

## Οι γαλαξίες αστρογέννησης και η κοσμική σκόνη

Οι εκπομπές των γαλαξιών στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα, από την δημιουργία τους στο σύμπαν μέχρι σήμερα, εμφανίζονται ως ένα διάχυτο κοσμολογικό υπόβαθρο. Την δεκαετία του 1990 ανακαλύφτηκε το κοσμικό υπόβαθρο υπέρυθρων ακτινών, και ειδικά το μέρος του υποβάθρου μήκους κύματος 1 $\mu\text{m}$ - 1mm. Οι μετρήσεις του μας έδειξαν ότι στην ιστορία του σύμπαντος η εκπομπή υπέρυθρων από την κοσμική σκόνη είναι ισότιμη (παρόμοιας ενεργειακής πυκνότητας) με την εκπομπή στο ορατό φως και με αυτήν στο υπεριώδες, ακτινοβολίες που προέρχονται άμεσα από τα αστέρια. Το περισσότερο από το αστρικό φως που έχει απορροφηθεί από τους κόκκους της σκόνης, με αποτέλεσμα την επανά-εκπομπή του στο υπέρυθρο, προέρχεται από νεαρά αστέρια. Αυτά εκπέμπουν σε μικρότερα μήκη κύματος που απορροφάται πιο εύκολα από την σκόνη. Αυτό το φως μας βοηθάει στον εντοπισμό της δραστηριότητας αστρογέννησης στους γαλαξίες. Η μελέτη της εκπομπής στο υπέρυθρο μας προσφέρει την κατανόηση του ιστορικού αστρογέννησης του σύμπαντος, δηλαδή πως χτήστηκε η αστρική μάζα των γαλαξιών.

Ο σχηματισμός των γαλαξιών είναι πολύπλοκη διαδικασία. Σχηματίζονται δομές στην σκοτεινή ύλη μέσω βαρυτικών επαυξήσεων μικρών αρχικών διακυμάνσεων της ύλης, που οδηγούν σε βαρυτικά δεμένες άλως σκοτεινής ύλης και αέριο που έλκεται από αυτές. Το αέριο αρχικά θερμαίνεται (κινητικότητα) και μετά ψύχεται (αποβολή θερμότητας μέσω ακτινοβολίας) με αποτέλεσμα να καταρρέει στα κέντρα των αλεών. Εκεί σχηματίζει αστέρια και υπερμεγέθεις μαύρες τρύπες. Η αποτελεσματικότητα μετατροπής της ύλης σε αστέρια ρυθμίζεται από την έκλυση ενέργειας των νεαρών αστεριών και των μαύρων τρυπών, μια διεργασία που ονομάζεται ανάδραση.

## Το κοσμικό μοντέλο $\Lambda$ CDM

Το σύμπαν αποτελείται κυρίως από 1) το  $\Lambda$  (70%), ένας όρος κοσμολογικής σταθεράς που ονομάζουμε σκοτεινή ενέργεια. Αυτή έχει ως αποτέλεσμα την επιταχυνόμενη συμπαντική διαστολή και 2) CDM (ψυχρή σκοτεινή ύλη, 26%), μια εξωτική μορφή ύλης που αλληλεπιδρά μόνο μέσω της βαρύτητας. Ο όρος ψυχρή παραπέμπει σε σωματίδια μεγάλης μάζας και όχι ταχέως κινούμενα, άρα θερμά, σωματίδια μικρής μάζας. Οι διακυμάνσεις της πυκνότητας της ενέργειας κατά την μεγάλη έκρηξη εξελίχτηκαν σε γαλαξίες ορατής ύλης (μόλις το 4% της συμπαντικής μάζας) εμβαπτισμένους σε άλως σκοτεινής ύλης. Σε αυτό το μοντέλο οι γαλαξίες αναπτύσσονται ιεραρχικά, δηλαδή οι μεγαλύτεροι συσσωρεύουν τους μικρότερους. Έτσι σχηματίζονται οι γαλαξιακοί δίσκοι (η διατήρηση της στροφορμής του αερίου που εισέρχεται σε έναν γαλαξία). Ένας γαλαξιακός δίσκος σχηματίζεται όταν η πυκνότητα της βαρυονικής ύλης (αέριο που ψύχεται) ξεπεράσει αυτήν την σκοτεινής, με αποτέλεσμα να καταρρέει λόγω ίδιας βαρύτητας (και όχι της βαρύτητας της σκοτεινής ύλης). Τότε το αέριο είναι διαθέσιμο για σχηματισμό

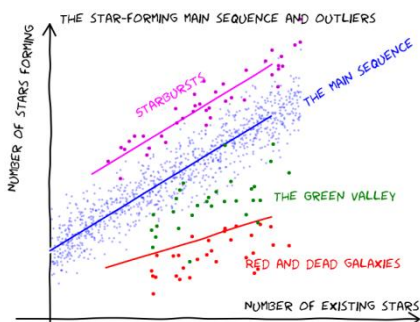
αστεριών, που συμβαίνει σε γιγάντια μοριακά νέφη. Αυτά σχηματίζονται από αστάθειες του αερίου που καταρρέει βαρυτικά. Χρησιμοποιούμε τον νόμο Kennicutt- Schmidt (η σχέση της επιφανειακής πυκνότητας της αστρογέννησης με την επιφανειακή πυκνότητα του αερίου, ή την συνιστώσα μοριακού αερίου). Η αλληλεπίδραση των φυσικών διεργασιών ψύξη του αερίου- σχηματισμός αστεριών- ανάδραση διαμορφώνει τους γαλαξίες.

Σημαντικές είναι και οι διαγαλαξιακές αλληλεπιδράσεις (συγχωνεύσεις και απογύμνωση μέσω πίεσης εμβολής).

Η διασπορά φασματικής ενέργειας (Spectral Energy Distribution) περιγράφει την εκπομπή κάθε γαλαξία σε ένα πλήθος από μήκη κύματος. Συγκρίνουμε με επιτυχία την SED του μακρινού υπερύθρου του μοντέλου μας με αυτήν από παρατηρήσεις γαλαξιών κύριας ακολουθίας, δηλαδή γαλαξίες με ισορροπία αστρικής μάζας. Οι γαλαξίες διατηρούν αυτήν την ιδιότητα (συνήθως εκφράζεται με την κυριαρχία του γαλαξιακού δίσκου) στο μεγαλύτερο μέρος της κοσμικής ιστορίας τους. Παρατηρούμε μείωση της θερμοκρασίας της σκόνης σε αυτούς τους γαλαξίες κατά την εξέλιξή τους. Άρα η αστρογέννηση στους γαλαξίες κύριας ακολουθίας συμβαίνει πιο εκρηκτικά στα πρώιμα στάδια των γαλαξιών, κάτι που σημαίνει πιο καυτή σκόνη.

## Οι γαλαξίες εκπομπής στα υπό- χιλιοστόμετρα (SMG, sub millimeter galaxies)

Αυτοί δεν αποτελούν τις κύριες πηγές του υποβάθρου ακτινοβολίας υπερύθρων. Αποτελούν όμως τους γαλαξίες με την ισχυρότερη αστρογέννηση (100 ηλιακές μάζες/έτος). Η εκπομπή σε αυτά τα μήκη κύματος προέρχεται από τον σχηματισμό αστεριών. Χαρακτηρίζονται από την λαμπρότητα ανά χωρική μονάδα στον ουρανό. Αυτοί οι γαλαξίες έχουν μεγάλη μέση μετατόπιση στο ερυθρό ( $z= 2,5$ ), μεγάλη αστρική μάζα και πολύ σκόνη. Η μεγάλη αστρογέννηση προέρχεται από δυναμικά γεγονότα όπως η γαλαξιακή συσσώρευση και η αστάθεια του δίσκου. Οι γαλαξίες SMG αποτελούν την φάση γαλαξιακής εξέλιξης όπου σχηματίστηκε η πλειονότητα των σημερινών αστεριών. Είναι η φάση ανάμεσα σε γαλαξίες κύριας ακολουθίας και ελλειπτικούς.



Η εξέλιξη των γαλαξιών εξαρτάται από το περιβάλλον τους. Το πιο σημαντικό μέγεθος είναι οι μάζες των αλεών σκοτεινής ύλης των γαλαξιών.

## Οι ιδιότητές τους

Όπως αναφέραμε, η έκρηξη αστρογέννησης σε αυτούς τους γαλαξίες συμβαίνει μέσω της κατάρρευσης (αστάθεια) του γαλαξιακού δίσκου. Η αστρογέννηση συμβαίνει πλέον στην αναπτυσσόμενη γαλαξιακή κοιλιά. Η αστάθεια του δίσκου έχει 2 χαρακτηριστικά, 1) παρατηρείται σε ταχέα συσσώρευση αερίου από τον δίσκο στην γαλαξιακή κοιλιά σηματοδοτώντας την έκρηξη αστρογέννησης 2) είναι η βασική οδός τροφοδότησης της υπερμεγέθους μαύρης τρύπας, με αποτέλεσμα η ανάδραση του ενεργού γαλαξιακού πυρήνα να εμποδίζει τον σχηματισμό αστεριών στην γαλαξιακή άλω (όπου συγκρούονται οι πίδακες με την περιβάλλον ύλη δημιουργώντας κρουστικό κύμα, και εμποδίζουν έτσι την ψύξη του αερίου) σε μεταγενέστερους χρόνους. Αυτό το μοντέλο πετυχαίνει την πρόβλεψη της σύντομης διάρκειας του επεισοδίου αστρογέννησης που παρατηρούμε σε αυτούς τους γαλαξίες. Οι γαλαξίες με πολύ σκόνη (κυρίως στην κατηγορία των SMG) είναι κυρίως κεντρικοί γαλαξίες στα σμήνη τους.

## Το μοντέλο σχηματισμού γαλαξιών

Όπως αναφέραμε, το ιεραρχικό μοντέλο προβλέπει τον σχηματισμό μικρών αλεών που αργότερα συγχωνεύονται. Οι παράγοντες που περιγράφουν την εξέλιξη της βαρυονικής μάζας σχετικά με την μεταλλικότητα είναι 1) το καυτό αέριο των γαλαξιακών αλεών 2) το ψυχρό αέριο στο εσωτερικό των γαλαξιών 3) τα αστέρια 4) το αέριο που απομακρύνεται από τους γαλαξίες και 5) οι υπερμεγέθεις μαύρες τρύπες. Το ψυχρό αέριο και τα αστέρια μπορεί να βρίσκονται κυρίως σε γαλαξιακό δίσκο προερχόμενο από το καυτό αέριο της άλως ή σε σφαιροειδή γαλαξιακό κέντρο/ράβδο μέσω γαλαξιακών συγχωνεύσεων ή αστάθεια του δίσκου.

Η ανάπτυξη υπερμεγέθης μαύρων τρυπών και η ανάδραση μέσω των ενεργών γαλαξιακών πυρήνων (AGN)

Η συσσώρευση μάζας από τις υπερμεγέθεις μαύρες τρύπες απελευθερώνει τεράστια ποσά ενέργειας. Οι υπερμεγέθεις μαύρες τρύπες μπορούν να αυξήσουν την μάζα τους με 3 τρόπους. 1) Την συσσώρευση αερίου σε γαλαξιακή φάση αστρογέννησης. Η μάζα του ψυχρού αερίου που συσσωρεύεται στην μαύρη τρύπα είναι ανάλογη της αστρικής μάζας που σχηματίζεται κατά την έκρηξη αστρογέννησης. 2) Συσσώρευση αερίου από την καυτή άλω. 3) Συγχώνευση μαύρων τρυπών, που συμβαίνει ταυτόχρονα με την γαλαξιακή συγχώνευση. Οι κεντρικές μαύρες τρύπες σχηματίζονται μετά τα πρώτα φαινόμενα γαλαξιακής συγχώνευσης. Η άμεση συσσώρευση καυτού αερίου της άλως ενεργοποιεί τους σχετικιστικούς πίδακες των AGN.

## Συγχωνεύσεις γαλαξιών

Οι γαλαξίες κατατάσσονται ως κεντρικοί όταν βρίσκονται στο κέντρο της σκοτεινής άλως και δορυφόροι όταν κινούνται σε τροχιές μέσα στην σκοτεινή άλω. Όταν συγχωνεύονται σκοτεινές άλως ο κεντρικός γαλαξίας της άλως με την μεγαλύτερη μάζα γίνεται ο νέος κεντρικός γαλαξίας και οι υπόλοιποι γαλαξίες –δορυφόροι.

Όταν ένας γαλαξίας αποκτήσει δορυφόρο (τον δεσμεύσει βαρυντικά) τον απογυμνώνει από όλο το καυτό αέριο της άλως του (απογύμνωση μέσω πίεσης εμβολής, ram- pressure stripping). Έτσι ο δορυφόρος δεν έχει πια απόθεμα αερίου που να μπορεί να ψυχθεί. Στις μεγάλες συγχωνεύσεις καταστρέφεται ο δίσκος του κυρίαρχου γαλαξία και σχηματίζεται ένας ελλειπτικός γαλαξίας. Όλο το ψυχρό αέριο εισέρχεται στην σφαιροειδή κεντρική μορφή του γαλαξία που σχηματίστηκε από την κατάρρευση των αστεριών του δίσκου.

Σημαντικό ρόλο έχουν 2 μεγέθη, ο χρόνος κατάρρευσης του αερίου στον γαλαξία ( $t_c$ ) και ο χρόνος που αυτό καταναλώνεται στην αστρογέννηση ( $t_s$ ). Η αλληλεπίδραση αυτών των 2 μεγεθών έχει καθοριστικό ρόλο στον σχηματισμό διαφορετικών μορφολογικών γαλαξιακών τύπων. Αν  $t_s < t_c$ , τα περισσότερα αστέρια σχηματίζονται πριν την ολοκλήρωση της κατάρρευσης του αερίου, με αποτέλεσμα το αέριο να μην προλάβει να αποβάλλει ενέργεια ώστε να υποστηριχτεί ο δίσκος. Τότε ο γαλαξίας θα γίνει ελλειπτικός, ενώ αν  $t_s > t_c$ , το αέριο θα αποβάλλει ενέργεια και θα υποστηριχτεί ο δίσκος. Η μάζα που εισέρχεται στον δίσκο μπορεί να προέλθει από συγχωνεύσεις ή από άμεση συσσώρευση μεσογαλαξιακού αερίου (ιδίως στο πρώιμο σύμπαν). Αυτή η απλουστευμένη εικόνα σχηματισμού γαλαξιών είναι σύμφωνη με την μελέτη των αστρικών πληθυσμών.

## Η φασματική διασπορά ενέργειας (SED, spectral energy distribution) της κύριας ακολουθίας των γαλαξιών και των γαλαξιών αστρογέννησης

Η μεσοαστρική σκόνη σχηματίζεται από μέταλλα που παράγονται στο εσωτερικό των αστεριών μέσω της θερμοπυρηνικής σύντηξης. Οι αστρικοί άνεμοι και οι εκρήξεις σουπερνόβα διασπείρουν τα μέταλλα στον μεσοαστρικό χώρο και ένα μέρος τους δημιουργεί κόκκους σκόνης. Αυτοί οι κόκκοι απορροφούν το ορατό φως και εκπέμπουν στο υπέρυθρο. Η πυκνότητα ενέργειας του υποβάθρου στο υπέρυθρο είναι παρόμοια με αυτήν στο ορατό και στις υπεριώδεις (άμεση αστρική ακτινοβολία). Οι παρατηρήσεις μας δείχνουν ότι η πλειονότητα των αστεριών στο σύμπαν σχηματίστηκε σε γαλαξίες της κύριας ακολουθίας. Αυτοί είναι γαλαξίες με στενή σχέση ανάμεσα στον ρυθμό αστρογέννησης και την αστρική μάζα, λόγω της εξάρτησης της αστρογέννησης από την αλληλεπίδραση της ψύξης του αερίου και των διαδικασιών ανάδρασης. Οι γαλαξίες με αυξημένο ρυθμό αστρογέννησης ονομάζονται γαλαξίες εκρηκτικής αστρογέννησης (starburst galaxies). Σε αντίθεση με τις κοσμικές διεργασίες αστρογέννησης στους γαλαξίες της κύριας ακολουθίας, σε αυτούς η έκρηξη αστρογέννησης οφείλεται σε δυναμικά γεγονότα όπως οι γαλαξιακές συγχωνεύσεις και η αστάθεια του δίσκου. Όμως αυτή η φάση γαλαξιακής εξέλιξης είναι σχετικά σύντομη. Η εκρηκτική αστρογέννηση εντοπίζεται στο υπέρυθρο και στο υπεριώδες, κάνοντας την εκπομπή της σκόνης σημαντική για την κατανόηση αυτών των γαλαξιών. Η μικρή ανάλυση που πετυχαίνουμε στο υπέρυθρο δεν μας επιτρέπει την παρατήρηση των λιγότερο λαμπρών και με σχετικά

μικρότερο ρυθμό αστρογέννησης γαλαξιών εκρηκτικής αστρογέννησης, καθώς και των γαλαξιών μεγάλης ερυθρολίσθησης.

Υποθέτουμε ότι η σκόνη στους γαλαξίες εκρηκτικής αστρογέννησης θερμαίνεται από ένα σταθερό πεδίο ακτινοβολίας, το οποίο καθορίζει την θερμοκρασία της. Φαίνεται η θερμοκρασία της σκόνης να αυξάνεται με την ερυθρολίσθηση. Μετά από  $z > 2$  δεν ισχύει η καθολική σχέση μεταλλικότητας/ ρυθμού αστρογέννησης (η ενισχυμένη μεταλλικότητα ευνοεί την αστρογέννηση λόγω πιο αποτελεσματικής ψύξης του αερίου). Εκείνη την εποχή η αναλογία των γαλαξιών αστρογέννησης/ κύριας ακολουθίας ήταν μεγαλύτερη, και σχηματίζονταν αναλογικά περισσότερα αστέρια μεγάλης μάζας (επακόλουθο της μικρής μεταλλικότητας) με πολύ ισχυρούς αστρικούς ανέμους. Αυτό σημαίνει ενίσχυση του φαινομένου απορρόφησης του αστρικού φωτός και επανά- εκπομπής στο υπέρυθρο από τους κόκκους σκόνης. Η θερμοκρασία της σκόνης ορίζεται από την αναλογία υπέρυθρης λαμπρότητας/ μάζα της σκόνης. Σε μεγαλύτερη ερυθρολίσθηση ο ρυθμός αστρογέννησης είναι γενικά υψηλότερος, που σημαίνει υψηλότερη υπέρυθρη λαμπρότητα ενώ η μάζα της σκόνης δεν μεταβάλλεται σημαντικά. Αυτό συμβαίνει λόγω ανταγωνιστικών φαινομένων, δηλαδή η αναλογία αερίου στους γαλαξίες για δεδομένη αστρική μάζα μειώνεται με την γαλαξιακή εξέλιξη επειδή το διαθέσιμο αέριο ελαττώνεται (καταναλώνεται στην αστρογέννηση), ενώ αυξάνεται η μεταλλικότητα (αναλογία της σκόνης στο αέριο). Έτσι εξηγείται η μεγαλύτερη θερμοκρασία της σκόνης σε μεγάλο  $z$ .

Γενικά στους γαλαξίες κυριαρχεί η σχέση ρυθμού αστρογέννησης/ μάζας, εκτός αν υπάρχει κάποιο από τα παρακάτω φαινόμενα 1) Εκρηκτική αστρογέννηση μέσω δυναμικών γεγονότων. 2) Επιδράσεις του γαλαξιακού περιβάλλοντος όπως η απογύμνωση του αερίου μέσω της πίεσης εμβολής καταπνίγει την αστρογέννηση. 3) Η ανάδραση των AGN που επηρεάζει γενικά την αστρογέννηση του γαλαξία.

Για συγκεκριμένη γαλαξιακή μάζα, ο ρυθμός αστρογέννησης σε γαλαξίες εκρηκτικής αστρογέννησης μεγάλου  $z$  είναι μεγαλύτερος. Το φαινόμενο ότι η βολομετρική λαμπρότητα αυξάνεται με την γαλαξιακή μάζα, δηλαδή οι μεγαλύτερης μάζας γαλαξίες έχουν πιο έντονη αστρογέννηση, είναι βασικό χαρακτηριστικό της κύριας ακολουθίας των γαλαξιών. Η βολομετρική λαμπρότητα των γαλαξιών εκρηκτικής αστρογέννησης είναι υψηλότερη από αυτήν των γαλαξιών κύριας ακολουθίας για ίδιες αστρικές μάζες και ίδια ερυθρολίσθηση.

Στους γαλαξίες κύριας ακολουθίας η αστρογέννηση συμβαίνει ομαλά στον γαλαξιακό δίσκο, και υπάρχει εξάρτησή της από την πυκνότητα του μοριακού αερίου. Στους γαλαξίες εκρηκτικής αστρογέννησης αυτή συμβαίνει εκρηκτικά στην γαλαξιακή κοιλιά λόγω μεταφοράς του αερίου σε αυτήν από τον δίσκο (μέσω δυναμικού γεγονότος όπως αστάθεια του δίσκου ή γαλαξιακή συγχώνευση. Οι γαλαξίες εκρηκτικής αστρογέννησης παρουσιάζουν γενικά υψηλότερες θερμοκρασίες της σκόνης λόγω αυξημένου ρυθμού αστρογέννησης. Υποθέτουμε ότι σε αυτούς η συνιστώσα αρχικής αστρικής μάζας είναι <βαριάς κορυφής> (top heavy IMF, δηλαδή μεγάλη αναλογία αστεριών μεγάλης μάζας). Το μοντέλο μας προβλέπει μια κύρια ακολουθία με αυστηρά όρια όπου αυτό- ρυθμίζεται η αλληλεπίδραση της

ψύξης του αερίου, της ομαλής αστρογέννησης και της ανάδρασης από τις σουπερνόβα. Η παραπάνω ισορροπία καταρρέει όταν 1) δυναμικά γεγονότα σηματοδοτούν εκρηκτική αστρογέννηση 2) περιορίζεται το διαθέσιμο αέριο λόγω πίεσης εμβολής (περιβαλλοντικός παράγοντας) 3) η ανάδραση μέσω ενεργού γαλαξιακού πυρήνα (AGN) αναστέλλει την ψύξη του αερίου.

Η ανάδραση μέσω των σουπερνόβα είναι πολύ σημαντική φυσική διεργασία για την γαλαξιακή εξέλιξη. Όμως οι λεπτομέρειες αυτού του μηχανισμού δεν μας είναι γνωστές. Οι εκρήξεις σουπερνόβα είχαν μεγάλη συνεισφορά στον επαναιονισμό του σύμπαντος.