

3. ΕΚΠΟΜΠΗ ΡΑΔΙΟΚΥΜΑΤΩΝ ΑΠΟ ΤΟ ΗΛΙΑΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ

3.1 Εισαγωγή

Όπως αναφέραμε στο Κεφάλαιο 1, το 1942 ο J.S. Hey κατά τη διάρκεια του 2^{ου} παγκόσμιου πόλεμου ανακάλυψε ισχυρή ραδιοφωνική ακτινοβολία που συνέπιπτε σε γενικές γραμμές με τη θέση του Ήλιου στην ουράνια σφαίρα. Η ακτινοβολία αυτή σωστά αποδόθηκε τότε στην εμφάνιση μιας μεγάλης ομάδας ηλιακών κηλίδων η οποία συνοδεύονταν από φαινόμενα έντονης δραστηριότητας (ισχυρές εκλάμψεις και κοσμική σωματιδιακή ακτινοβολία).

Μερικά χρόνια αργότερα, με την κατασκευή πιο ευαίσθητων ραδιοενισχυτών διεξήχθησαν οι πρώτες παρατηρήσεις της Σελήνης και των πλανητών. Τα ουράνια αυτά σώματα είναι ετερόφωτα και επομένως η θερμοκρασία της επιφάνειάς τους είναι πολύ μικρότερη (μεταξύ 50 K και 500 K περίπου). Το μέγιστο της ακτινοβολίας τους, σύμφωνα με το νόμο του Wien, εμπίπτει στην περιοχή των υπέρυθρων κυμάτων ενώ ένα σημαντικό ποσοστό εκπέμπεται και σε ραδιοκύματα. Το φάσμα τους -με εξαίρεση τον πλανήτη Δία- παρουσιάζει πολλές ομοιότητες με το φάσμα ενός μελανού σώματος (Σχήμα 1.4).

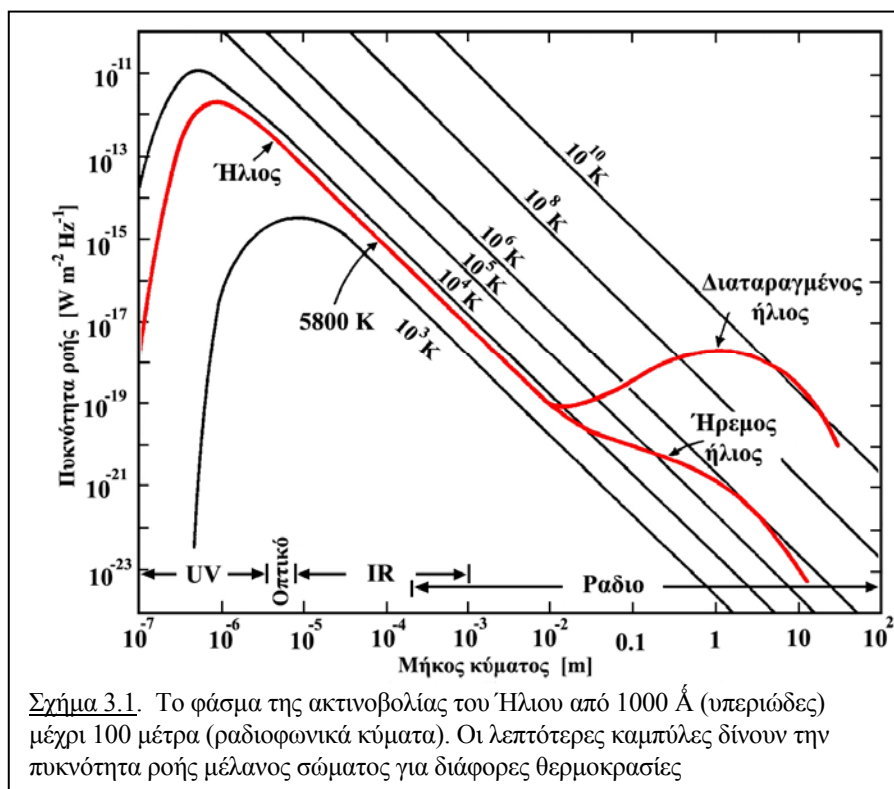
3.2. Ο Ήλιος σε ραδιοφωνικά μήκη κύματος

Οι κυριότερες φυσικές ιδιότητες του Ήλιου καθώς και το πιο διαδεδομένο πρότυπο με το οποίο ερμηνεύονται, περιγράφονται συνοπτικά από τους Βάρβογλη και Σειραδάκη, 1991. Στην παράγραφο αυτή θα ασχοληθούμε αποκλειστικά με τη ραδιοφωνική εκπομπή του Ήλιου, θεωρώντας ότι ο αναγνώστης γνωρίζει τη βασική δομή και τις ιδιότητες του.

Την εποχή που ο Ήλιος βρίσκεται στο μέγιστο του ενδεκαετούς κύκλου δραστηριότητάς του, και ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια εκλάμψεων, η ραδιοφωνική ενέργεια που εκπέμπει

είναι δυνατόν να αυξηθεί κατά 100000 φορές ενώ η αντίστοιχη αύξηση σε οπτικά μήκη κύματος δεν υπερβαίνει το 1%. Για το λόγο αυτό οι ηλιακές εκλάμψεις ανιχνεύονται πολύ ευκολότερα σε ραδιοφωνικά μήκη κύματος από ό,τι σε οπτικά, ακόμα και με συννεφιά!

Σε οπτικά μήκη κύματος το φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας συμπίπτει με το φάσμα ενός μελανού σώματος θερμοκρασίας περίπου 5800 K. Η οπτική ακτινοβολία του Ήλιου δηλαδή είναι θερμικής φύσης. Αντίθετα σε ραδιοφωνικά μήκη κύματος η πυκνότητα ροής της ηλιακής ακτινοβολίας είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτήν που θα αναμενόταν από ένα μέλαν



Σχήμα 3.1. Το φάσμα της ακτινοβολίας του Ήλιου από 1000 Å (υπεριώδες) μέχρι 100 μέτρα (ραδιοφωνικά κύματα). Οι λεπτότερες καμπύλες δίνουν την πυκνότητα ροής μέλανος σώματος για διάφορες θερμοκρασίες

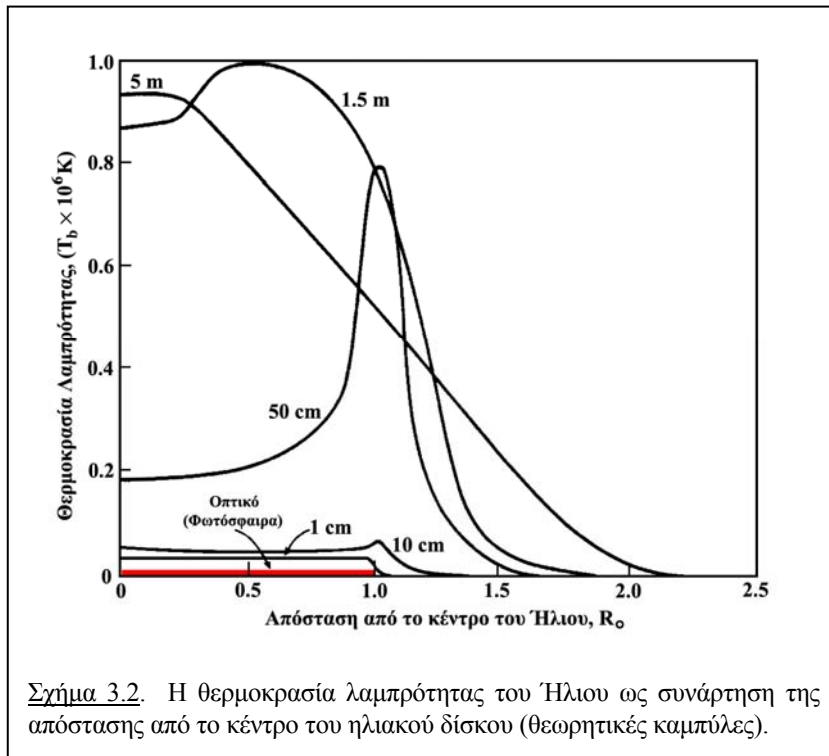
σώμα θερμοκρασίας 5800 K. Για μήκη κύματος μικρότερα από 1 cm το φάσμα της, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1, υπακούει στο νόμο του Planck. Για μεγαλύτερα όμως μήκη κύματος η ηλιακή ακτινοβολία είναι σαφώς μη θερμικής φύσης και μάλιστα διακρίνουμε δύο τύπους

ακτινοβολίας ανάλογα με την κατάσταση δραστηριότητας που βρίσκεται ο Ήλιος: (α) σε αυτήν που οφείλεται στον **ήρεμο Ήλιο** (quiet Sun) και σε αυτήν που οφείλεται στο **διαταραγμένο Ήλιο** (disturbed Sun). Αν η ραδιοφωνική ακτινοβολία του διαταραγμένου Ήλιου ήταν θερμικής φύσης, τότε η περιοχή από την οποία εκπέμπεται θα έπρεπε να είχε θερμοκρασία τουλάχιστον μερικά εκατομμύρια (ή και δισεκατομμύρια) K.

3.2.1. Ο ήρεμος Ήλιος

Όπως γνωρίζουμε σε οπτικά μήκη κύματος, ο Ήλιος εμφανίζεται ως ένας φωτεινός δίσκος διαμέτρου 32' περίπου με ισότροπη κατανομή ακτινοβολίας μέχρι το χείλος όπου παρατηρείται κάποια *αμαύρωση του χείλους* (βλ. Βάρβογλη, Σειραδάκη, 1991). Ραδιοφωνικές παρατηρήσεις σε εκατοστομετρικά μήκη κύματος ($\sim 1 \text{ GHz}$) δείχνουν παρόμοια συμπεριφορά

ενώ αντίθετα σε μεγαλύτερα μήκη κύματος (10 cm μέχρι περίπου 1 m) η διάμετρός του αυξάνει. Συγχρόνως παρατηρείται κάποια λάμπρυνση του χείλους (Σχήμα 3.2). Σε ακόμα



Σχήμα 3.2. Η θερμοκρασία λαμπρότητας του Ήλιου ως συνάρτηση της απόστασης από το κέντρο του ηλιακού δίσκου (θεωρητικές καμπύλες).

μεγαλύτερα μήκη κύματος (μερικά μέτρα μέχρι μερικές δεκάδες μέτρα) η διάμετρος του δίσκου γίνεται ακόμα μεγαλύτερη με πολύ έντονη αμαύρωση του χείλους. Τα παρατηρησιακά αυτά δεδομένα μπορούν εύκολα να εξηγηθούν αν εξετάσουμε τη συμπεριφορά του δείκτη διάθλασης της ακτινοβολίας, n , ως συνάρτηση του μήκους κύματος. Από την

Οπτική γνωρίζουμε ότι για να έχουμε διάδοση ακτινοβολίας ο δείκτης διάθλασης πρέπει να είναι θετικός ($n > 0$). Για τιμές του δείκτη μεταξύ 1 και 0, η γωνία διάθλασης μεταβάλλεται μεταξύ 0° και 90° . Ο δείκτης διάθλασης δίνεται από τη σχέση

$$n = \sqrt{1 - \frac{v_p^2}{v^2}} \quad (3.1)$$

όπου n είναι ο δείκτης διάθλασης

v_p είναι η συχνότητα πλάσματος και

v είναι η συχνότητα παρατήρησης.

Η συχνότητα πλάσματος εξαρτάται από την αριθμητική πυκνότητα των ηλεκτρονίων σύμφωνα με τη σχέση

$$v_p = \frac{e}{2\pi} \sqrt{\frac{N_e}{\epsilon_o m_e}} \quad (3.2)$$

όπου e είναι το φορτίο του ηλεκτρονίου [$= 1.6 \times 10^{-19}$ coulomb]

m_e είναι η μάζα του ηλεκτρονίου [$= 9.1 \times 10^{-31}$ kg]

ϵ_o είναι η ηλεκτρική διαπερατότητα του κενού [$= 8.85 \times 10^{-2}$ farad m⁻¹]

N_e είναι η αριθμητική πυκνότητα των ηλεκτρονίων, [ηλεκτρόνια m⁻³]

Η αριθμητική πυκνότητα των ηλεκτρονίων ελαττώνεται με την απόσταση R από το κέντρο του Ήλιου σύμφωνα με τη (θεωρητική) σχέση

$$N_e = (1.55 R^{-6} + 2.99 R^{-16}) \times 10^{14} \quad (3.3)$$

όπου R είναι η απόσταση από το κέντρο του Ήλιου σε ηλιακές ακτίνες, [$R_\odot$] και

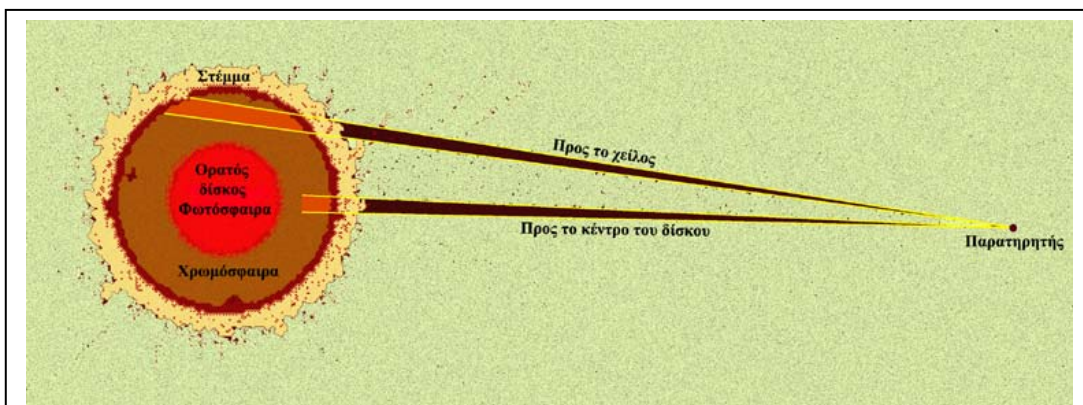
N_e είναι η αριθμητική πυκνότητα των ηλεκτρονίων, [ηλεκτρόνια m^{-3}]

Η σχέση (3.3) ισχύει για $R > 1$.

Από τις σχέσεις (3.1), (3.2) και (3.3) καθίσταται σαφές ότι για κάθε συχνότητα παρατήρησης ν , υπάρχει μια ελάχιστη απόσταση R_m από το κέντρο του Ήλιου, πέραν από την οποία δεν είναι δυνατή η διάδοση ακτινοβολίας. Για αποστάσεις μικρότερες από R_m ο δείκτης διάθλασης παίρνει φανταστικές τιμές και επομένως δεν είναι δυνατή η διάδοση ακτινοβολίας. Αν αυξηθεί η συχνότητα παρατήρησης ν , τότε ελαττώνεται η ελάχιστη αυτή απόσταση R_m και επομένως “βλέπουμε” προοδευτικά βαθύτερα στρώματα της ηλιακής ατμόσφαιρας.

Τα φαινόμενα της αμαύρωσης και λάμπρυνσης του χείλους του δίσκου του Ήλιου που παρατηρούνται σε ορισμένα μήκη κύματος οφείλονται στο γεγονός ότι η ένταση της ακτινοβολίας εξαρτάται από το οπτικό βάθος που, όπως είναι γνωστό, εξαρτάται τόσο από την πυκνότητα όσο και από το συντελεστή απορρόφησης που είναι συνάρτηση της συχνότητας παρατήρησης (βλ. Βάρβογλη, Σειραδάκη, 1991).

Σε υψηλές ραδιοφωνικές συχνότητες (και σε οπτικά μήκη κύματος) “βλέπουμε” βαθιά μέσα στην ατμόσφαιρα του Ήλιου όπου η αριθμητική πυκνότητα των ηλεκτρονίων είναι πολύ



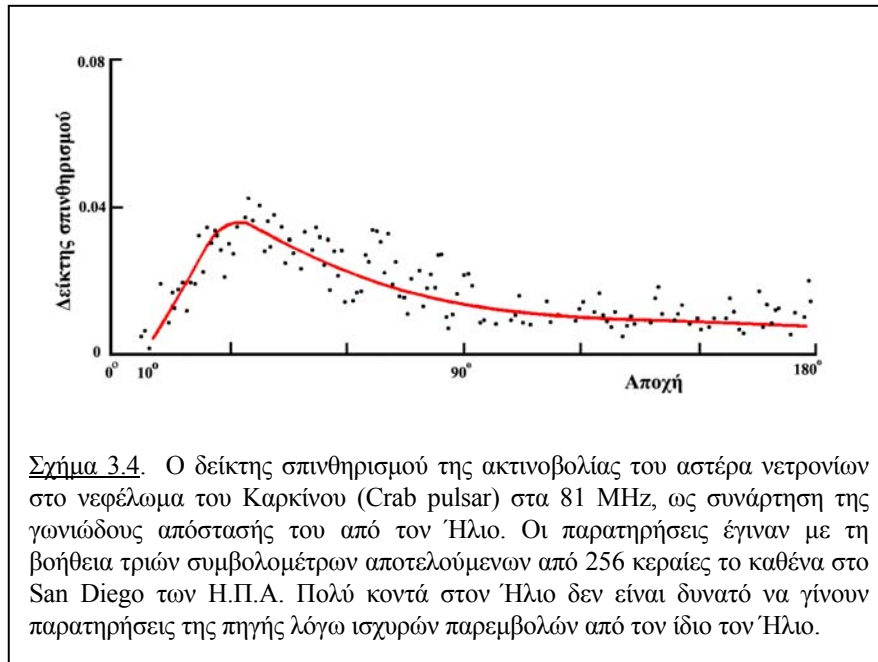
Σχήμα 3.3. Η λάμπρυνση του χείλους του ηλιακού δίσκου σε ραδιοφωνικές συχνότητες οφείλεται στη μικρή τιμή που έχει το οπτικό βάθος της ατμόσφαιρας του Ήλιου σ' αυτές τις συχνότητες.

μεγάλη και το οπτικό βάθος $\tau_\nu \gg 1$ με αποτέλεσμα να παρατηρούμε την επιφάνεια ενός ορισμένου στρώματος και καθόλου δια μέσου αυτού. Το στρώμα αυτό βρίσκεται στη κατώτερη

χρωμόσφαιρα (lower chromosphere), θερμοκρασίας 10000 K περίπου για τα ραδιοφωνικά κύματα και στη φωτόσφαιρα για τα οπτικά κύματα. Η ένταση της ακτινοβολίας εξαρτάται από τον αριθμό και τη θερμοκρασία των σωματιδίων που βρίσκονται στην ευθεία οράσεως. Όταν το οπτικό βάθος είναι μεγάλο ο αριθμός των σωματιδίων ουσιαστικά δεν μεταβάλλεται με τη γωνιώδη απόσταση από το κέντρο του δίσκου του Ήλιου. Επειδή όμως στο κέντρο του δίσκου διεισδύουμε ελαφρά βαθύτερα, σε στρώματα με μεγαλύτερη θερμοκρασία, η ένταση της ακτινοβολίας είναι μεγαλύτερη σε σχέση με το χείλος το οποίο εμφανίζεται ελαφρά σκοτεινότερο (αμαύρωση του χείλους).

Σε χαμηλότερες συχνότητες το οπτικό βάθος γίνεται μικρότερο της μονάδας ($\tau_v < 1$) και επομένως τα στρώματα που εκπέμπουν καθίστανται διαφανή για τον παρατηρητή ο οποίος τώρα παρατηρώντας το χείλος του ηλιακού δίσκου “βλέπει” περισσότερα ακτινοβολούντα σωματίδια απ’ ότι προς στο κέντρο του δίσκου (Σχήμα 3.3). Το χείλος επομένως εμφανίζεται λαμπρότερο (λάμπρυνση του χείλους). Το στρώμα της ατμόσφαιρας του Ήλιου που παρατηρούμε στις συχνότητες αυτές βρίσκεται στην **ανώτερη χρωμόσφαιρα** (upper chromosphere) και στο στέμμα. Η θερμοκρασία του κυμαίνεται μεταξύ 20000 και 100000 K.

Σε ακόμα χαμηλότερες συχνότητες η ελάχιστη απόσταση R_m , πέραν της οποίας δεν

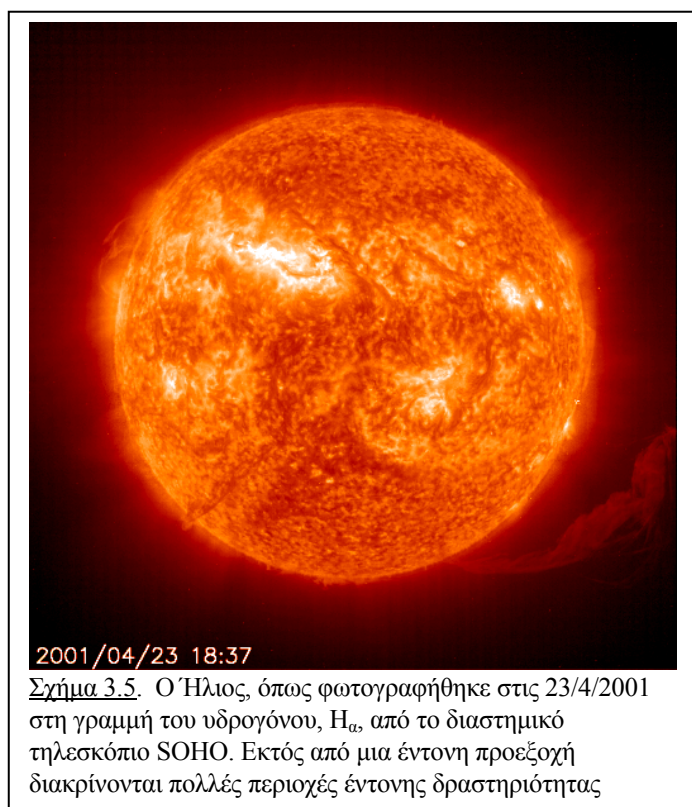


είναι δυνατή η διάδοση ακτινοβολίας, γίνεται εξαιρετικά μεγάλη και εμπίπτει σε περιοχές όπου η αριθμητική πυκνότητα των σωματιδίων είναι τόσο μικρή ώστε δεν υπάρχει πλέον αρκετή ύλη για να ακτινοβολήσει. Παρατηρείται δηλαδή πάλι το φαινόμενο της αμαύρωσης

του χείλους. Η περιοχή εκπομπής εντοπίζεται στο στέμμα με θερμοκρασία περίπου 1000000 K.

Η ατμόσφαιρα του Ήλιου εκτείνεται πολύ πέραν αυτής που βλέπουμε οπτικά κατά τη διάρκεια εκλείψεων, ή σε ραδιοφωνικά μήκη κύματος. Γνωρίζουμε ότι ο ηλιακός άνεμος εκτείνεται πέραν της τροχιάς του πλανήτη Πλούτωνα. Παρόλο που η ηλιακή αυτή

"ατμόσφαιρα" δεν μπορεί να παρατηρηθεί απευθείας από την εκπομπή ακτινοβολίας της, εντούτοις με τη βοήθεια μετρήσεων των μεταβολών που υφίσταται η ακτινοβολία άλλων, μακρινών ραδιοπηγών δια μέσου αυτής, μπορούμε να την ανιχνεύσουμε μέχρι απόσταση αρκετών αστρονομικών μονάδων. Ο **αστέρας νετρονίων στο νεφέλωμα του Καρκίνου** (Crab pulsar) βρίσκεται πολύ κοντά στην εκλειπτική και μια φορά το χρόνο, συγκεκριμένα στις 14 Ιουνίου, ο Ήλιος φαίνεται να περνά πολύ κοντά του (η γωνιώδης απόστασή του αστέρα νετρονίων από τον Ήλιο – δηλαδή η αποχή του – γίνεται ελάχιστη). Σε χαμηλές συχνότητες ($\nu < 150$ MHz), η ραδιοφωνική ακτινοβολία του αστέρα νετρονίων υφίσταται τόσο μεγάλη διασπορά κατά συχνότητα (βλ. Σπύρου, 1986, σ.165), ώστε εμφανίζεται πλέον ως μία σημειακή, συνεχής ραδιοπηγή (τότε, δηλαδή, δεν παρατηρούνται περιοδικοί παλμοί). Τέτοιες σημειακές ραδιοπηγές μας επιτρέπουν να μελετήσουμε τις ιδιότητες της ηλιακής ατμόσφαιρας,



Σχήμα 3.5. Ο Ήλιος, όπως φωτογραφήθηκε στις 23/4/2001 στη γραμμή του υδρογόνου, H_{α} , από το διαστημικό τηλεσκόπιο SOHO. Εκτός από μια έντονη προεξοχή διακρίνονται πολλές περιοχές έντονης δραστηριότητας

μελετώντας π.χ. τη διασπορά της ακτινοβολίας τους ως συνάρτηση της γωνιώδους απόστασής τους από τον Ήλιο. Στο Σχήμα 3.4 παρουσιάζεται η μεταβολή που υφίσταται ο **δείκτης σπινθηρισμού** (scintillation index) της ακτινοβολίας του παραπάνω αστέρα νετρονίων στα 81 MHz, ως συνάρτηση της αποχής του (δηλαδή της γωνιώδους απόστασής του) από τον Ήλιο. Ο δείκτης σπινθηρισμού είναι μια ποσότητα που εκφράζει την τιμή της μέσης απόκλισης μιας σειράς μετρήσεων από τη μέση τιμή τους. Καθώς ο Ήλιος πλησιάζει τη

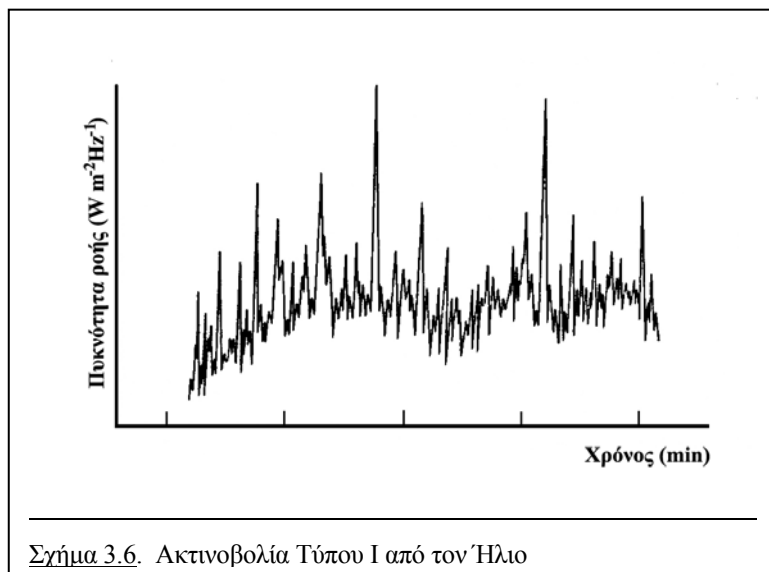
ραδιοπηγή, η τιμή του δείκτη σπινθηρισμού που παρατηρούμε αυξάνει, πράγμα που σημαίνει πως στην ευθεία οράσεως παρεμβάλλονται περισσότερα σωματίδια τα οποία προκαλούν πολλαπλή σκέδαση (scattering) της ακτινοβολίας και επομένως πιο έντονες μεταβολές της έντασης του σήματος που φτάνει μέχρι τη Γη. Συγχρόνως αυξάνεται και η φαινόμενη διάμετρος της ραδιοπηγής (αντίστοιχα φαινόμενα προκαλούν την οπτική στίλβη των αστερών, μόνο που υπεύθυνη για τη στίλβη είναι η ατμόσφαιρα της Γης μας και όχι η μεσοπλανητική ύλη). Στα 81 MHz η μέγιστη τιμή του δείκτη σπινθηρισμού παρατηρείται όταν η ραδιοπηγή απέχει από

τον Ήλιο περίπου 20 ηλιακές ακτίνες ($\sim 10^\circ$). Σε μικρότερη απόσταση η διάμετρος της ραδιοπηγής γίνεται τόσο μεγάλη, ώστε γρήγορα σταματά το φαινόμενο του σπινθηρισμού (για τον ίδιο λόγο για τον οποίο στους πλανήτες του ηλιακού μας συστήματος δεν παρατηρείται το φαινόμενο της στίλβης). Το γεγονός και μόνο ότι η καμπύλη που μας δίνουν τα δεδομένα του Σχήματος 3.4 είναι συνεχής και ομαλή, ακόμα και όταν η Γη βρίσκεται μεταξύ της ραδιοπηγής και του Ήλιου (η ραδιοπηγή, δηλαδή, έχει αποχή 180°), σημαίνει ότι η κατανομή των ηλεκτρονίων του μεσοπλανητικού χώρου φθίνει ομαλά και ότι εκτείνεται σε απόσταση μεγαλύτερη από μια αστρονομική μονάδα.

Σπάνια ο Ήλιος εμφανίζεται εντελώς ήρεμος σε ραδιοφωνικές συχνότητες. Σχεδόν πάντα στην επιφάνειά του υπάρχουν κέντρα δραστηριότητας τα οποία προκαλούν εντοπισμένες εξάρσεις της ακτινοβολίας του. Αν με τη βοήθεια ενός συμβολομέτρου υψηλής διακριτικής ικανότητας σαρώσουμε κατ' εξακολούθηση τον ηλιακό δίσκο σε συχνότητες μεταξύ 0.5 και 1 GHz, σχεδόν σίγουρα θα παρατηρήσουμε την ύπαρξη μερικών κέντρων έντονης δραστηριότητας. Συνήθως τα κέντρα αυτά, τα οποία ονομάζονται **ραδιοφωνικές λαμπρές περιοχές** (radio plages) εμφανίζονται σε περιοχές όπου υπάρχουν οπτικές κηλίδες ή πυρσοί (Σχήμα 3.5) και η διάρκειά τους κυμαίνεται μεταξύ μερικών ημερών και μερικών μηνών. Επειδή η θέση και η ένταση των ραδιοφωνικών λαμπρών περιοχών μεταβάλλεται βραδέως πάνω στον ηλιακό δίσκο, η ακτινοβολία τους λέγεται και **βραδέως μεταβαλλόμενη συνιστώσα** (slowly varying component), σε αντίθεση με την ακτινοβολία που παρατηρείται κατά τη διάρκεια έντονης ηλιακής δραστηριότητας, η ένταση της οποίας μεταβάλλεται πολύ ταχύτερα (από μερικά δευτερόλεπτα μέχρι μερικά λεπτά της ώρας). Παρατηρήσεις υψηλής διακριτικής ικανότητας έχουν αποδείξει ότι η ραδιοφωνική εκπομπή των λαμπρών αυτών περιοχών λαμβάνει χώρα σε απόσταση ~ 100000 km υπεράνω των φωτοσφαιρικών περιοχών δραστηριότητας με τις οποίες και συνδέονται φυσικά. Η ακτινοβολία που εκπέμπουν είναι πολλές φορές πολωμένη πράγμα που αποκαλύπτει την ύπαρξη ισχυρών μαγνητικών πεδίων στην περιοχή τους.

3.2.2. Ο διαταραγμένος Ήλιος

Όταν παρατηρούμε τη φωτόσφαιρα του Ήλιου με κοινά οπτικά τηλεσκόπια, σπάνια εμφανίζεται εντελώς ήρεμη, χωρίς να περιέχει κέντρα δραστηριότητας με κηλίδες ή πυρσούς. Κατά κανόνα, στα κέντρα αυτά, ιδιαίτερα όταν περιέχουν πολλές κηλίδες, παρατηρείται ιδιαιτέρως ισχυρή έκλυση ενέργειας η οποία εκδηλώνεται καταρχήν με την αύξηση της



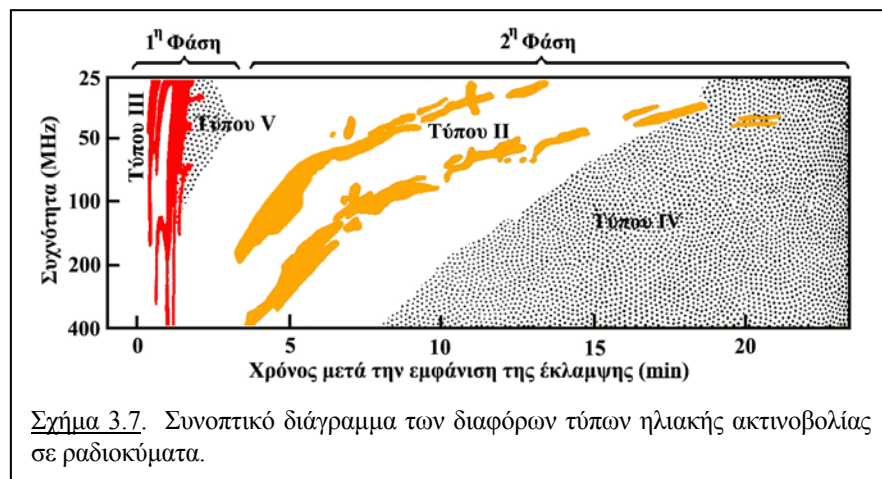
θερμοκρασίας και της λαμπρότητας της περιοχής, μπορούν όμως να προκαλέσουν και την εκρηκτική εμφάνιση μιας έκλαμψης. Ανεξάρτητα από την εμφάνιση ή όχι μιας έκλαμψης, στα κέντρα αυτά παράγεται συνήθως ισχυρή ραδιοφωνική ακτινοβολία που χαρακτηρίζεται από εκρηκτική αύξηση της ενέργειας που

εκπέμπεται. Η διάρκεια της εκρηκτικής φάσης κυμαίνεται από μερικά δευτερόλεπτα μέχρι μερικές ώρες. Σε χαμηλές συχνότητες ($\nu < 500$ MHz) τα φαινόμενα είναι πολύ έντονα. Καταρχήν παρατηρείται ισχυρή ακτινοβολία που διαρκεί μερικά δευτερόλεπτα ή λεπτά, ενώ αργότερα εμφανίζεται ένας λιγότερο ισχυρός "θόρυβος" που διαρκεί μερικές ώρες ή και ημέρες. Σε υψηλότερες συχνότητες ($\nu > 500$ MHz) η ακτινοβολία είναι λιγότερο έντονη με μεγαλύτερη όμως διάρκεια που κυμαίνεται από μερικά λεπτά μέχρι μερικές ώρες. Επειδή τα φαινόμενα που μόλις περιγράψαμε συνοδεύονται από ταχείες μεταβολές της έντασής τους, αναφέρονται συλλήβδην ως **ταχέως μεταβαλλόμενη συνιστώσα** (rapidly varying component) της ηλιακής ακτινοβολίας.

Ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της, η ταχέως μεταβαλλόμενη συνιστώσα εντάσσεται σε μια από τις παρακάτω πέντε κατηγορίες:

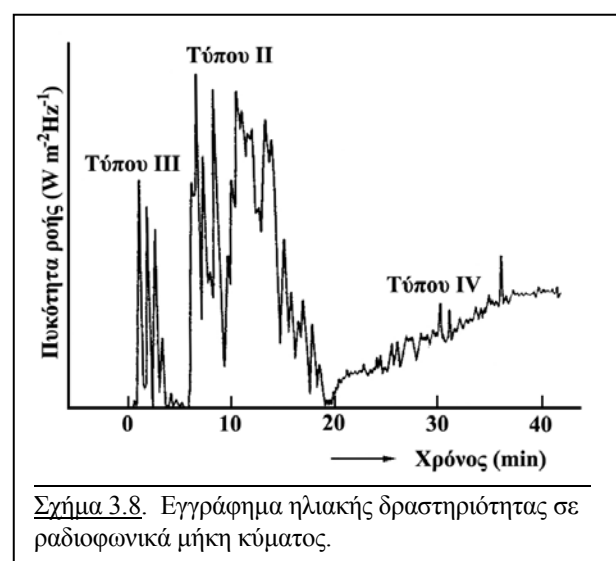
- **Τύπου I:** Αυξομειώσεις της έντασης της ακτινοβολίας υπό μορφή θορύβου.
- **Τύπου II:** Εκρηκτική αύξηση της έντασης της ακτινοβολίας με βραδεία ολίσθηση κατά συχνότητα (20 MHz/min).
- **Τύπου III:** Όπως και η τύπου II αλλά με ταχεία ολίσθηση (20 MHz/s).
- **Τύπου IV:** Εκπομπή ακτινοβολίας συνεχούς φάσματος μεγάλης διάρκειας. Η ακτινοβολία αυτή παρατηρείται μετά από ακτινοβολία Τύπου II.
- **Τύπου V:** Εκπομπή ακτινοβολίας συνεχούς φάσματος μεγάλης διάρκειας, κυρίως σε χαμηλές συχνότητες. Η ακτινοβολία αυτή παρατηρείται μετά από ακτινοβολία Τύπου III.

Ανάλογα με τον χρόνο εμφάνισής τους, οι διαφόρων τύπων ακτινοβολίες κατατάσσονται σε δύο φάσεις. Στην πρώτη φάση ανήκει η ακτινοβολία Τύπου III και V. Στη δεύτερη η ακτινοβολία Τύπου II και IV. Ακτινοβολία που δεν μπορεί να ενταχθεί στις δύο παραπάνω φάσεις, χαρακτηρίζεται συνήθως ως Τύπου I (Σχήμα 3.6). Η ακτινοβολία Τύπου I εμφανίζεται συνήθως σποραδικά, λίγα λεπτά μετά την έκρηξη μιας ηλιακής έκλαμψης, και διαρκεί συνήθως λίγα μόνο δευτερόλεπτα ή λεπτά. Πιστεύεται ότι οφείλεται σε ταχέως κινούμενα σωματίδια που παρήχθησαν κατά την έκλαμψη.

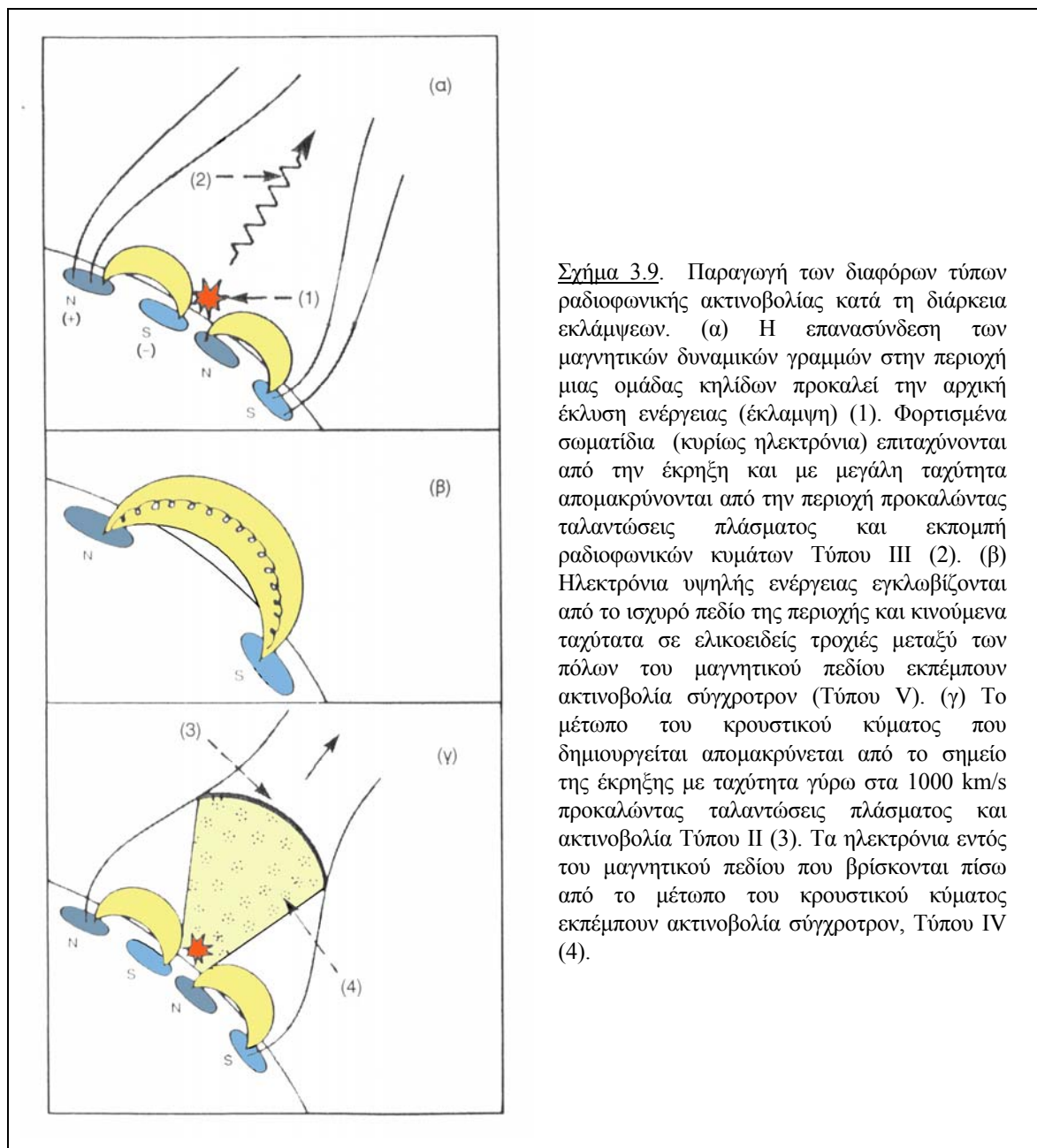


Το κύριο χαρακτηριστικό της πρώτης φάσης είναι η ξαφνική, έντονη και μικρής διάρκειας αύξηση της ακτινοβολίας, συνήθως μετά την εμφάνιση μιας έκλαμψης. Η αύξηση της

ακτινοβολίας παρατηρείται πρώτα σε σχετικά υψηλές συχνότητες (~500 MHz). Το εύρος της είναι πολύ στενό, 1 - 2 MHz, και εντός ολίγων δευτερολέπτων “ολισθαίνει” προς μικρότερες συχνότητες μέχρι 20 – 25 MHz. Η παρατήρηση της ολίσθησης επιτυγχάνεται με ειδικούς ενισχυτές, οι οποίοι καλύπτουν μεγάλο εύρος συχνοτήτων. Στο Σχήμα 3.7 δίνεται παραστατικά η εικόνα που παίρνουμε από ένα τέτοιο ενισχυτή.



Αν οι παρατηρήσεις πραγματοποιηθούν με ενισχυτές περιορισμένου εύρους συχνοτήτων, τότε η ένταση της ακτινοβολίας από τον Ήλιο μετά από μία ισχυρή έκλαμψη δίνεται παραστατικά στο Σχήμα 3.8. Παρόλο που σε τέτοια εγγραφήματα δεν μπορούμε να παρατηρήσουμε την ολίσθηση κατά συχνότητα, εύκολα όμως διακρίνουμε τους διάφορους τύπους εκπομπής που αναφέρθηκαν παραπάνω.



Σχήμα 3.9. Παραγωγή των διαφόρων τύπων ραδιοφωνικής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια εκλάμψεων. (α) Η επανασύνδεση των μαγνητικών δυναμικών γραμμών στην περιοχή μιας ομάδας κηλίδων προκαλεί την αρχική έκλυση ενέργειας (έκλαμψη) (1). Φορτισμένα σωματίδια (κυρίως ηλεκτρόνια) επιταχύνονται από την έκρηξη και με μεγάλη ταχύτητα απομακρύνονται από την περιοχή προκαλώντας ταλαντώσεις πλάσματος και εκπομπή ραδιοφωνικών κυμάτων Τύπου III (2). (β) Ηλεκτρόνια υψηλής ενέργειας εγκλωβίζονται από το ισχυρό πεδίο της περιοχής και κινούμενα ταχύτατα σε ελικοειδείς τροχιές μεταξύ των πόλων του μαγνητικού πεδίου εκπέμπουν ακτινοβολία σύγχροτρον (Τύπου V). (γ) Το μέτωπο του κρουστικού κύματος που δημιουργείται απομακρύνεται από το σημείο της έκρηξης με ταχύτητα γύρω στα 1000 km/s προκαλώντας ταλαντώσεις πλάσματος και ακτινοβολία Τύπου II (3). Τα ηλεκτρόνια εντός του μαγνητικού πεδίου που βρίσκονται πίσω από το μέτωπο του κρουστικού κύματος εκπέμπουν ακτινοβολία σύγχροτρον, Τύπου IV (4).

Η ακτινοβολία Τύπου III χαρακτηρίζεται από ταχύτατη ολίσθηση της έντασης της ακτινοβολίας (~ 20 MHz/s) από μεγάλες συχνότητες σε μικρότερες. Η ακτινοβολία αυτή λαμβάνει χώρα αμέσως μετά την εμφάνιση μιας έκλαμψης. Αν η έκλαμψη είναι ισχυρή, τότε κατά την πρώτη φάση εμφανίζεται και η εκπομπή Τύπου V, κυρίως σε χαμηλές συχνότητες. Η εκπομπή Τύπου III οφείλεται σε μία ταχύτατα κινούμενη δέσμη ηλεκτρονίων (~ 100000 km/s) από την περιοχή της έκλαμψης που συνοδεύεται από ταλαντώσεις πλάσματος (Βλάχος, 1990). Η κίνηση της δέσμης προς τα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας του Ήλιου επιβεβαιώνεται από την παρατηρούμενη ολίσθηση κατά συχνότητα. Η συχνότητα των ταλαντώσεων του πλάσματος εξαρτάται από την αριθμητική πυκνότητα των ηλεκτρονίων, η οποία

ελαττώνεται καθώς η δέσμη απομακρύνεται από την επιφάνεια του Ήλιου. Δέσμες φορτισμένων σωματιδίων, ηλιακής προέλευσης, έχουν παρατηρηθεί ακόμα και στη γειτονιά της Γης όπου η συχνότητα των ταλαντώσεων πλάσματος έχει πέσει στα 20 kHz περίπου ($\lambda = 15$ km).

Η εκπομπή Τύπου V πιστεύουμε ότι οφείλεται σε ταχέως κινούμενα ηλεκτρόνια που κινούνται εντός του ισχυρού μαγνητικού πεδίου στην περιοχή της έκλαμψης. Πρόκειται δηλαδή για ακτινοβολία σύγχροτρον, η οποία παράγει ραδιοφωνικά κύματα σε αρκετά μεγάλο εύρος συχνοτήτων.

Αν η αρχική έκλαμψη είναι μικρή, τότε τα φαινόμενα που τη συνοδεύουν στα ραδιοφωνικά μήκη κύματος περιορίζονται σε αυτά της πρώτης φάσης. Αν όμως πρόκειται για ισχυρή έκλαμψη (σπουδαιότητας 3 ή και περισσότερο) τότε, συνήθως, μερικά λεπτά αργότερα, παρατηρούνται ακόμα πιο θεαματικά φαινόμενα που διαρκούν πολύ περισσότερο. Τα φαινόμενα αυτά (εκπομπή Τύπου II και IV) συνιστούν τη δεύτερη φάση της ταχέως μεταβαλλόμενης συνιστώσας. Η δεύτερη φάση αρχίζει με την εκπομπή ισχυρής ακτινοβολίας Τύπου II σε υψηλές συχνότητες. Η εκπομπή ακτινοβολίας παρατηρείται συγχρόνως σε μεγάλο εύρος συχνοτήτων (20 – 100 MHz) και το μέγιστό της ολισθαίνει με ταχύτητα 20 MHz/min προς τις χαμηλότερες συχνότητες. Η ολίσθηση αυτή είναι πολύ βραδύτερη από την ολίσθηση που παρατηρείται κατά την εκπομπή ακτινοβολίας Τύπου III. Κατά κανόνα η εκπομπή ακτινοβολίας Τύπου II συνοδεύεται από την πρώτη αρμονική της η οποία παρατηρείται ταυτόχρονα με κατάλληλους ενισχυτές (Σχήμα 3.7). Και σε αυτήν την περίπτωση η εκπομπή οφείλεται σε ταλαντώσεις πλάσματος από το μέτωπο ενός ταχέως ανερχόμενου κρουστικού κύματος από την περιοχή της έκλαμψης. Η ταχύτητα του κρουστικού κύματος υπολογίζεται γύρω στα 1000 km/s.

Μερικές φορές η εκπομπή Τύπου II συνοδεύεται από ένα μεγάλης διάρκειας “θόρυβο” συνεχούς ακτινοβολίας, ο οποίος μπορεί να διαρκέσει αρκετές ώρες ή ακόμα και ημέρες. Η ακτινοβολία αυτή έχει ταξινομηθεί ως εκπομπή Τύπου IV και οφείλεται σε εκπομπή σύγχροτρον από το διαστελλόμενο αέριο που δημιουργήσε το κρουστικό κύμα στο οποίο αναφερθήκαμε στην προηγούμενη παράγραφο. Πράγματι, υψηλής διακριτικής ικανότητας παρατηρήσεις απέδειξαν πως η πηγή της ακτινοβολίας Τύπου IV κινείται, απομακρυνόμενη από το δίσκο του Ήλιου με ταχύτητα 1000 – 1500 km/s και μπορεί να φτάσει σε απόσταση μερικών ακτίνων Ηλίου έως ότου εξασθενήσει “πέφτοντας” κάτω από τα όρια ευαισθησίας των ραδιοτηλεσκοπίων.

Στο Σχήμα 3.9 επιχειρείται μια παραστατική εξήγηση του μηχανισμού δημιουργίας των διαφόρων τύπων της ταχέως μεταβαλλόμενης συνιστώσας της ραδιοφωνικής ακτινοβολίας από τον Ήλιο.

3.3. Η Σελήνη σε ραδιοφωνικά μήκη κύματος

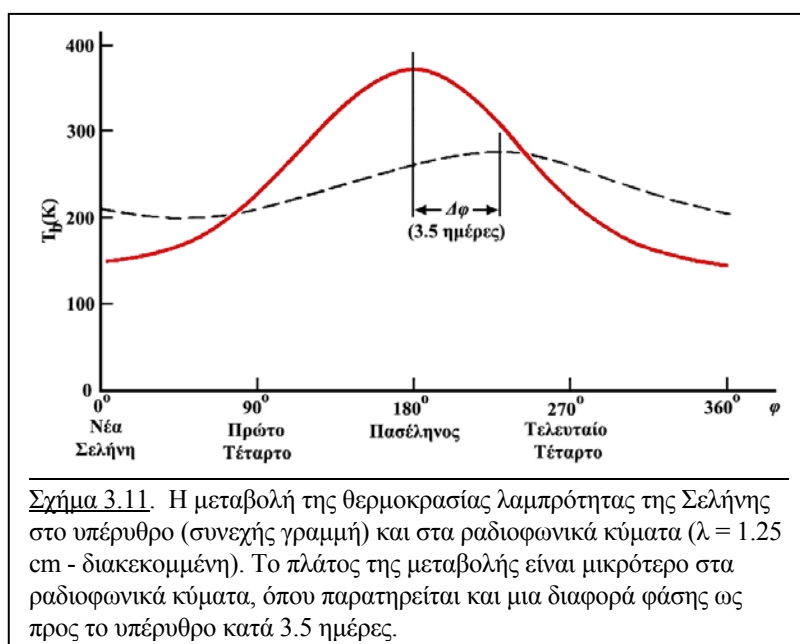


Σχήμα 3.10 Η επιφάνεια της Σελήνης καλύπτεται από κρατήρες, πεδιάδες και όρη

Η Σελήνη (Σχήμα 3.10) είναι ετερόφωτο σώμα με επιφανειακή θερμοκρασία μεταξύ 380 K (όταν είναι πανσέληνος) και 100 K (όταν είναι νέα Σελήνη). Σύμφωνα με το νόμο του Wien η θερμική ακτινοβολία της εμπίπτει στην περιοχή των υπέρυθρων

ακτίνων, πράγμα που έχει πλήρως επιβεβαιωθεί με απευθείας παρατηρήσεις. Οι πρώτες παρατηρήσεις της Σελήνης σε ραδιοφωνικά μήκη κύματος έγιναν το 1946 στα 1.25 cm. Συμπληρωματικές παρατηρήσεις σε άλλα μήκη κύματος έδειξαν ότι και στα ραδιοκύματα η ακτινοβολία της Σελήνης είναι θερμικής φύσης.

Με τις πρώτες μετρήσεις ανακαλύφθηκε μια σημαντική διαφορά μεταξύ της ραδιοφωνικής ακτινοβολίας της Σελήνης και της ακτινοβολίας σε οπτικά ή υπέρυθρα κύματα.



Σχήμα 3.11. Η μεταβολή της θερμοκρασίας λαμπρότητας της Σελήνης στο υπέρυθρο (συνεχής γραμμή) και στα ραδιοφωνικά κύματα ($\lambda = 1.25$ cm - διακεκομμένη). Το πλάτος της μεταβολής είναι μικρότερο στα ραδιοφωνικά κύματα, όπου παρατηρείται και μια διαφορά φάσης ως προς το υπέρυθρο κατά 3.5 ημέρες.

Ενώ το μέγιστο της ακτινοβολίας στο υπέρυθρο συμπίπτει με την στιγμή κατά την οποία έχουμε πανσέληνο, το μέγιστο στα ραδιοφωνικά κύματα παρατηρείται αργότερα με διαφορά φάσης 3.5 ημερών περίπου (Σχήμα 3.11). Η απροσδόκητη αυτή παρατήρηση μπορεί να εξηγηθεί εύκολα αν συνειδητοποιήσουμε ότι η οπτική

και υπέρυθρη ακτινοβολία προέρχονται από την επιφάνεια της Σελήνης, ενώ η ραδιοφωνική από βαθύτερα στρώματα, γεγονός που συνδέεται με την ελάττωση του οπτικού βάθους με τη συχνότητα. Τα ραδιοφωνικά κύματα προέρχονται από ένα στρώμα βάθους μερικών εκατοστών (μέχρι και μερικών μέτρων) από την επιφάνεια (μερικά μήκη κύματος) όπου αφενός η επίδραση της ηλιακής ενέργειας προκαλεί μικρότερες μεταβολές της θερμοκρασίας, αφετέρου, λόγω θερμικής αδράνειας, υπάρχει καθυστέρηση στις μεταβολές αυτές. Η ενεργός θερμοκρασία, T_e , της Σελήνης, όπως συνάγεται από παρατηρήσεις σε διάφορα μήκη κύματος, δίνεται από τη σχέση

$$T_e = T_o + \frac{T_a}{2} \cos(\omega_s t - \Phi) \quad (3.4)$$

Όπου T_o είναι η μέση θερμοκρασία (που μετρείται) στη συχνότητα παρατήρησης,

T_a είναι το εύρος της μεταβολής (η διαφορά μεγίστης - ελαχίστης θερμοκρασίας),

ω_s είναι η συχνότητα περιφοράς της γύρω από τη Γη (μέχρι να επανέλθει στην ίδια φάση) $= 360^\circ/\Sigma_s$ όπου Σ_s ο συνοδικός μήνας (29.53 ημέρες, βλ. Αυγολούπη, Σειραδάκη, 1993, σ. 113),

t είναι ο χρόνος που έχει παρέλθει από τη στιγμή της Πανσελήνου (σε ημέρες) και

Φ είναι η διαφορά φάσης [σε μοίρες $= (3.5 \times 360^\circ)/29.53$].

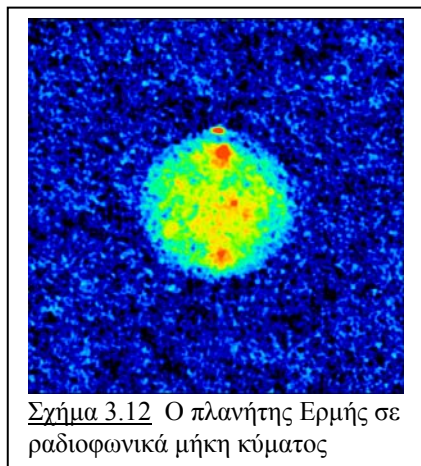
Οι μετρήσεις του εύρους, T_a και της διαφοράς φάσης Φ δύνανται να ερμηνευτούν εάν δεχτούμε ότι η επιφάνεια της Σελήνης αποτελείται από ένα πορώδες επίστρωμα πάχους $6 (\pm 3)$ m. Η πυκνότητα του επιστρώματος αυτού είναι περίπου 1.0 gr cm^{-3} (0.6 gr cm^{-3} για τα ανώτερα 4 – 5 cm). Από τις ίδιες μετρήσεις είναι δυνατό να υπολογιστεί η θερμική αγωγιμότητα ενώ από μετρήσεις της μεταβολής της ανακλαστικότητας μεταξύ οπτικών και ραδιοφωνικών κυμάτων είναι δυνατόν να υπολογιστεί η διηλεκτρική σταθερά.

Όπως βλέπουμε η μελέτη της μεταβολής της θερμοκρασίας της Σελήνης σε ραδιοφωνικά κύματα και η διαφορά φάσης που μόλις αναφέραμε συνέβαλε στον ποσοτικό υπολογισμό των φυσικών ιδιοτήτων (πυκνότητα, θερμική αγωγιμότητα, διηλεκτρική σταθερά, κτλ.) των επιφανειακών στρωμάτων της Σελήνης πολύ πριν καταστεί δυνατός ο επιτόπιος προσδιορισμός τους από αστροναύτες που προσεδάφισθηκαν σε αυτήν.

Σήμερα, χρησιμοποιώντας ραδιοτηλεσκόπια μεγάλης διακριτικής ικανότητας, έχει καταστεί δυνατή η λεπτομερής χαρτογράφηση των επιφανειακών στρωμάτων της Σελήνης, μέχρι βάθους μερικών εκατοστών. Οι παρατηρήσεις αυτές έχουν συμπληρώσει τις γνώσεις μας για τη χημική σύσταση και τη γεωλογική δομή της Σελήνης καθώς επίσης και για τους πιθανούς μηχανισμούς γένεσης και εξέλιξής της. Τέλος απεδείχθησαν πολύ χρήσιμες για την επιλογή των κατάλληλων περιοχών προσεδάφισης στην επιφάνειά της των επανδρωμένων

διαστημοπλοίων.

3.4. Ερμής, Αφροδίτη και Άρης

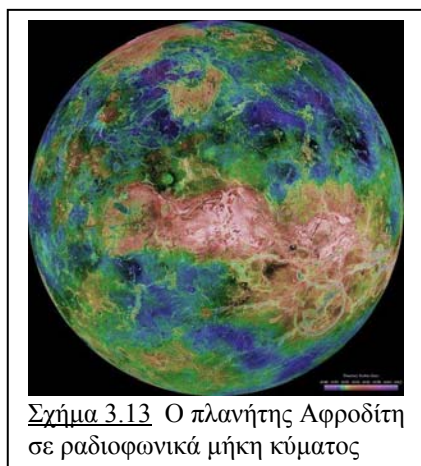


Σχήμα 3.12 Ο πλανήτης Ερμής σε ραδιοφωνικά μήκη κύματος

Η μικρή αποχή του πλανήτη Ερμή (Σχήμα 3.12) από τον Ήλιο (μέγιστη γωνιώδης απόσταση 28°) καθιστά πολύ δύσκολη την παρατήρησή του, όχι μόνο σε οπτικά αλλά και σε ραδιοφωνικά κύματα. Το 1962, με τις πρώτες μετρήσεις που έγιναν σε συχνότητα 3 cm, βρέθηκε ότι η θερμοκρασία του είναι της τάξης των 400 K, δηλαδή πολύ μεγαλύτερη από αυτήν που προέβλεπε η μέχρι τότε θεωρία, σύμφωνα με την οποία η περίοδος περιστροφής του έπρεπε να συμπίπτει με την περίοδο περιφοράς (88 ημέρες). Σύντομα

το παράδοξο αυτό εξηγήθηκε όταν περαιτέρω ραδιοαστρονομικές παρατηρήσεις απέδειξαν ότι η περίοδος περιστροφής του πλανήτη δεν είναι 88 ημέρες αλλά 59 και επομένως ολόκληρη η επιφάνεια του θερμαίνεται περιοδικά από τον Ήλιο. Δεν έχει δηλαδή ένα θερμό και ένα ψυχρό ημισφαίριο.

Κάθε 19 μήνες ο πλανήτης Αφροδίτη (Σχήμα 3.13) πλησιάζει τη Γη περισσότερο από οποιοδήποτε άλλο πλανήτη. Μεταξύ του πλησιέστερου και του απώτερου σημείου της τροχιάς

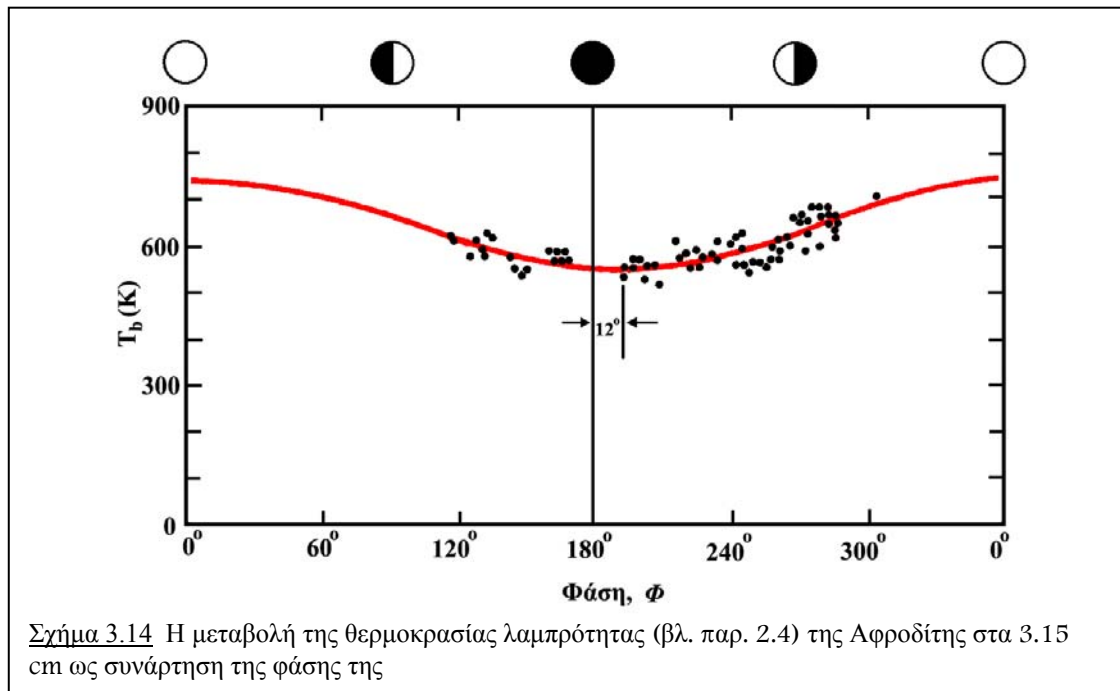


Σχήμα 3.13 Ο πλανήτης Αφροδίτη σε ραδιοφωνικά μήκη κύματος

της από τη Γη, η γωνιώδης διάμετρός της ελαττώνεται από $64''$ έως $9.''9$ και η απόστασή της εξαπλασιάζεται (είναι ευνόητο ότι τότε οι παρατηρήσεις καθίστανται εξαιρετικά δύσκολες). Ολόκληρος ο πλανήτης καλύπτεται από πυκνή ατμόσφαιρα και νέφη που εμποδίζουν τόσο τα οπτικά κύματα όσο και τα υπέρυθρα να διεισδύσουν μέχρι την επιφάνειά της. Τα ραδιοφωνικά κύματα βέβαια διεισδύουν μέχρι την επιφάνεια του πλανήτη. Έτσι χρησιμοποιώντας το πανίσχυρο ραντάρ του ραδιοτηλεσκοπίου του Arecibo στα

12.5 cm, άλλα και αντίστοιχες μεθόδους από διαστημικές αποστολές (π.χ. η αποστολή Magellan) έχει χαρτογραφηθεί η επιφάνεια του πλανήτη (Σχήμα 3.13). Το υψηλότερο όρος στην Αφροδίτη είναι το Maxwell Mons, ύψους 11 km, υψηλότερο από το όρος Everest της Γης. Εξαιτίας της πυκνής ατμόσφαιρας, η ατμοσφαιρική πίεση στην επιφάνεια της Αφροδίτης είναι 90 φορές μεγαλύτερη από αυτήν στην επιφάνεια της Γης.

Η θερμοκρασία των ανωτέρων στρωμάτων της ατμόσφαιρας της Αφροδίτης έχει μετρηθεί με μεγάλη ακρίβεια και είναι της τάξης των 230 K. Το 1956 όμως, οι πρώτες ραδιοφωνικές παρατηρήσεις της Αφροδίτης (σε μήκος κύματος 3 και 9 cm) έδειξαν ότι η θερμοκρασία στην επιφάνειά της είναι πολύ υψηλότερη, τουλάχιστον 600 K. Σήμερα γνωρίζουμε ότι η υψηλή περιεκτικότητα της ατμόσφαιρας της Αφροδίτης σε διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) και άζωτο (N₂) δημιουργεί **φαινόμενο θερμοκηπίου** (green house effect) με αποτέλεσμα η θερμοκρασία της επιφάνεια του πλανήτη να είναι πολύ υψηλή. Η μεταβολή της ενεργού θερμοκρασίας της επιφάνειας της Αφροδίτης εξαρτάται από τη φάση της (θέση της ως



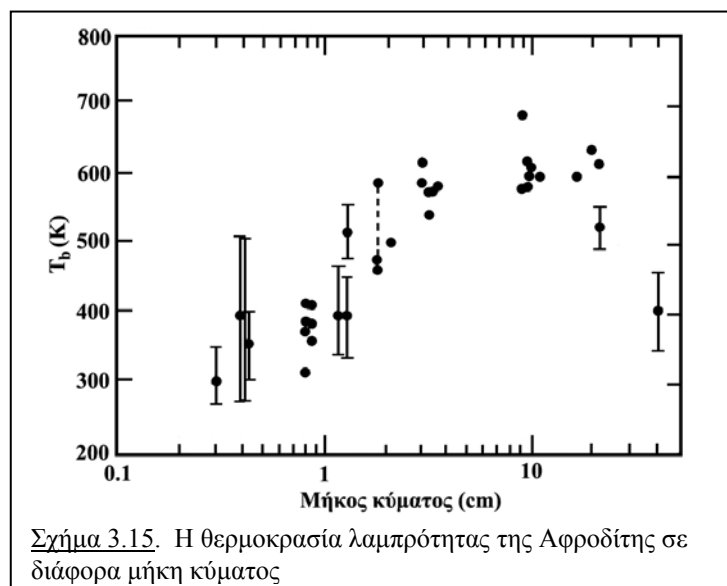
προς τον Ήλιο (και είναι ανάλογη με τη μεταβολή που παρατηρείται στην επιφάνεια της Σελήνης). Από παρατηρήσεις στα 3.15 cm (Σχήμα 3.14) βρέθηκε η σχέση

$$T_e(3.15 \text{ cm}) = 621 + 73 \cos(\Phi - 12^\circ) \text{ K} \quad (3.5\alpha)$$

ενώ στα 8.6 mm η αντίστοιχη σχέση είναι

$$T_e(8.6 \text{ mm}) = 427 + 41 \cos(\Phi - 21^\circ) \text{ K} \quad (3.5\beta)$$

Στο Σχήμα 3.15 δίδεται η φασματική κατανομή της θερμοκρασίας λαμπρότητας της Αφροδίτης από παρατηρήσεις που έγιναν μεταξύ 3 mm και 40 cm. Η ελάττωση της θερμοκρασίας που παρατηρείται μεταξύ 3 cm (600 K) και 3 mm (300 K) οφείλεται στην απορρόφηση που υφίσταται η ακτινοβολία που μετράμε (η οποία προέρχεται από την επιφάνεια της Αφροδίτης) καθώς διέρχεται από την πυκνή ατμόσφαιρά της (σκόνη και άλλα σωματίδια). Η ύπαρξη υδρατμών στην ατμόσφαιρα της Αφροδίτης αποκλείεται λόγω της απουσίας οιοδήποτε ίχνους γραμμής απορρόφησης στα 1.35 cm που είναι το χαρακτηριστικό μήκος κύματος



Σχήμα 3.15. Η θερμοκρασία λαμπρότητας της Αφροδίτης σε διάφορα μήκη κύματος

που απορροφά (και εκπέμπει) το νερό. Η διηλεκτρική σταθερά της επιφάνειας της Αφροδίτης έχει βρεθεί από τις παραπάνω μετρήσεις ότι είναι $\epsilon = 2.2 \pm 0.2$, πράγμα που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η επιφάνειά της είναι πορώδης. Από τις σχέσεις 3.5 συνάγεται ότι ο πλανήτης περιστρέφεται ανάδρομα και ότι η θερμοκρασία της επιφάνειάς του είναι εξαιρετικά υψηλή. Η φωτιζόμενη επιφάνεια

έχει θερμοκρασία 800 K περίπου, ενώ η σκοτεινή επιφάνεια περί τα 600 K. Η θερμοκρασία των πόλων είναι μικρότερη, της τάξης των 470 K. Η Αφροδίτη περιστρέφεται ανάδρομα (από ανατολάς προς δυσμάς σε 243 γήινες ημέρες). Είναι, δηλαδή, ο μόνος πλανήτης του Ηλιακού συστήματος όπου ο Ήλιος ανατέλλει από τη δύση! Τέλος εξαιτίας της πολύ αργής περιστροφής της η Αφροδίτη δεν διαθέτει αξιόλογο μαγνητικό πεδίο.

Οι παρατηρήσεις του πλανήτη Άρη (Σχήμα 3.16) είναι ακόμα δυσκολότερες καθώς ακόμα και όταν βρίσκεται στην ελάχιστη απόστασή του από τη Γη, αυτή είναι διπλάσια από τη



Σχήμα 3.16. Ο πλανήτης Άρης σε οπτικά μήκη κύματος

μέγιστη απόσταση της Αφροδίτης. Επί πλέον ο Άρης είναι μικρότερος σε όγκο και ψυχρότερος από την Αφροδίτη. Σε γενικές γραμμές η θερμοκρασία λαμπρότητας του Άρη είναι δέκα φορές περίπου ασθενέστερη από τη θερμοκρασία λαμπρότητας της Αφροδίτης. Η μέση θερμοκρασία της επιφάνειάς του σε ραδιοφωνικά μήκη κύματος είναι 216 K, ενώ στο υπέρυθρο η θερμοκρασία του είναι σημαντικά υψηλότερη, 250 K. Το γεγονός αυτό εξηγείται επίσης εάν θεωρήσουμε ότι η επιφάνειά του είναι

πορώδης και ότι σε ραδιοφωνικά μήκη κύματος παρατηρούμε τα βαθύτερα στρώματα. Στον Άρη δεν παρατηρείται καμία ιδιαίτερη σχέση της θερμοκρασίας του με τη φάση που παρουσιάζει γεγονός που επιβεβαιώνει την ταχύτατη περιστροφή του ($24.^h62^m$).

3.5. Ο πλανήτης Δίας και η αλληλεπίδραση του με τον δορυφόρο Ιώ

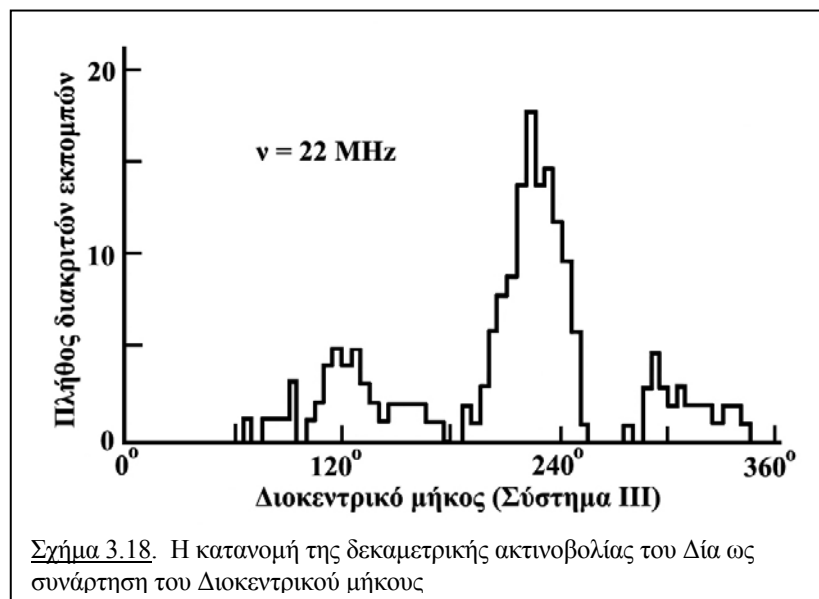


Σχήμα 3.17 Ο πλανήτης Δίας: ο γίγαντας του ηλιακού συστήματος

Η απόσταση του πλανήτη Δία (Σχήμα 3.17) από τον Ήλιο είναι τουλάχιστον πενταπλάσια της απόστασης Γης–Ήλιου, η μάζα του ξεπερνά τις 300 γήινες μάζες και η διάμετρός του υπερβαίνει τις 11 γήινες διαμέτρους. Παρόλα αυτά η περίοδος περιστροφής του είναι μόλις $9^{\text{h}}.9$. Η γωνιώδης διάμετρός του κυμαίνεται μεταξύ $30.''5$ και $49.''8$ καθιστώντας τον ένα από τα λαμπρότερα ουράνια σώματα. Γύρω από τον Δία περιφέρονται τουλάχιστον 16 δορυφόροι, τέσσερις από τους οποίους

ανακαλύφθηκαν από τον Γαλιλαίο κατά τις αρχές του 17^{ου} αιώνα (Ιώ, Ευρώπη, Γανυμήδης και Καλλιστώ). Η επιφάνεια του Δία καλύπτεται από πυκνά σύννεφα στα οποία διακρίνονται (ακόμα και με μικρής ισχύος τηλεσκόπια) χαρακτηριστικές ζώνες καθώς και η ερυθρή κηλίδα (βλ. Μπάνος, 1985). Η ταχύτητα περιστροφής του Δία υπολογίζεται από παρατηρήσεις των χαρακτηριστικών αυτών σχηματισμών. Από την περιστροφή των ζωνών, που βρίσκονται κοντά στον ισημερινό του πλανήτη, συνάγεται ότι η ταχύτητα περιστροφής του είναι $9^{\text{h}}50^{\text{m}}30^{\text{s}}$ (γνωστό ως **Σύστημα περιστροφής I**), ενώ από τις εύκρατες ζώνες του η ταχύτητα περιστροφής του υπολογίζεται σε $9^{\text{h}}55^{\text{m}}40.^{\text{s}}6$ (**Σύστημα II**). Προφανώς τόσο το Σύστημα I όσο και το Σύστημα II συνδέονται με την περιστροφή της ατμόσφαιρας του Δία και όχι την περιστροφή του ίδιου του πλανήτη. Η ατμόσφαιρα του Δία περιέχει, μεταξύ άλλων ενώσεων, σημαντική ποσότητα αμμωνίας (NH_3) και μεθανίου (CH_4), ενώ, από μετρήσεις στο υπέρυθρο, η θερμοκρασία της έχει υπολογισθεί ότι είναι περίπου 130 K.

Οι πρώτες παρατηρήσεις του πλανήτη Δία σε ραδιοκύματα έγιναν τυχαία το 1955 όταν δύο Αμερικανοί αστρονόμοι δοκίμαζαν μια καινούρια κεραία στα 22 MHz (~ 13.6 m). Τα σήματα που στην αρχή είχαν εκληφθεί ως ενοχλητικές παρεμβολές απεδείχθησαν ότι προερχόταν από τη διεύθυνση του Δία. Αργότερα, στην Αυστραλία, επανεξετάστηκαν παλαιά εγγραφήματα που είχαν ληφθεί στα 18.3 MHz. Αμέσως εντοπίστηκαν σήματα προερχόμενα από τη διεύθυνση του Δία. Τα σήματα αυτά (δεκαμετρική ακτινοβολία) είναι ελλειπτικά πολωμένα και το φάσμα τους είναι μη θερμικό. Στατιστική ανάλυση των σποραδικών κατά τα άλλα σημάτων απέδειξε ότι παρουσιάζουν περιοδικότητα με περίοδο περίπου ίση προς αυτήν του Συστήματος II. Το νέο σύστημα ονομάστηκε **Σύστημα III** ($9^{\text{h}}55^{\text{m}}29.^{\text{s}}71$) και σήμερα πιστεύουμε ότι εκφράζει την περίοδο περιστροφής του πλανήτη (και όχι της ατμόσφαιράς του).



Στο Σχήμα 3.18 παρουσιάζεται η συχνότητα της δεκαμετρικής ακτινοβολίας που εκπέμπει ο Δίας ως συνάρτηση της περιόδου του Συστήματος III. Είναι προφανές ότι ισχυρή, σποραδική δεκαμετρική ακτινοβολία από τον πλανήτη εκπέμπεται από ένα συγκεκριμένο Διοκεντρικό μήκος

και επομένως από μια συγκεκριμένη (και περιορισμένη) περιοχή του πλανήτη.

Εν τω μεταξύ, το 1956, εντοπίστηκε στο Δία και θερμικής φύσης ακτινοβολία στα 3 cm (εκατοστομετρική ακτινοβολία) με θερμοκρασία λαμπρότητας περίπου 140 K (παρόμοια με τη θερμοκρασία των ανωτέρων στρωμάτων της ατμόσφαιρας του πλανήτη που είχε μετρηθεί με τη βοήθεια παρατηρήσεων στο υπέρυθρο). Η ακτινοβολία αυτή παρατηρείται σε μήκη κύματος μικρότερο από 7 cm.

Σε μεγαλύτερα μήκη κύματος ($\lambda > 7\text{cm}$) η εκατοστομετρική ακτινοβολία γίνεται σαφώς μη θερμική, στα 31 cm, μάλιστα, παρουσιάζεται ισχυρά πολωμένη (~25%). Η κλίση του επιπέδου πόλωσης παρουσιάζει γωνία 10° ως προς το επίπεδο του ισημερινού του Δία, μεταβάλλεται δε ημιτονοειδώς καθώς ο πλανήτης περιστρέφεται. Οι παρατηρήσεις αυτές αποτελούν σαφείς ενδείξεις ύπαρξης μαγνητικού πεδίου και μάλιστα μας παρέχουν την πληροφορία ότι ο μαγνητικός άξονας του Δία σχηματίζει γωνία 10° ως προς τον άξονα περιστροφής του. Υψηλής διακριτικής ικανότητας παρατηρήσεις έδειξαν ότι η εκατοστομετρική αυτή ακτινοβολία (με $\lambda > 7\text{ cm}$) προέρχεται από μια εκτεταμένη περιοχή που περιβάλλει το Δία και εκτείνεται σε απόσταση τουλάχιστον μερικών διαμέτρων του πλανήτη.

Ανακεφαλαιώνοντας σημειώνουμε ότι η ραδιοφωνική ακτινοβολία που εκπέμπει ο πλανήτης Δίας είναι αρκετά ισχυρή και διακρίνεται σε τρεις κατηγορίες: (α) Στη μη θερμική δεκαμετρική ακτινοβολία ($\lambda > 7\text{ m}$) η οποία είναι σποραδική, κυκλικά πολωμένη, περιοδική (περίοδος του Συστήματος III) και προέρχεται από μια περιορισμένη περιοχή, η οποία δεν συμπίπτει με την θέση του Δία. (β) Στη μη θερμική εκατοστομετρική ακτινοβολία ($7 < \lambda < 150\text{ cm}$), η ένταση της οποίας είναι περίπου σταθερή, προέρχεται από μια σαφώς εκτεταμένη περιοχή γύρω από τον πλανήτη και είναι ελλειπτικά πολωμένη. (γ) Στη θερμική

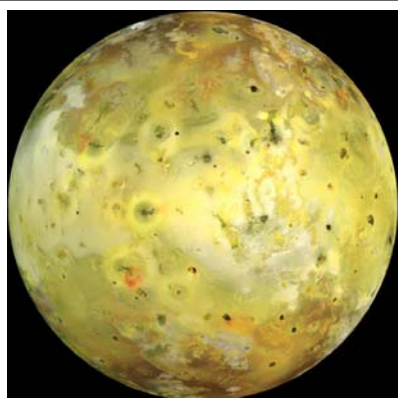
εκατοστομετρική ακτινοβολία ($\lambda < 7 \text{ cm}$) η οποία οφείλεται στην ακτινοβολία που εκπέμπει ο πλανήτης ως μέλαν σώμα (θερμοκρασίας $\sim 140 \text{ K}$).

Η δεκαμετρική ακτινοβολία που εκπέμπει ο πλανήτης Δίας δεν παρατηρείται πλέον όταν το μήκος κύματος γίνει μικρότερο από 7 περίπου μέτρα ($\sim 40.5 \text{ MHz}$). Αν θεωρήσουμε ότι η συχνότητα αυτή αντιστοιχεί στη γυροσυχνότητα ηλεκτρονίων τα οποία εκπέμπουν εντός μαγνητικού πεδίου επαγωγής B , τότε είναι δυνατόν να υπολογίσουμε την ένταση του μαγνητικού πεδίου από τη σχέση

$$\omega_g = \frac{e}{m} B \quad (3.6)$$

Θέτοντας $\omega_g = 2\pi \nu_g$, όπου $\nu_g = 40.5 \text{ MHz}$, υπολογίζεται ότι η ένταση του μαγνητικού πεδίου του Δία είναι 14.5 Gauss . Ας σημειωθεί ότι επιτόπιες μετρήσεις που έγιναν με τα διαστημόπλοια Pioneer και Voyager, δέκα χρόνια μετά τις παρατηρήσεις που μόλις περιγράψαμε, επιβεβαίωσαν τις παραπάνω μετρήσεις. Επίσης με τις ίδιες επιτόπιες μετρήσεις επιβεβαιώθηκε η κλίση των 10° που σχηματίζει ο μαγνητικός άξονας του πλανήτη με τον άξονα περιστροφής του, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως.

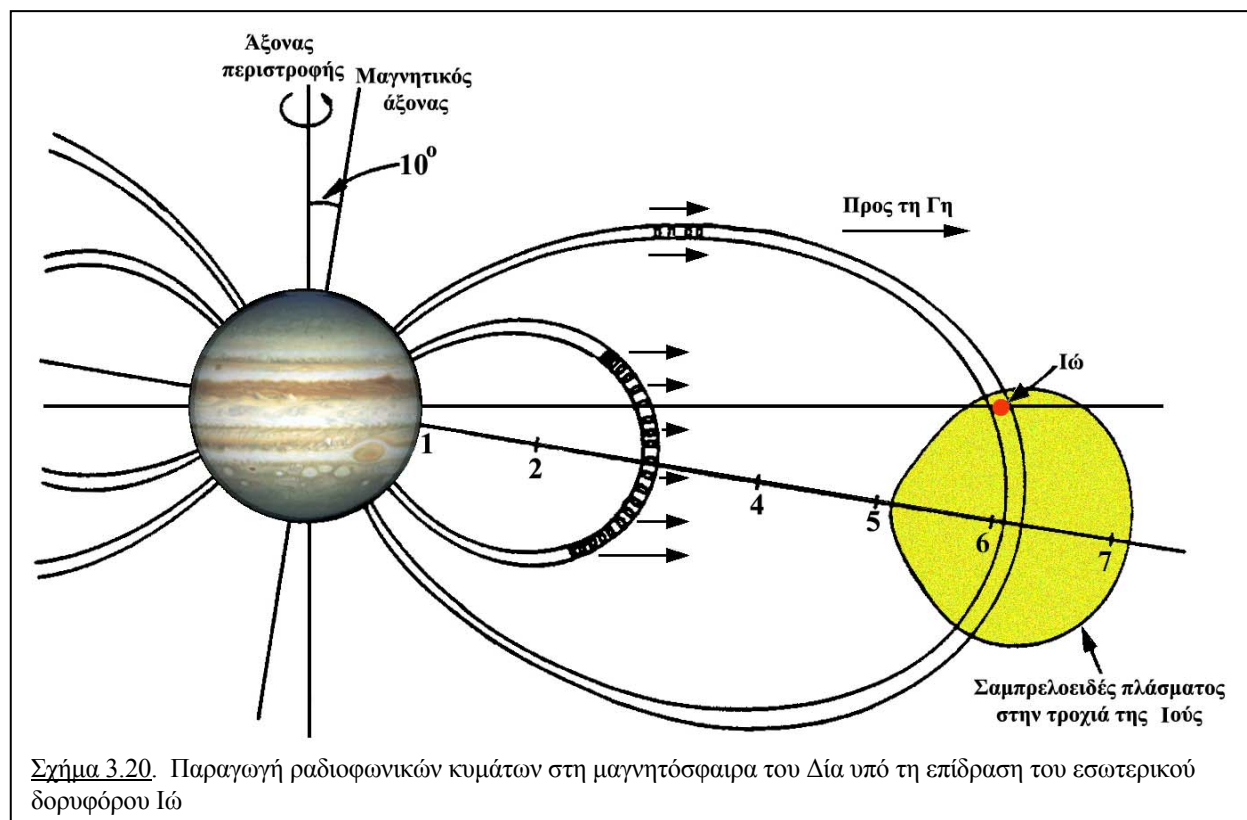
Η δεκαμετρική ακτινοβολία που εκπέμπει ο Δίας παρουσιάζει μια αξιοσημείωτη



Σχήμα 3.19 Ο ηφαιστειογενής δορυφόρος του Δία, Ιώ

συμπεριφορά. Η πιθανότητα να παρατηρηθεί εξαρτάται από τη θέση του εσωτερικού δορυφόρου Ιώ (Σχήμα 3.19). Σήμερα γνωρίζουμε ότι στην επιφάνεια του δορυφόρου αυτού εκδηλώνονται συχνά ηφαιστειακές εκρήξεις, κατά τη διάρκεια των οποίων ο χώρος γύρω του εμπλουτίζεται σε θείο και οξυγόνο καθώς επίσης και σε άλλες ατομικές ή μοριακές ενώσεις. Τα άτομα αυτά ιονίζονται (π.χ. από την ηλιακή ακτινοβολία) και αιχμαλωτίζονται από το μαγνητικό πεδίο του Δία. Έτσι σχηματίζεται ένας

σαμπρελοειδής χώρος, που περιβάλλει την τροχιά του δορυφόρου γύρω από τον πλανήτη. Ο χώρος αυτός περιέχει φορτισμένα σωματίδια τα οποία συνεχώς ανανεώνονται από τα ενεργά ηφαίστεια που έχουν παρατηρηθεί (και φωτογραφηθεί) από τα διαστημόπλοια Pioneer και Voyager στην Ιώ. Ο σαμπρελοειδής αυτός χώρος, δηλαδή, περιέχει πλάσμα (*Io plasma torus*) εντός μαγνητικού πεδίου και επομένως εκπέμπει μη θερμική (δεκαμετρική και εκατοστομετρική) ακτινοβολία (Σχήμα 3.20). Ο λεπτομερής μηχανισμός εκπομπής παραμένει ακόμα ανεξακρίβωτος.



3.6. Κρόνος, Ουρανός, Ποσειδών και Πλούτων

Μετά τον Δία, ο Κρόνος είναι ο δεύτερος σε μέγεθος πλανήτης του ηλιακού μας συστήματος (μάζα = $95.15 M_{\oplus}$, ακτίνα $9.4 R_{\oplus}$). Με το ωραιότατο σύστημα δακτυλίων που τον περιβάλλει προσφέρεται σαν ένα από τα θεαματικότερα αντικείμενα του ηλιακού συστήματος και ίσως και ολόκληρου του νυχτερινού ουρανού. Περιφέρεται γύρω από τον Ήλιο σε απόσταση 9.5 A.U. με περίοδο περιφοράς 29.46 έτη. Όπως και ο Δίας, καλύπτεται από πυκνά στρώματα νεφών τα οποία εμποδίζουν τις οπτικές παρατηρήσεις της επιφάνειάς του. Από παρατηρήσεις στο υπέρυθρο, η θερμοκρασία της κορυφής των νεφών του βρέθηκε ότι είναι περίπου 95 K. Οι πρώτες ραδιοαστρονομικές μετρήσεις σε εκατοστομετρικά μήκη κύματος έδωσαν παρόμοιες θερμοκρασίες, ενώ αργότερα σε υψηλότερη συχνότητα (9 mm) ανιχνεύθηκε ακτινοβολία που αντιστοιχεί σε θερμοκρασία της τάξης των 200 K. Το Νοέμβριο 1980 τα διαστημόπλοια Voyager I και Voyager II κατέγραψαν σποραδική, μη θερμική ακτινοβολία από τον Κρόνο σε συχνότητα μεταξύ 20 και 500 kHz. Η ακτινοβολία, η οποία φαίνεται να προέρχεται από περιοχές υπεράνω των πόλων, παρουσιάζει περιοδικές μεταβολές από τις οποίες υπολογίστηκε, με μεγάλη ακρίβεια, η περίοδος περιστροφής του πλανήτη, $10^h 39^m 24^s$.

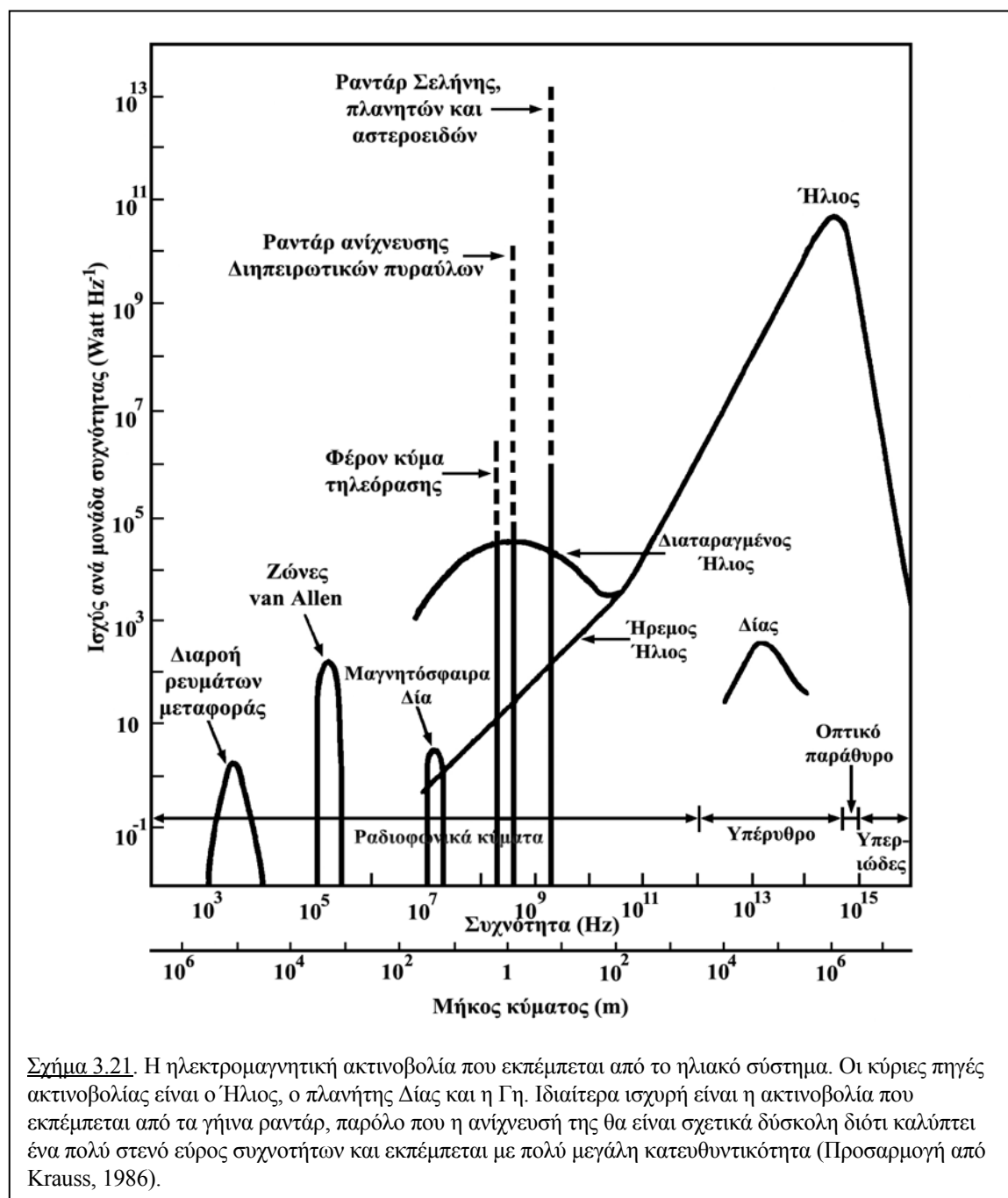
Ο Ουρανός και ο Ποσειδών συχνά αναφέρονται σαν αδελφοί πλανήτες. Περιέχουν περίπου την ίδια μάζα (14.56 και 17.23 φορές τη μάζα της Γης αντίστοιχα). Η πυκνότητα του Ουρανού είναι ελαφρά μικρότερη από αυτή του Ποσειδώνα. Το 1986 οι φωτογραφίες που έστειλε το διαστημόπλοιο Voyager 2 απέκάλυψαν την ύπαρξη δακτυλίων στον Ουρανό. Αργότερα, το 1989, με το ίδιο διαστημόπλοιο φωτογραφήθηκαν τόσο δακτύλιοι όσο και μια κυανή κηλίδα, ανάλογη προς την ερυθρή κηλίδα του Δία, στον πλανήτη Ποσειδώνα. Η θερμοκρασία των δύο αυτών πλανητών μετρήθηκε με παρατηρήσεις σε εκατοστομετρικά μήκη κύματος, στις αρχές της δεκαετίας του '60 και βρέθηκε ότι κυμαίνεται μεταξύ 125 K και 170 K για τον Ουρανό και μεταξύ 115 K και 135 K για τον Ποσειδώνα.

Σχετικά πρόσφατα, το 1987, κατόρθωσαν οι ραδιοαστρονόμοι να μετρήσουν τη θερμοκρασία του πλανήτη Πλούτωνα με μετρήσεις στα 250 GHz ($\lambda = 1.2$ mm), η οποία ευρέθη ίση προς $T = 40$ K. Ο μικροσκοπικός (μάζα = $0.0023 M_{\oplus}$) αυτός πλανήτης βρίσκεται σε απόσταση ~ 40 A.U. από τον Ήλιο, πράγμα που καθιστά την παρατήρησή του εξαιρετικά δύσκολη.

3.7. Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία από τη Γη μας και το ηλιακό σύστημα

Πριν κλείσουμε το κεφάλαιο αυτό αξίζει να εξετάσουμε τι θα παρατηρούσαμε αν βρισκόμαστε έξω από το ηλιακό σύστημα (π.χ. στην περιοχή του α-Κενταύρου, σε απόσταση 1.3 pc) και στρέψαμε τα τηλεσκόπιά μας προς τη διεύθυνση του Ήλιου. Καταρχήν, σε οπτικά μήκη κύματος, θα υπερίσχυε η έντονη ακτινοβολία του Ήλιου ενώ στο υπέρυθρο θα ήταν δυνατόν να ανιχνευθεί και ο πλανήτης Δίας. Σε ραδιοφωνικά μήκη κύματος σχετικά υψηλής συχνότητας ($\nu > 100$ MHz), ο Ήλιος θα εξακολουθούσε να αποτελεί την κύρια πηγή ακτινοβολίας ιδίως όταν, κατά τη διάρκεια του μεγίστου του ενδεκαετούς κύκλου δραστηριότητάς του (βλ. Βάρβογλη, Σεραδάκη, 1991), εκπέμπει ισχυρή ραδιοφωνική ακτινοβολία Τύπου II και III (βλ. και παράγραφο 3.2.2).

Σε συχνότητα 10 - 50 MHz, ιδιαίτερα ισχυρή είναι η δεκαμετρική ακτινοβολία του πλανήτη Δία (βλ. παράγραφο 3.5). Σε ακόμα χαμηλότερη συχνότητα (~ 200 kHz) τα ταχέως κινούμενα σωματίδια των ζωνών van Allen της Γης εκπέμπουν ισχυρότατη ακτινοβολία, η ένταση της οποίας δεν είναι σταθερή. Εξαρτάται από τη ροή των φορτισμένων σωματιδίων ηλιακής προέλευσης που παγιδεύονται από τη μαγνητόσφαιρα της Γης. Η συνολική ισχύς της ακτινοβολίας μπορεί να φτάσει το 1 GW. Εάν δεν υπήρχε η ιονόσφαιρα της Γης, η ακτινοβολία αυτή θα εμπόδιζε σημαντικά τις τηλεπικοινωνίες μας. Σε ακόμα χαμηλότερη συχνότητα (1 - 10 kHz)



θα ήταν ανιχνεύσιμη η ακτινοβολία από ορισμένες αρμονικές συχνοτήτες του εναλλασσομένου ρεύματος που διαρρέει από τις γραμμές μεταφοράς των ηλεκτρικών δικτύων. Η ακτινοβολία αυτή διαπερνά την ιονόσφαιρα και ενισχύεται στη μαγνητόσφαιρα σκεδαζομένη από ταχέως κινούμενα σωματίδια.

Ραδιοφωνικά κύματα μεγάλης ισχύος εκπέμπονται από τον πλανήτη μας ως αποτέλεσμα της εξελιγμένης τεχνολογίας που διαθέτει. Το φέρον κύμα των σταθμών τηλεόρασης (TV), γύρω στα 200 MHz, θα ήταν ανιχνεύσιμο από την απόσταση του α-Κενταύρου παρόλο που το εύρος συχνοτήτων που καλύπτει είναι πολύ στενό (<1 Hz). Βεβαίως, πρέπει να διευκρινίσουμε ότι το διάγραμμα ακτινοβολίας των κεραιών εκπομπής δεν

είναι ισοτροπικό και επομένως η ακτινοβολία αυτή εκπέμπεται επιλεκτικά προς ορισμένες διευθύνσεις. Στο Σχήμα 3.21 ακτινοβολίες που εκπέμπονται προς ορισμένες διευθύνσεις (με κατευθυντικότητα $D \gg 1$) παρίστανται με διακεκομμένη γραμμή. Με συνεχόμενη γραμμή παρίστανται ακτινοβολίες που εκπέμπονται ισοτροπικά (με κατευθυντικότητα $D = 1$).

Στα 400 MHz τα σήματα από τα στρατιωτικά ραντάρ ανίχνευσης διηπειρωτικών πυραύλων είναι αρκετά ισχυρά. Ισχύει βέβαια και εδώ όσα αναφέρθηκαν προηγουμένως για το εύρος των συχνοτήτων που καλύπτουν και την κατευθυντικότητα των κεραιών.

Τέλος τα ισχυρότερα σήματα που εκπέμπονται από τον πλανήτη μας είναι αυτά που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της απόστασης και τη χαρτογράφηση της Σελήνης, του Ερμή, της Αφροδίτης, του Άρη και ορισμένων αστεροειδών. Εκτός από το πολύ στενό εύρος συχνοτήτων που έχουν τα σήματα αυτά, εκπέμπονται από παραβολικές κεραιές μεγάλης κατευθυντικότητας (Arecibo, Jodrell Bank, κ.τ.λ. – βλ. Πίνακα 2.I –) και επομένως η πιθανότητα ανίχνευσής τους από μια τυχαία διεύθυνση είναι πολύ μικρή.

Τα διάφορα είδη ραδιοφωνικής ακτινοβολίας που εκπέμπονται από πηγές που βρίσκονται στο πλανητικό μας σύστημα συνοψίζονται στο Σχ. 3.21.

Βιβλιογραφία

Αυγολούπη Σ., Σειραδάκη I.X. (1993): "Παρατηρησιακή Αστρονομία", ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη

Βάρβογλη Χ., Σειραδάκη I.X. (1991): "Εισαγωγή στη Σύγχρονη Αστρονομία", ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη.

Βλάχου Λ. (1990): "Φυσική Πλάσματος", Διδακτικές Σημειώσεις, ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη.

Μπάνου Γ. (1985): "Γενική Αστρονομία", Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων.

Σπύρου Ν. (1986): "Αρχές Αστρικής Εξέλιξης", ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη.

Hey J.S. (1975): "The Radio Universe", Pergamon Press, Oxford.

Kraus J.D. (1986): "Radio Astronomy" Cygnus-Quasar Books, Ohio.