

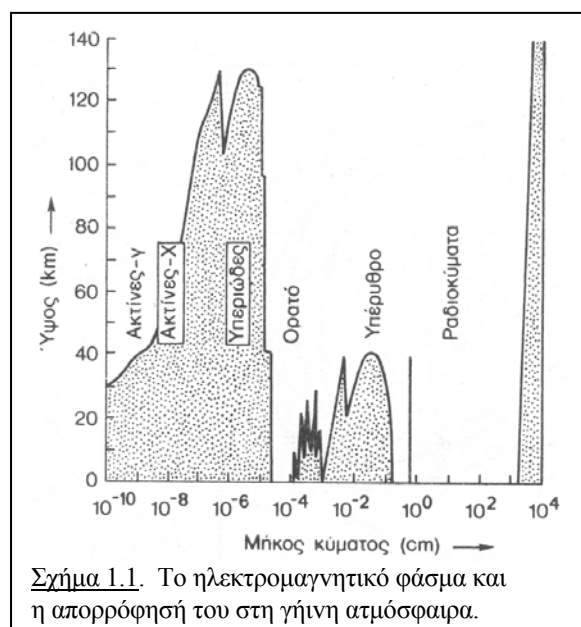
ΓΙΑΝΝΗ Χ. ΣΕΙΡΑΛΑΚΗ

**ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ
ΡΑΔΙΟΑΣΤΡΟΝΟΜΙΑΣ**

ΜΑΡΤΙΟΣ 2006

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Μαζί με τα πρώτα μηνύματα της ιστορίας μας που έρχονται στο φώς με τη σκαπάνη και την επιμονή των αρχαιολόγων, βρίσκουμε και τις πρώτες ενδείξεις παρατηρήσεων του ουρανού, του Ήλιου, της Σελήνης, των πλανητών και των αστερών. Οι εποχιακές μεταβολές της θέσης των ουράνιων σωμάτων μας έδωσαν τα πρώτα ερεθίσματα ποσοτικού υπολογισμού του χρόνου, που, μαζί με την έμφυτη αντίληψη της έννοιας της αρμονίας του χώρου, υπήρξαν τα κύρια κίνητρα οργάνωσης της ζωής των προγόνων μας. Η οργάνωση αυτή οδήγησε καταρχήν στην επιβίωση και ύστερα στη γρήγορη εξέλιξη και επικράτηση του ανθρώπινου είδους.



Από τα παραπάνω γίνεται φανερό πως οι ρίζες της Αστρονομίας είναι άμεσα συνδεδεμένες με την ιστορία μας και, όπως συμβαίνει με τους περισσότερους κλάδους της επιστήμης, είναι αδύνατο να καθορίσουμε με ακρίβεια πότε και πού γεννήθηκε. Ωστόσο αυτό που σίγουρα γνωρίζουμε είναι πως μέχρι πριν από 100 περίπου χρόνια όλες οι αστρονομικές παρατηρήσεις γινόταν στο οπτικό παράθυρο δηλαδή σε μια πολύ στενή περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος (βλ. Σχ.1.1). Μερικά χρόνια αργότερα, -και αυτή τη φορά μπορούμε

να προσδιορίσουμε με μεγάλη ακρίβεια την ημερομηνία και τον τόπο- ένας Αμερικανός μηχανικός της εταιρείας Bell Telephone Laboratories, ο Carl G. Jansky, έκανε τις πρώτες αστρονομικές παρατηρήσεις σε ραδιοφωνικά μήκη κύματος, ανοίγοντας έτσι ένα καινούργιο "παρά-

θυρο" στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα. Έτσι το 1931 στο New Jersey των Η.Π.Α. γεννήθηκε ο κλάδος της Ραδιοαστρονομίας και από τότε, για να μην υπάρξει σύγχυση με την κλασική επιστήμη της Αστρονομίας, αυτή ονομάστηκε Οπτική Αστρονομία. Η ανάπτυξη της Αστρονομίας στους δύο παραπάνω κλάδους δεν είναι τυχαία αλλά συμπίπτει με τις κύριες περιοχές συχνότητας του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος στις οποίες η ουράνια ακτινοβολία μπορεί να διεισδύσει ανεμπόδιστα φτάνοντας μέχρι την επιφάνεια της Γης. Ουράνια ακτινοβολία θα ονομάζουμε στο εξής την ακτινοβολία του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος της οποίας η προέλευση δεν είναι γήινη.

Το οπτικό παράθυρο εκτείνεται από μήκος κύματος $\lambda = 0.4 \mu\text{m}$ μέχρι $\lambda = 0.8 \mu\text{m}$ περίπου, ενώ το ραδιοφωνικό από $\lambda = 1 \text{ m}$ μέχρι $\lambda = 100 \text{ m}$. Ο λόγος του εύρους του οπτικού παράθυρου προς τη μέση τιμή των οπτικών μηκών κύματος είναι περίπου 1:1. Αυτό σημαίνει πως οι οπτικές παρατηρήσεις, είτε σε μικρά μήκη κύματος ($\lambda = 0.4 \mu\text{m}$) είτε σε μεγάλα ($\lambda = 0.8 \mu\text{m}$), είναι δυνατό να πραγματοποιηθούν με τη βοήθεια ενός μόνο οργάνου (του οπτικού τηλεσκοπίου). Αντίθετα ο αντίστοιχος λόγος για ραδιοφωνικές παρατηρήσεις είναι περίπου $10^5:1$ και επομένως οι απαιτήσεις παρατήρησης στις διάφορες περιοχές του ραδιοφωνικού παράθυρου διαφέρουν ριζικά μεταξύ τους. Για το λόγο αυτό τα ραδιοτηλεσκόπια που χρησιμοποιούνται σε χαμηλές συχνότητες, πολλές φορές δεν παρουσιάζουν καμία ομοιότητα με τα ραδιοτηλεσκόπια υψηλών συχνοτήτων.

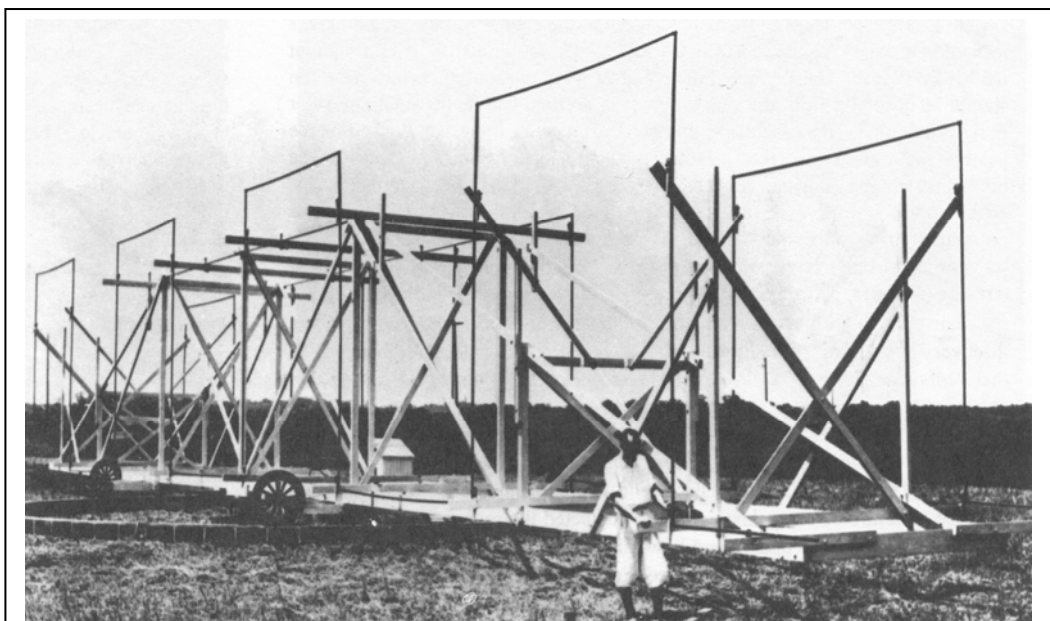
Υπεύθυνη για την απορρόφηση της ακτινοβολίας στα μικρά μήκη κύματος ($\lambda < 1 \text{ m}$) είναι η ατμόσφαιρα της Γης, ενώ για τα μεγαλύτερα μήκη κύματος ($\lambda > 100 \text{ m}$) είναι η ιονόσφαιρα (η απορρόφηση εδώ εξαρτάται από την αριθμητική πυκνότητα των ηλεκτρονίων η οποία όπως γνωρίζουμε μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια της ημέρας).

Με την εξέλιξη της τεχνολογίας και ιδιαίτερα με τις επιτυχημένες τοποθετήσεις δορυφόρων έξω από την ατμόσφαιρα της Γης αναπτύχθηκαν και άλλοι κλάδοι της Αστρονομίας όπως η Αστρονομία του Υπέρυθρου, η Αστρονομία του Υπεριώδους, η Αστρονομία των Ακτίνων-X και η Αστρονομία των Ακτίνων-γ ανάλογα με την περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος στο οποίο πραγματοποιούνται οι παρατηρήσεις (Σχ. 1.1).

Η ενέργεια των ακτίνων-γ ($E = h \nu$) μπορεί να φθάσει τα μερικά GeV ($1 \text{ Giga} = 10^9$) ενώ αυτή των ραδιοφωνικών κυμάτων χαμηλής συχνότητας δεν ξεπερνά τα μερικά peV ($1 \text{ pico} = 10^{-12}$). Δηλαδή η ενέργεια των φωτονίων του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος από τα μικρότερα μήκη κύματος μέχρι τα μεγαλύτερα διαφέρει τουλάχιστον κατά 20 τάξεις μεγέθους (10^{20}). Γίνεται επομένως φανερό πως οι μέθοδοι που πρέπει να χρησιμοποιήσουμε και οι δέκτες που πρέπει να κατασκευάσουμε για τις παρατηρήσεις των ουράνιων σωμάτων στους διάφορους

κλάδους της Αστρονομίας θα διαφέρουν ριζικά μεταξύ τους. Παρόλα αυτά οι πληροφορίες που μας δίνουν τα φωτόνια που συλλέγονται με τις διάφορες αυτές μεθόδους αποτελούν ένα ομοιογενές σύνολο και όλες, μία προς μία, είναι εντελώς απαραίτητες για να σχηματίσουμε μια πλήρη εικόνα της φυσικής κατάστασης του ουράνιου αντικειμένου που παρατηρούμε.

1.1 Η γένεση της Ραδιοαστρονομίας



Σχήμα 1.2. Ο Carl Jansky και η ιστορική κεραία του με την οποία έγιναν οι πρώτες ραδιοαστρονομικές παρατηρήσεις

Όπως αναφέραμε παραπάνω, η επιστήμη της Ραδιοαστρονομίας ξεκίνησε με τα πειράματα του Jansky το 1931 στο N. Jersey των Η.Π.Α. Προσπαθώντας ο Jansky να εντοπίσει την προέλευση των στατικών παρεμβολών που εμποδίζαν τις διηπειρωτικές κυρίως ραδιοφωνικές επικοινωνίες ανακάλυψε ότι μερικές χαρακτηριστικές παρεμβολές προέρχονταν από μια σχετικά περιορισμένη περιοχή του ουρανού που συνέπιπτε με τη γενική διεύθυνση του κέντρου του Γαλαξία. Η κεραία που χρησιμοποιήθηκε από τον Jansky (Σχ. 1.2) λειτουργούσε στα 20.5 MHz ($\lambda = 14.6$ m) και είχε αρκετά καλή κατευθυντική ικανότητα (βλ. Κεφ. 2). Ο "κοσμικός θόρυβος" που είχε ανακαλύψει ακολουθούσε την κίνηση του ουρανού, καθυστερώντας κατά 4 περίπου λεπτά της ώρας από ημέρα σε ημέρα. Αυτή η παρατήρηση και μόνη ήταν αρκετή για να αποκλειστεί η περίπτωση παραγωγής του θορύβου από πομπούς που βρίσκονταν πάνω στην επιφάνεια της Γης ή και στο Ηλιακό σύστημα. Σήμερα γνωρίζουμε πως ο Jansky είχε ανακαλύ-

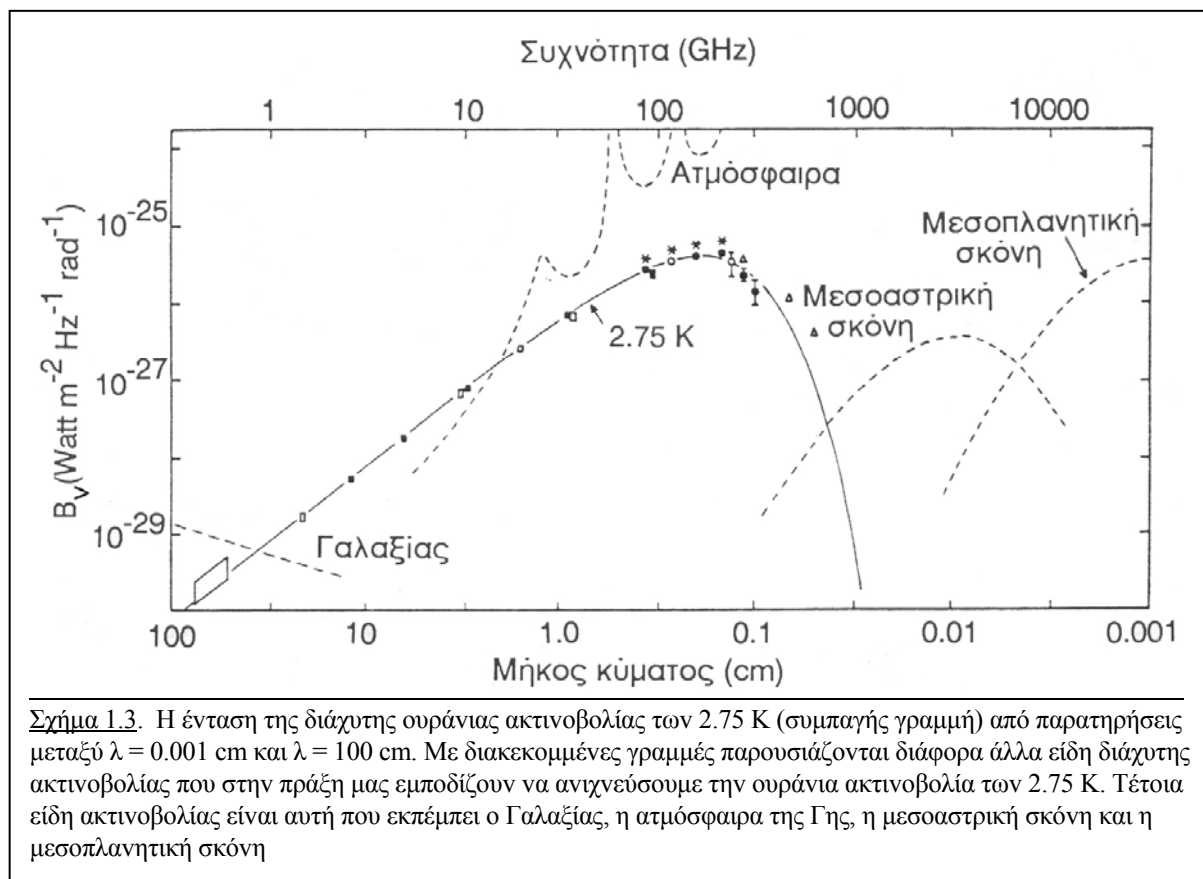
ψει τη διάχυτη ακτινοβολία σύγχροτρον που οφείλεται στην κίνηση σχετικιστικών ηλεκτρονίων στο μαγνητικό πεδίο του Γαλαξία. Τα έτη 1931-32 συνέπιπταν με ελάχιστο στον ενδεκαετή κύκλο δραστηριότητας του Ήλιου. Αν ο Jansky συνέχιζε τα πειράματά του για μερικά χρόνια ακόμα, σίγουρα θα εντόπιζε ραδιοφωνική ακτινοβολία προερχόμενη και από τον Ήλιο.

Τη σκυτάλη στην εξέλιξη της Ραδιοαστρονομίας πήρε αργότερα ένας ραδιοηλεκτρολόγος-μηχανικός (και ερασιτέχνης αστρονόμος) ο Grote Reber. Το 1937 ο Reber κατασκεύασε μια παραβολική κεραία διαμέτρου 9.5 m και το 1940 δημοσίευσε τα πρώτα αποτελέσματα από τις μετρήσεις του στα 160 MHz ($\lambda = 1.87$ m), όπου φαινόταν καθαρά ότι είχε εντοπίσει ραδιοφωνική ακτινοβολία προερχόμενη από το επίπεδο του Γαλαξία.

Παράλληλα κατά τη διάρκεια του Β' Παγκόσμιου Πόλεμου, Βρετανοί επιστήμονες υπό τον J.S. Hey, στην προσπάθειά τους να βελτιώσουν το σύστημα ραντάρ που είχαν εγκαταστήσει στα στενά της Μάγχης για τον εντοπισμό Γερμανικών πλοίων που προσπαθούσαν να τα διασχίσουν, αλλά και για την έγκαιρη ανίχνευση των Γερμανικών αεροπλάνων και των πυραύλων V1 και V2, αντιμετώπιζαν ισχυρότατα παράσιτα, που αρχικά τα απέδωσαν σε εχθρικές παρεμβολές. Αργότερα όμως αντιλήφθηκαν ότι επρόκειτο για "στατικό θόρυβο" προερχόμενο από τον Ήλιο. Στην ομάδα του Hey ανήκαν και οι (μετέπειτα Sir) Bernard Lovell και Martin Ryle, οι οποίοι διαδραμάτισαν σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη της Ραδιοαστρονομίας στην Ευρώπη κατά την τριακονταετία 1950 - 1980.

Σε οπτικά μήκη κύματος ένα σημαντικό ποσοστό της ουράνιας ακτινοβολίας σχετίζεται με τη γραμμική εκπομπή ορισμένων χημικών στοιχείων (όπως π.χ. η γραμμή H α της σειράς Balmer στα 6563 Å). Αντίθετα το ποσοστό της γραμμικής εκπομπής που αναμένουμε να παρατηρήσουμε σε ραδιοφωνικά μήκη κύματος είναι εξαιρετικά μικρό. Γι' αυτό η ανακάλυψη το 1951 γραμμικής ραδιοφωνικής εκπομπής από το υδρογόνο του μεσοαστρικού χώρου στα 1420 MHz ($\lambda = 21.1$ cm), από τους Ewen και Purcell (του Πανεπιστημίου του Harvard), θεωρείται ιδιαίτερα σημαντική, δεδομένου ότι, λόγω της μικρής απορρόφησης που υφίστανται τα ραδιοφωνικά κύματα στο μεσοαστρικό χώρο, μας δίνεται πλέον η δυνατότητα να μελετούμε, με άμεσες παρατηρήσεις, τις ιδιότητες του μεσοαστρικού χώρου (αποστάσεις, χημική σύνθεση, θερμοκρασία, πυκνότητα, κτλ.). Εδώ βέβαια θα πρέπει να αναφέρουμε ότι η γραμμική αυτή εκπομπή, η οποία οφείλεται στην υπέρλεπτη υφή του ουδέτερου υδρογόνου είχε ήδη προβλεφθεί από το 1944 από ένα μεταπτυχιακό φοιτητή, τον Hank van de Hulst, υπό την καθοδήγηση του καθηγητή Jan H. Oort στο Leiden της Ολλανδίας.

Το 1951 ο (μετέπειτα Sir) Francis Graham Smith προσδιόρισε με μεγάλη ακρίβεια (χρησιμοποιώντας τη μέθοδο της συμβολομετρίας -βλ. §2.4) τη θέση μιας πολύ ισχυρής ραδιοπηγής στον αστερισμό του Κύκνου, τη Cygnus A. Λίγο αργότερα ο W. Baade χρησιμοποιώντας τις συντεταγμένες που του είχε δώσει ο Smith την εντόπισε και σε οπτικά μήκη κύματος με το τηλεσκόπιο των 5 m του Αστεροσκοπείου του Palomar. Επρόκειτο για ένα ραδιογαλαξία, δηλαδή ένα γαλαξία που εκπέμπει τόσο σε οπτικά όσο και σε ραδιοφωνικά μήκη



κύματος. Ο ραδιογαλαξίας Cygnus A είναι η τρίτη ισχυρότερη ραδιοπηγή του ουρανού στη συχνότητα των 178 MHz. Η συνολική του ισχύς σε ραδιοφωνικά μήκη κύματος είναι 10^{38} Watts. Για σύγκριση, ας σημειωθεί πως ο γνωστός "οπτικός" γαλαξίας M31 στον αστερισμό της Ανδρομέδας επιδεικνύει αρκετά μικρότερη ισχύ σε ραδιοφωνικά μήκη κύματος, 10^{32} Watts, και γι' αυτό δεν κατατάσσεται στην κατηγορία των ραδιογαλαξιών.

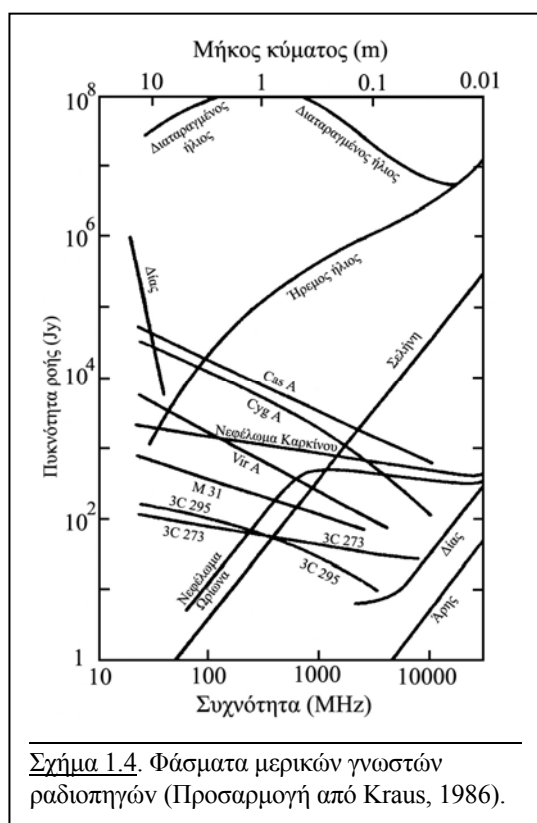
Το 1957 κοντά στο Manchester της Αγγλίας υπό την εποπτεία του Sir Bernard Lovell τελείωσε η κατασκευή ενός τεράστιου παραβολικού ραδιοτηλεσκοπίου διαμέτρου 76 m, ενώ συγχρόνως η επιστήμη της Ραδιοαστρονομίας αναπτύσσεται αλματωδώς σε πολλές χώρες του κόσμου όπως η Αυστραλία, οι Η.Π.Α., η Σοβιετική Ένωση, η Γαλλία, η Ολλανδία, η Ινδία, η Γερμανία και ο Καναδάς.

Το 1963 οπτικοί αστρονόμοι, στην προσπάθειά τους να εντοπίσουν μερικές ισχυρές

ραδιοπηγές σε οπτικά μήκη κύματος, ανακάλυψαν τους κουέιζαρς (quasars- quasi stars), ενώ το 1967 στο Cambridge της Μ. Βρετανίας η Jocelyn Bell, μεταπτυχιακή φοιτήτρια υπό την καθοδήγηση του καθηγητού Antony Hewish (βραβείο Nobel 1974), ανακάλυψε μια νέα κατηγορία αστέρων, τους πάλσαρς (pulsars- pulsating stars) από την περιοδική τους ακτινοβολία σε ραδιοφωνικά μήκη κύματος.

Εν τω μεταξύ το 1965 οι Arno Penzias και Robert Wilson (βραβείο Nobel 1978) χρησιμοποιώντας έναν τεράστιο κυματαγωγό ανακάλυψαν ότι το Σύμπαν (όπως συνάγεται από παρατηρήσεις του χώρου γύρω μας) κυριαρχείται από μια ισοτροπική ουράνια ακτινοβολία της οποίας το φάσμα συμπίπτει με αυτό που έχει ένα μέλαν σώμα θερμοκρασίας 2.75 K. Η ακτινοβολία ενός τέτοιου σώματος παρουσιάζει μέγιστο σε ραδιοφωνικά μήκη κύματος, γύρω στο 1 mm (Σχήμα 1.3). Σήμερα πιστεύουμε ότι πρόκειται για την ακτινοβολία της (αρχικής) Μεγάλης Έκρηξης (Big Bang) που δημιούργησε το Σύμπαν, η θερμοκρασία της οποίας ελαττώνεται συνεχώς, λόγω αδιαβατικής διαστολής, και σήμερα έχει φτάσει τα 2.75 K.

Η εικοσαετία 1960-1980 χαρακτηρίζεται ιδιαίτερα από αλληπάλληλες ανακαλύψεις μορίων και μοριακών ενώσεων στο μεσοαστρικό χώρο από τη γραμμική τους ακτινοβολία (βλ. Κεφ. 9). Το 1963 ανακαλύφθηκε πρώτα η ρίζα του υδροξυλίου ($\text{OH}^\cdot$) στα 1667 MHz και μετά, το 1968, η αμμωνία (NH_3) στα 22.7 GHz. Σήμερα σε μεσοαστρικά μοριακά νέφη έχουν εντο-



πισθεί σε διάφορες συχνότητες (από 700 MHz μέχρι 700 GHz) πάνω από 60 μοριακές ενώσεις, πολλές από τις οποίες είναι οργανικές. Η γραμμική ακτινοβολία μερικών ενώσεων (π.χ. του OH^- και του H_2O) σε ορισμένα μοριακά νέφη είναι τόσο ισχυρή ώστε μπορεί να εξηγηθεί μόνον αν υπάρχει συντονισμένη ενίσχυση (φαινόμενο maser).

Ήδη οι επιστημονικές δημοσιεύσεις που αναφέρονται σε ραδιοαστρονομικές παρατηρήσεις καλύπτουν ένα μεγάλο ποσοστό του συνόλου των αστρονομικών παρατηρήσεων. Η ανάπτυξη της Ραδιοαστρονομίας οφείλεται στη ραγδαία εξέλιξη της τεχνολογίας, χάριν της οποίας έχει καταστεί δυνατή η ανίχνευση πολύ ασθενών σημάτων και έχουν επιτευχθεί

εξαιρετικά υψηλές διακριτικές ικανότητες στα ραδιοτηλεσκόπια. Πιστεύουμε ότι τα περιθώρια εξέλιξης της είναι ακόμα πολύ πλατιά. Η υψηλή διακριτική ικανότητα των ραδιοτηλεσκοπίων σε συνδυασμό με τη μικρή απορρόφηση που υφίστανται τα ραδιοφωνικά κύματα, μας επιτρέπει λεπτομερείς μελέτες τόσο των γαλαξιών (πυρήνας, σπειροειδής μορφή) όσο και της δομής της χρωμόσφαιρας των αστερών. Η ακτινοβολία των 2.75 K αποτελεί το αρχαιότερο παρατηρήσιμο δείγμα του Σύμπαντος. Η ορθότητα και ισχύς της Γενικής Θεωρίας Σχετικότητας διερευνάται εξονυχιστικά με τη βοήθεια ραδιοαστρονομικών πειραμάτων. Τέλος δεν πρέπει να παραλείψουμε να αναφέρουμε τη σημαντική πρόοδο που έχει επιτευχθεί τα τελευταία χρόνια στην έρευνα των φυσικών μηχανισμών που διέπουν τη μεσοαστρική ύλη του Γαλαξία (και άλλων κοντινών γαλαξιών) με τη βοήθεια της γραμμικής της εκπομπής ή απορρόφησης στην περιοχή των μικροκυμάτων. Στο Σχήμα 1.4 παρουσιάζονται τα φάσματα ορισμένων τυπικών ουράνιων ραδιοπηγών. Αν εξαιρέσουμε τις πολύ χαμηλές συχνότητες, ο Ήλιος αποτελεί την ισχυρότερη πηγή ραδιοκυμάτων στον ουρανό. Παρόλ' αυτά ούτε ο Ήλιος, αλλά ούτε βέβαια και η Σελήνη, είναι αρκετά ισχυρές πηγές ραδιοκυμάτων ώστε, με την επίδρασή τους στην ατμόσφαιρα της Γης, να εμποδίζουν τις συνηθισμένες ραδιοαστρονομικές παρατηρήσεις, πράγμα που, αντίθετα, συμβαίνει στις οπτικές παρατηρήσεις. Αξίζει τέλος να αναφερθεί ότι σύμφωνα με απλούς υπολογισμούς η ολική ενέργεια που έχουν συλλέξει μέχρι σήμερα όλα τα ραδιοτηλεσκόπια του κόσμου δεν ξεπερνά την ενέργεια που εναποθέτει στην επιφάνεια της Γης μια χιονονιφάδα ή την ενέργεια που θα καταναλώσετε γυρίζοντας φύλλο.

Βιβλιογραφία

- Coutrez R. (1956): "Radioastronomie" Observatoire Royal de Belgique, Uccle.
- Kraus J.D. (1986): "Radio Astronomy" Cygnus-Quasar Books, Ohio.
- Kellermann K., Sheets B. eds. (1983): "Serendipitous Discoveries in Radio Astronomy" Proc. of NRAO Workshop No. 7, Green Bank, W.Va., USA.
- Κωτσάκη Δ. (1963): "Ραδιοαστρονομία", Ελληνική Μαθηματική Εταιρεία, Αθήνα.
- Pawsey J.L., Bracewell R.N. (1955): "Radio Astronomy" Oxford Clarendon Press, Oxford.
- Shklovsky I.S. (1960): "Cosmic Radio Waves" Harvard University Press, Cambridge, Ma.
- Smith F.G., Sir (1960): "Radio Astronomy" Penguin Books, Inc., Baltimore.