους ως συνέπεια της μάζας, του μορφολογικού τύπου κλπ. μπορούν να μας δώσουν μια εικόνα για το χτίσιμο των γαλαξιών.
- Υπάρχουν λεπτές δομές γύρω από γαλαξίες όλων των τύπων?
- Η επισκόπησή μας θα περιλαμβάνει 260 ETG και 100 σπειροειδείς όταν ολοκληρωθεί. Έτσι θα έχουμε καλά στατιστικά προς σύγκριση με τα κοσμολογικά μοντέλα σχηματισμού γαλαξιών και τις σχετικές προσομοιώσεις. Φαίνεται πως όλοι οι γαλαξίες μεγάλης μάζας περικυκλώνονται από αστρικές ροές, τα κατάλοιπα πολλαπλών (κυρίως μικρών) συγχωνεύσεων, μέσω των οποίων αυτοί χτίστηκαν. Οι γαλαξίες έχουν καταταγεί ως συστήματα υπό αλληλεπίδραση, αυτοί με μεγάλες ή μικρές συγχωνεύσεις, και γαλαξίες σε πλήρη ηρεμία, ανάλογα το σχήμα και τον αριθμό των λεπτών δομών γύρω τους. Οι γαλαξίες μεγάλης μάζας εμφανίζονται να έχουν περάσει περισσότερες πρόσφατες μεγάλες και μικρές συγχωνεύσεις. Η αναλογία των σε πλήρη ηρεμία συστημάτων μειώνεται κατά παράγοντα 2 από την μικρότερη στην μεγαλύτερη μάζα. Παρόμοιες τάσεις βρέθηκαν από τους ταχέως

στους αργά περιστρεφόμενος και από τους πλούσιους σε αέριο στους φτωχούς σε αέριο γαλαξίες.

- Η εξέλιξη των ηλικιών και της μεταλλικότητας των μεγάλης μάζας γαλαξιών σε  $z = 0,7$
- Θα παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα για τις ιδιότητες των αστρικών πληθυσμών των γαλαξιών μεγάλης μάζας σε  $z = 0,7$ , βάσει της φασματικής ανάλυσης IMACS, σε δείγμα 70 γαλαξιών με μεγαλύτερη μάζα από 100 δις ηλιακές. Οι σχέσεις ηλικίας/ μάζας και αστρικής μεταλλικότητας/ μάζας για τον πληθυσμό ως σύνολο παρουσιάζουν παρόμοιο σχήμα με τις τοπικές (σημερινές) για ανάλογες μάζες, αλλά απεικονίζουν ηλικίες μικρότερες από 4 δις έτη και μεταλλικότητες μικρότερες από 0,13 dex. Οι γαλαξίες σε ηρεμία έχουν αστρικές μεταλλικότητες και ηλικίες που δείχνουν παθητική εξέλιξη. Η εξέλιξη (εμπλουτισμός) στην μεταλλικότητα καθοδηγείται από τους γαλαξίες σχηματισμού αστερών. Όμως ένα σημαντικό ποσοστό των γαλαξιών αστρογέννησης έχουν μεταλλικότητες που συγκρίνονται με αυτές των τοπικών <ήρεμων> γαλαξιών. Αν η ελάττωση σχηματισμού άστρων συνέβη σε  $z < 0,7$ , τότε οι γαλαξίες αυτοί μπόρεσαν να δημιουργήσουν τον απαραίτητο πληθυσμό που αντιπροσωπεύει την διασπορά της ηλικίας και μεταλλικότητας των τοπικών (σημερινών) <ήρεμων> γαλαξιών.
- Οι πληθυσμοί των μεγάλης μάζας γαλαξιών πέρασαν μια σημαντική εξέλιξη από την ηλικία  $z < 1$ , κάτι που φαίνεται από την δραματική ελάττωση της πυκνότητας του κοσμικού ρυθμού αστρογέννησης (star formation rate, SFR) παράλληλα με μια αύξηση του πλήθους των <ήρεμων> γαλαξιών. Η ανίχνευση των ηλικιών και της μεταλλικότητας των αστρικών πληθυσμών σε γαλαξίες με διαφορετικό  $z$ , σε σχέση με τις γαλαξιακές μάζες και την δραστηριότητα σχηματισμού αστεριών, οριοθετεί επιπλέον τους μηχανισμούς που οδηγούν στην κοσμική υποβάθμιση σχηματισμού αστεριών και το χτίσιμο του πληθυσμού των <ήρεμων> γαλαξιών.
- Οι μελέτες των αστρικών πληθυσμών των γαλαξιών σε μεσαίο  $z$  (κοντά στο 1) περιορίζονται λόγω της απαίτησης βαθιάς φασματοσκοπίας με ευαισθησία στις αστρικές ηλικίες και μεταλλικότητες. Οι περισσότερες μελέτες έχουν ως στόχους γαλαξίες της κόκκινης ακολουθίας, που βρίσκονται σε σμήνη. Οι ιδιότητές τους βρέθηκαν να συμφωνούν με παθητική εξέλιξη γαλαξιών μεγάλης μάζας. Οι μελέτες της ηλικίας και της μεταλλικότητας για μεγάλης μάζας ήρεμους γαλαξίες είναι λίγες για  $z < 0,7$ . Εμείς θα αναλύσουμε ήρεμους γαλαξίες προγενέστερου τύπου (early type) και γαλαξίες αστρογέννησης μεταγενέστερου (late) τύπου. Μετρήσαμε τις αναλογίες ανάμεσα στην ηλικία, αστρική μεταλλικότητα και αστρική μάζα για το σύνολο του πληθυσμού και ξεχωριστά για τους ήρεμους γαλαξίες και τις συγκρίναμε με ανάλογες σε  $z = 0$  (σήμερα). Θέλουμε να δούμε αν οι ανεξάρτητοι γαλαξίες που βρίσκονται ήδη στην κόκκινη ακολουθία (ελάχιστη αστρογέννηση) σε  $z = 0,7$  παρουσιάζουν κάποια εξέλιξη μέχρι  $z = 0$  ή αν ο συνολικός γαλαξιακός πληθυσμός εξελίχθηκε επιπλέον των γαλαξιών που ήρθαν πρόσφατα σε <ηρεμία>. Θα αναλύσουμε αν οι γαλαξίες αστρογέννησης σε  $z = 0,7$  έχουν ηλικίες και μεταλλικότητες που συμφωνούν με τους πληθυσμούς που πρέπει να έχουν οι παρατηρήσιμοι στην κόκκινη ακολουθία γαλαξίες.

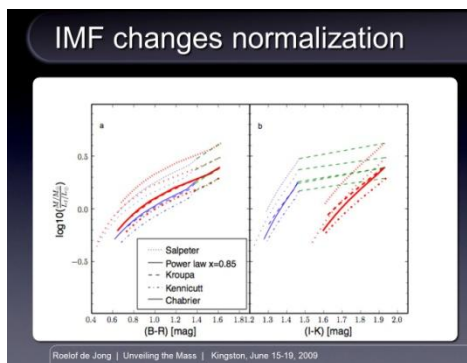
- Η ηλικία που κυριαρχεί στον αστρικό πληθυσμό αυξάνεται από 2,3 δις έτη για γαλαξίες με μάζα 30 δις ηλιακές σε 4,5 δις έτη για μάζα μιας τάξης μεγέθους μεγαλύτερη (πάντα για  $z = 0,7$ ). Η μορφή της αναλογίας είναι σύμφωνη με αυτήν σε  $z = 0$ , και οι χαρακτηριστικές ηλικίες των αστεριών σε γαλαξίες με μάζα 150 δις ηλιακές είναι κατά 4 δις νεότερες από τις τοπικές μας τιμές. Η αναλογία που παρατηρούμε σε  $z = 0,7$  είναι σημαντικά πιο επίπεδη και έχει ένα σημείο 0 σε μεγαλύτερη ηλικία από ότι περιμέναμε για παθητικής εξέλιξης γαλαξίες. Η διασπορά μεταλλικότητας σε  $z = 0,7$  είναι όμοια με αυτήν των γαλαξιών της SDSS (επισκόπηση κοντινών γαλαξιών). Η μορφή της αναλογίας είναι παρόμοια και στις 2 τιμές ερυθρολίθωσης, ενώ η χαρακτηριστική αστρική μεταλλικότητα σε  $z = 0,7$  είναι 0,13 dex χαμηλότερη από ότι σε  $z = 0$ . Και οι δύο παρατηρήσεις μας δείχνουν ότι η παθητική εξέλιξη όλου του πληθυσμού των μεγάλης μάζας γαλαξιών σε  $z = 0,7$  δεν προμηνύει την τοπική αναλογία ηλικίας /μάζας και μεταλλικότητα/ μάζας.
- Οι ηλικίες των αστεριών των ήρεμων γαλαξιών σε  $z = 0,7$  αυξάνονται με την γαλαξιακή μάζα παρόμοια με τους σημερινούς γαλαξίες, αλλά εξισορροπούν στα 3 δις έτη. Οι αστρικές μεταλλικότητες των ήρεμων σε  $z = 0,7$  γαλαξιών έχουν παρόμοια διασπορά με τους σημερινούς, δείχνοντας ότι δεν εξελίσσεται η αστρική μεταλλικότητα για αυτό το είδος γαλαξιών. Η μη εξέλιξη της διασποράς αστρικής μεταλλικότητας υποδηλώνει ότι η παθητική εξέλιξη συμβαίνει στους γαλαξίες μεγάλης μάζας που ήταν ήδη σε ηρεμία στις μεσαίες τιμές του  $z$ .
- Οι γαλαξίες αστρογέννησης παρουσιάζουν μια πιο απότομη αναλογία ηλικίας/ μάζας από τους ήρεμους, που εξισορροπείται στα 5 δις έτη από τις ανάλογες τοπικές ηλικίες. Οι αστρικές μεταλλικότητές τους είναι κατά 0,12 dex χαμηλότερες από τις τοπικές μας. Η παρατηρήσιμη εξισορρόπηση μεταξύ  $z = 0,7$  και 0 είναι παρόμοια με την μέση εξέλιξη της αφθονίας του οξυγόνου αέριας φάσης των γαλαξιών σχηματισμού αστεριών. Είναι επίσης παρόμοια, αν και λίγο μεγαλύτερη, από την εξέλιξη της ίδιας αστρικής μάζας και  $z$  με βάση τις εκτιμήσεις των μέσων ιστορικών σχηματισμού αστεριών των γαλαξιών και την παρατηρήσιμη αναλογία SFR μάζας / μεταλλικότητας του αερίου. Η παρατηρήσιμη εξέλιξη στην μέση αστρική μεταλλικότητα δείχνει να υπάρχει χημικός εμπλουτισμός τουλάχιστον σε μερικούς γαλαξίες μεγάλης μάζας σχηματισμού αστεριών. Ένα σημαντικό μέρος των γαλαξιών αστρογέννησης σε  $z = 0,7$  έχει ήδη συγκρίσιμες μεταλλικότητες με τους σημερινούς ήρεμους γαλαξίες. Αυτοί έχουν ιδιότητες αστρικού πληθυσμού συγκρίσιμες με αυτές που χρειάζεται για το νεαρότερο μέρος του πληθυσμού των τοπικών ήρεμων γαλαξιών, αυξάνοντας την διασπορά της ηλικίας χωρίς την αύξηση της διασποράς της μεταλλικότητας.
- Βρήκαμε ότι οι ήρεμοι γαλαξίες σε  $z = 0,7$  έχουν αστρικές μεταλλικότητες και ηλικίες που είναι συνεπείς με τους σημερινούς γαλαξίες παθητικής εξέλιξης. Είδαμε επίσης ότι η διασπορά της αστρικής ηλικίας στους ήρεμους γαλαξίες με  $z = 0,7$  είναι πολύ μικρή για να αναπαράγει την σημερινή αντίστοιχη διασπορά. Οι γαλαξίες σχηματισμού αστεριών που ήρθαν πρόσφατα σε ηρεμία μπορούν να συμβάλλουν στο χτίσιμο του νεότερου πληθυσμού των γαλαξιών στην κόκκινη ακολουθία. Περίπου το 40% των μεγάλης μάζας γαλαξιών σχηματισμού αστεριών στο δείγμα μας έχουν πράγματι αστρικές ηλικίες και μεταλλικότητες συγκρίσιμες με αυτές που είναι απαραίτητες για την αύξηση της διασποράς της ηλικίας

- χωρίς να επηρεάζεται η διασπορά της μεταλλικότητας που αντιπροσωπεύει τον τοπικό πληθυσμό στους ήρεμους γαλαξίες.
  
- **Η οδός ανάπτυξης των μεγάλης μάζας γαλαξιών.**
- Υπάρχουν ενδείξεις ότι οι μεγάλης μάζας γαλαξίες έχουν αναπτυχθεί σε μάζα και μέγεθος μέσω της συσσώρευσης μικρότερων. Αυτή η οδός ανάπτυξης μας εξηγεί πολλές διαφορετικές παρατηρήσεις μας. Ακόμα δεν γνωρίζουμε αν αυτό το σενάριο συγχωνεύσεων είναι αρκετό να εξηγήσει την σημαντική αύξηση μάζας και μεγέθους των γαλαξιών μεγάλης μάζας από την εποχή  $z=2$ . Θα δείξουμε ότι το πλήθος των δορυφόρων γαλαξιών γύρω από γαλαξίες μεγάλης μάζας όλων των τιμών ερυθρολίσησης και η ύπαρξη των μεγάλης μάζας γαλαξιακών <πτωμάτων> (γαλαξίες χωρίς αστρογέννηση) στο κοντινό μας σύμπαν συμφωνούν με τα παραπάνω. Παραμένουν ανοιχτά ερωτήματα για τις ιδιότητες της αστρικής άλως των σημερινών γαλαξιών μεγάλης μάζας και το μέγεθος του πλήθους των μεγάλης μάζας γαλαξιακών πτωμάτων σε όλες τις τιμές του  $z$ . Έχουμε αρκετά μεγάλο αριθμό συγχωνεύσεων ώστε να δικαιολογείται η μεγάλη αύξηση του μεγέθους των γαλαξιών? Που βρίσκονται τα γαλαξιακά πτώματα στο κοντινό μας σύμπαν?
- Είναι ικανό το πλήθος των συγχωνεύσεων για την αύξηση του μεγέθους των γαλαξιών?
- Αν η οδός μέσω των συγχωνεύσεων είναι η κυρίαρχη ώστε οι μεγάλης μάζας γαλαξίες να φτάσουν τα σημερινά μεγέθη τους, τότε σε όλες τις τιμές ερυθρολίσησης πρέπει να υπάρχουν αρκετοί δορυφόροι γαλαξίες γύρω από τους γαλαξίες με μεγάλη μάζα. Η μέθοδος που ακολουθούμε είναι να μετρήσουμε τον αριθμό των γαλαξιών σε μια ορισμένη ακτινική απόσταση και ορισμένο διάστημα ερυθρολίσησης προς τους γαλαξίες μεγάλης μάζας που εξετάζουμε. Το πλήθος των δορυφόρων γύρω από γαλαξίες μεγάλης μάζας έχει παραμείνει αρκετά σταθερό από την εποχή  $z=1,5$ . Αυτό παρατηρείται ανεξάρτητα από την αναλογία μάζας ανάμεσα στον μεγάλο και στον δορυφόρο γαλαξία. Μια λεπτομερή ανάλυση της συνεισφοράς της μάζας κάθε δορυφόρου στο συνολικό σύστημα γαλαξία-δορυφόρων μας δείχνει ότι, στην περίπτωση της συγχώνευσης των δορυφόρων στον γαλαξία, την μεγαλύτερη συνεισφορά στην αύξηση της γαλαξιακής μάζας έχουν οι δορυφόροι με τις μεγαλύτερες μάζες. Αυτό συμβαίνει γιατί δεν υπάρχει ικανός αριθμός μικρών δορυφόρων να ισορροπήσουν την συνεισφορά μάζας. Ανεξάρτητα αν το χρονοδιάγραμμα της συγχώνευσης των δορυφόρων εξαρτάται από την μάζα τους ή όχι (μικρότερο για τους μεγαλύτερης μάζας δορυφόρους), η αύξηση της μάζας ενός μεγάλης μάζας γαλαξία είναι 8% /δισ έτη. Αυτό σημαίνει μια αύξηση από την εποχή  $z=1$  κατά παράγοντα 2. Η αύξηση της γαλαξιακής μάζας συνδέεται με απλή σχέση με την αύξηση του μεγέθους. Μια αύξηση της μάζας κατά παράγοντα 2 σημαίνει μια αύξηση του μεγέθους κατά παράγοντα 2-4. Αυτό αρκεί να εξηγήσει την παρατηρήσιμη εξέλιξη του μεγέθους των μεγάλης μάζας γαλαξιών κατά παράγοντα 2 από  $z=1$ . Με αυτήν την έννοια, η μέσω των συγχωνεύσεων οδός φαίνεται να έχει ικανό αριθμό δορυφόρων γύρω από τους γαλαξίες μεγάλης μάζας ώστε να εξηγήσει τα παρατηρήσιμα μεγέθη τους.

- Που βρίσκονται τα <ανέπαφα πτώματα> μεγάλης μάζας (untouched massive relic) γαλαξιών στην γειτονιά μας ( $z=0$ )? Θέλουμε να ανακαλύψουμε αν υπάρχουν στην γειτονιά μας μεμονωμένοι γαλαξίες μεγάλης μάζας, που έχουν μείνει χωρίς εξέλιξη από την εποχή  $z=2$ . Μια πρόσφατη έρευνα έδειξε ότι μόνο 1 στους 1000 μεγάλης μάζας γαλαξίες στο σημερινό σύμπαν συσώρευσε λιγότερο από το 10% της συνολικής αστρικής του μάζας από συγχωνεύσεις, μετά την εποχή  $z=2$ . Βάσει της πυκνότητας του αριθμού των γαλαξιών, αυτό μεταφράζεται σε ένα τέτοιο <πτώμα> σε μια σφαίρα 63 Mpc. Δεν μπορέσαμε να βρούμε κάποιο μεμονωμένο γαλαξία με χαρακτηριστικά πτώματος (100 δις ηλιακές μάζες, ακτίνα 1,5 kpc και ομογενή γηραιό αστρικό πληθυσμό ηλικίας  $> 10$  δις ετών). Όμως ένα κοντινό αντικείμενο, το NGC 1277, παρουσιάζει δομές που το κάνουν υποψήφιο. Οι ιδιότητές του (120 δις ηλιακές μάζες, 1,2 kpc ακτίνα, διακύμανση ταχύτητας 330 km/s και ο γηραιός αστρικός πληθυσμός του) είναι μέσα στα παραπάνω όρια. Από την ομαλή του μορφολογία δεν φαίνεται να φέρει σημάδια από πρόσφατη προσαύξηση εξωτερικών του αστεριών. Σε όλες τις ακτίνες του (αποστάσεις από το κέντρο του) που μελετήθηκε, τα ιστορικά αστρογέννησης συμφωνούν με την απουσία σχηματισμού αστεριών τα τελευταία 10 δις έτη. Μας δίνει την δυνατότητα να εξερευνήσουμε με λεπτομέρεια τις ιδιότητες των πρώτων βημάτων σχηματισμού των μεγάλης μάζας γαλαξιών. Η μεγάλη τιμή της αναλογίας  $\alpha/Fe > 0,3$  δείχνει μια ακραία βραχύχρονη περίοδο σχηματισμού αστεριών, όπου υπήρχε τεράστια παραγωγή αστεριών με 1000 ηλιακές μάζες/ έτος. Ο NGC1277 είναι ισχυρή απόδειξη ότι μερικοί γαλαξίες μεγάλης μάζας δεν εξελίχθηκαν από την εποχή  $z=2$ . Αυτό είναι σύμφωνο με την θεωρία των συγχωνεύσεων. Από την άλλη, αυτά τα γαλαξιακά πτώματα είναι δύσκολο να δικαιολογήσουν σενάρια αύξησης μάζας όπως μέσω AGN (ενεργοί γαλαξιακοί πυρήνες), μιας και αυτός ο γαλαξίας φιλοξενεί ήδη μια υπερμεγέθους κεντρική μαύρη τρύπα και παραμένει συμπαγής.
- Η οδός αύξησης μάζας μέσω συγχωνεύσεων πέρασε με επιτυχία δυο δοκιμές. 1) Υπάρχουν αρκετοί δορυφόροι γύρω από τους γαλαξίες μεγάλης μάζας ώστε να δικαιολογηθεί η παρατηρήσιμη αύξησή τους σε μάζα και μέγεθος. 2) Εξηγεί την ύπαρξη μη εξελιγμένων μεμονωμένων γαλαξιών μεγάλης μάζας στο σημερινό σύμπαν.
- 
- Η συνιστώσα αρχικής μάζας (initial mass function, IMF) για γαλαξίες μεγάλης μάζας σε  $z=1$ .
- Θα αναλύσουμε τα αποτελέσματα της ομαλοποίησης της αστρικής IMF 68 μεγάλης μάζας (100 δις- 1 τρις ηλιακές μάζες) ETG (προγενέστερου τύπου γαλαξιών) σε  $z=1$  μέσω δεδομένων από την επισκόπηση DEEP2 Galaxy red shift survey, που παρατήρησε 49000 γαλαξίες. Αυτό το πετύχαμε αντλώντας την αστρική αναλογία μάζας/ φωτός (M/L) των γαλαξιών από συμμετρικά στον άξονα δυναμικά μοντέλα και συγκρίνοντάς την με τις τιμές από τα μοντέλα αστρικών πληθυσμών μέσω εφαρμογής των φασμάτων. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι μεγάλης μάζας ETG σε μεγάλο  $z$  έχουν μια ομαλοποίηση της IMF τύπου Salpeter και παρέχουν παρατηρήσιμες αποδείξεις μικρής αναλογίας σκοτεινής ύλης στις εσωτερικές περιοχές τους. Η IMF δεν έχει παγκόσμια τιμή, αλλά κυμαίνεται συστηματικά

ανάλογα την κεντρική διασπορά ταχυτήτων των γαλαξιών. Αυτό έχει επιβεβαιωθεί από μοντέλα αστρικού πληθυσμού και δυναμικές προσεγγίσεις.

- Επικεντρωθήκαμε στους γαλαξίες με  $z = 0,7-0,9$  που παρουσιάζουν σημαντικές γραμμές απορρόφησης. Με την χρήση του προφίλ φωτός και μάζας κάθε γαλαξία μπορούμε να καθορίσουμε την αναμενόμενη αστρική κινηματική και να την καλιμπράρουμε με την παρατηρήσιμη, ώστε να καθορίσουμε την αστρική σχέση M/L. Πρέπει να έχουμε το προφίλ φωτός από τις εσωτερικές περιοχές των γαλαξιών, όπου αντλούμε τις αστρικές κινηματικές, και να έχουμε οπτική εξακρίβωση. Δεν περιλαμβάνουμε γαλαξίες με μη συμμετρικές στον άξονα δομές όπως μπάρες, γραμμές σκόνης κλπ. Υπολογίσαμε το προφίλ της άλως βάσει σύγκρισης αστρικής μάζας ή M/L με την σχετική σκοτεινή άλω σε ορισμένο z. Η αναλογία σκοτεινής ύλης στο εσωτερικό των γαλαξιών υπολογίστηκε στο 30%. Αφαιρέσαμε τους γαλαξίες με πολλαπλά επεισόδια αστρογέννησης ή σημαντικές αναλογίες νεαρού (<1,2 δις έτη) αστρικού πληθυσμού. Τέτοιοι γαλαξίες παρουσιάζουν ακτινωτά κυμαινόμενη M/L και δεν επιτρέπουν τον υπολογισμό γενικής M/L του γαλαξία.



- Η μυστική ζωή των γαλαξιών.
- Γνωρίζουμε πολλά για την εξέλιξη των γαλαξιών από την εποχή  $z=2$  και μερικά για ακόμα πιο μεγάλες ερυθρολισθήσεις. Πως γίνεται να γνωρίζουμε τόσο λίγα για τα ιστορικά σχηματισμού άστρων (star formation histories, SFH) των ανεξάρτητων γαλαξιών?
- Η πράσινη κοιλάδα είναι μωβ.
- Η επισκόπηση SDSS μας παρείχε για πρώτη φορά φωτομετρία για εκατοντάδες χιλιάδες κοντινούς γαλαξίες. Διαχωρίσαμε τους μπλε (αστρογέννησης) από τους κόκκινους γαλαξίες και είδαμε ότι μόνο για μάζες < 100 δις ηλιακών οι γαλαξίες στο σύμπαν είναι ή σχηματισμού αστεριών ή παθητικοί. Πάνω από αυτή την μάζα είναι όλοι παθητικοί. Ανακαλύψαμε και την πράσινη κοιλάδα, έναν ενδιάμεσο πληθυσμό, που είναι στον δρόμο από το μπλε σύννεφο προς την κόκκινη ακολουθία, ως συνέπεια της υποβάθμισης της αστρογέννησης. Πρόσφατες μελέτες στο υπεριώδες δεν υποστηρίζουν το σενάριο της σε διαδικασία μεταμόρφωσης των γαλαξιών. Θα παρουσιάσουμε και άλλες αποδείξεις σε αυτήν την κατεύθυνση. Η υπόθεσή μας είναι ότι οι γαλαξίες εμφανίζονται στην πράσινη κοιλάδα επειδή

έχουν κανονικό δίσκο αστρογέννησης αλλά και ουσιαστική κοιλιά, που αυτά τους κάνουν να φαίνονται πράσινοι. Αυτή η ιδέα αναπτύχθηκε από μια μελέτη της κύριας ακολουθίας αστρογέννησης που έδειξε ότι λαμβάνοντας υπόψη την ιδιότητα μη σχηματισμού αστεριών στις κοιλίες μπορούμε να λύσουμε τον γρίφο της παθητικότητας για τους γαλαξίες μεγάλης μάζας, που κυριαρχούνται από τις κοιλίες τους.

- Επιστρέφοντας στην πράσινη κοιλιάδα, αναγνωρίζουμε ότι πολλοί γαλαξίες της είναι απλά σκονισμένοι γαλαξίες που βλέπουμε στην κόψη. Τους αφαιρέσαμε από το δείγμα και κρατήσαμε αυτούς που τους βλέπουμε κατά πρόσωπο (με ελλειπτικότητα  $<0,2$ ). Όπως ήταν αναμενόμενο, οι γαλαξίες του μπλε σύννεφου κυριαρχούνται από τους δίσκους τους, οι γαλαξίες της κόκκινης ακολουθίας από τις κοιλίες τους, ενώ αυτοί της πράσινης κοιλιάδας είναι ενδιάμεσης κατάστασης, υποδηλώνοντας ότι αν πρόκειται για γαλαξίες που υπήρξε <κατάσβεση> (quenched, βίαιη καταστολή μέσω εμβολής) της αστρογέννησης του μπλε σύννεφου, πρέπει να έχουν αναπτύξει μεγάλη κοιλιά. Προτιμούμε την απλούστερη εξήγηση, ότι η πλειοψηφία αυτών των γαλαξιών της πράσινης κοιλιάς δεν είναι σε εξέλιξη προς την κόκκινη ακολουθία, αλλά απλά γαλαξίες με συνδυασμό κόκκινης κοιλιάς και μπλε δίσκου. Αν αφαιρέσουμε την κοιλιά, ο δίσκος ενός τέτοιου γαλαξία έχει κανονικό μπλε χρώμα. Η ιδέα ότι οι περισσότεροι από τους γαλαξίες της πράσινης κοιλιάδας είχαν κατάσβεση αστρογέννησης και είναι σε μετάβαση φαίνεται να είναι λανθασμένη, βάσει των δεδομένων μας. Όμως είναι λογικό να αναρωτηθούμε πόσοι από τους γαλαξίες της πράσινης ακολουθίας προέρχονται από κατάσβεση. Υπάρχει μια καλά γνωστή σχέση αύξησης της ισχύς της γραμμής απορρόφησης Hδ με την SFR (ρυθμό αστρογέννησης) που έχει να κάνει με την αύξηση της αναλογίας των νεαρών καυτών αστεριών. Η ενισχυμένη παρουσία αυτής της γραμμής αποτελεί υπογραφή έξαρσης σχηματισμού αστεριών. Φαίνεται να υπάρχουν αποδείξεις ύπαρξης αστρικού πληθυσμού με εξάντληση καυσίμων. Τα χρώματα και οι ισχύ των γραμμών απορρόφησης του μπλε σύννεφου και της πράσινης ακολουθίας ταιριάζουν με ακρίβεια, αλλά οι πρώτοι παρουσιάζουν αργότερα αδύναμες ή καθόλου γραμμές εκπομπής (κυρίως Hα, Hβ). Αυτό ακριβώς αναμένουμε από γαλαξίες με βίαιη κατάσβεση, όπου τα αστέρια ηλικίας 1- 10 εκατομμυρίων ετών που ερεθίζουν τις περιοχές HII έχουν εξαφανιστεί (μικρή διάρκεια ζωής των τεράστιων αστεριών που παράγονται κατά την έκρηξη αστρογέννησης), ενώ ο αστρικός πληθυσμός ηλικίας 100 εκ. ετών (πιο μικρά αστέρια) παραμένει αμετάβλητος. Σε ένα χρονοδιάγραμμα 1 δις ετών αυτοί οι γαλαξίες θα μπουν την κόκκινη ακολουθία.
- Εκτιμούμε ότι για το δείγμα της επισκόπησης, ο πληθυσμός με κατάσβεση καυσίμων (γαλαξίες που εξελίσσονται γρήγορα) αποτελεί μερικά ποσοστά του συνολικού πληθυσμού αστρογέννησης. Η φάση της κατάσβεσης είναι χρονικά σύντομη. Οι περισσότεροι γαλαξίες της πράσινης κοιλιάδας ακολουθούν μια αργή, με χρονοδιάγραμμα μερικά δις έτη εξέλιξη, που είναι αποτέλεσμα κανονικής γαλαξιακής εξέλιξης και όχι ενός γεγονότος απότομης κατάσβεσης (βίαιη απώλεια αερίου). Συμπεράναμε ότι για τους τωρινούς γαλαξίες η πράσινη κοιλιάδα αποτελείται βασικά από ενδιάμεσους μπλε κοιλιάς- σπειροειδείς γαλαξίες που αργά κινούνται από το μπλε σύννεφο στην κόκκινη ακολουθία, μέσω κανονικών

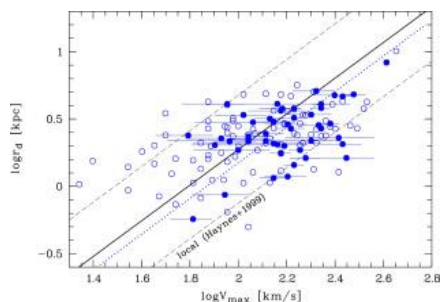
διαδικασιών εξάντλησης του αερίου τους. Οι γαλαξίες κατάσβεσης μπορεί να αποτελούν μια μεγαλύτερη κατηγορία προγενέστερων (early) γαλαξιών. Να επιστημονούμε ότι η κατάσταση σε μεσαία ερυθρολίση είναι παρόμοια με αυτήν που αναφέραμε εδώ, με την προσθήκη 10 φορές πιο μεγάλου πληθυσμού γαλαξιών σχηματισμού αστεριών και της μετέπειτα φάσης εξέλιξης. Μπορούμε να σκεφτούμε ότι αυτές είναι περιπτώσεις όπου ο σχηματισμός αστεριών σταμάτησε από έντονο ξέσπασμα αστρογέννησης, αλλά έχουμε αποδείξεις ότι τα ξεσπάσματα σχηματισμού αστεριών δεν μεταμορφώνουν τους γαλαξίες από μπλε σύννεφου σε κόκκινη ακολουθία. Αν γινόταν αυτό, το πλήθος των γαλαξιών μεσαίας ερυθρολίσης ( $z$ ) της κόκκινης ακολουθίας θα αυξανόταν πολύ πιο γρήγορα από ότι παρατηρούμε. Υποθέτουμε ότι τα έντονα ξεσπάσματα σχηματισμού αστεριών είναι αποτέλεσμα μικρών συγχωνεύσεων, που δεν αλλάζουν την κατάσταση των γαλαξιών αστρογέννησης (παραμένουν και μετά στο μπλε σύννεφο). Ομοίως, αν συμβούν σε γαλαξίες της κόκκινης ακολουθίας, αυτοί επιστρέφουν στην παθητική τους κατάσταση. Μόνο οι μεγάλες συγχωνεύσεις (η μάζα του μικρότερου γαλαξία να είναι μεγαλύτερη από το  $\frac{1}{4}$  της μάζας του μεγάλου) μπορεί να εξελίξει έναν γαλαξία από μπλε σε κόκκινο μέσω έντονης αστρογέννησης και εξάντλησης αερίου.

- Τα παραπάνω θα μας βοηθήσουν να έχουμε καλύτερες παραμέτρους για τα ιστορικά σχηματισμού αστεριών και τον ανάλογο ρυθμό των γαλαξιών (SFH, SFR). Θέλουμε να μετρήσουμε την διασπορά SFR σε διαφορετικό  $z$ . Μπορούμε να υπολογίσουμε τις συνιστώσες αρχικής μάζας (IMF) για ενεργούς και παθητικούς γαλαξίες σε  $0,5 < z < 2,5$ , ακόμα και για μάζες που ποτέ δεν είχαμε στα μοντέλα των SFH.
- Ένα μοντέλο που περιλαμβάνει μεγάλη διασπορά της SFH αντιπροσωπεύει τις 3 σημερινές κοινές σχέσεις που χαρακτηρίζουν την εξέλιξη των βασικών γαλαξιακών παραμέτρων σε κοσμικό χρόνο. Την πυκνότητα των SFR, την διασπορά του πλάτους των SFMS (star forming main sequence, μια σχέση εξέλιξης της SFR και της αστρικής μάζας ως πρότυπο γαλαξιακής εξέλιξης) και της IMF των γαλαξιών, αστρογέννησης και παθητικών. Σε αυτές τις σχέσεις υπάρχει ακόμα πολύ ασάφεια για τον ορισμό τους. Πρέπει να ξεπεράσουμε αυτές τις 3 βασικές παραμέτρους και να ελέγχουμε τις SFH μεμονωμένων γαλαξιών, όπως του δικού μας και των γειτονικών μας.
- Η κινηματική εξέλιξη των σπειροειδών γαλαξιών, πεδίου και γαλαξιακών σμηνών
- Ερευνήσαμε την εξέλιξη της σχέσης Tully- Fisher (TF, σχέση ταχύτητας περιστροφής του γαλαξία/ λαμπρότητας) μέχρι  $z=1$ , για 137 γαλαξίες εκπομπής του πεδίου που απεικονίζουν μια κανονική καμπύλη περιστροφής. Για ένα δείγμα 48 γαλαξιών με πολύ κανονική κινηματική αερίου και αστρική δομή καθορίσαμε μια διασπορά της TF των 1,15 mag, που είναι 2 φορές μεγαλύτερη από τα τοπικά μας δείγματα. Αυτό μάλλον συμβαίνει λόγω των μικρών διακυμάνσεων των ιστορικών σχηματισμού αστεριών και χημικού εμπλουτισμού. Σε μια άλλη μελέτη 96 γαλαξιών των σμηνών Abell 901/902 σε  $z=0,17$  και 86 γαλαξιών του πεδίου με παρόμοια ερυθρολίση

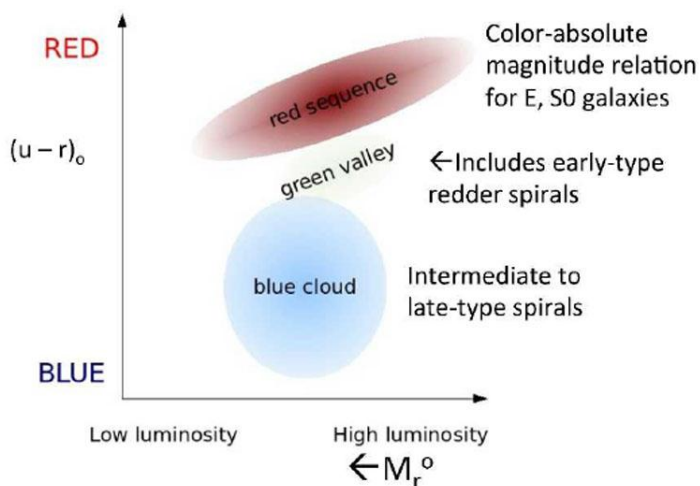


βρήκαμε μια διαφορά της TF των 0,42 mag χωρίς σημαντική διαφορά στην αστρική μάζα. Συγκρίνοντας τους κόκκινους σπειροειδείς με τους μπλε στο σμήνος, οι πρώτοι είναι αμυδρότεροι και έχουν 15% λιγότερη αστρική μάζα. Αυτό μάλλον οφείλεται σε κατάσβεση (quenching) της αστρογέννησης μέσω πίεσης εμβολής από σύγκρουση με άλλον γαλαξία (ram pressure) στο περιβάλλον του σμήνος. Απόδειξη για αυτό το σενάριο αποτελούν οι ισχυρές διαταραχές των δίσκων αερίων των κόκκινων σπειροειδών, που ταυτόχρονα παρουσιάζουν πολύ κανονική δομή αστρικού δίσκου.

- Οι εσωτερικές κινηματικές των γαλαξιών μας παρέχουν σημαντικές πληροφορίες για την φύση τους και τα διάφορα φυσικά συστατικά τους. Ενώ τα αστέρια βρίσκονται σε τροχιές μη σύγκρουσης, δείχνοντάς μας το βαρυτικό μερίδιο που κυριαρχείται από την σκοτεινή ύλη, τα νέφη αερίου μπορούν να αντιδράσουν πιο γρήγορα σε ανεπαίσθητες επιδράσεις και να απεικονίσουν ιδιόρρυθμες κινήσεις, αποκαλύπτοντας γεγονότα αλληλεπίδρασης. Στην περίπτωση των ατάραχων σπειροειδών γαλαξιών η περιστροφή παράγει ένα χαρακτηριστικό προφίλ ταχύτητας με την απότομη αύξηση στις εσωτερικές περιοχές του γαλαξία να μετατρέπεται σε επίπεδη ταχύτητα, η λεγόμενη καμπύλη περιστροφής RC. Σε τέτοια δυναμική (virial) κατάσταση η μέγιστη ταχύτητα μας παρέχει μια καλή εκτίμηση της συνολικής μάζας του γαλαξία και συνδέεται στενά με την λαμπρότητα στην σχέση TF. Με αυτήν την παραδοχή η TF αποτελεί μια σημαντική κλιμακωτή σχέση ώστε να ελέγξουμε ποσοτικά την εξέλιξη των δίσκων των γαλαξιών με την ερυθρολίθση (στον χρόνο). Αφού η κινηματική των αστεριών από τις γραμμές απορρόφησης απαιτεί μεγαλύτερη αναλογία σήματος/θορύβου, οι περισσότερες μελέτες των μακρινών γαλαξιών αρκούνται σε μετρήσεις γραμμών εκπομπής από το θερμό ιονισμένο αέριο. Εδώ θα δούμε 2 εφαρμογές. Μια μελέτη της TF μακρινών γαλαξιών πεδίου και μία έρευνα των αντικειμένων μετάβασης (γαλαξίες που μεταβαίνουν στο κόκκινο) στο σμήνος Abell 901/902.
- Η εξέλιξη της σχέσης TF μέχρι  $z=1$ .
- Το δείγμα μας αποτελείται από 238 γαλαξίες. Για τους 137 σπειροειδείς μπορέσαμε να εξάγουμε τις καμπύλες RC και να καθορίσουμε την μέγιστη αστρική ταχύτητα, ενώ απορρίψαμε 101 γαλαξίες με γραμμές εκπομπής λόγω της διασποράς της κινηματικής τους. Αυτοί οι σπειροειδείς βρίσκονται σε  $0,05 > z > 0,97$ , που αντιπροσωπεύει χρονικό διάστημα 0,6 ως 7,6 δις έτη. Η κλίση του δείγματος στο διάγραμμα είναι όμοια με δείγματα σημερινών γαλαξιών.



- Οι κόκκινοι σπειροειδείς ως αντικείμενα μετάβασης μέσω απογύμνωσης στα σμήνη.
- Στο παραπάνω σμήνος πετύχαμε κινηματική ανάλυση για 96 μέλη του και 86 σπειροειδείς του πεδίου με παρόμοιο  $z$  (0,12- 0,38). Όμως πολλοί γαλαξίες δεν παρουσίασαν κανονική RC, αλλά διαταραγμένες κινηματικές. Μετρήσαμε ότι οι γαλαξίες με τέτοιες διαταραχές φτάνουν το 17% στο πεδίο και το 25% στο σμήνος. Τα αντικείμενα με υψηλής ποιότητας RC για ανάλυση της TF που είναι μέλη του σμήνος είναι λίγο πιο αμυδρά από αυτά του πεδίου.
- Ακόμα, επικεντρωθήκαμε στους κόκκινους σπειροειδείς, που έχουν κόκκινο χρώμα όπως οι γαλαξίες της κόκκινης ακολουθίας, αλλά ταυτόχρονα σπειροειδής (δίσκου)μορφολογία και σημαντικούς ρυθμούς αστρογέννησης (star formation rates, SFR), αν και χαμηλότερους από τους τυπικούς μπλε σπειροειδείς. Αυτοί οι κόκκινοι σπειροειδείς με κανονικό RC παρουσιάζονται αμυδρότεροι και δείχνουν μια μικρή διαφορά στην αστρική TF σχετικά με τα μέλη του μπλε σύννεφου του σμήνος. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί από πρόσφατη κατάσβεση (quenching) της αστρογέννησης των κόκκινων σπειροειδών που προκλήθηκε από πίεση εμβολής, που είχε ως αποτέλεσμα την αφαίρεση αερίου των γαλαξιών (απογύμνωση) μέσα στο σμήνος. Πολλοί κόκκινοι σπειροειδείς δείχνουν ισχυρές ασυμμετρίες στην καμπύλη περιστροφής, που όμως συνδυάζονται με μια μη ταραγμένη αστρική μορφολογία. Η μόνη διαδικασία σε περιβάλλον σμήνους που επηρεάζει τον δίσκο αερίου και όχι τη αστρική μορφολογία είναι η πίεση μέσω εμβολής. Έτσι οι κόκκινοι σπειροειδείς είναι γαλαξίες σε μετάβαση από το μπλε σύννεφο στους φακοειδείς γαλαξίες σμήνους (S0).



- Η σχέση αστρικής και μάζας της άλως στους νάνους γαλαξίες μέχρι  $z=1$ .
- Αποτελούν τα προφίλ κινηματικής και μάζας των νάνων γαλαξιών μια βασική πρόκληση στα καθιερωμένα μοντέλα ψυχρής σκοτεινής ύλης? Μια

φασματοσκοπική μελέτη για εκατοντάδες νάνους γαλαξίες αστρογέννησης, με 10 εκατομμύρια ως 1 δις ηλιακές μάζες σε μεσαίο  $z$  (0,2-1), δείχνει ότι αυτή η ερώτηση είναι λιγότερο αντικείμενο κοσμικών μεγεθών και περιβάλλοντος από ότι γνωρίζαμε. Το μισό δείγμα εμφανίζει καλά αναλυμένη, μετατοπισμένη στο ερυθρό εκπομπή νεφών που χρησιμοποιήσαμε στον καθορισμό των καμπυλών περιστροφής. Έτσι κατασκευάσαμε την σχέση Tully- Fisher (TF) για μικρές μάζες μέχρι 10 εκ. ηλιακές.

- Η πρόκληση για την κυρίαρχη θεωρία σκοτεινής ύλης (WIMP- like CDM) είναι η ασυμφωνία ανάμεσα στις θεωρητικές (προβλεπόμενες) εσωτερικές πυκνότητες των γαλαξιών με τις παρατηρήσιμες. Απεικονισμένη στα σχήματα και τα πλάτη των καμπυλών περιστροφής, αυτή η ασυμφωνία είναι εν μέρει ξεκάθαρη σε γαλαξίες μικρής μάζας όπου η σκοτεινή ύλη κυριαρχεί και στις εσωτερικές περιοχές, πολύ περισσότερο από ότι στους γαλαξίες μεγάλης μάζας. Τώρα έχουμε την δυνατότητα ανάλυσης των καμπυλών περιστροφής των νάνων σε μεγαλύτερο  $z$ . Έτσι αυτή η διαπίστωση δεν αντιμετωπίζεται πλέον σαν τοπικό μας φαινόμενο.
- Εντοπίσαμε ασυνέπειες ανάμεσα στην αφθονία των νάνων/ μεθόδους προσομοίωσης και στην παρατηρησιακή μέθοδο κινηματικής, που δεν μπορούν να εξηγηθούν μέσω της κλασσικής παραδοχής της μη ανακάλυψης των δορυφόρων των μεγάλων γαλαξιών και του προβλήματος cusp-core (η ασυμφωνία μεταξύ παρατηρήσιμης πυκνότητας σκοτεινής ύλης και προβλεπόμενης στους νάνους). Με το δείγμα μας που αποτελείται από γαλαξίες πεδίου και σμηνών, και με εύρος ηλικίας την μισή του σύμπαντος, μπορούμε να καθορίσουμε τι λείπει από τα μοντέλα μας.
- Επεκτείνοντας την μέτρηση της αστρικής μάζας στην σχέση TF.
- Ενώ μπορεί να υπάρξει μια συνεπής εικόνα για τις μάζες που τυπικά ερευνούμε σε μεσαίο  $z$ , η εικόνα αποκλίνει στις μικρές γαλαξιακές μάζες. Μια εξήγηση είναι η μεγαλύτερη διακύμανση της αναλογίας της μάζας αστεριών /αερίου στις άλως των νάνων. Ένα πρόβλημα των συγκριτικών παρατηρήσεων με μοντέλα που χρησιμοποιούν άξονες είναι ότι η μάζα της άλω αποτελεί εν μέρει έμμεση μέτρηση και με πολλές παραδοχές. Για παράδειγμα, μετατρέψαμε τις οπτικά μετρημένες ταχύτητες σε ταχύτητες της άλως με την χρήση σχέσεων βαρυτικού φακού. Αποτελεί αυτό το θέμα ένα κλειδί για την κατανόηση της σκοτεινής ύλης ή απλά βλέπουμε πως τα βαρυονία κλιμακώνονται με τα βαρυονικά φαινόμενα στα εσωτερικά των γαλαξιών, ακόμα και στις μικρές γαλαξιακές μάζες?
- Υπάρχουν 3 αιχμές για μελλοντικές επισκοπήσεις σχετικά με τους νάνους σε μεσαίο  $z$  με ανάλυση της κινηματικής της μικρότερης αστρικής μάζας και της πιο αργής περιστροφής τους.
- A) Low mass regime (συστήματα μικρής μάζας), με λόγο αστρικής/ ηλιακής μάζας  $<8$  και  $<6$ , στις περιοχές κυριαρχίας της σκοτεινής ύλης όπου τα βαρυονία και η αστρογέννηση έχουν περιορισμένο μερίδιο ενεργειακού αποθέματος.
- B) Ευαισθησία εξέλιξης (πέρα από  $z=1$ ), ώστε να ανιχνεύσουμε την αλλαγή του προφίλ πυκνότητας στον χρόνο και στα περιβάλλοντα, όπως και τον σχηματισμό αστεριών.
- Γ) Η διακύμανση των περιβαλλόντων (από τα πιο πυκνά στα πιο αραιά). Για να συγκρίνουμε τους γαλαξίες που μπορεί να έχουν περιορισμένη αλληλεπίδραση με

αυτούς που κυριαρχούνται από το ιστορικό αλληλεπίδρασής τους, για την καλύτερη κατανόηση των δυνάμεων στην εσωτερική δυναμική των νάνων.

- Την τελευταία δεκαετία μάθαμε ότι η σχέση ανάμεσα στην βαρυονική και την σκοτεινή ύλη δεν είναι καθολική.