

Τα γαλαξιακά σμήνη

Στατιστική και παρατήρηση.

Ακόμα και μια χονδρική ανάλυση της διασποράς των γαλαξιών στον ουρανό μας δείχνει την τάση δημιουργίας σμηνών που επικρατεί.

Από τους 35 λαμπρούς γαλαξίες του καταλόγου Messier οι 16 βρίσκονται σε ένα μικρό πεδίο (το σμήνος της Παρθένου). Οι γαλαξίες μέχρι φαινόμενο μέγεθος 13mag στον κατάλογο Sharpley- Aimes βρίσκονται στο σμήνος της Παρθένου και σε εκτεταμένες ομάδες στον Νότιο ουρανό. Οι γαλαξίες μέχρι 18,3mag μας δείχνουν ότι η σύσταση σμηνών είναι πολύ φυσιολογική. Οι γαλαξίες μέχρι 21mag (δομή Abell) βρίσκονται σε 4000 σμήνη, με 1-2 σμήνη κάθε 10 κυβικές μοίρες και σε μετατόπιση προς το ερυθρό μέχρι $z = 0,15$.

Κατηγοριοποίηση των σμηνών.

Κατά Zwicky

Γαλαξιακά σμήνη ονομάζονται οι ισχυρές συγκεντρώσεις γαλαξιών με χιλιάδες μέλη και στατιστική κανονικότητα. Γαλαξιακά νέφη είναι οι μεγάλες, ανώμαλες ομάδες, χωρίς ευδιάκριτη συγκέντρωση. Ομάδες γαλαξιών είναι οι χαλαρές συναθροίσεις μερικών γαλαξιών, χωρίς ευδιάκριτη συγκέντρωση.

Σχετικά με την δομή (περιεχόμενο σε γαλαξίες), έχουμε 3 κατηγοριοποιήσεις, που όμως λειτουργούν σε μεγάλο βαθμό παράλληλα.

Τύποι Rood- Sastry και οι αναλογίες τους στο σύνολο των σμηνών.

cD 21% (supergiant). Το σμήνος κυριαρχείται από έναν πολύ λαμπρό υπερ-γαλαξία (cD).

B 9% (binary). Το σμήνος κυριαρχείται από 2 πολύ λαμπρούς γίγαντες γαλαξίες.

L 9% (line). Τρεις ή περισσότεροι από τους 10 λαμπρότερους γαλαξίες του σμήνους βρίσκονται σε συγκρίσιμες αποστάσεις, σχεδόν σε μια ευθεία.

F 18% (Flat). Μερικοί από τους λαμπρότερους και πολλοί από τους ασθενέστερους σχηματίζουν ένα επίπεδο.

C 14% (core- halo). Τέσσερις ή περισσότεροι από τους 10 λαμπρότερους με συγκρίσιμες αποστάσεις βρίσκονται στην περιοχή του κέντρου του σμήνους, περιτριγυρισμένοι από πολλούς αμυδρότερους γαλαξίες.

I 29% (Irregular). Σμήνος χωρίς καλά καθορισμένο κέντρο.

Τύποι Bautz- Morgan.

Βασίζονται στο κόντράστ λαμπρότητας των λαμπρότερων μελών ενός σμήνους.

BMI Κυριαρχείται από έναν κεντρικό cD γαλαξία.

BMI Περιέχει περισσότερους από έναν λαμπρούς γαλαξίες τύπου μεταξύ cD και cE (giant ellipse)

BMIII Χωρίς κυρίαρχους γαλαξίες.

Τύποι Oemler.

Κατάταξη με το ποσοστό των γαλαξιών σε τύπους της κατάταξης Hubble

	E	SO	S
Σμήνος cD	35	45	20
Φτωχό σε σπειροειδείς γαλαξίες σμήνος	20	50	30
Πλούσιο σε σπειροειδείς γαλαξίες σμήνος	15	35	50

Όσο πιο πλούσιο και συμπυκνωμένο είναι ένα σμήνος, τόσο μεγαλύτερο είναι το μερίδιο σε ελλειπτικούς γαλαξίες σε σχέση με τους γαλαξίες πεδίου. Τα πλούσια σε σπειροειδείς γαλαξίες σμήνη ξεχωρίζουν από το πεδίο επειδή περιέχουν μεγάλη ποσότητα σε SO γαλαξίες.

Παραδείγματα γαλαξιακών σμηνών.

Το σμήνος της Παρθένου.

Είναι το κοντινότερο σε εμάς. Η κεντρική περιοχή του έχει διάμετρο 7 μοίρες, και το κύριο μέρος του 15 x 40 μοίρες. Οι γαλαξίες στις παρυφές του εκτείνονται σε όλο το νότιο γαλαξιακό πλάτος. Μάλλον η τοπική ομάδα και ο Γαλαξίας μας ανήκουν στις παρυφές του σμήνος. Τα γνωστά μέλη του είναι 3000. Το κέντρο του είναι στα 15 Mpc απόσταση από εμάς. Ο ραδιογαλαξίας M87 είναι και αυτός μέλος του.

Το σμήνος του Περσέα.

Κοντινό μας σμήνος, με περισσότερα από 1000 μέλη, σε απόσταση 75 Mpc. Ο γαλαξίας Seyfert NGC 1275, το κέντρο του οποίου παρουσιάζει σημάδια τεράστιας εκροής ύλης, είναι ένα μέλος του.

Το σμήνος της Κόμης Abell1656.

Συμμετρικό πυκνό σμήνος με 2 λαμπρούς γαλαξίες E στο κέντρο, τύπου BMII. Έχει 11000 μέλη μέσα σε πεδίο 6 μοίρες από το κέντρο. Είναι σε απόσταση 70 Mpc.

Τα σμήνη του Ηρακλή.

Ανώμαλα σμήνη τύπου BMIII, με $z = 0,037$.

Abell 2218. Πλούσιο σμήνος με ισχυρά βαρυτικά τόξα, με $z = 0,176$.

Η ανατομία ενός σμήνος.

Αριθμός μελών, εξάπλωση και κατανομή γαλαξιών.

Οι πιο αμυδροί γαλαξίες στα σμήνη δεν είναι παρατηρήσιμοι, αλλά σίγουρα οι νάνοι-γαλαξίες έχουν σημαντικό μερίδιο στα σμήνη. Έτσι τα μεγέθη των σμηνών που μετράμε είναι μόνο τα ελάχιστα. Η διασπορά πυκνότητας σε ένα σμήνος εξαρτάται από την απόσταση των γαλαξιών από το κέντρο του σμήνος και την πυκνότητα του σμήνος σε γαλαξίες. Σε σφαιρωτό γαλαξιακό σμήνος με μεγάλη συγκέντρωση στο κέντρο η διασπορά πυκνότητας μοιάζει με αυτήν ενός περιορισμένου ισόθερμου αερίου.

Διαχωρισμός.

Τα πλούσια σμήνη δείχνουν ισχυρότερη συγκέντρωση των λαμπρών (μεγάλης μάζας) γαλαξιών έναντι των αμυδρών. Θεωρητικά αυτό ισχύει για συστήματα σε ηρεμία, αλλά αυτό είναι δύσκολο να αποδειχτεί από τις παρατηρήσεις. Η διασπορά της ταχύτητας των γαλαξιών μεγαλώνει όσο πιο μεγάλο και πλούσιο είναι το σμήνος, και ποικίλει μέσα σε αυτό. Για παράδειγμα, στο κέντρο του σμήνος της Κόμης η διασπορά ταχύτητας είναι 1300 km/sec, ενώ στις εξωτερικές περιοχές 600 km/sec. Οι μικρές ομάδες και τα φτωχά σε γαλαξίες σμήνη έχουν διασπορά 100 -500 km/sec, ενώ τα μεγάλα σμήνη παρουσιάζουν διασπορά ταχύτητας 400 -1400 km/sec.

Χαρακτηριστικοί χρόνοι στα σμήνη.

Χρόνος διάσχισης (crossing time) ενός γαλαξία για το σμήνος του.
Ισούται με 1 δις έτη για μια ακτίνα Abell για ταχύτητα του γαλαξία 1000 km/sec. Δηλαδή για μια τυπική διάμετρο ενός σμήνος (10 Mpc) ο χρόνος διάσχισης είναι κοντά στον χρόνο Hubble (ηλικία του σύμπαντος).

Χρόνος ηρεμίας (relaxation time).

Είναι ο χρόνος στον οποίο η τυπική διασπορά ταχύτητας σε ένα σμήνος αλλάζει αισθητά λόγω σύγκρουσης γαλαξιών. Στο κέντρο πλουσίων σμηνών ο χρόνος ηρεμίας είναι περίπου 1 δις έτη για τους μεγάλης μάζας γαλαξίες. Μόνο σε αυτούς είναι δυνατή η ύπαρξη φάσης ηρεμίας, όχι για τους γαλαξίες μικρής μάζας.

Χρόνος σύγκρουσης (collision time).

Ο μέσος χρόνος μεταξύ συγκρούσεων ενός γαλαξία με άλλο μέλος του σμήνος.

Χρόνος ψύξης (cooling time).

Το μεσογαλαξιακό πλάσμα ψύχεται μέσω ακτινοβολίας επιβράδυνσης. Για τυπικές πυκνότητες γαλαξιακών σμηνών ο χρόνος ψύξης είναι 10-100 δις έτη.

Μορφολογία –σχέση πυκνότητας- τύπου.

Υπάρχει συσχέτιση ανάμεσα στην επιφανειακή πυκνότητα των γαλαξιών και τον τύπο τους. Με μεγάλη επιφανειακή πυκνότητα είναι οι προγενέστεροι τύποι (E, S0), ενώ με μικρότερη οι μεταγενέστεροι (σπειροειδείς). Οι τελευταίοι κυριαρχούν στις εξωτερικές περιοχές των σμηνών.

Η μεσογαλαξιακή ύλη στα σμήνη.

Ορατή ύλη.

Οι γαλαξίες cD έχουν εκτεταμένη άλω, και συμπεραίνοντας από το χρώμα της αυτή μάλλον αποτελείται από αστέρια (όχι από αέριο). Στον μεσογαλαξιακό χώρο των κοντινών σμηνών (Παρθένος, Κόμη) έχουμε ανιχνεύσει την ύπαρξη πληθυσμού πλανητικών νεφελωμάτων. Η μάζα των μεσογαλαξιακών αστεριών αντιπροσωπεύει το 10- 20% της συνολικής λαμπρότητας των σμηνών. Είναι δύσκολο να μετρήσουμε την διαχέουσα ακτινοβολία, ώστε να ορίσουμε το υπόβαθρο. Τα μέχρι τώρα αποτελέσματα δείχνουν χρώμα που αντιπροσωπεύει φως που εκπέμπεται από αστέρια.

Η ακτινοβολία X.

Προκαλείται από την επιβράδυνση του καυτού μεσογαλαξιακού πλάσματος, δηλαδή το αέριο του σμήνος (intra- cluster medium, ICM). Η μάζα του αερίου είναι 1 ως 7 φορές την αστρική μάζα των γαλαξιών του σμήνος, εξαρτάται από την θερμοκρασία του πλάσματος. Αυτή κυμαίνεται από 20 εκ ως 100 εκ βαθμούς. Η πυκνότητα των ηλεκτρονίων σε ένα πλούσιο σμήνος είναι 3000 ανά m³. Οι γραμμές εκπομπής των μεγάλου ιονισμού ιόντων στις ακτίνες X δείχνουν ότι υπάρχουν μέταλλα (στοιχεία πέρα του ήλιου), που δημιουργήθηκαν σε αστέρια. Αρα η προέλευση του αερίου είναι οι γαλαξιακοί άνεμοι, κινούμενοι από τις εκρήξεις σουπερνόβα.

Ο ορισμός ρεύμα ψύξης (cooling flow) χαρακτηρίζει τα κέντρα των σμηνών στα οποία η ψύξη μέσω της ακτινοβολίας X είναι μικρότερη από τον χρόνο Hubble. Έτσι το αέριο πρέπει να ψύχτηκε στο κέντρο του σμήνος, και λόγω πτώσης της πίεσης ψυχρό πλέον αέριο να κινήθηκε προς το κέντρο του σμήνος.

Εξαίρεση αποτελούν τα AGN (ενεργά γαλαξιακά κέντρα), που μπορεί να εμποδίζουν τη ψύξη λόγω αλληλεπίδρασής τους με το μεσογαλαξιακό αέριο.

Το φαινόμενο Sunjajew- Seldowitsch.

Τα φωτόνια της μικροκυματικής ακτινοβολίας υποβάθρου υπόκεινται στην διασπορά Compton στα γαλαξιακά σμήνη. Αυτή προκαλείται από ηλεκτρόνια του καυτού μεσογαλαξιακού αερίου που διασπείρονται σε ανώτερες ενέργειες. Στην παρατήρηση της πλευράς του μεγάλου μήκους κύματος του μέγιστου από το φάσμα του μελανού σώματος, δημιουργείται μια σκιά, και στο μικρό μήκος κύματος αντίστοιχα μια αναλαμπή. Άρα έχουμε πτώση της θερμοκρασίας της ακτινοβολίας υποβάθρου στην κατεύθυνση του σμήνους. Το μεσογαλαξιακό πλάσμα προέρχεται από γαλαξιακούς ανέμους και συγκρούσεις από σαρωμένη μεσογαλαξιακή ύλη.

Ραδιοακτινοβολία.

α) Μεμονωμένοι ραδιογαλαξίες, για παράδειγμα ο M87 στο σμήνος της Παρθένου και ο NGC 1275 στο σμήνος του Περσέα.

Γαλαξίες κεφαλής- ουράς (Head- tail galaxies). Το σχήμα της διασποράς των ραδιοκυμάτων κινείται στο κοντινό μέσο (η ουρά λυγίζει προς τα πίσω από την πίεση της σκόνης).

β) Διαχέουσα εκπομπή.

Δεν συσχετίζεται με μεμονωμένους γαλαξίες και προέρχεται από το μεσογαλαξιακό πλάσμα.

- Ράδιο- άλως. Έχουν μικρή επιφανειακή λαμπρότητα, <απότομο> φάσμα, δεν είναι πολωμένες και διασχίζουν όλο το κεντρικό πεδίο του σμήνους. Υποψιαζόμαστε την ύπαρξή τους σε όλα τα σμήνη σε συχνότητα <math>< 10 \text{ MHz}</math>, αλλά δεν έχουν παρατηρηθεί σε μεγάλο βαθμό. Η συχνότητα εμφάνισής τους (που έχουμε παρατηρήσει) είναι 5%, ενώ σε σμήνη με έντονη εκπομπή ακτίνων X 35%. Η προέλευσή τους είναι μάλλον από συγκρούσεις και συγχωνεύσεις σμηνών.

-Ράδιο- κειμήλια (radio- relics).

Μεγάλες εκπομπές, όμοιες σε επιφανειακή λαμπρότητα και φάσμα με τις εκπομπές από τις ράδιο- άλως. Βρίσκονται κυρίως στις εξωτερικές περιοχές των σμηνών, με μεγάλη πολικότητα (20%). Οι μεγαλύτερες και λαμπρότερες είναι σε σμήνη με κεντρική ράδιο-άλω. Η συχνότητα εμφάνισής τους είναι 6%. Μάλλον προέρχονται από κρουστικά κύματα σε συγχωνεύσεις σμηνών.

-Μίνι- άλως. Μικρές (500 kpc), διάχυτες ραδιοπηγές με απότομο φάσμα στο κέντρο των σμηνών, που έχουν ισχυρή ένδειξη ρεύματος ψύξης στο κέντρο τους. Μέχρι τώρα δεν έχει παρατηρηθεί μεσογαλαξιακό ψυχρό νέφος (HI).

Οι βαρυτικοί φακοί.

Τα τόξα που εμφανίζονται στις απεικονίσεις τους είναι προβολές γαλαξιών στο υπόβαθρο μέσω του φαινομένου των βαρυτικών φακών. Η σημασία τους είναι ότι μας επιτρέπουν τον καθορισμό της διασποράς μάζας και της μέτρησης της συνολικής μάζας του σμήνους, από μοντέλα της βαρυτικής απεικόνισης. Η ενίσχυση του φωτός μας επιτρέπει την παρατήρηση πολύ μακρινών αμυδρών γαλαξιών που χωρίς τους βαρυτικούς φακούς δεν θα ήταν παρατηρήσιμοι. Μετρήθηκε ότι η λαμπρότητα μιας σουπερνόβα Ia ενισχύθηκε 52 φορές από βαρυτικό φακό!

Ο καθορισμός μάζας των σμηνών.

Είναι από την φύση του προβληματικός επειδή δεν γίνεται άμεσα, αλλά μέσα από θεωρητικά μοντέλα. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούμε είναι

- 1) Από την σχέση μάζας- λαμπρότητας που γνωρίζουμε για κοντινούς γαλαξίες.
- 2) Από την διασπορά ταχύτητας και το θεώρημα του virial (ισορροπία). Προϋποθέτει το σμήνος να ισορροπεί, να είναι σταθερό και η απόστασή του να μας είναι γνωστή.
- 3) Από μοντελοποίηση του φαινομένου των βαρυτικών φακών. Έχουμε την ισχυρή επίδραση των φακών, δηλαδή με την ανοικοδόμηση του βαρυτικού δυναμικού, που δημιουργεί μεγάλα τόξα, και την ασθενή επίδραση, δηλαδή την ανάλυση της συστηματικής παραμόρφωσης της εικόνας των γαλαξιών του υποβάθρου λόγω του βαρυτικού δυναμικού του σμήνος που βρίσκεται μπροστά.
- 4) Από την ακτινοβολία X του καυτού πλάσματος στο σμήνος. Το πλάσμα μας βοηθάει να μετρήσουμε την συνολική βαρυτική μάζα του σμήνος. Η μάζα είναι ανάλογη της διασποράς της πυκνότητας του αερίου και της διασποράς της θερμοκρασίας. Για παράδειγμα, από τέτοιες μετρήσεις συμπεραίνουμε ότι το σμήνος του Περσέα έχει μάζα 10 στη 15 ηλιακές.

Οι υπολογισμοί μαζών με τις μεθόδους 2, 3, 4 δίνουν αισθητά μεγαλύτερες μετρήσεις από αυτές με την μέθοδο 1. Υπάρχει το πρόβλημα της ελλείπουσας μάζας (missing mass), που είναι το 70% της συνολικής μάζας και είναι άγνωστης φύσης (σκοτεινή ύλη). Μια λύση στο πρόβλημα θα ήταν να μην ισχύει η σχέση λαμπρότητας- μάζας που γνωρίζουμε στους κοντινούς γαλαξίες και στα σμήνη, αλλά κάτι τέτοιο είναι απίθανο, γιατί σε όλες τις άλλες παραμέτρους οι γαλαξίες στα σμήνη συμπεριφέρονται όπως και οι κοντινοί μας. Μια άλλη λύση είναι να εκτείνονται τα σμήνη κατά πολύ, αλλά σε αυτή την περίπτωση θα είχαμε παρατηρήσει σμήνη να διαλύονται. Έτσι επικρατεί η λύση της σκοτεινής ύλης, η οποία υπολογίζεται με τις μεθόδους 2, 3, 4, αλλά όχι με την μέθοδο 1 (μόνο η ορατή ύλη).

Η διασπορά των σμηνών στον χώρο.

Η συσχέτιση συνάρτησης 2 σημείων είναι λίγο πιο απότομη για σμήνη από ότι για γαλαξίες σε μικρότερη κλίμακα. Η πυκνότητα του χώρου σε σμήνη εξαρτάται από το πόσο πλούσια σε γαλαξίες είναι τα σμήνη.

Τα υπερσμήνη.

Τα γαλαξιακά σμήνη τείνουν να σχηματίσουν υπερσμήνη, αλλά ο χρόνος που απαιτείται για αυτό είναι μεγαλύτερος από τον χρόνο Hubble (ηλικία του σύμπαντος), άρα δεν έχει ολοκληρωθεί κάτι τέτοιο ακόμα. Τα υπερσμήνη αποτελούν το τελευταίο στάδιο της ιεραρχικής δημιουργίας δομής στο σύμπαν. Το μέγεθος των νηματοειδών αυτών δομών είναι 150 Mpc, με 2- 15 σμήνη σε κάθε υπερσμήνος. Το ποσοστό των σμηνών που είναι μέλη τέτοιων σχηματισμών είναι 54%, και το ποσοστό από την συνολική μάζα στο σύμπαν που καταλαμβάνουν είναι 3%.

Το τοπικό υπερσμήνος.

Υπάρχουν ενδείξεις (διασπορά λαμπρών γαλαξιών και σμηνών) ότι οι εξωτερικοί γαλαξίες του σμήνος της Παρθένου εκτείνονται ως την τοπική ομάδα μας. Τότε η τοπική ομάδα πρέπει να αποτελεί το ακραίο μέλος ενός υπερσμήνους. Λόγω της συγκέντρωσης μάζας στο σμήνος της Παρθένου, είναι αναμενόμενη μια κίνηση της τοπικής ομάδας προς αυτήν την κατεύθυνση. Διάφορες παρατηρήσεις (σύγκριση με το σμήνος της Κόμης, με γαλαξίες του καταλόγου Sharpley- Aimes, και με ελλειπτικούς γαλαξίες) μας δίνουν την ταχύτητα αυτής της κίνησης σε 220+/- 50 km/sec. Η τιμή αυτή δηλώνει την κίνηση του κέντρου της τοπικής ομάδας προς το σμήνος της Παρθένου. Αυτή η τιμή προστίθεται στην παρατηρήσιμη μετατόπιση στο ερυθρό, ώστε να συμπεράνουμε την κοσμολογική μετατόπιση στο ερυθρό του σμήνος της Παρθένου.

Ο μεγάλος ελκυστής (Great Attractor).

Υπάρχει μια κίνηση της τοπικής ομάδας προς μια συγκεκριμένη κατεύθυνση, σε σχέση με ένα δίκτυο από 289 γαλαξίες E 9τους θεωρούμε σταθερά σημεία), κάτι που φαίνεται και στην μικροκυματική ακτινοβολία υποβάθρου (διπολικότητα της ακτινοβολίας κατά το COBE). Ένας μεγάλος όγκος που συμπεριλαμβάνει την τοπική ομάδα και το σμήνος της Παρθένου κινείται προς τα εκεί. Αιτία φαίνεται να είναι μια τοπική μεγάλη συγκέντρωση μάζας.

Σημείωση 1

Το δάσος Lyman-α.

Μια παρατήρηση ενός αστρονόμου από το 1965 ήταν ότι τα μακρινά Κβάζαρ εμφανίζονται 1000 φορές πιο λαμπρά από ότι θα έπρεπε. Τα νέφη μοριακού υδρογόνου που συναντάει η ακτινοβολία των Κβάζαρ στον δρόμο της προς εμάς έπρεπε να απορροφούν το μεγαλύτερο ποσοστό της μέσω της μετάβασης Lyman- α. Δηλαδή τα φωτόνια με ενέργεια 10,2 ev, που αντιστοιχεί στα 121,6 νανόμετρα μήκος κύματος, θα έπρεπε να απορροφώνται από τα άτομα υδρογόνου (που αποτελούν το 94% των ατόμων στο σύμπαν), διεγείροντας τα ηλεκτρόνιά τους σε τροχιές μεγαλύτερης ενέργειας. Το φως από τα Κβάζαρ, που ξεκινάει το ταξίδι του στο υπεριώδες, φτάνει με την μετατόπιση στο ερυθρό στα κρίσιμα 121,6 νμ. Αυτό γίνεται σταδιακά, ανάλογα το αρχικό μήκος κύματος. Έτσι δημιουργείται ένα <δάσος> φασματικών γραμμών απορρόφησης, το δάσος Lyman-α. Η απορρόφηση αυτή γίνεται σε διαφορετικές αποστάσεις από την πηγή για κάθε μέσο που συναντάει η ακτινοβολία.

Το ότι φαίνονται τόσο λαμπρά τα Κβάζαρ σε εμάς οφείλεται στον ιονισμό του υδρογόνου από υπεριώδεις ακτινοβολίες, από τα αστέρια και τους γαλαξίες. Το ιονισμένο υδρογόνο δεν μπορεί να απορροφήσει την ακτινοβολία, λόγω του ότι δεν έχει δεσμευμένα ηλεκτρόνια.

Έτσι το δάσος είναι <διαπερατό>, και το πόσο φως λαμβάνουμε μας δείχνει πόσο υδρογόνο είναι ουδέτερο (μη ιονισμένο), καθώς και την κατανομή του. Μπορούμε να κατανοήσουμε την διαδρομή της ακτινοβολίας από το Κβάζαρ έως το τηλεσκόπιο. Το δάσος έχει σήμερα τεντωθεί πλέον στο ορατό φάσμα από το υπεριώδες.

Οι γαλαξίες μόνο δεν φτάνουν να δικαιολογήσουν την ποσότητα του ουδέτερου μοριακού υδρογόνου που μετράμε. Έτσι πρέπει να υπάρχουν μεγάλα μεσογαλαξιακά νέφη. Αυτά όμως μπορούν να συγκρατηθούν βαρυτικά μόνο από την σκοτεινή ύλη, αλλιώς θα είχαν διαλυθεί. Αυτό επιβεβαιώθηκε και από εξομοιώσεις σε υπολογιστές. Έτσι φάνηκε και η κατανομή της σκοτεινής ύλης μέσα από το φασματικό δάσος.

