
6. Γαλαξίες

6.1 ΓΕΝΙΚΑ

Η ύλη στο Σύμπαν δεν είναι τυχαία κατανομημένη. Σε οποιαδήποτε κλίμακα και αν εξετάσουμε το χώρο γύρω μας, η ύλη παρουσιάζει τοπικές συγκεντρώσεις μάζας. Για παράδειγμα, στο μικρόκοσμο συναντάμε τα quarks, τα ηλεκτρόνια και τα άτομα. Στο μακρόκοσμο η ύλη είναι συγκεντρωμένη κυρίως στους αστέρες. Αλλά και αυτοί οι αστέρες δεν είναι μεμονωμένοι. Συνήθως αποτελούν ομάδες που ονομάζονται **γαλαξίες** (galaxies) Ανάλογα με το μέγεθός του, ένας γαλαξίας περιέχει μερικά δισεκατομμύρια ή τρισεκατομμύρια αστέρες. Οι περισσότεροι γαλαξίες έχουν σχήμα ελλειπτικό και ονομάζονται **ελλειπτικοί** (ellipticals). Σε



Σχήμα 6.1. Ο κοντινός γαλαξίας M31 στον αστερισμό της Ανδρομέδας

άλλους η ύλη δεν είναι ομοιόμορφα κατανομημένη, αλλά συγκεντρώνεται σε σπειροειδείς σχηματισμούς. Οι γαλαξίες αυτοί, στους οποίους ανήκει και ο δικός μας Γαλαξίας, ονομάζονται **σπειροειδείς** (spirals). Οι υπόλοιποι δεν έχουν καμμία εμφανή συμμετρία και ονομάζονται **ανώμαλοι** (irregulars).

Ο Ήλιος μας είναι ένας κοινός αστέρας που βρίσκεται αρκετά μακριά ($\sim 3 \times 10^4$ έτη φωτός) από το κέντρο του **Γαλαξία** (Milky Way). Εξαιτίας του δισκοειδούς σχήματος του Γαλαξία μας τον βλέπουμε (προφανώς «εκ των έσω») στο νυχτερινό ουρανό σαν μια γαλακτόχρωμη ταινία αποτελούμενη από μυριάδες αστέρες.

Εδώ και χιλιάδες χρόνια είναι γνωστό ότι ανάμεσα στους αστέρες του ουρανού υπάρχουν και μερικά αμυδρά νεφελώματα. Το 1755 ο γνωστός Γερμανός φιλόσοφος Immanuel Kant είχε προτείνει ότι μερικά απ' αυτά τα νεφελώματα ίσως είναι «νησίδες-σύμπαντα» ή γαλαξίες (Kant: «Allgemeine Naturgeschichte und Theorie Des Himmels - Παγκόσμια Φυσική Ιστορία και Θεωρία των Ουρανών»). Η θεωρία αυτή ήταν τόσο επαναστατική, ώστε απορρίφθηκε αμέσως από τους αστρονόμους της εποχής του.

Αργότερα, το 1787, ο C. Messier, ψάχνοντας για κομήτες, εντόπισε και κατέγραψε 103 νεφελώματα στον περίφημο κατάλογό του. Στα τέλη του 19ου αιώνα οι W. Herschel και J. L. Dreyer συνέταξαν έναν κατάλογο νεφελωμάτων, που δημοσιεύτηκε το 1888 από τον Dreyer, με την ονομασία New General Catalogue (NGC). Το 1895 και το 1898 ο Dreyer συμπλήρωσε τον κατάλογο αυτό με τα παραρτήματα Index Catalogue I (ICI) και Index Catalogue II (ICII). Η τελική έκδοση του καταλόγου του Dreyer περιέχει 7840 «νεφελώματα». Για παράδειγμα, το νεφέλωμα του Καρκίνου (Crab Nebula) είναι το πρώτο νεφέλωμα στον κατάλογο του Messier (M1) και το 1952^ο στον New General Catalogue (NGC1952). Επίσης στον αστερισμό της Ανδρομέδας υπάρχει ένας αμυδρός νεφελοειδής σχηματισμός που ονομάζεται M31 ή NGC 224.

Στις αρχές του αιώνα μας υπήρχε διάσταση απόψεων σχετικά με το ερώτημα αν τα «νεφελώματα» αυτά ήταν είτε σμήνη αστέρων είτε νέφη σκόνης και αερίων του Γαλαξία μας ή αν αποτελούσαν ιδιαίτερους εξωτερικούς γαλαξίες. Στις σχετικές συζητήσεις συμμετείχαν ενεργά δύο πολύ γνωστοί αστρονόμοι. Ο Harlow Shapley,



Σχήμα 6.2 Το ζεύγος γαλαξιών M81 και M82

ερευνητής στο Αστεροσκοπείο του Mt. Wilson στην Καλιφόρνια, υποστήριζε ότι στο Σύμπαν υπήρχε μόνο ο (τεράστιος) Γαλαξίας μας, ότι ο Ήλιος βρισκόταν πολύ μακριά από το κέντρο του Γαλαξία και ότι όλα τα υπόλοιπα νεφελώματα ανήκαν στο Γαλαξία. Αντίθετα ο Heber D. Curtis, ερευνητής στο Αστεροσκοπείο Lick (επίσης στην Καλιφόρνια), υποστήριζε ότι ο Γαλαξίας ήταν μικρός, ότι ο Ήλιος βρισκόταν πολύ κοντά στο κέντρο του και ότι όλα τα υπόλοιπα νεφελώματα δεν ανήκαν στον Γαλαξία μας. Μερικά νεφελώματα, βέβαια, ανήκαν σίγουρα στο

Γαλαξία μας. Μορφολογικά δεν παρουσίαζαν καμιά συμμετρία, βρίσκονταν κοντά στο επίπεδο του Γαλαξία (στην γαλακτόχρωμη ζώνη που διασχίζει τον ουρανό) και στα φάσματά τους κυριαρχούσαν οι χαρακτηριστικές γραμμές εκπομπής ιονισμένου υδρογόνου (HII). Τα νεφελώματα αυτά ήταν προφανώς νέφη υδρογόνου στο Γαλαξία μας. Εκεί όμως που υπήρχαν πολλές αμφιβολίες, ήταν σε μερικά «νεφελώματα» που η κατανομή τους στο χώρο ήταν περίπου ισοτροπική, αν εξαιρέσει κανείς το γεγονός ότι δεν παρατηρούνταν κοντά στο επίπεδο του Γαλαξία. Τα σχήματα των «νεφελωμάτων» αυτών ήταν κατά το πλείστον συμμετρικά (ελλειπτικά ή σπειροειδή) και τα φάσματά τους ήταν τα τυπικά φάσματα απορρόφησης των αστέρων.

Τα επιχειρήματα υπέρ της άποψης ότι επρόκειτο για εξωτερικούς γαλαξίες ήταν βασικά δύο:

- 1) Τα μορφολογικά συμμετρικά νεφελώματα είχαν τεράστιες ταχύτητες απομάκρυνσης (όπως προέκυπτε από φασματοσκοπικές παρατηρήσεις), μεγαλύτερες από την ταχύτητα διαφυγής του Γαλαξία μας.
- 2) Αν οι καινοφανείς αστέρες (pnae), που είχαν παρατηρηθεί σε μερικά από τα νεφελώματα αυτά, είχαν το ίδιο απόλυτο μέγεθος με τους καινοφανείς του Γαλαξία μας, τότε επειδή ήταν πολύ αμυδροί, θα έπρεπε να βρίσκονται σε απόσταση μεγαλύτερη από 10^6 έτη φωτός.

Τελικά, το 1924, ο E. Hubble επιβεβαίωσε τα παραπάνω επιχειρήματα με την ανακάλυψη μεταβλητών αστέρων (κηφειδών) σε τρία συμμετρικά «νεφελώματα» (M31, M33 και NGC 6822). Ο νόμος περιόδου-φωτεινότητας, $M_{pg} = f(P)$, των κηφειδών ήταν ήδη γνωστός και έτσι, με μερικές απλές παρατηρήσεις της περιόδου και του φαινομένου μεγέθους τους, μπόρεσε να υπολογίσει την απόστασή τους. Δεν υπήρχε πια αμφιβολία ότι πρόκειται για *εξωτερικούς γαλαξίες* και έτσι το «νεφέλωμα» M31 μετονομάστηκε σε «γαλαξία» M31. Σήμερα



Σχήμα 6.3. Το αλληλοεπιδρών ζεύγος γαλαξιών M51 και NGC 5195.

γνωρίζουμε ότι η απόσταση του κοντινού αυτού γαλαξία είναι περίπου 2.5×10^6 έτη φωτός.

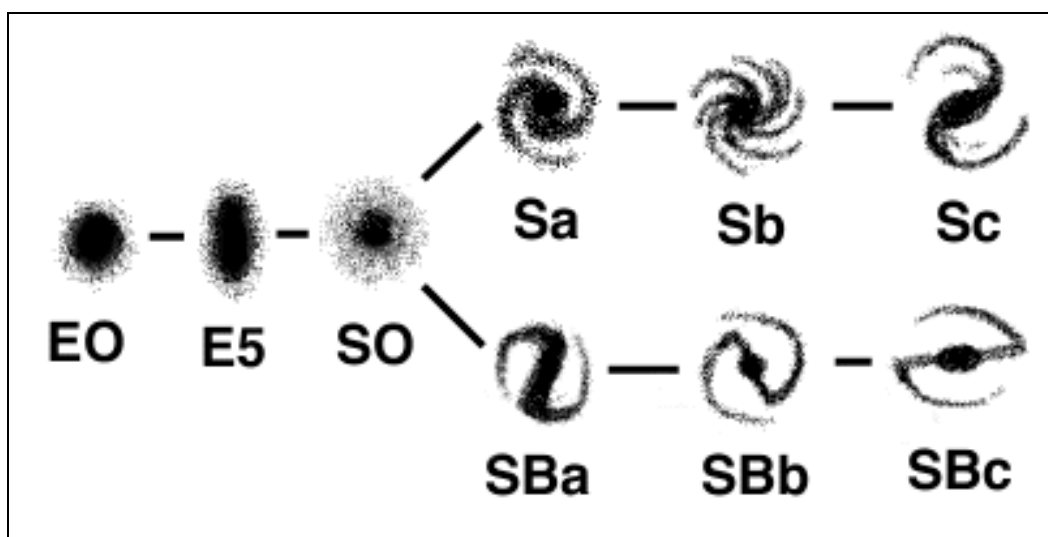
Μέσα σε λίγα χρόνια από την ανακάλυψη του Hubble, η απόσταση όλων των γαλαξιών που βρίσκονται πλησιέστερα από 20×10^6 έτη φωτός είχε μετρηθεί με τη μέθοδο των κηφειδών. Πέρα απ' αυτήν την απόσταση όμως, οι κηφειδες είναι τόσο αμυδροί που δεν μπορούμε να τους παρατηρήσουμε πλέον. Για αποστάσεις μέχρι 80×10^6 ετών φωτός χρησιμοποιούνται σήμερα λαμπροί αστέρες της κύριας ακολουθίας με γνωστό απόλυτο μέγεθος (αστέρες φασματικού τύπου O και B), λαμπρά σφαιρωτά σμήνη ή καινοφανείς αστέρες. Για μεγαλύτερες αποστάσεις οι μετρήσεις είναι πολύ δύσκολες. Αφ' ενός οι γαλαξίες είναι πλέον πολύ αμυδροί, αφ' ετέρου η γωνιώδης διάμετρος τους είναι πολύ μικρή και δεν μπορούμε να διακρίνουμε τα χαρακτηριστικά τους. Πάντως ο αριθμός των γαλαξιών που μπορούμε να παρατηρήσουμε, πιστεύεται ότι υπερβαίνει τους 10^{10} . Απ' αυτούς οι περισσότεροι είναι μικρότεροι από το Γαλαξία μας. Υπάρχουν όμως και αρκετοί που είναι πολύ μεγαλύτεροι.

6.2 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΓΑΛΑΞΙΩΝ ΚΑΤΑ HUBBLE

Παρά το μεγάλο αριθμό των γαλαξιών που υπάρχουν στο Σύμπαν, όλοι σχεδόν μπορούν να ταξινομηθούν ανάλογα με το μορφολογικό τους τύπο. Σήμερα οι γαλαξίες κατατάσσονται σε τέσσερις κατηγορίες:

α) **Σπειροειδείς** (τύπου S – spirals). Οι γαλαξίες αυτοί είναι οι πιο εντυπωσιακοί. Αποτελούνται συνήθως από ένα λαμπρό πυρήνα και δυο συνεπίπεδες αντιδιαμετρικές και συμμετρικές σπείρες. Ανάλογα με τη διάμετρο, τη φωτεινότητα του πυρήνα και τη μορφή των περιελίξεων των σπειρών τους, υποδιαιρούνται σε τρεις κατηγορίες: (**Sa**) με λαμπρούς πυρήνες και κλειστές σπείρες, (**Sb**) με κάπως αμυδρότερους πυρήνες και πιο ανοικτές σπείρες και (**Sc**) με αμυδρούς και μικρούς πυρήνες και πολύ ανοικτές σπείρες (Σχήμα 6.4). Ο Γαλαξίας μας και ο M31 (ο γαλαξίας της Ανδρομέδας – Σχήμα 6.1) ανήκουν στην κατηγορία Sb.

β) **Ραβδωτοί σπειροειδείς** (τύπου SB – barred spirals). Στους γαλαξίες αυτούς, που αποτελούν το ένα τρίτο περίπου των σπειροειδών γαλαξιών, οι σπείρες δεν ξεκινούν εφαιπομενικά από τον πυρήνα αλλά από τα άκρα μιας «ράβδου» που αποτελείται από αστέρες,

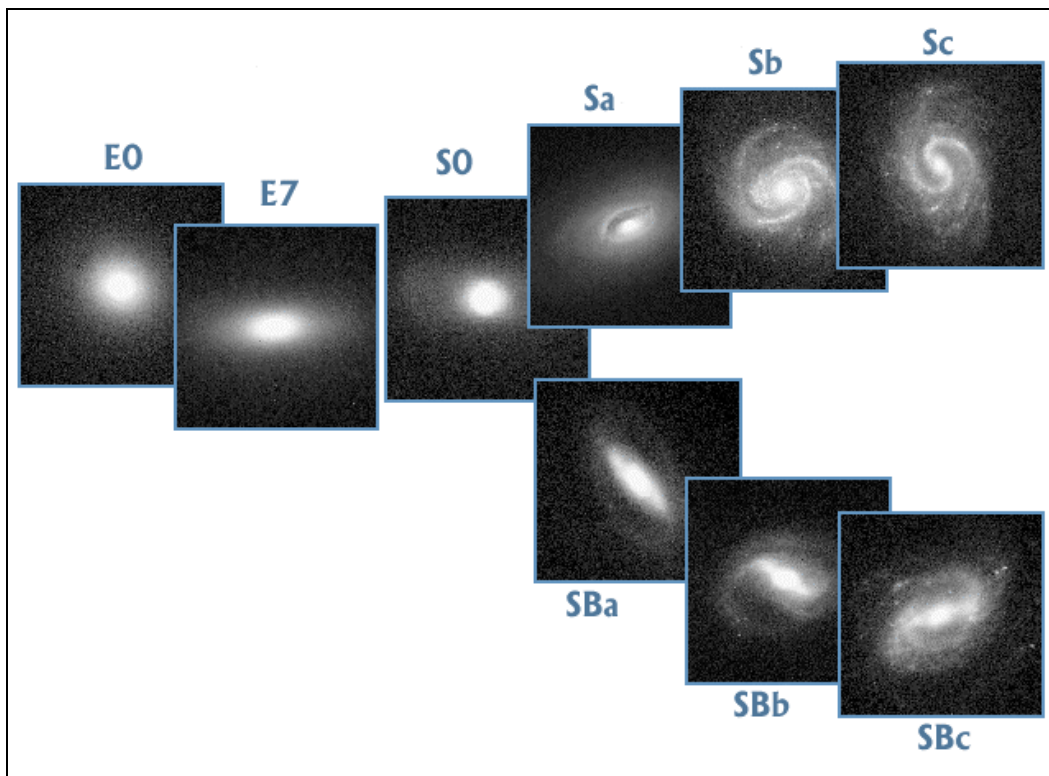


Σχήμα 6.4. Η ταξινόμηση γαλαξιών κατά Hubble

αέρια και σκόνη. Ανάλογα με τη λαμπρότητα του πυρήνα και τη μορφή των περιελίξεων των σπειρών τους, διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες, **SBa**, **SBb** και **SBc**, σε αναλογία με την προηγούμενη κατηγορία (Σχήμα 6.4).

γ) **Ελλειπτικοί** (τύπου E – ellipticals). Είναι ο πιο κοινός τύπος γαλαξία. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι μεγαλύτεροι γαλαξίες που έχουν παρατηρηθεί μέχρι σήμερα είναι ελλειπτικοί. Ανάλογα με την ελλειπτικότητά τους (δηλαδή την πλάτυνση της έλλειψης, που παριστάνεται από το λόγο $(a-b)/a$, όπου a και b είναι ο μεγάλος και ο μικρός αντίστοιχα ημιάξονας της έλλειψης) διακρίνονται σε 8 τύπους (**E0**, **E1**, **E2**, ..., **E7**). Ο αριθμός που συνοδεύει το E είναι το δεκαπλάσιο της πλάτυνσης (Σχήμα 6.4). Παλαιότερα επικρατούσε η αντίληψη ότι το σχήμα των ελλειπτικών γαλαξιών είναι σφαιροειδές (ελλειψοειδές εκ περιστροφής) και ότι παρουσιάζονται σαν ελλειπτικοί λόγω προβολής τους πάνω στο επίπεδο του ουρανού. Τελευταία όμως διαπιστώθηκε ότι πολλοί ελλειπτικοί γαλαξίες έχουν σχήμα τριαξονικού ελλειψοειδούς, δηλαδή έχουν τρεις άνιστους άξονες. Ανάλογα με τη μάζα τους διακρίνονται σε **νάνους ελλειπτικούς** (dwarf ellipticals) με μάζα περίπου $10^6 M_{\odot}$ και **γίγαντες ελλειπτικούς** (giant ellipticals) με μάζα που φθάνει τις $10^{13} M_{\odot}$.

δ) **Ανόμαλοι** (τύπου Irr – irregulars). Ένα μικρό ποσοστό γαλαξιών (γύρω στο 3%) δεν παρουσιάζουν εμφανή συμμετρία. Η κατανομή της ύλης τους είναι ακανόνιστη. Χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: Αυτοί που ανήκουν στον τύπο I (**Irr I**) περιέχουν πολύ λίγη σκόνη και αέρια και κατά συνέπεια οι αστέρες τους διακρίνονται εύκολα. Αυτοί που ανήκουν στον τύπο II (**Irr II**) περιέχουν ζώνες σκόνης που εμποδίζουν την παρατήρηση μεμονωμένων αστερών. Γαλαξίες τύπου Irr I είναι τα Μαγγελανικά Νέφη (οι πλησιέστεροι συνοδοί γαλαξίες του Γαλαξία μας).



Σχήμα 6.5 Πραγματικές φωτογραφίες γαλαξιών σύμφωνα με την ταξινόμηση του Hubble

Ο Hubble ταξινόμησε τους τρεις πρώτους τύπους γαλαξιών (S, SB και E) σ' ένα διάγραμμα που ονομάζεται **διαπασών του Hubble** (Hubble's tuning fork – Σχήματα 6.4 και

6.5). Οι γαλαξίες SO (SBO αντίστοιχα για τους ραβδωτούς) είναι πολύ σπάνιοι και δεν συμπεριλαμβάνονταν στην αρχική ταξινόμηση. Οι γαλαξίες αυτοί είναι ενδιάμεσοι τύποι μεταξύ σπειροειδών και ελλειπτικών και η ταξινόμησή τους είναι πολλές φορές προβληματική.

6.3 ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΜΕΤΑΞΥ ΣΠΕΙΡΟΕΙΔΩΝ ΚΑΙ ΕΛΛΕΙΠΤΙΚΩΝ ΓΑΛΑΞΙΩΝ

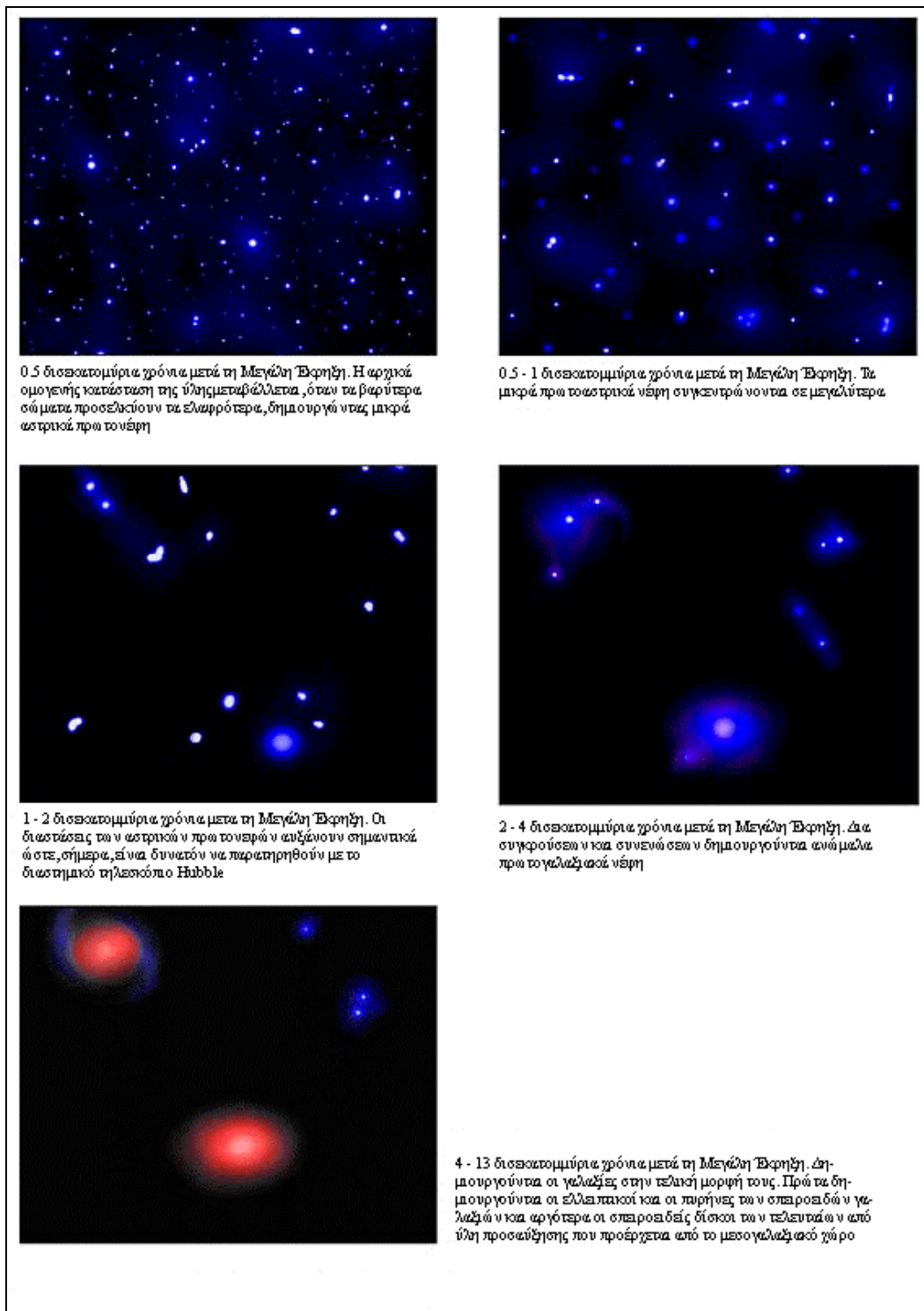
Εκτός από τη βασική διαφορά της ύπαρξης (ή όχι) σπειρών, οι κυριότερες διαφορές μεταξύ σπειροειδών και ελλειπτικών γαλαξιών είναι οι εξής:

- α) Οι μεγαλύτεροι γαλαξίες που έχουν παρατηρηθεί ($M \sim 10^{13} M_{\odot}$) είναι ελλειπτικοί.
- β) Ο λόγος της μέσης τιμής των τυχαίων ταχυτήτων των αστέρων προς την ταχύτητα περιστροφής του γαλαξία είναι πολύ μεγαλύτερος στους ελλειπτικούς. Στους γαλαξίες μάλιστα αυτούς υπάρχει συσχετισμός μεταξύ της ταχύτητας περιστροφής του γαλαξία και του μορφολογικού του τύπου, δηλαδή όσο πιο μεγάλη είναι η ταχύτητα περιστροφής, τόσο πιο μεγάλος είναι και ο δείκτης του E. Στους σπειροειδείς δεν υπάρχει ανάλογος συσχετισμός, όπως προκύπτει από παρατηρήσεις.
- γ) Οι ελλειπτικοί δεν περιέχουν αέρια και σκόνη. Αντίθετα, αυτό είναι ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά γνωρίσματα των σπειροειδών και των ανώμαλων γαλαξιών. Η ύπαρξη μάλιστα ζώνης σκόνης σ' ένα γαλαξία, τον κατατάσσει αυτόματα, με ελάχιστες εξαιρέσεις, στους σπειροειδείς.
- δ) Οι ελλειπτικοί δεν περιέχουν νεαρούς αστέρες, και αυτό οφείλεται στην έλλειψη αερίων και σκόνης που απαιτούνται για τη δημιουργία πρωτοαστέρων.
- ε) Οι σπειροειδείς έχουν ισχυρές γραμμές εκπομπής στο φάσμα τους, ενώ οι ελλειπτικοί λόγω της έλλειψης αερίων και σκόνης δεν παρουσιάζουν ούτε γραμμές εκπομπής, ούτε απορρόφησης.

6.4 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΚΑΙ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΩΝ ΓΑΛΑΞΙΩΝ

Όταν ο Hubble δημοσίευσε τις πρώτες παρατηρήσεις του, θεωρούσε ότι η ταξινόμησή του αντιπροσωπεύει την εξελικτική πορεία των γαλαξιών, δηλαδή ότι με την πάροδο του χρόνου οι ελλειπτικοί γαλαξίες «συμπιέζονται» παράλληλα προς τον άξονα περιστροφής και εξελίσσονται σε σπειροειδείς. Σήμερα γνωρίζουμε ότι η άποψη αυτή ήταν λανθασμένη. Οι γαλαξίες καταλήγουν σ' έναν τύπο, ανάλογα με την αρχική μάζα και στροφορμή των πρωτογαλαξιακών νεφών από τα οποία σχηματίστηκαν. Μετά τη δημιουργία τους οι γαλαξίες ελάχιστα εξελίσσονται, εκτός εάν συγκρουστούν με άλλους γαλαξίες, πράγμα όχι και τόσο σπάνιο. Υπό την έννοια αυτή δεν φαίνεται να υπάρχει άμεση εξελικτική σχέση μεταξύ σπειροειδών και ελλειπτικών γαλαξιών, όπως τουλάχιστον την είχε προτείνει αρχικά ο Hubble.

Οι γνώσεις μας σχετικά με τη **δημιουργία** των γαλαξιών είναι ακόμα πολύ περιορισμένες. Ακόμα και το βασικό πρόβλημα, αν δηλαδή δημιουργήθηκαν πρώτα οι γαλαξίες και μετά οι αστέρες, δεν έχει ουσιαστικά λυθεί. Όπως είναι γνωστό από έμμεσες παρατηρήσεις, περίπου το 90% της ύλης του Σύμπαντος αποτελείται από **σκοτεινή ύλη** (dark matter), ύλη η



Σχήμα 6.6 Πρότυπο εξέλιξης γαλαξιών σύμφωνα με τον Sam Pascarella (Πανεπιστήμιο Arizona State, ΗΠΑ)

οποία δεν είναι ορατή με τις συμβατικές μεθόδους παρατήρησης. Η σκοτεινή ύλη μπορεί να χαρακτηριστεί είτε από τη φύση της (**βαρυονική** –baryonic–, ή **εξωτική** –exotic–) είτε από τη θερμοκρασία της (**θερμή** –hot–, ή **ψυχρή** –cold dark matter–).

(α) Βαρυονική σκοτεινή ύλη. Πρόκειται για κοινή ύλη που βρίσκεται αποθηκευμένη σε ψυχρά σώματα που δεν ακτινοβολούν σημαντικά ποσά θερμότητας, όπως π.χ. πλανητοειδείς,

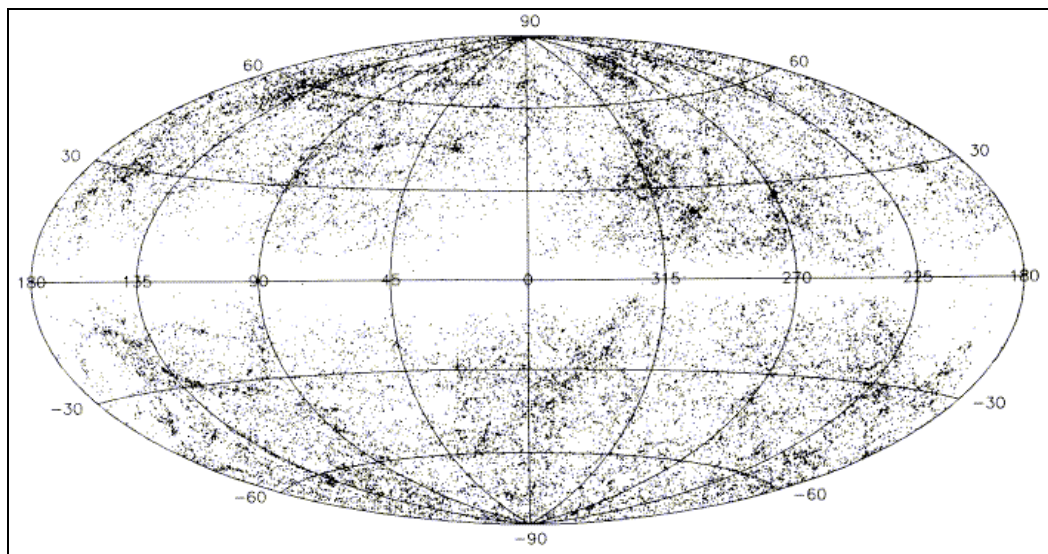
πλανήτες, φαιοίς νάνους (αστέρες που δεν έχουν αρκετή μάζα για να συντηρήσουν θερμοπυρηνικές αντιδράσεις στον πυρήνα τους), κλπ.. Η ύλη αυτή θεωρείται ψυχρή, επειδή η ταχύτητά της είναι πολύ μικρότερη από την ταχύτητα του φωτός)

(β) Εξωτική σκοτεινή ύλη. Η ύλη αυτή αποκαλείται έτσι επειδή αποτελείται είτε από γνωστά στοιχειώδη σωματίδια, τα οποία όμως δεν έχουμε συνηθίσει να τα θεωρούμε ως δομικά στοιχεία του Σύμπαντος, είτε από σωματίδια η ύπαρξη των οποίων έχει προταθεί από τους θεωρητικούς Φυσικούς αλλά δεν έχει ακόμη ανιχνευθεί πειραματικά. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν τα νετρίνα, τα οποία σχετικά πρόσφατα έχει αποδειχθεί ότι έχουν μικρή αλλά μη μηδενική μάζα ηρεμίας. Επειδή τα σωματίδια αυτά κινούνται με σχετικιστικές ταχύτητες (λόγω της μικρής μάζας τους), θεωρούνται ως θερμή σκοτεινή ύλη. Σύμφωνα με τις τελευταίες εκτιμήσεις, τα νετρίνα αποτελούν περίπου το 5% της μάζας-ενέργειας του Σύμπαντος. Στη δεύτερη κατηγορία ανήκουν τα αξιόνια (με μάζα $10^{-6} - 10^{-3}$ eV, περίπου $10^{-39} - 10^{-36}$ gr) και σωματίδια που προβλέπονται από τις σύγχρονες θεωρίες υπερσυμμετρίας, όπως τα φωτίνα (με μάζα 100 GeV, περίπου 10^{-22} gr). Τα σωματίδια αυτά κατατάσσονται στην κατηγορία της ψυχρής σκοτεινής ύλης, επειδή κινούνται με μικρές ταχύτητες (είτε επειδή έτσι δημιουργούνται, όπως τα αξιόνια, είτε επειδή έχουν μεγάλη μάζα, όπως τα φωτίνα).

Η βαρυστική επιρροή της σκοτεινής ύλης προφανώς έπαιξε (και παίζει) σημαντικό ρόλο στη δημιουργία και εξέλιξη των γαλαξιών και των αστέρων. Εάν αποτελείται από ψυχρή ύλη (είτε βαρυονική είτε εξωτική), η μέση ταχύτητά της είναι μικρή (πολύ μικρότερη από την ταχύτητα του φωτός) και ευνοείται η δημιουργία αστέρων. Εάν αποτελείται από θερμή εξωτική ύλη, η ταχύτητά της είναι πολύ μεγάλη (συγκρίσιμη με την ταχύτητα του φωτός) και δεν είναι δυνατή η δημιουργία μικρών μονάδων μάζας, δηλαδή αστέρων. Το γεγονός ότι έχουν παρατηρηθεί αστέρες, των οποίων η ηλικία είναι σχεδόν ίση με την ηλικία του Σύμπαντος, μας κάνει να πιστεύουμε ότι η σκοτεινή ύλη είναι ψυχρή.

Σύμφωνα με τις νεώτερες θεωρίες, οι γαλαξίες δημιουργήθηκαν στην τελική μορφή τους 4 - 13 δισεκατομμύρια χρόνια μετά από τη Μεγάλη Έκρηξη, πιθανόν από συγκρούσεις ανώμαλων πρωτογαλαξιακών νεφών (Σχήμα 6.6). Η πιθανότητα σύγκρουσης αυτών των νεφών είναι σχετικά μεγάλη, δεδομένου ότι, σε αντιδιαστολή προς τους αστέρες, η μέση απόστασή τους είναι σχετικά μικρή, της τάξης των 20 γαλαξιακών διαμέτρων. Πρώτα δημιουργήθηκαν οι ελλειπτικοί γαλαξίες και οι πυρήνες των σπειροειδών γαλαξιών και αργότερα οι δίσκοι των σπειροειδών από ύλη που προερχόταν από το μεσογαλαξιακό χώρο. Έτσι δεν μας παραξενεύει πλέον το γεγονός ότι σε όσο μεγαλύτερες αποστάσεις παρατηρούμε, βλέπουμε ολοένα λιγότερους γαλαξίες με ομαλά σχήματα και περισσότερους γαλαξίες με ακανόνιστα, ενώ παράλληλα αυξάνει και ο αριθμός των κουέιζαρς (quasars – βλ. §6.6), που χαρακτηρίζονται από πολύ λαμπρούς και μεταβλητούς πυρήνες. Τα quasars βρίσκονται σε πάρα πολύ μεγάλες αποστάσεις και επομένως τα παρατηρούμε όπως ήταν στο παρελθόν. Αυτό συμβαίνει διότι, λόγω της πεπερασμένης ταχύτητας του φωτός, τα φωτόνια που καταγράφονται στις φωτογραφικές πλάκες και τους άλλους ανιχνευτές ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας ταξιδεύουν πολλά δισεκατομμύρια χρόνια μέχρι να φτάσουν σ' εμάς. Ας σημειωθεί ότι τους γαλαξίες των οποίων η ακτινοβολία παρουσιάζει μετατόπιση Doppler προς το ερυθρό (βλ. §6.7) $z = 0.3 - 0.5$ τους βλέπουμε όπως ήταν πριν από 3 - 5 δισεκατομμύρια έτη. Όταν το $z = 1 - 2$, τότε τους βλέπουμε όπως ήταν πριν από 7 - 10 δισεκατομμύρια έτη. Η ηλικία του Σύμπαντος, όπως αναφέρεται στο Κεφάλαιο 7, είναι 12 - 15 δισεκατομμύρια έτη.

6.5 ΣΜΗΝΗ ΓΑΛΑΞΙΩΝ



Σχήμα 6.7 Ο θέση όλων γαλαξιών με $m_B \leq 14.5$ σε γαλαξιακές συντεταγμένες. Η έλλειψη γαλαξιών κατά μήκος του γαλαξιακού επιπέδου οφείλεται στην ισχυρή απορρόφηση που υφίσταται το φως τους από τη σκόνη και τα αέρια του Γαλαξία μας.

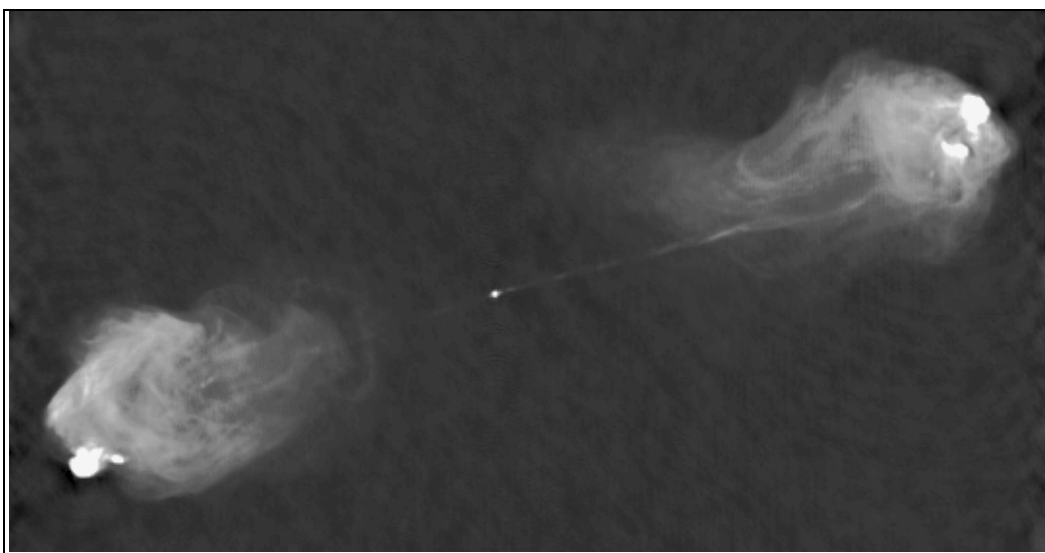
Σήμερα, με τα διαθέσιμα μέσα, είναι δυνατό να παρατηρηθούν τουλάχιστον 10^{11} γαλαξίες, οι περισσότεροι από τους οποίους ανήκουν σε σμήνη γαλαξιών. Στο Σχήμα 6.7 φαίνεται η θέση όλων των γνωστών γαλαξιών με φαινόμενο μέγεθος $m_B \leq 14.5$. Είναι προφανές ότι, με ελάχιστες εξαιρέσεις, οι γαλαξίες είναι συγκεντρωμένοι σε ομάδες και σμήνη. Το 1958 ο Abell κατέγραψε 2712 σμήνη γαλαξιών (κυρίως του βόρειου ημισφαιρίου) στον περίφημο κατάλογό του από μετρήσεις που έκανε στον **χάρτη του Πάλομαρ** (Palomar Sky Survey Atlas). Το **Τοπικό Σμήνος γαλαξιών** (Local Cluster of galaxies) περιέχει γύρω στους 40 γαλαξίες και κινείται ως σύνολο με ταχύτητα $v = 220$ km/sec προς το **σμήνος γαλαξιών της Παρθένου** (Virgo cluster), που βρίσκεται σε απόσταση 19 Mpc. Οι γνωστότεροι γαλαξίες του Τοπικού Σμήνους είναι ο **γαλαξίας της Ανδρομέδας** (Andromeda galaxy), ο οποίος είναι και ο μεγαλύτερος γαλαξίας του σμήνους, και τα δύο **Μαγγελανικά Νέφη** (Magellanic Clouds), το *Μεγάλο* (LMC) και το *Μικρό* (SMC). Όπως αναμένεται, οι περισσότεροι γαλαξίες του Τοπικού Σμήνους είναι ελλειπτικοί. Το ίδιο συμβαίνει και με το σμήνος της Παρθένου, που περιλαμβάνει τουλάχιστον 3000 γαλαξίες με συνολική μάζα $2-4 \times 10^{14} M_{\odot}$ καθώς και με το **σμήνος της Κόμης** (Coma cluster – στον αστερισμό της Κόμης Βερενίκης) που περιέχει πάνω από 10 000 μέλη, σε μέση απόσταση 140 Mpc, και μάζα $2-3 \times 10^{15} M_{\odot}$. Ο χάρτης του Palomar, ο κλασικός αυτός χάρτης του ουρανού, περιέχει γύρω στα 100 000 πολλαπλά συστήματα γαλαξιών.

6.6 ΑΛΛΟΙ ΤΥΠΟΙ ΓΑΛΑΞΙΩΝ ΚΑΙ QUASARS

Παρ' όλο που στο Κεφάλαιο αυτό δεν θα ασχοληθούμε με άλλους τύπους γαλαξιών, θα θέλαμε να αναφέρουμε ότι, εκτός από τους κοινούς γαλαξίες, στους οποίους στηρίζεται το

σύστημα ταξινόμησης που ήδη αναφέραμε, υπάρχουν και άλλοι γαλαξίες με τελείως διαφορετικές ιδιότητες. Οι περισσότεροι από τους γαλαξίες αυτούς ανακαλύφθηκαν τα τελευταία 40 χρόνια και χαρακτηρίζονται από ιδιαίτερες λαμπρούς και μεταβλητούς πυρήνες. Οι πυρήνες που παρουσιάζουν ισχυρές διακυμάνσεις λαμπρότητας, ονομάζονται **ενεργοί γαλαξιακοί πυρήνες** (active galactic nuclei, AGN) και αποτελούν αντικείμενο έντονης ερευνητικής δραστηριότητας. Μερικές κατηγορίες ιδιαίτερων τύπων γαλαξιών είναι οι παρακάτω:

α) **Γαλαξίες τύπου Seyfert και BL Lac.** Οι γαλαξίες αυτοί αποτελούν το 10% περίπου των φωτεινότερων γαλαξιών και χαρακτηρίζονται από πολύ λαμπρούς πυρήνες. Σε συνηθισμένες φωτογραφίες εμφανίζονται σαν αστέρες. Έχει παρατηρηθεί ότι η λαμπρότητά τους μεταβάλλεται σημαντικά μέσα σε μικρά χρονικά διαστήματα (μερικών ημερών έως και μερικών μηνών). Όταν, όμως, αυξηθεί ο χρόνος έκθεσης των φωτογραφιών, παρατηρείται ότι οι μεν τύπου Seyfert περιβάλλονται από ένα σπειροειδή δίσκο, οι δε τύπου BL Lac παρουσιάζουν χαρακτηριστικά ελλειπτικών γαλαξιών με πολύ λαμπρούς πυρήνες. Φασματοσκοπικές παρατηρήσεις επιβεβαίωσαν ότι οι γαλαξίες τύπου Seyfert έχουν ισχυρές γραμμές εκπομπής, ενώ οι τύπου BL Lac, όπως και οι ελλειπτικοί γαλαξίες, έχουν μόνο συνεχές φάσμα. Και οι δύο τύποι συνήθως εκπέμπουν σημαντική ενέργεια υπό μορφή ραδιοφωνικών κυμάτων.



Σχήμα 6.8. Ο ραδιογαλαξίας Cygnus A. Η χαρτογράφηση έγινε με το ραδιοτηλεσκόπιο VLA

β) **Ραδιογαλαξίες** (Radio galaxies): Οι γαλαξίες αυτοί, που συνήθως είναι ελλειπτικοί, εκπέμπουν ισχυρά σε ραδιοφωνικά μήκη κύματος. Τυπικό παράδειγμα ραδιογαλαξία είναι ο γαλαξίας **Κύκνος Α** (Cygnus A - Σχήμα 6.8). Εντοπίστηκε το 1946 και η ένταση της ραδιοφωνικής ακτινοβολίας του είναι τουλάχιστον 10^6 φορές μεγαλύτερη από αυτήν που εκπέμπει ο Γαλαξίας. Ισχυρή πηγή ραδιοκυμάτων είναι επίσης ο λαμπρότερος γαλαξίας του σμήνους της Παρθένου, ο **M87**. Συνήθως η ραδιοφωνική ακτινοβολία των γαλαξιών αυτών εκπέμπεται από ένα πυρήνα θερμικής ακτινοβολίας, που συμπίπτει με τον οπτικό γαλαξία, και από δύο λοβούς μη θερμικής ακτινοβολίας (ακτινοβολίας σύγχροτρον), που βρίσκονται σε πολύ μεγάλη απόσταση από τον πυρήνα. Η διάδοση της ενέργειας από το συμπαγή πυρήνα (οπτικό γαλαξία) προς τους λοβούς οφείλεται στην ύπαρξη δύο πιδάκων (jets) ύλης, που ξεκινούν από τον πυρήνα του γαλαξία και εκτείνονται σε απόσταση μεγαλύτερη από τη διάμετρο του

γαλαξία. Η δημιουργία αυτών των πιδάκων πιστεύεται σήμερα ότι οφείλεται στην ύπαρξη μιας μελανής οπής στον πυρήνα του γαλαξία. Η ύλη που πέφτει προς τη μελανή οπή σχηματίζει έναν δίσκο προσάυξης και ένα μέρος της διαφεύγει στο μεσογαλαξιακό χώρο κατά μήκος του άξονα περιστροφής του γαλαξία.

γ) **Εκρηκτικοί γαλαξίες:** Στους πυρήνες των γαλαξιών αυτών συμβαίνουν σφοδρές εκρήξεις που συνοδεύονται από εκπομπή μεγάλων ποσοτήτων μάζας. Ο γαλαξίας M82 στον αστερισμό της Μεγάλης Άρκτου (Σχήμα 6.2) και ο M87 αποτελούν τυπικά παραδείγματα εκρηκτικών γαλαξιών.

δ) **Quasars και QSOs:** Το 1963 ο Maarten Schmidt ανακάλυψε ότι όλες οι φασματικές γραμμές εκπομπής της ραδιοπηγής 3C 273, που είχε εν τω μεταξύ εντοπισθεί και οπτικά, ήταν μετατοπισμένες προς το ερυθρό κατά 16% ($z = 0.158$). Οπτικά το 3C 273 έμοιαζε με αστέρα, αλλά, σύμφωνα με το νόμο του Hubble (βλ. §6.7), η απόστασή του ήταν πολύ μεγαλύτερη από την απόσταση του πλέον απομακρυσμένου γαλαξία που ήταν γνωστός μέχρι τότε. Για το λόγο αυτό το του εδόθη η ονομασία **quasar** (quasi star). Λίγο αργότερα εντοπίστηκε και το quasar 3C 48, με μετατόπιση προς το ερυθρό $z = 0.369$. Το πλέον απομακρυσμένο quasar που έχει ανιχνευθεί μέχρι σήμερα (2000), είναι το PC 1247+3406, στο οποίο η φασματική γραμμή Lyman- α παρουσιάζεται μετατοπισμένη από τα 1216 Å (που εμπίπτει στα υπεριώδη μήκη κύματος) στα 6968 Å (στο ερυθρό χρώμα). Η μετατόπιση αυτή αντιστοιχεί σε $z = 4.73$, που ισοδυναμεί με ταχύτητα ίση προς το 94.4% της ταχύτητας του φωτός!

Σήμερα είναι γνωστά πάνω από 4000 αντικείμενα με μεγάλη μετατόπιση προς το ερυθρό, το 90% των οποίων δεν εκπέμπει σε ραδιοφωνικά μήκη κύματος. Τα αντικείμενα αυτά ονομάζονται συλλήβδην **QSOs** (Quasi Stellar Objects), ενώ η ονομασία "quasar" έχει διατηρηθεί για όσα από αυτά εκπέμπουν ισχυρή ραδιοφωνική ακτινοβολία.

Οι βασικές ιδιότητες των QSOs συνοψίζονται ως εξής:

- Μεγάλη φασματική μετάθεση προς το ερυθρό ($z \geq 0.06$, βλέπε §6.7)
- Το μεγαλύτερο ποσοστό της ακτινοβολίας τους προέρχεται από μια πολύ μικρή κεντρική περιοχή (τον πυρήνα),γωνιάδους διαμέτρου $< 1''$, που αντιστοιχεί σε γραμμική διάμετρο < 1 kpc
- Στα φάσματά τους κυριαρχούν γραμμές εκπομπής. Οι γραμμές απορρόφησης, όταν υπάρχουν, παρουσιάζουν πολύ μικρότερη μετατόπιση προς το ερυθρό και επομένως προέρχονται από απορρόφηση στο μεσογαλαξιακό ή μεσοαστρικό χώρο
- Τα πλησιέστερα QSOs ($z \leq 2.5$) εκπέμπουν έντονα τόσο στο υπεριώδες όσο και στο υπέρυθρο
- Η ακτινοβολία τους είναι έντονα μεταβλητή σε χρονική κλίμακα μερικών ημερών έως μερικών ετών
- Η ραδιοφωνική ισχύς των quasars είναι της τάξης των 10^{37} Watt. Η ισχύς της ραδιοφωνικής ακτινοβολίας του 90% των QSO είναι κατά 100 έως 1000 φορές χαμηλότερη

Ο σημαντικός ρόλος των QSO στην αστροφυσική επικεντρώνεται σε δύο πεδία: (α) στο μηχανισμό εκπομπής τους, κατά τον οποίο από μία πολύ μικρή περιοχή εκπέμπεται ένα τεράστιο ποσό ενέργειας, και (β) στο γεγονός ότι, με παρατηρήσεις των αντικειμένων

αυτών που βρίσκονται στις εσχαιές του Σύμπαντος, ελπίζουμε να κατανοήσουμε καλύτερα τις συνθήκες που επικρατούσαν κατά τις αρχικές στιγμές της δημιουργίας τους.

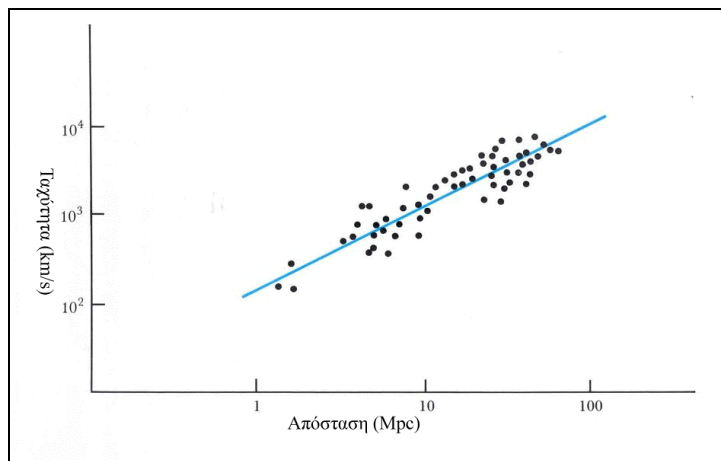
6.7 ΝΟΜΟΣ ΤΟΥ HUBBLE - ΔΙΑΣΤΟΛΗ ΚΑΙ ΗΛΙΚΙΑ ΤΟΥ ΣΥΜΠΑΝΤΟΣ

Η απόσταση των γαλαξιών είναι δυνατό να βρεθεί με φασματοσκοπικές παρατηρήσεις, με την παραδοχή ότι η **μετατόπιση Doppler** (προς το ερυθρό) που παρατηρούμε οφείλεται αποκλειστικά στην απομάκρυνσή τους. Βέβια σήμερα υπάρχουν μερικές διαφωνίες ως προς την ορθότητα αυτής της παραδοχής (ιδιαίτερα μετά την προσεκτική μελέτη ζευγών γαλαξιών και quasars από τον Agr) αλλά σε γενικές γραμμές πιστεύουμε ότι είναι σωστή, τουλάχιστον στατιστικά.

Το 1929 ο Hubble ανακοίνωσε την ύπαρξη μιας γραμμικής σχέσης μεταξύ της ακτινικής ταχύτητας απομάκρυνσης (v) των γαλαξιών και της απόστασης τους (r). Η σχέση:

$$v = H_0 \times r, \quad (6.1)$$

όπου H_0 είναι η **σταθερά του Hubble** (Hubble constant), είναι γνωστή ως **σχέση του Hubble**. Η σχέση αυτή μας λέγει ότι όσο πιο μακριά βρίσκεται ένας γαλαξίας, τόσο πιο μεγάλη είναι η ταχύτητα απομάκρυνσής του (Σχήμα 6.9). Η τιμή της σταθεράς H_0 δεν είναι ακριβώς γνωστή, αλλά πιστεύουμε ότι βρίσκεται στο διάστημα μεταξύ 55 km/sec/Mpc και 75



Σχήμα 6.9. Ο νόμος του Hubble

km/sec/Mpc. Η τιμή που συνήθως χρησιμοποιούμε σήμερα είναι $H_0 = 65$ km/sec/Mpc. Η σπουδαιότητα της σχέσης (6-1) είναι πολύ μεγάλη, διότι μας επιτρέπει να υπολογίζουμε κάθε φορά την απόσταση ενός γαλαξία ή quasar, όταν γνωρίζουμε την ταχύτητα απομάκρυνσής του. Όπως είναι γνωστό, η μετατόπιση του μήκους κύματος των φασματικών γραμμών εκπομπής ή απορρόφησης των διάφορων στοιχείων των αστερών ή νεφελωμάτων είναι ανάλογη προς την ακτινική συνιστώσα της ταχύτητας της σχετικής κίνησης μεταξύ πηγής και δέκτη (φαινόμενο Doppler). Αν λ_0 είναι το μήκος κύματος μιας φασματικής γραμμής στο τοπικό σύστημα αναφοράς (κατάσταση ηρεμίας), λ το μετατοπισμένο μήκος κύματος και c η ταχύτητα του φωτός τότε, σύμφωνα με την Ειδική Θεωρία της Σχετικότητας, ισχύει η σχέση

$$1 + z = [(1+v/c)/(1-v/c)]^{1/2} \quad (6.2)$$

όπου z είναι η μετατόπιση Doppler,

$$z = (\lambda - \lambda_0)/\lambda_0 \quad (6.3)$$

Η μετατόπιση Doppler είναι προς το ερυθρό (redshift - θετική) αν η πηγή απομακρύνεται ή προς το κυανό (blueshift - αρνητική) αν η πηγή πλησιάζει τον παρατηρητή. Από τη σχέση (6.2) είναι προφανές ότι για μη σχετικιστικές ταχύτητες ($v/c \ll 1$), η μετατόπιση Doppler δίνεται από τη σχέση:

$$z = v/c \quad (6.4)$$

Μετρώντας τη μετατόπιση $\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0$ των φασματικών γραμμών ενός γαλαξία ή ενός quasar, υπολογίζουμε την ταχύτητα απομάκρυνσής του v από τη σχέση (6.2) ή την (6.4) και, στη συνέχεια, την απόστασή του από τη σχέση (6.1).

Ποία είναι, όμως, η φυσική σημασία της σταθεράς του Hubble; Αν υποθέσουμε ότι η ταχύτητα απομάκρυνσης των γαλαξιών δεν μεταβάλλεται με την πάροδο του χρόνου, τότε ένας γαλαξίας, από τη στιγμή της Μεγάλης Έκρηξης (Big Bang), θα έχει διανύσει απόσταση $r = v \times T$, όπου T είναι η ηλικία του Σύμπαντος. Η σχέση αυτή γράφεται:

$$v = (1/T) \times r. \quad (6.5)$$

Από τις σχέσεις (6.1) και (6.5) προκύπτει ότι:

$$T = H_0^{-1} \quad (6.6)$$

Επομένως η ηλικία του Σύμπαντος μπορεί να βρεθεί με τη μέτρηση της σταθεράς του Hubble. Για $H_0 = 65 \text{ km/sec/Mpc}$ βρίσκουμε ότι

$$T = 1.53 \times 10^{10} \text{ έτη.}$$

Από την παραπάνω ανάλυση γίνεται αμέσως φανερό η σημασία της σταθεράς του Hubble στην Κοσμολογία (βλ. Κεφ. 7) και γενικότερα στη μελέτη του Σύμπαντος.