

ΕΚΤΑΚΤΟΣ ΣΥΝΕΔΡΙΑ ΤΗΣ 11ΗΣ ΜΑΡΤΙΟΥ 1997

ΠΡΟΕΔΡΙΑ ΝΙΚΟΛΑΟΥ ΜΑΤΣΑΝΙΩΤΗ

ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΗΛΙΑΚΟΥ ΑΝΕΜΟΥ ΚΑΙ ΠΛΑΝΗΤΩΝ

ΟΜΙΛΙΑ ΤΟΥ ΑΝΤΕΠΙΣΤΕΛΛΟΝΤΟΣ ΜΕΛΟΥΣ κ. ΣΤΑΜΑΤΙΟΥ Μ. ΚΡΙΜΙΖΗ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ἀπὸ τὴν ἀρχὴ τῆς ρομποτικῆς ἐξερεύνησης τοῦ ἡλιακοῦ συστήματος, πρὶν ἀπὸ 35 χρόνια, ἔγινε ἓνα ἐπαναστατικὸ ἄλμα πρὸς τὰ ἐμπρὸς στὴ γνῶση τοῦ ἡλιακοῦ συστήματος, ξεκινώντας ἀπὸ τὸν ἥλιο αὐτὸν καθ' ἑαυτὸν καὶ ἐκτεινόμενο στὸν καθένα ἀπὸ τοὺς ἐννιά πλανῆτες ποὺ ἔχουν ἐξερευνηθεῖ μέχρι τώρα ἀπὸ διαστημόπλοια. Τὰ διαστημόπλοια ἔδωσαν λεπτομερεῖς εἰκόνες τῶν πλανητικῶν ἐπιφανειῶν ἢ ἀτμοσφαιρῶν, καθὼς καὶ πλανητικῶν δορυφόρων, κομητῶν καὶ μερικῶν ἀστεροειδῶν, ποὺ εἶναι διαδεδομένες εὐρέως στὸ κοινὸ καὶ μᾶς ἔχουν βοηθήσει νὰ σχηματίσουμε μιὰ ἐντελῶς καινούργια εἰκόνα γιὰ τὸ τί εἶναι τὸ ἡλιακὸ σύστημα καὶ τί εἶναι ὀρισμένοι μηχανισμοὶ ποὺ τὸ ὀδήγησαν στὴν παρούσα του κατάστασι. Οἱ εἰκόνες ἀπὸ τὶς πλανητικὲς ἐπιφάνειες καὶ τὶς ἀτμόσφαιρες πάντως, ὅσο θαυμαστὲς καὶ ἂν εἶναι, παρ' ὅλα αὐτὰ εἶναι ἓνα μέρος μόνον τῆς γνῶσης ποὺ ἔχει συσσωρευτεῖ ἀπὸ τὴ χρῆσι αὐτῶν τῶν διαστημοπλοίων. Ὑπάρχει μιὰ πλευρὰ τῆς γνῶσης μας ποὺ δὲν εἶναι παρατηρήσιμη στὰ ὀρατὰ μήκη κύματος καὶ εἶναι σὲ μεγάλου βαθμοῦ ἄγνωστη στὸ εὐρὺ κοινόν, ἀλλὰ εἶναι πάντως βασικῆς σημασίας γιὰ τὴν κατανόησή μας τοῦ πῶς τὸ ἡλιακὸ σύστημα σχηματίστηκε, καὶ ἐγκαθιδρύει τὴ βάση στὴν ὁποία μποροῦμε νὰ ὀπτικοποιήσουμε τὶς εἰκόνες ἄλλων ὑλικῶν συστημάτων, ἄλλων γαλαξιδῶν καὶ ἀστροφυσιῶν ἀντικειμένων ποὺ βρίσκονται μέσα σ' αὐτά, οἱ ὁποῖες ἀποκτοῦνται ἀπὸ τηλεσκόπια στὴ Γῆ καὶ στὸ διάστημα.

Μια σημαντική ανακάλυψη, που ξεπήδησε μέσα από την εποχή τής εξερεύνησης του ήλιακού συστήματος με διαστημόπλοια είναι ο ύψηλός βαθμός στὸν ὁποῖο τὰ πλανητικά καὶ τὰ ἡλιακά μαγνητικά πεδία ὀργανώνουν τὴν ἰονισμένη ὕλη. Ραδιοκύματα, που ἐκπέμπονται ἀπὸ ἡλιακά καὶ πλανητικά πλάσματα, συναντῶνται σὲ μία εὐρεία ὁμάδα ἀστροφυσικῶν προβλημάτων καὶ γι' αὐτὸ καταλαμβάνουν μιὰ κεντρικὴ θέση στὴ φυσικὴ πλάσματος τοῦ ἡλιακοῦ συστήματος. Χαρτογραφώντας τοὺς πληθυσμοὺς πλάσματος γύρω ἀπὸ τὴ Γῆ καὶ τοὺς ἄλλους πλανῆτες καὶ καθορίζοντας τοὺς φυσικοὺς μηχανισμοὺς που λειτουργοῦν σ' αὐτὰ τὰ πλάσματα, οἱ ἐπιστήμονες ἀναπτύσσουν μοντέλα μὲ τὰ ὁποῖα μεταφράζουν τὶς ἠλεκτρομαγνητικὲς ἐκπομπὲς που λαμβάνονται ἀπὸ μακρινὰ ἀστέρια καὶ γαλαξίες. Πολλὰ μὴ-ἐκπεμπόμενα κύματα καὶ ἀλληλεπιδράσεις σωματιδίων παίζουν ἓνα κρίσιμο ρόλο στὴν παραγωγὴ τῶν παρατηρημένων ἐκπομπῶν. Αὐτὸ ἔκανε ἀπαραίτητο νὰ ἐξετάσουμε τὶς διαδικασίες πλάσματος ἐπὶ τόπου μὲ διαστημόπλοια. Πολλὲς ἀπὸ τὶς πληροφορίες που παρουσιάζονται ἐδῶ προέρχονται ἀπὸ τέτοιες μετρήσεις διαστημοπλοίων.

Σ' αὐτὸ τὸ ἄρθρο ξεκινοῦμε ἐξετάζοντας τὸ πιὸ σημαντικό ἀστὲρι στὸν οὐρανό, τὸν "Ἡλιο μας, καὶ μετὰ προχωροῦμε νὰ περιγράψουμε πῶς ἡ ἡλιακὴ δραστηριότητα φανερώνεται διὰ τῆς σωματιδιακῆς ἐξάπλωσής της στὸ διάστημα μέσω τοῦ ἡλιακοῦ ἀνέμου, τὶς ἐπιδράσεις καὶ τὶς μορφὲς τοῦ ἠλεκτρομαγνητικοῦ περιβάλλοντος καθ' ἑνὸς ἀπὸ τοὺς πλανῆτες, ἀκόμα καὶ τοὺς προσωρινοὺς κατοίκους τοῦ ἡλιακοῦ συστήματος ὅπως οἱ κομήτες. Θὰ παρουσιαστεῖ μιὰ πιὸ ἐκτενὲς περιγραφή τῆς μαγνητόσφαιρας τῆς Γῆς διότι σχηματίζει τὸ πλαίσιο ἐργασίας ἀπὸ τὸ ὁποῖο μποροῦμε νὰ καταλάβουμε καὶ νὰ συγκρίνουμε τὶς μαγνητόσφαιρες τῶν ἄλλων πλανητῶν. Μετὰ θὰ προχωρήσουμε νὰ δοῦμε τὰ γενικὰ χαρακτηριστικὰ τῶν μαγνητοσφαιρῶν ὅπως τὰ κατανοοῦμε στὸ ἡλιακὸ σύστημα, θὰ σημειώσουμε μερικὲς ἀπὸ τὶς ὁμοιότητες καὶ μερικὲς ἀπὸ τὶς σημαντικὲς διαφορὲς καὶ μετὰ θὰ γενικεύσουμε τὴν ἀντίληψη τῶν μαγνητοσφαιρῶν γιὰ νὰ προτείνουμε προεκτάσεις σὲ ἄλλα ἀστροφυσικὰ ἀντικείμενα τὰ ὁποῖα δὲν προσφέρονται γιὰ ἐπὶ τόπου παρατηρήσεις.

ΗΛΙΑΚΗ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ

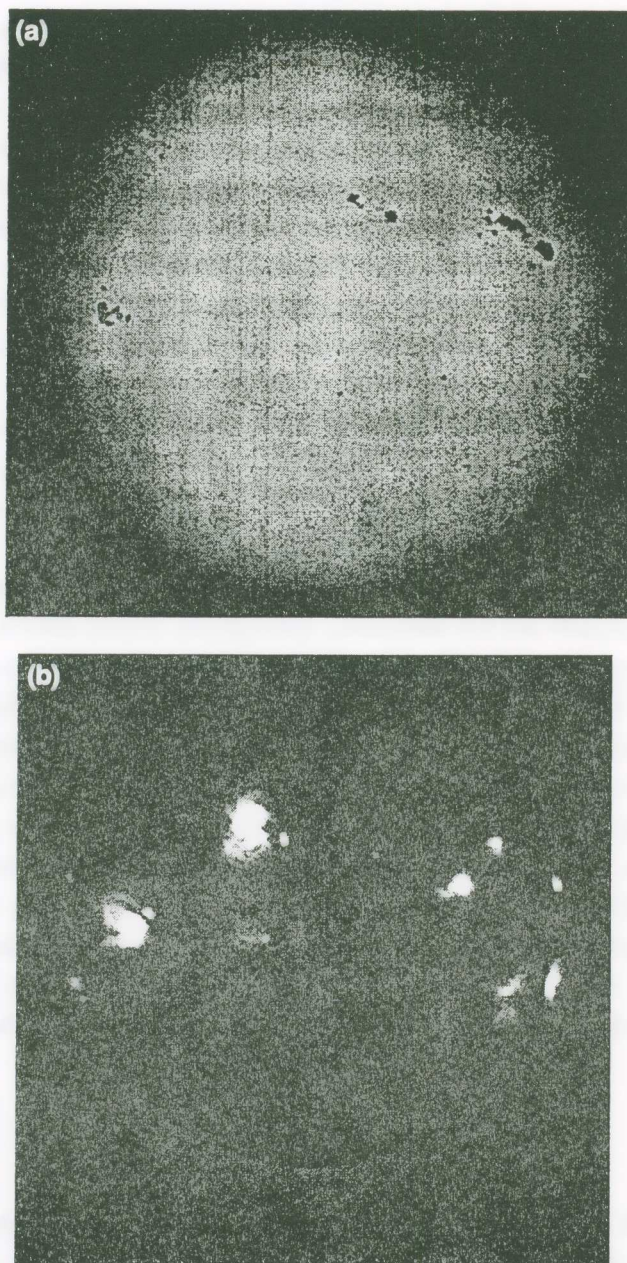
Ὁ "Ἡλιος εἶναι ἓνα τυπικὸ μέσης ἡλικίας ψυχρὸ ἄστρο ὅπως δισεκατομμύρια ἄλλα στὸ γαλαξία μας. Εἶναι μιὰ πελώρια σφαῖρα ἀερίου (1,4 ἑκατομμύρια km σὲ διάμετρο) τὸ ὁποῖο συγκρατεῖται ἀπὸ τὴν ἴδια του τὴ βαρύτητα, ἔχοντας μιὰ ἐστία στὸν πυρῆνα του, που ὀδηγεῖται ἀπὸ πυρηνικὲς ἀντιδράσεις σύντηξης. Ἡ Εἰκόνα 1 παρουσιάζει τὴν ὄψη τοῦ "Ἡλίου στὴν πρὸ καὶ μετὰ διαστήματος ἐποχὴ. Στὰ ἀριστερὰ φαίνεται μιὰ εἰκόνα που πάρθηκε στὸ ὄρατὸ φῶς που δείχνει μιὰ σχε-

τικά ήσυχη σφαίρα με μερικές σκοτεινές τελείες που ονομάζονται ήλιακές κηλίδες. Πριν από το ξεκίνημα των διαστημικών παρατηρήσεων γνωρίζαμε ότι η θερμοκρασία κοντά στην όρατη επιφάνεια ήταν κοντά στους 6000°K (φωτόσφαιρα) σε ένα ύψόμετρο περίπου 2000 km. Στο τμήμα (b) της Εικόνας 1 βλέπουμε μια πολύ διαφορετική εικόνα του Ήλιου που παρατηρήθηκε σε μήκη κύματος ακτίνων-X. Αυτή η εικόνα αποκαλύπτει ότι η επιφάνεια του Ήλιου είναι σε συνεχή κίνηση, ένας πολύπλοκος συνδυασμός τόσο της περιστροφής του Ήλιου γύρω από τον άξονά του όσο και της ταραχώδους μεταφοράς των αερίων κάτω από την επιφάνειά του. Η φωτογραφία απεικονίζει μια στιγμιαία εικόνα του ήλιακού στέμματος το οποίο είναι ένα αέριο σε θερμοκρασία περίπου 1,5 εκατομμυρίων βαθμών Kelvin.

Μέσω ενός μη κατανοητού άκroma μηχανισμού που περιλαμβάνει την περιστροφή του Ήλιου και τη μεταφορά ενέργειας δημιουργούνται μαγνητικές γραμμές. Αυτές οδηγούν στη δημιουργία ήλιακών κηλίδων και των τεράστιων εκρήξεων που ονομάζονται ήλιακές εκλάμψεις, που εμφανίζονται λιγότερο ή περισσότερο συχνά σε ένα περίπου έντεκάχρονο κύκλο. Η θερμοότητα που παράγεται από αυτές τις κινήσεις των μαγνητικών γραμμών και του πλάσματος φαινομενικά γίνεται αιτία ή ήλιακή ατμόσφαιρα να εκρήγνυται προς το διάστημα σε ένα ρέον προς τα έξω αέριο από ιόντα και ηλεκτρόνια το οποίο επεκτείνεται με μια ταχύτητα τουλάχιστον 400 ως 1000 km/sec μέσα στο ήλιακό σύστημα και σε όλες τις διευθύνσεις και σε πολλά δισεκατομμύρια χιλιόμετρα πέρα από την τροχιά του μακρινότερου πλανητικού σώματος. Αυτή η ροή θερμού πλάσματος ονομάζεται ήλιακός άνεμος. Ανάλογα με την ήλιακη δραστηριότητα, υπάρχουν περιστασιακές εκρήξεις προς τα έξω του ήλιακού πλάσματος που ονομάζονται στεμματικές εκτινάξεις μάζας (SEM), οι οποίες ωθούνται προς το διάστημα και διαδίδονται με μια ταχύτητα που είναι αρκετά μεγαλύτερη από ό,τι ο περιβάλλον ήλιακός άνεμος. Αυτές οι ἐγχύσεις έχουν σημαντικές επιδράσεις τη στιγμή που φτάνουν την τροχιά της Γης και των άλλων πλανητών, όπως θα δούμε στη συνέχεια.

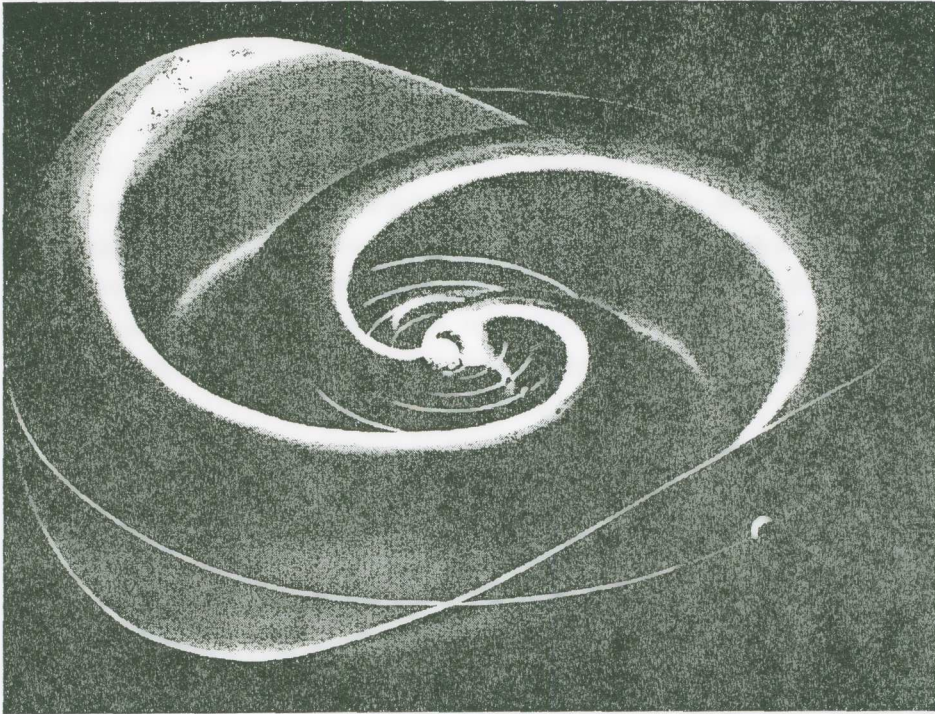
ΗΛΙΑΚΟΣ ΑΝΕΜΟΣ

Λόγω του ότι η πυκνότητα ενέργειας του πλάσματος που ρέει προς τα έξω είναι μεγαλύτερη από ό,τι η πυκνότητα ενέργειας του σταθερού ήλιακού μαγνητικού πεδίου, το πλάσμα ουσιαστικά τραβά το μαγνητικό πεδίο έξω από τον Ήλιο στον διαπλανητικό χώρο· το «πόδι» της μαγνητικής γραμμής του μαγνητικού παραμένει στερεωμένο στον Ήλιο, αλλά λόγω της ήλιακής περιστροφής η μαγνητική γραμμή τελειώνει σχηματίζοντας τεράστια έλικοειδή, που ονομάζονται Αρχιμήδεια έλικοειδή,



Εικόνα 1. Εικόνα της ηλιακής κορώνας σε μαλακές ακτίνες - X. Παρατηρήστε τη μεγάλη σκοτεινή περιοχή που αντιπροσωπεύει μια όπη κορώνας από την οποία αναδύεται ύψηλης ταχύτητας ηλιακός άνεμος. Οι λαμπερές περιοχές αντιπροσωπεύουν περιοχές ηλιακής δραστηριότητας με τις πιο λαμπερές περιοχές να δείχνουν τόξα από τα οποία τελικά μεγάλες μάζες ηλιακού αερίου εκπέμπονται στο πλανητικό μέσο.

όπως φαίνονται σχηματικά στην Εικόνα 2. Αυτό το λεγόμενο μοντέλο «φούστα μπαλαρίνας», πού αρχικά προτάθηκε από τον μετέπειτα βραβευμένο νομπελίστα Hannes Alfvén, δείχνει ότι οι πλανήτες καθώς ταξιδεύουν γύρω από τον Ήλιο εισέρχονται και εξέρχονται σε ένα τεράστιο φλοιό από ηλεκτρικά ρεύματα και άρα υφίστανται μεταβολές στην πολικότητα του μαγνητικού πεδίου ανάλογα με το αν ο πλανήτης βρίσκεται τον έναυστό του πάνω ή κάτω από το φλοιό αυτό. Αυτά τα τεράστια έλικοειδή συνεχίζουν να επεκτείνονται καθώς ο ήλιακός άνεμος διαδίδεται στο έξω τμήμα του ήλιακού συστήματος και είναι σε απόσταση τουλάχιστον 9.5 δισεκατομμύρια km από τον Ήλιο, δηλ. την απόσταση στην οποία βρέθηκε πρόσφατα ο Voyager I. Υπολογίστηκε ότι ο ήλιακός άνεμος θα συνεχίσει να επεκτείνεται στα 15 δισεκατομμύρια km και ίσως αρ-



Εικόνα 2. Το μοντέλο «φούστα μπαλαρίνας» του ήλιακού διαπλανητικού ρευματοφλοιού. Ο Ήλιος είναι στο κέντρο ενός έκτενουσ και τυλιγμένου σαν δίσκο φλοιού μέσα από τον οποίο ρέουν ηλεκτρικά ρεύματα γύρω από τον Ήλιο. Το μέσο επίπεδο του δίσκου είναι περίπου το επίπεδο του ισημερινού του μέσου διπολικού μαγνητικού πεδίου του Ήλιου. Οι πλανήτες βρίσκονται είτε πάνω είτε κάτω από αυτόν το ρευματοφλοιό με συνεχή αλλαγή στην πολικότητα του μαγνητικού πεδίου. Ο ρευματοφλοιός εκτείνεται σε πολύ μεγάλες αποστάσεις από τον Ήλιο πέρα από την τροχιά των πύό έξωτερικῶν πλανητῶν.

κετά πιό μακριά, αλλά δε θα τὸ γνωρίζουμε αὐτὸ μέχρι τὸ διαστημόπλοιο Voyager νὰ φτάσει σ' ἐκεῖνο τὸ τμήμα τοῦ διαστήματος στὶς ἀρχὲς τοῦ ἐπόμενου αἰώνα. Εἶναι τῶρα γνωστὸ ὅτι ἡ ἐπίδραση τοῦ Ἡλίου δε θα πάψει μέχρι ὁ ἡλιακὸς ἄνεμος νὰ σταματήσει νὰ ἐξαπλώνεται ὅταν θα ἔρθει σὲ ἐπαφὴ μὲ τὸ τοπικὸ διαπλανητικὸ μέσο· αὐτὴ ἡ περιοχὴ τοῦ διαστήματος ποὺ κυριαρχεῖται ἀπὸ τὸν Ἡλιο καὶ τὶς ἐκπομπὲς πλάσματός του ὀνομάζεται «ἡλιόσφαιρα». Θα ἐπιστρέψουμε στὸ θέμα αὐτὸ στὸ τμήμα μὲ τὰ συμπεράσματα τοῦ κειμένου αὐτοῦ.

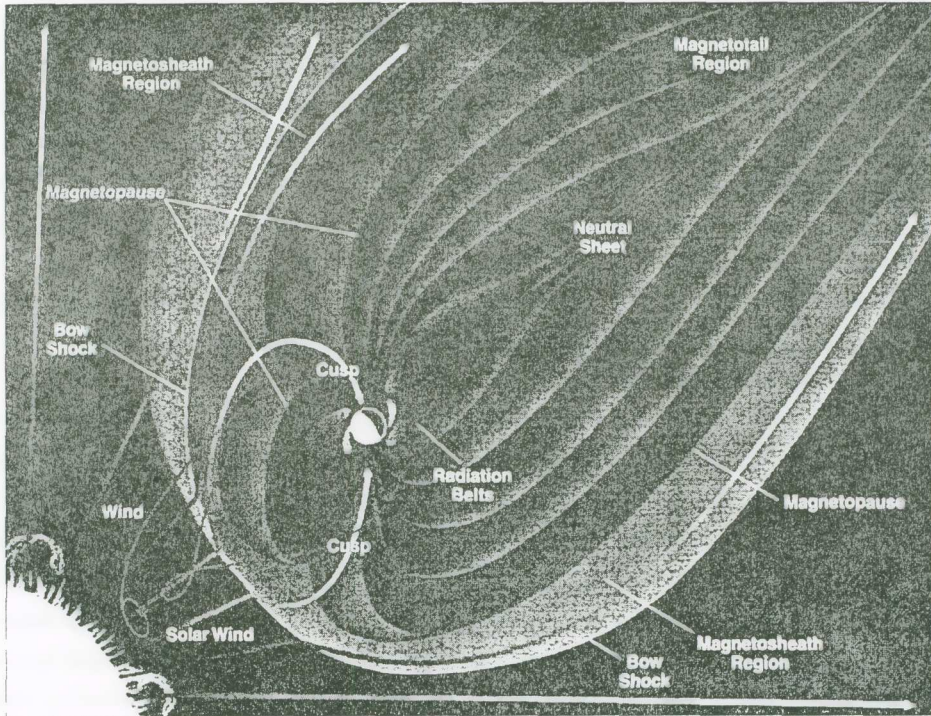
Στὴν τροχιά τῆς Γῆς ὁ ἡλιακὸς ἄνεμος ἔχει μιὰ πυκνότητα ἰόντων $\sim 10 \text{ cm}^{-3}$, ἡ ἐνέργεια πυκνότητα εἶναι $10^{-8} \text{ dyne cm}^{-3}$ καὶ τὸ μαγνητικὸ τοῦ πεδίου εἶναι περίπου 5 nanotesla. Αὐτὲς οἱ ποσότητες ἐλαττώνονται κατὰ προσέγγιση ἀντιστρόφως ἀνάλογα τοῦ τετραγώνου τῆς ἀπόστασης ἀπὸ τὸν Ἡλιο. Ὑπάρχουν μεγάλες διακυμάνσεις γύρω ἀπὸ ὀνομαστικὲς τιμές, ὅπως αὐτές, ἀπὸ τὴ στιγμὴ ποὺ ἡ ἡλιακὴ δραστηριότητα εἶναι χρονικὴ μεταβλητὴ καὶ οἱ ἐκπομπὲς πλάσματος ὅπως οἱ στεμματικὲς ἐκτινάξεις μάζας (SEM) ποὺ ἀναφέρονται στὰ παραπάνω ἔχουν σημαντικὰ διαφορετικὲς παραμέτρους. Ὁ ἡλιακὸς ἄνεμος ρεεῖ μὲ μιὰ ταχύτητα V ποὺ εἶναι συνήθως γύρω στὰ 500 km/sec . Θέτοντας ἕνα ἀντικείμενο ὅπως ἕνα πλανήτη, ἕνα κομήτη ἢ ἕνα ἀστεροειδὴ μέσα στὴ ροὴ παράγεται ἕνα κρουστικὸ κύμα ἀντίθετα στὸ ρεῦμα τοῦ ἡλιακοῦ ἀνέμου, στὸ ὁποῖο δὲ γίνονται συγκρούσεις. Αὐτὸ τὸ φαινόμενο εἶναι ἀνάλογο μὲ τὴ δημιουργία ἐνὸς κρουστικοῦ κύματος μπροστὰ ἀπὸ ἕνα ἀεροπλάνο ποὺ ταξιδεύει μὲ μιὰ ταχύτητα μεγαλύτερη ἀπὸ τὴν τοπικὴ ἀτμοσφαιρικὴ ταχύτητα τοῦ ἡχου (καὶ παράγει μιὰ ἡχητικὴ ἔκρηξη ὅταν τὸ κρουστικὸ κύμα χτυπήσει στὸ ἔδαφος).

Η ΜΑΓΝΗΤΟΣΦΑΙΡΑ ΤΗΣ ΓΗΣ

Τὸ μαγνητικὸ πεδίο τῆς Γῆς, ποὺ δημιουργεῖται ἀπὸ ἠλεκτρικὰ ρεύματα βθιάα μέσα στὸν πυρήνα της, ἀνακλᾷ τὸν ἡλιακὸ ἄνεμο μακριὰ ἀπὸ τὴ Γῆ καὶ δημιουργεῖ κοιλότητα στὸν ἡλιακὸ ἄνεμο σχηματίζοντας ἔτσι ἕνα προστατευτικὸ κουκούλι γύρω ἀπὸ τὸν πλανήτη μας. Αὐτὴ ἡ ἀλληλεπίδραση φαίνεται στὴν Εἰκόνα 3. Τὸ ἐξωτερικὸ κέλυφος αὐτοῦ τοῦ κουκουλιοῦ ὀνομάζεται κρουστικὸ κύμα, στὸ ὁποῖο ὁ ἡλιακὸς ἄνεμος ἀλληλεπιδρᾷ γιὰ πρώτη φορὰ μὲ τὸ μαγνητικὸ πεδίο καὶ ἐπιβραδύνεται μέσα σ' αὐτὸ τὸ σύνορο σὲ μιὰ μικρὴ ροὴ στὴ θέση τῆς μαγνητόπαυσης ὅπου ἀνακλᾶται γύρω ἀπὸ τὴ Γῆ σὲ ὑψόμετρα ~ 60 μὲ 70.000 km . Ὅπως δείχνει ἡ εἰκόνα, ὁ θερμὸς ἡλιακὸς ἄνεμος συμπιέζει τὸ μαγνητικὸ πεδίο στὴν προσήλια πλευρὰ καὶ τὸ τεντώνει πρὸς τὰ ἔξω στὴν ἀφήλια πλευρὰ γιὰ νὰ σχηματίσει μιὰ ἀόρατη κομητοειδὴ οὐρὰ ποὺ ἐκτείνεται σὲ περισσότερο ἀπὸ 6 ἑκατομμύρια χιλιόμετρα πρὸς τὴν ἀφήλια πλευρὰ τῆς Γῆς.

Μπορεῖ νὰ κάνει κανεῖς ἓνα χονδρικό ὑπολογισμό τῆς θέσης ὁποιασδήποτε μαγνητόσφαιρας πλανήτη ἐξισώνοντας τὴ δυναμικὴ πίεση $C\rho V^2$ τοῦ ἡλιακοῦ ἀνέμου καὶ τὸ ἄθροισμα τοῦ μαγνητικοῦ πεδίου καὶ τῶν πιέσεων πλάσματος.

$$C\rho V^2 = B^2/8\pi + P \Rightarrow B^2/8\pi + P$$



Εἰκόνα 3. Ἡ Μαγνητόσφαιρα τῆς Γῆς. Ὁ ἡλιακὸς ἀνεμὸς τυλίγει τὴ Γῆ ρέοντας γύρω ἀπὸ τὸ γήινο μαγνητικὸ πεδίο, συμπιέζοντάς το στὴν πρὸς τὸν ἥλιο πλευρὰ καὶ ἐπιμηκύνοντάς το σὲ μιὰ μακριὰ οὐρὰ στὴν πλευρὰ τῆς νύκτας. Οἱ ποικίλες περιοχὲς ποὺ σχετίζονται μὲ τὴ μαγνητόσφαιρα σημειώνονται στὴν εἰκόνα. Οἱ ζῶνες ἀκτινοβολίας Van Allen κοντὰ στὸν πλανήτη ἀντιπροσωπεύουν τὴν πρώτη ἀνακάλυψη τῆς διαστημικῆς ἐποχῆς.

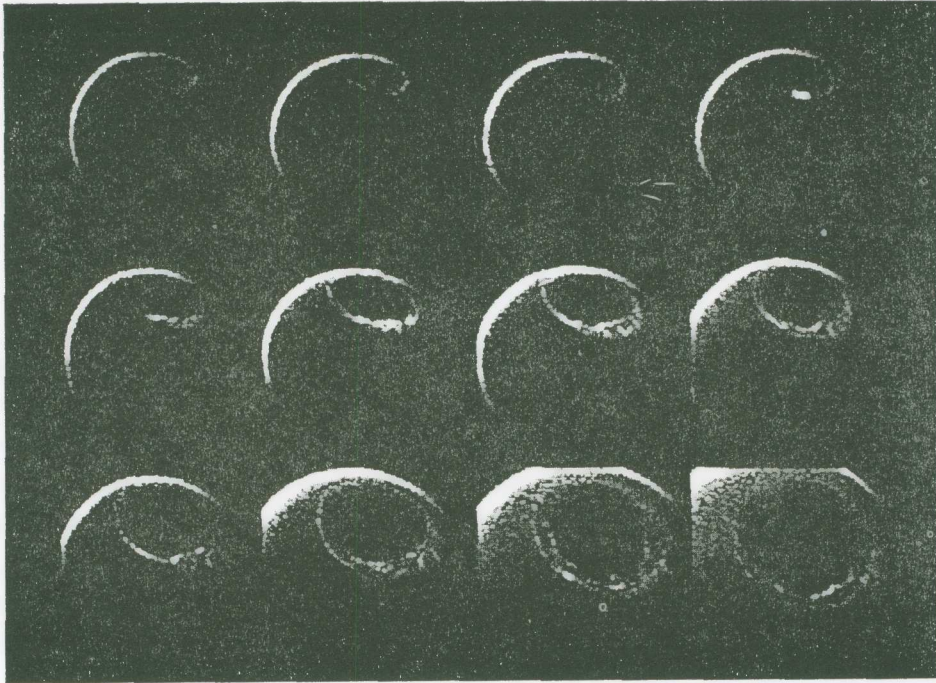
Ἐδῶ τὸ C εἶναι μιὰ σταθερά, τὸ $B^2/8\pi$ εἶναι ἡ πίεση λόγῳ τοῦ μαγνητικοῦ πεδίου τῆς μαγνητόσφαιρας στὴ μαγνητόπαυση, καὶ P , τὸ ὁποῖο εἶναι συχνὰ ἀμελητέο, εἶναι ἡ πίεση ἀερίου μέσα στὴ μαγνητόσφαιρα. Στὴ γεωμετρία τοῦ διπολικοῦ πεδίου τὸ ἐξωτερικὸ πεδίο B ἐνὸς πλανήτη ἐλαττώνεται ἀντιστρόφως ἀνάλογα τοῦ κύβου τῆς ἀπόστασης ἀπὸ τὸ κέντρο τοῦ πλανήτη, ἔτσι ποὺ ἡ γνώση τοῦ μαγνητικοῦ πεδίου στὴν ἐπιφάνεια τοῦ

πλανήτη επιτρέπει σε κάποιον να υπολογίσει κατά προσέγγιση τη θέση της μαγνητόσφαιρας.

Γενικά οι περιοχές της μαγνητόσφαιρας (Εικόνα 3), είναι ορισμένες από την πυκνότητα, τη θερμοκρασία και τη σύνθεση του υπάρχοντος πληθυσμού πλάσματος. Ο ήλιακός άνεμος, ο οποίος αποτελείται κυρίως από ιόντα H^+ και He^{++} , θεωρείται η κυρίαρχη πηγή του πλάσματος στη μαγνητόσφαιρα, ενώ η ιονόσφαιρα της Γης παρέχει ιόντα H^+ , He^+ και O^+ σε διάφορες περιοχές πιο κοντά στη Γη. Το πιο κυρίαρχο φαινόμενο της γήινης μαγνητόσφαιρας είναι οι ζώνες ακτινοβολίας Van Allen, που πρωτοανακαλύφθηκαν από τον αμερικανικό δορυφόρο Explorer I και πήραν το όνομά τους από τον Καθηγητή James A. Van Allen. Αυτές οι ζώνες ακτινοβολίας, που φαίνονται στην εικόνα 3, αποτελούνται από υψηλής ενέργειας πρωτόνια (μέχρι και μερικές εκατοντάδες εκατομμύρια ηλεκτρονιοβόλτ, MeV) για τις εσωτερικές ζώνες και μεγάλες ροές ηλεκτρονίων υψηλής ενέργειας (μέχρι αρκετά MeV) για τις εξωτερικές ζώνες. Συνολικά η μαγνητόσφαιρα αποτελείται από μεγάλους αριθμούς ενεργειακών ιόντων και ηλεκτρονίων, των οποίων ο κυρίαρχος πληθυσμός έχει ενέργεια της τάξης μερικών δεκάδων χιλιάδων ηλεκτρονιοβόλτ (keV).

Η μαγνητόσφαιρα πάντως δεν είναι μια δυναμικώς σταθερή οντότητα. Όποτεδήποτε αυξηθούν ή ταχύτητα ή η πυκνότητα του ήλιακού ανέμου λόγω διαταραχών στον Ήλιο, αυξάνεται ή πίεση στο μαγνητικό πεδίο της Γης με την είσοδο τόσο χαμηλής ενέργειας πλάσματος όσο και πολύ ενεργειακών ήλιακών σωματιδίων που τείνουν να διαταράξουν το σύστημα των ρευμάτων και των υψηλής ενέργειας σωματιδίων μέσα στις ζώνες ακτινοβολίας και έχουν θεαματικά αποτελέσματα στην ενέργεια που έναποτίθεται πάνω από τις πολικές περιοχές της Γης. Το ονομαζόμενο Βόρειο Σέλας (Aurora Borealis) είναι γνωστό από τον καιρό του Άριστοτέλη και έχει απεικονιστεί πολλές φορές στην ιστορία, κυρίως στα βόρεια πλάτη. Τώρα έχουμε μια αρκετά λεπτομερή γνώση των μηχανισμών που οδηγούν στη γέννηση αυτού του θεαματικού φαινομένου. Οι διαταραχές στον ήλιακό άνεμο παράγουν μεταβολές στη μαγνητοσφαιρική δομή, με αποτέλεσμα τα ιόντα και τα ηλεκτρόνια να ενεργοποιηθούν και να «πέσουν» στις πολικές περιοχές της Γης, δημιουργώντας έτσι τόσο οπτικές εκπομπές, όσο και ταλαντώσεις πλάσματος συμπεριλαμβανομένων και ραδιοκυμάτων υψηλής συχνότητας. Διαστημόπλοια έχουν πλέον αποθανάτισει το φαινόμενο του σέλαος από το διάστημα και φάνεται να είναι συγκεντρωμένο σε μια περιοχή σχήματος όβελ πάνω από το βόρειο και το νότιο πολικό κάλυμμα της Γης. Το σέλας δεν είναι σταθερός σχηματισμός, αλλά συνεχώς μεταβαλλόμενος, ιδιαιτέρως ως απόκριση της μαγνητόσφαιρας σε μεγάλες διαταραχές στον Ήλιο. Μια ακολουθία εικόνων που αποκτήθηκε από το δορυφόρο Dynamics Explorer φαίνεται στην Εικόνα

4. Έδω βλέπουμε αρχικά ένα μάλλον λεπτό όβάλ, αλλά καθώς ο χρόνος προχωρά (από αριστερά προς τα δεξιά) αρχίζουμε να βλέπουμε μια αύξηση της έντασης κοντά στην περιοχή του τοπικού μεσονυκτίου (το τόξο στο οποίο φωτίζει ο Ήλιος είναι ή πλευρά της ημέρας) που αυξάνεται τελικά και καλύπτει ολόκληρο το όβάλ του σέλαος. Αυτή ήταν μια μαγνητοσφαιρική υποκαταιγίδα που εκδηλώθηκε τον Απρίλιο του 1982. Η ποσότητα ενέργειας που έναποτίθεται σ' αυτές τις εκδηλώσεις



Εικόνα 4. Μαγνητοσφαιρική υποκαταιγίδα: Δώδεκα συνεχόμενες εικόνες του βόρειου όβάλ του σέλαος καταγράφουν την έναρξη και εξέλιξη μιας υποκαταιγίδας καθώς ο δορυφόρος Dynamics Explorer I προχωρεί προς τη Γῆ (ή προς το περίγειο της τροχιάς του) από το απόγειο κατά τη διάρκεια της περιόδου από 05 : 29 μέχρι 07 : 55 UT στις 2 'Απριλίου 1982. Τα αρχικά φαινόμενα της υποκαταιγίδας στο σέλας εμφανίζονται πρώτα στην τέταρτη εικόνα που αρχίζει στις 06 : 05 UT. Έπειτα απ' αυτό, οι δομές στο σέλας μπορούν να φανούν μετακινούμενες προς τα δυτικά και προς τη Γῆ καθώς ολόκληρο το όβάλ του σέλαος γίνεται ενεργό. Το φωτιζόμενο από τον Ήλιο ήμισφαίριο είναι όρατο στο πάνω αριστερά τμήμα των εικόνων. Το όργανο μέτρησης καταγράφει κυρίως έκπομπές ατομικού οξυγόνου στα 130.4 και 135.6 nanometers. Η θέση του διαστημοπλοίου για την πρώτη εικόνα (πάνω αριστερή γωνία) είναι 23° N γεωγραφικό πλάτος και 22° μήκος και το ύψος είναι 3.67 R_E. Το διαστημόπλοιο είναι ακριβώς πάνω από το όβάλ του σέλαος καθώς η τελευταία εικόνα εκπέμπεται από ύψος 2.17 R_E (1 R_E = 6378 km).

του σέλαος μπορεί να έχει τιμές μέχρι και 10^{11} Watts (100 δισεκατομμύρια Watts), μέρος της οποίας επίσης εκδηλώνεται ως ραδιοκύματα που εκπέμπονται σε μεγάλο ύψος και που μπορεί να φτάνουν μέχρι και το ποσό του ενός δισεκατομμυρίου Watts ενέργειας. Γι' αυτό η Γῆ, εκτός από το να έχει οπτικές εκδηλώσεις στην πλευρά της νύκτας, αποτελεί και μια ραδιοπηγή στο διάστημα. Αυτό αντιπροσωπεύει μόνο μια πλευρά της ροής ενέργειας μέσα στη μαγνητόσφαιρα· υπάρχουν σημαντικά φαινόμενα μεταφοράς κατά τα όποια μεταφέρεται ενέργεια τόσο μέσα στο έσωτερικό της μαγνητόσφαιρας με ένα τεράστιο ρεύμα που περιβάλλει τη Γῆ σαν δακτυλίδι (το λεγόμενο δακτυλιοειδές ρεύμα), όσο και με ροές πλάσματος που προέρχονται από την πλευρά της περιοχής της ημέρας της Γῆς, μέσα από φαινόμενα που περιλαμβάνουν την επανένωση των γραμμών του μαγνητικού πεδίου, ή οποία μετασχηματίζει την ενέργεια του μαγνητικού πεδίου σε μηχανική ενέργεια ενεργοποιώντας το πλάσμα. Μια περιγραφή των φαινομένων είναι πέρα από τους σκοπούς του κειμένου αυτού.

ΠΛΑΝΗΤΙΚΕΣ ΜΑΓΝΗΤΟΣΦΑΙΡΕΣ

Έχοντας περιγράψει τα γενικά μέρη της μαγνητόσφαιρας της Γῆς μπορούμε τώρα να προχωρήσουμε και να δοῦμε τις ιδιότητες των άλλων πλανητικών μαγνητοσφαιρών που έχουν εξερευνηθεί από διαστημόπλοια. Για να θέσουμε μια βάση ο Πίννακας 1 (σ. 241) δίνει τις γενικές ιδιότητες για κάθε έναν από τους πλανήτες, συμπεριλαμβανομένης της απόστασης από τον Ήλιο, την ακτίνα, την περίοδο περιστροφής καθώς επίσης και την κλίση (ἢ γωνία) του ἄξονα περιστροφής, τη μέση πυκνότητα, την επιφανειακή βαρύτητα και την ταχύτητα διαφυγής. Είναι προφανές από τον πίνακα ότι σε σχέση με το μέγεθος οι πλανήτες Έρμης, Ἀφροδίτη, Γῆ και Ἄρης αποτελούν μια ομάδα στην κλίμακα από ~ 2.000 - 6.000 km ακτίνα ἐνῶ ὁ Δίας, ὁ Κρόνος, ὁ Οὐρανὸς καὶ ὁ Ποσειδῶνας εἶναι σε διαφορετικὴ τάξη, με κλίμακα ακτίνας από ~ 71.000 - 25.000 km. Θὰ ἀναφερθοῦμε στὶς δύο ομάδες χωριστὰ ἐπειδὴ ὑπάρχουν οὐσιαστικὲς διαφορὲς στὸν τρόπο πὺ οἱ δύο αὐτὲς τάξεις ἀλληλεπιδροῦν με τὸν ἡλιακὸ ἄνεμο.

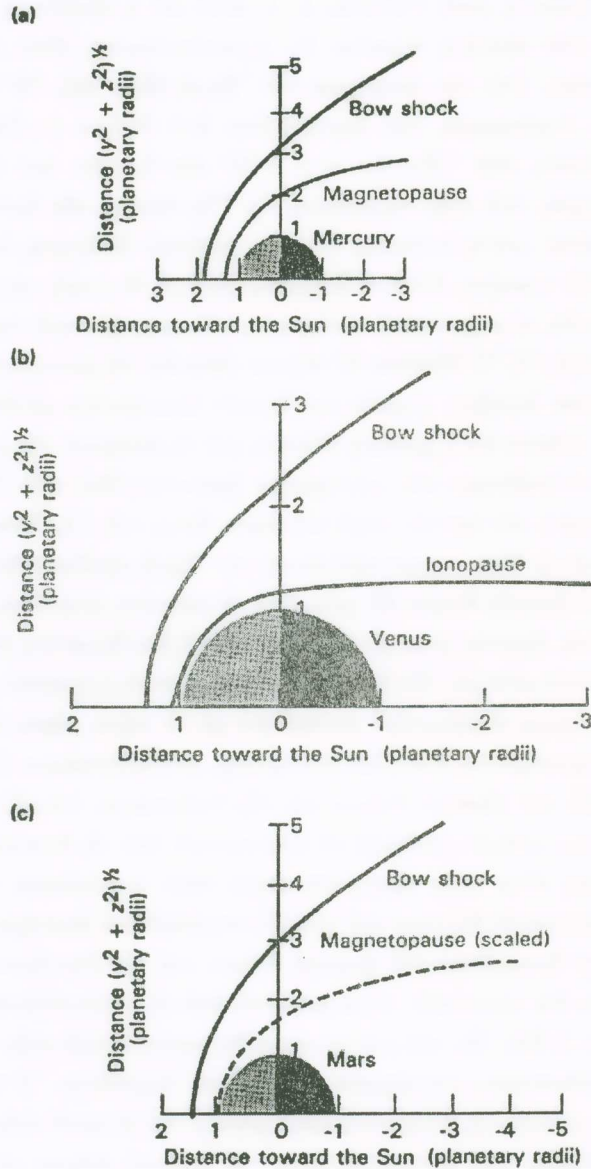
ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΙ ΠΛΑΝΗΤΕΣ

Μια βαρυσήμαντη εξέλιξη στις γνώσεις μας για τὸν πλανητικὸ μαγνητισμὸ ἦταν ἡ ἀνακάλυψη ἀπὸ τὸ διαστημόπλοιο Mariner 10 ὅτι ὁ Έρμης, πὺ περιστρέφεται ἀργὰ (Πίνακας 1), ἐλάχιστα μεγαλύτερος ἀπὸ τὸ φεγγάρι τῆς Γῆς, ἔχει ἕνα φυσικὸ μαγνητικὸ πεδίο, τὸ ὁποῖο εἶναι ἡ βάση τῆς μαγνητόσφαιρας τοῦ πλανήτη [Ness, 1979]. Ἡ χαμη-

λή πλανητική μαγνητική ροπή (Πίνακας 2, σ. 242) και ή ύψηλότερη πυκνότητα του ήλιακού ανέμου στὸν πλανήτη σημαίνει ὅτι ή μαγνητόπαυση εἶναι μόλις μιὰ πλανητική ἀκτίνα πάνω ἀπὸ τὴν ἐπιφάνεια τοῦ Ἑρμῆ (Εἰκ. 5a). Ὁ Ἑρμῆς ἔχει ἐξαιρετικά λεπτὴ ἀτμόσφαιρα, ποὺ κυριαρχεῖται ἀπὸ Νάτριο ($\sim 3 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$) καὶ σὲ μικρότερη ἔκταση ἀπὸ Ὁξυγόνο $\sim (7 \times 10^3 \text{ cm}^{-3})$, κάτι ποὺ ὑποδεικνύει τὴν ἀπουσία ἰονόσφαιρας, ποὺ στὴν περίπτωση τῆς Γῆς παρέχει τὴν διεπιφάνεια μεταξὺ τῆς ὀλικῆς ἰονισμένης μαγνητόσφαιρας καὶ τῆς λιγότερο ἀγώγιμης ἀτμόσφαιρας καὶ τῆς ἐπιφάνειας τοῦ πλανήτη. Αὐτὲς οἱ διαφορές, μαζὶ μὲ τὴ μικρὴ μαγνητόσφαιρα τοῦ Ἑρμῆ, δηλώνουν ὅτι οἱ μηχανισμοὶ πλάσματος στὴ μαγνητοσφαῖρα του διαφέρουν ἀπ' αὐτοὺς γύρω ἀπὸ τὴ Γῆ. Ὁ Mariner 10 πέρασε μέσα ἀπὸ τὴ μαγνητόσφαιρα τοῦ πλανήτη καὶ ἀνίχνευσε ἐκρήξεις ψυχρῶν καὶ θερμῶν ἡλεκτρονίων μὲ ἐνέργειες περίπου $< 35 \text{ keV}$. Εἶναι πιθανὸν ὅτι ή χρονικὴ κλίμακα γιὰ τὴ δυναμικὴ τῆς μαγνητόσφαιρας εἶναι μικρὴ, μὲ τὸ ἰσοδύναμο τῶν μαγνητικῶν ὑποκαταιγίδων στὸν Ἑρμῆ νὰ ἐμφανίζεται στὴν κλίμακα τῶν λεπτῶν παρὰ τῶν ὥρῶν ὅπως στὴ Γῆ. Ἕνας ἰσχυρὸς ἡλιακὸς ἄνεμος μπορεῖ νὰ θέσει τὴ μαγνητόπαυση τοῦ Ἑρμῆ σχεδὸν στὴν ἐπιφάνεια τοῦ πλανήτη, ὁπότε ὁ ἡλιακὸς ἄνεμος θὰ μποροῦσε νὰ κτυπήσει ἀπευθείας τὴν ἐπιφάνεια.

Ἡ Ἀφροδίτη, ἔχοντας μελετηθεῖ γιὰ πάνω ἀπὸ δύο δεκαετίες ἀπὸ ἀμερικανικὰ καὶ σοβιετικὰ διαστημόπλοια, δὲν ἔχει ἀνιχνεύσιμο φυσικὸ μαγνητικὸ πεδίο (Πίνακας 2). Ὁ ἡλιακὸς ἄνεμος ἀλληλεπιδρᾷ κατευθεῖαν μὲ τὸ πάνω μέρος τῆς ἰονόσφαιρας τοῦ πλανήτη, σχηματίζοντας ἓνα εἶδος πλανητικῆς μαγνητόσφαιρας [Russell, 1979]. Τὸ σύνορο μεταξὺ τοῦ ἡλιακοῦ ανέμου καὶ τῆς ἰονόσφαιρας ὀνομάζεται ἰονόπαυση, τῆς ὁποίας τὸ ὕψος μπορεῖ χονδρικὰ νὰ ὑπολογιστεῖ ἀπὸ τὴ δυναμικὴ τῶν ἀερίων. Ἡ ἀλληλεπίδραση εἶναι στὴν πραγματικότητα πολὺ περισσότερο πολὺπλοκη ἀπ' αὐτὴ ποὺ οἱ ὑπολογισμοὶ δείχνουν καὶ πιθανὸν περιλαμβάνει συστήματα ἐπαγόμενων ρευμάτων καὶ τὴν διεπιφάνεια τοῦ ἡλιακοῦ ανέμου καὶ τῶν ἐπαγόμενων μαγνητικῶν πεδίων. Ὑπάρχει ἓνα κρουστικὸ κύμα μπροστὰ ἀπὸ τὴ μαγνητόπαυση τῆς Ἀφροδίτης, ὅπως δείχνει ἡ Εἰκ. 5b, καὶ μιὰ νηματοειδὴς μαγνητοσφαῖρα στὴν ἀφῆλια πλευρὰ τοῦ πλανήτη σὲ ἀποστάσεις τουλάχιστον 10 ἀκτίνων Ἀφροδίτης. Ἡ γνώση ποὺ ἀποκτήθηκε ἀπὸ τὴ μελέτῃ τῆς ἀλληλεπίδρασης μεταξὺ τοῦ ἡλιακοῦ ανέμου καὶ τῆς Ἀφροδίτης ἐφαρμόζεται στὶς ἀλληλεπιδράσεις τοῦ ἡλιακοῦ ανέμου μὲ τοὺς κομήτες, ἰδιαίτερα κατὰ τὴ διάρκεια τῶν περιηλίων περασμάτων τους, καθὼς καὶ στὶς ἀλληλεπιδράσεις τοῦ ἡλιακοῦ ανέμου μὲ τοὺς δορυφόρους τοῦ Κρόνου, τὸν Τιτάν, καὶ τοῦ Ποσειδώνα, τὸν Τρίτωνα, ποὺ καὶ οἱ δύο ἔχουν ἀτμόσφαιρα ἀλλὰ ὄχι ἀνιχνεύσιμο μαγνητικὸ πεδίο [Connerney and Ness, 1988, Krimigis, 1990].

Ἡ μαγνητόσφαιρα τοῦ Ἄρη δὲν ἔχει κατανοηθεῖ καλὰ, παρόλο ποὺ ἀμέτρητα διαστημόπλοια ἔχουν πᾶσι στὸν πλανήτη [Gombosi, 1993]. Ὑπάρχουν τῶρα φανερὲς



Εικόνα 5. Έγκάρσια τομή μαγνητοσφαιρών που δείχνει τη μορφή και θέση του κρουστικού μετώπου και της μαγνητόπαυσης. Οι καμπύλες αντιπροσωπεύουν τις μέσες θέσεις και τα σχήματα του κρουστικού μετώπου και της μαγνητόπαυσης α) του Έρμη, b) της Αφροδίτης και c) του Άρη. Και οι τρεις πλανήτες σχεδιάστηκαν στην κλίμακα απόστασης για σύγκριση. Ο πίνακας 1 υποδεικνύει τις τιμές των πλανητικών ακτίνων (Krimigis, 1981).

ἀποδείξεις ἐνὸς κρουστικοῦ μετώπου, ὅπως εἶναι σχεδιασμένο στὴν Εἰκ. 5c, ἀλλὰ δὲν ὑπάρχει συμφωνία στὴν ἔνταση τοῦ ὅποιου μαγνητικοῦ πεδίου. Ὑπάρχουν ἐνδείξεις πὼς ὁ ἥλιακὸς ἄνεμος ἀλληλεπιδρᾷ μὲ τὴν ἰονόσφαιρα στὸ ἀνώτερο τμῆμα τῆς ἀραιῆς ἀτμόσφαιρας τοῦ Ἄρη, τῆς ὁποίας ἡ πίεση στὴν ἐπιφάνεια τοῦ πλανῆτη εἶναι μόνο 5 περίπου mbars. Δὲν ὑπάρχουν πληροφορίες γιὰ τὸ ἂν ἡ ἀλληλεπίδραση εἶναι κανονικὴ ἢ ἂν μπορεῖ νὰ ὑπάρχει μαγνητόπαυση κάτω ἀπὸ κάποιες συνθῆκες ἥλιακοῦ ἀνέμου. Ἡ φύση τῆς ἀλληλεπίδρασης μεταξὺ τοῦ ἥλιακοῦ ἀνέμου καὶ τῆς ἰονόσφαιρας εἶναι βασικὴ γιὰ τὴν κατανόηση τῆς ἐξέλιξης τῆς ἀτμόσφαιρας τοῦ Ἄρη. Ἄν ὁ Ἄρης δὲν ἔχει οὐσιαστικὸ μαγνητικὸ πεδίο εἶναι πιθανὸ ὅτι ὁ ἥλιακὸς ἄνεμος ἔχει «συλῆσει» ἢ «λεηλατήσει» τὰ συστατικὰ τῆς ἀτμόσφαιρας, ὁδηγώντας στὴ σημερινή ἀραιή ἀτμόσφαιρα. Στὴν πραγματικότητά μὲ ρυθμὸ ἀπωλειῶν 1 kg/s, ποὺ βρέθηκε ἀπὸ τὸ διαστημόπλοιο Phobos, τὸ περιεχόμενο ὀξυγόνου μιᾶς ἀτμόσφαιρας 7mbars θὰ ἐξέλιπε σὲ $<10^8$ χρόνια [Zakharov, 1992].

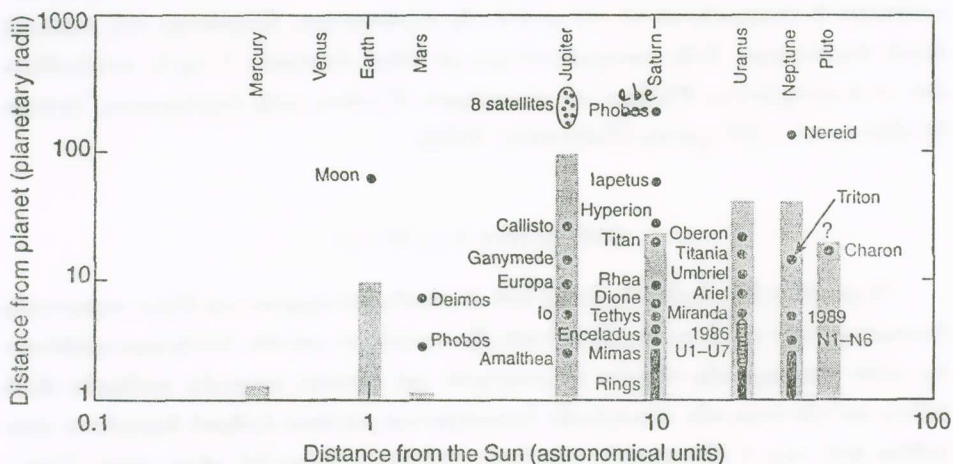
ΕΞΩΤΕΡΙΚΟΙ ΠΛΑΝΗΤΕΣ

Ἔχει πλέον ἐμπεδωθεί ὅτι ἐκτὸς ἀπὸ τὸ μέγεθος, ὑπάρχουν καὶ ἄλλες σημαντικὲς διαφορὲς μεταξὺ τῶν ἐσωτερικῶν καὶ τῶν ἐξωτερικῶν πλανητῶν. Αὐτὲς περιλαμβάνουν ὅχι μόνο τὴν παρουσία πυκνῶν ἀτμοσφαιρῶν καὶ ἐντόνων καιρικῶν συνθηκῶν ἀλλὰ ἐπίσης καὶ τὴν παρουσία πλανητικῶν δακτυλίων καὶ μεγάλου ἀριθμοῦ δορυφόρων στὸν καθένα ἀπὸ τοὺς 4 ἐξωτερικοὺς πλανῆτες, ποὺ ἔχουν ἐρευνηθεῖ μέχρι τώρα. Ὅπως δείχνει ἡ Εἰκ. 6, στερεὰ ὕλικά στὴ μορφή δακτυλίων καὶ φεγγαριῶν βρίσκονται βυθισμένα βαθιὰ μέσα στὶς μαγνητόσφαιρες τοῦ Δία, τοῦ Κρόνου, τοῦ Οὐρανοῦ καὶ τοῦ Ποσειδώνα. Φυσικὰ τὸ φεγγάρι τῆς Γῆς βρίσκεται μέσα στὴ μαγνητοσφαίρα γιὰ λίγες μέρες κάθε 28 μέρες. Πάντως δὲν ἔχουμε μέχρι τώρα διακρίνει σημαντικὴ σεληνιακὴ ἐπίδραση στὴ γεωμαγνητικὴ δραστηριότητα (ἢ τὸ ἀντίστροφο). Στὴ μικρὴ μαγνητόσφαιρα τοῦ Ἄρη, τὰ δύο φεγγάρια του, ὁ Φόβος καὶ ὁ Δεῖμος, περιστασιακὰ βρίσκονται μέσα στὴ μαγνητοσφαίρα του, ἀλλὰ αὐτὰ τὰ μικρὰ βραχώδη σώματα δὲ θὰ ἔχουν σημαντικὴ ἐπιρροή στὴ δυναμικὴ τοῦ πλάσματος.

Ἀντιθέτως, οἱ Γαλιλαϊκοὶ δορυφόροι παίζουν σημαντικὸ ρόλο στὴν τοπικὴ διαμόρφωση τῶν ροῶν σωματιδίων γύρω ἀπὸ τὸ Δία καὶ συνεισφέρουν στὸν πληθυσμὸ ἰόντων στὴ μαγνητόσφαιρα αὐτοῦ τοῦ πλανῆτη. Τὰ φεγγάρια καὶ οἱ δακτύλιοι τοῦ Κρόνου βοηθοῦν στὴν ἐκκένωση τῶν πληθυσμῶν τῶν ἐνεργειακῶν σωματιδίων στὴ μαγνητόσφαιρα τοῦ καθενὸς καὶ ἐπίσης εἶναι πηγὲς χαμηλῆς ἐνέργειας ἰόντων, ὅπως ὀξυγόνου καὶ πιθανὸν νεροῦ. Ὁ Τιτάνας μπορεῖ νὰ εἶναι μιὰ σημαντικὴ πηγὴ πλάσματος γιὰ τὴν ἐξωτερικὴ μαγνητόσφαιρα τοῦ Κρόνου. Παρόμοια φαινόμενα βρί-

σκονται, σέ σχέση με τούς δορυφόρους καί τούς δακτυλίους, καί στή μαγνητόσφαιρα τοῦ Οὐρανοῦ. Ἐπιπλέον, στήν περίπτωση τοῦ Ποσειδῶνα, ὄχι μόνο οἱ δακτύλιοι παίζουσι σημαντικὸν ρόλον στὸν περιορισμὸ τῶν μαγνητοσφαιρικῶν σωματιδιακῶν πληθυσμῶν κοντὰ στὸν πλανήτη ἀλλὰ ἐπίσης τὸ φεγγάρι Τρίτων χρησιμεύει ὡς πηγὴ πλάσματος ὡς πρὸς τὸ ἐξωτερικὸν τμήμα τῆς μαγνητόσφαιρας τοῦ Ποσειδῶνα [Mauk et al., 1995].

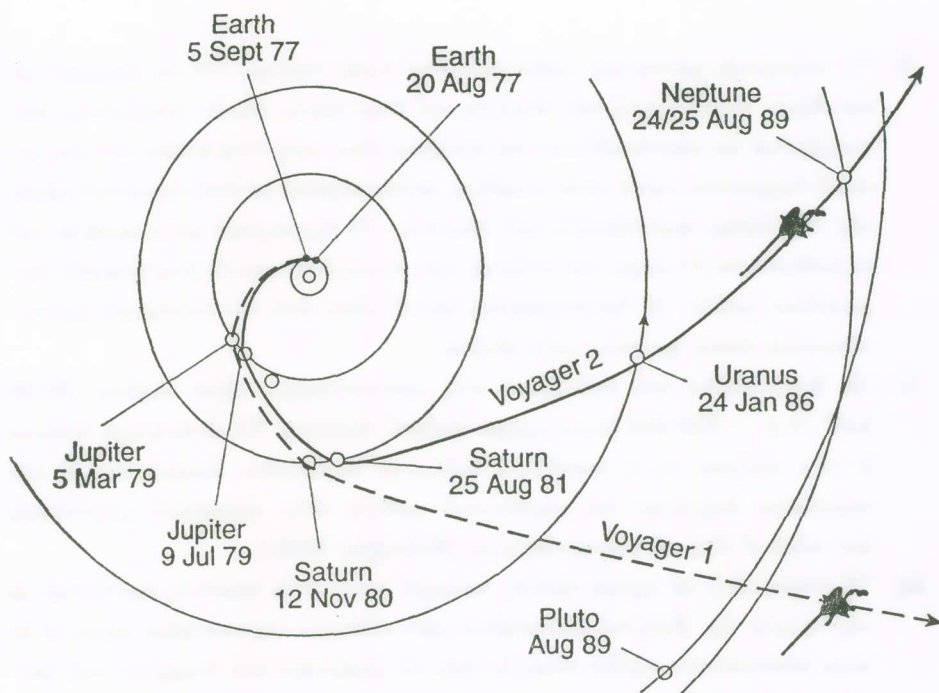
Ἡ ἀρχικὴ ἐξερεύνηση τοῦ Δία ἔγινε ἀπὸ τὰ διαστημόπλοια Pioneer 10 καὶ 11 στὶς ἀρχὲς τῆς δεκαετίας τοῦ '70, ἐνῶ ἡ πρώτη ἐξερεύνηση τῆς μαγνητόσφαιρας τοῦ



Εἰκόνα 6. Μεγέθη μαγνητοσφαιρῶν, θέσεις δορυφόρων καὶ πλανητικὲς τροχιακὲς ἀκτίνες. Ἡ κάθετη στήλη ἀντιπροσωπεύει τὴν ἀπόσταση ἀπὸ τὸ κέντρο ἐνὸς πλανήτη μέχρι τὸ πρὸς τὸν ἥλιο σύνορον τῆς μαγνητόσφαιράς του, σὲ μονάδες τῆς πλανητικῆς του ἀκτίνας. Τὸ μέγεθος τῆς μαγνητόσφαιρας γιὰ τὸν Ποσειδῶνα εἶναι κατὰ προσέγγιση (ὅπως τροποποιήθηκε ἀπὸ τοὺς Lanzerotti καὶ Krimigis, 1985).

Κρόνου ἔγινε ἀπὸ τὸν Pioneer 11 τὸ 1979. Ἡ ὁλοκληρωμένη ἐξερεύνηση τοῦ ἐξωτερικοῦ πλανητικοῦ συστήματος σὲ ὅλο του τὸ μέγεθος, συμπεριλαμβάνοντας τὴ μαγνητόσφαιρα, ἔγινε ἀπὸ τὰ διαστημόπλοια Voyager 1 καὶ 2 μεταξὺ τοῦ 1979 καὶ τοῦ 1989. Οἱ τροχίες τῶν δύο Voyager φαίνονται στήν Εἰκ. 7. Καὶ οἱ δύο ἐκτοξεύτηκαν τὸ 1977, συνάντησαν τὸ Δία τὸ 1979 καὶ τὸν Κρόνον τὸ 1980 καὶ τὸ 1981 ἀντίστοιχα γιὰ τὸν Voyager 1 καὶ τὸν 2. Οἱ κοντινὲς διελεύσεις τοῦ Voyager 1 ἀπὸ τὸν Κρόνον καὶ τὸν Τιτᾶνα τὸ 1980 ὁδήγησαν σὲ μιὰ τροχιά διαφυγῆς ἀπὸ τὸ ἡλιακὸ σύστημα σὲ σχετικὰ ὑψηλὰ πλάτη πάνω ἀπὸ τὴν ἐκλειπτικὴν μετὰ τὸν Voyager 1 σὲ μιὰ ἀπόσταση ἐπὶ τοῦ παρόντος περίπου 64 AU, (1 AU = 150 ἑκατομύρια χιλιόμετρα,

ή απόσταση μεταξύ της Γῆς και τοῦ Ἡλίου), καὶ 35° βόρειο ἐκλειπτικὸ πλάτος. Ὁ Voyager 2 συνέχισε πέρα ἀπὸ τὸν Κρόνο σὲ συναντήσεις μὲ τὸν Οὐρανὸ τὸ 1986 καὶ τὸν Ποσειδῶνα τὸ 1989. Ἡ παροῦσα θέση του εἶναι ~ 50 AU καὶ 15° νότιο ἐκλειπτικὸ πλάτος.



Εἰκόνα 7. Εἰκόνα τῶν τροχιῶν τῶν δύο διαστημοπλοίων Voyager ποὺ ἐκτοξεύθηκαν τὸ καλοκαίρι τοῦ 1977, ποὺ δείχνει τὶς συναντήσεις τους μὲ τὸ Δία καὶ τὸν Κρόνο τὸ 1979, 1980 καὶ 1981 καὶ τὶς ἀκόλουθες συναντήσεις μὲ τὸν Οὐρανὸ καὶ τὸν Ποσειδῶνα. Ὁ Voyager 1 εἶναι τώρα σὲ μιὰ ἀπόσταση ~ 9.8 δισεκατομμυρίων km ἀπὸ τὴ Γῆ, ἐνῶ ὁ Voyager 2 εἶναι σὲ μιὰ ἀπόσταση ~ 7.5 δισεκατομμυρίων km καὶ ὁδεύει πρὸς τὴ νότια περιοχὴ τῆς ἐκλειπτικῆς.

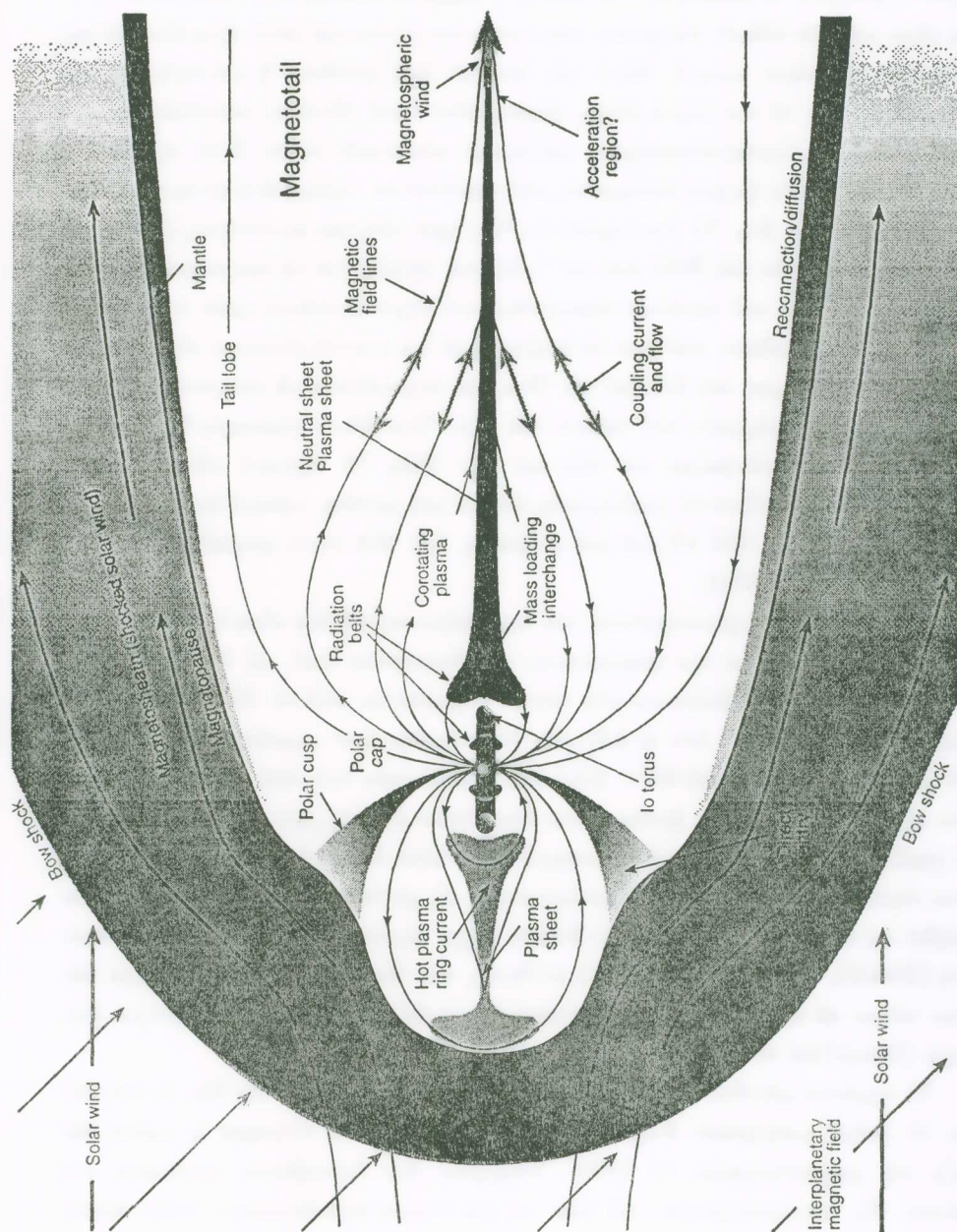
Δ Ι Α Σ

Ὁ Δίας εἶναι ὁ μεγαλύτερος πλανήτης τοῦ ἡλιακοῦ συστήματος καὶ ἔχει ἐπίσης τὴ μεγαλύτερη μαγνητόσφαιρα, ποὺ ἔχει ἀνακαλυφθεῖ μέχρι τώρα. Ἐκτείνεται σὲ περίπου 50-100 ἀκτίνες Δία (R_J) στὴν πρὸς τὸν Ἡλιο διεύθυνση, ὅπως δείχνει ἡ Εἰκ. 8, καὶ σὲ τουλάχιστον 6 AU στὴν ἀντίθετη πρὸς τὸν Ἡλιο κατεύθυνση (ἢ πρὸς τὴ μαγνητοσφαῖρα) [Krimigis, 1981]. Ἄν ἡ μαγνητόσφαιρα τοῦ Δία ἦταν ὁρατὴ ἀπὸ τὴ Γῆ θὰ ἔδινε μεγαλύτερη εἰκόνα στὸν οὐρανὸ ἀπ' ὅ,τι ὁ Ἡλιος, ἀκόμη καὶ ἂν εἶνα

4 φορές μακρύτερα από τη Γῆ. Τὰ σχετικά μεγέθη τοῦ Ἡλίου καὶ τῆς μαγνητόσφαιρας τοῦ Δία φαίνονται στὴν Εἰκόνα. Ὁ Voyager χρειάστηκε, ταξιδεύοντας μὲ 35.000 km/h περίπου μέση ταχύτητα, πάνω ἀπὸ 32 ἡμέρες γιὰ νὰ διασχίσει ἓνα τμήμα τῆς μαγνητόσφαιρας. Ὑπάρχουν ἀρκετὰ φαινόμενα ποὺ ἐπισημαίνονται στὴν Εἰκ. 8, ποὺ ἀξίζουν ἀναφορᾶς.

- i) Τὸ πλανητικὸ μαγνητικὸ πεδίο πάλ्लεται κατὰ περίπου 10^0 σὲ ἀναφορὰ μὲ τὸν ἄξονα περιστροφῆς τοῦ πλανήτη καὶ ἓνας παχὺς φλοιὸς πλάσματος, ποὺ ἀναφέρεται ὡς μαγνητοδίσκος καὶ συνήθως εἶναι στὴν ἴδια εὐθεία τοῦ μαγνητικοῦ ἰσημερινοῦ κοντὰ στὸν πλανήτη, περιστρέφεται μὲ ἓνα σημαντικὸ μέρος τῆς ταχύτητας περιστροφῆς τοῦ πλανήτη. Ἡ περιστροφή αὐτὴ παράγει μιὰ περιοδικότητα 10 ὥρῶν στὸ πλάσμα καὶ στοὺς πληθυσμοὺς ἐνεργειακῶν σωματιδίων, καθὼς τὸ διαστημόπλοιο περνᾷ μέσα ἀπὸ τὴν πλανητικὴ μαγνητόσφαιρα, ὅπως φαίνεται στὴν εἰκόνα.
- ii) Ἡ θερμοκρασία τοῦ πλάσματος στὴ μαγνητόσφαιρα εἶναι περίπου 20-40 keV (π.χ. $\sim 200-450$ ἑκατομμύρια βαθμοὶ Kelvin). Τὸ ἀντίστοιχο πλάσμα β (ποὺ ὀρίζεται ὡς ἡ πυκνότητα ἐνέργειας σωματιδίου διαιρούμενη μὲ τὴν πυκνότητα ἐνέργειας τοῦ μαγνητικοῦ πεδίου) εἶναι σημαντικὰ μεγαλύτερο ἀπ' αὐτὸ σ' ὅλη τὴ μαγνητόσφαιρα [Krimigis, 1981].
- iii) Ἡ στρογγυλὴ, σὲ σχῆμα donut, περιοχὴ κοντὰ στὸν πλανήτη σχετίζεται μὲ τὴν τροχιά τῆς Ἡῶς καὶ ἀποτελεῖται ἀπὸ οὐδέτερα καὶ ἰονισμένα ἀέρια τὰ ὁποῖα ἐκπέμπονται σχεδὸν συνεχῶς ἀπὸ τὰ ἡφαίστεια ποὺ ὑπάρχουν στὸ φεγγάρι αὐτὸ τοῦ Δία. Τὸ ἀέριο αὐτὸ ἀποτελεῖται κυρίως ἀπὸ ὀξυγόνο, θεῖο καὶ οὐδέτερα ἰόντα νατρίου καὶ πυριτίου καὶ ἀποτελεῖ τὴν πρὶν σημαντικὴ πηγὴ πληθυσμοῦ πλάσματος γιὰ ὁλόκληρη τὴ μαγνητόσφαιρα.
- iv) Τὸ σύνоро τῆς μαγνητόπαυσης στὸν Δία δὲν ἐμφανίζεται νὰ εἶναι τόσο ὁμαλὸ ὅπως αὐτὸ τῆς Γῆς καὶ ὑπάρχουν ἐνδείξεις ὅτι μερικὲς φορές μεγάλες ποσότητες μαγνητοσφαιρικοῦ πλάσματος διαφεύγουν στὴν περιοχὴ μπροστὰ ἀπὸ τὸν πλανήτη [Zwickl et al., 1981]. Στὴν πραγματικότητα ἡ πλανητικὴ μαγνητόπαυση ποικίλλει σὲ ἀπόσταση ἀπὸ 60-100 R_J (Πίνακας 2) ὡς ἀποτέλεσμα τῆς δυναμικῆς ἰσορροπίας μεταξὺ τῆς πίεσης ποὺ ἐφαρμόζεται ἀπὸ τὸν ἡλιακὸ ἄνεμο καὶ αὐτὴ τοῦ θερμοῦ πλάσματος ποὺ περιορίζεται μέσα στὴ μαγνητόσφαιρα τοῦ πλανήτη.

Μέσα ἀπὸ τὴν ἀκατάπαυστη ἡφαιστειογένειά της ἡ Ἡὼ τροφοδοτεῖ ἀέρια μὲ ρυθμὸ περίπου ἓνα τόνο ἀνὰ δευτερόλεπτο. Αὐτὰ τὰ ἀέρια —κυρίως διοξείδιο τοῦ πυ-

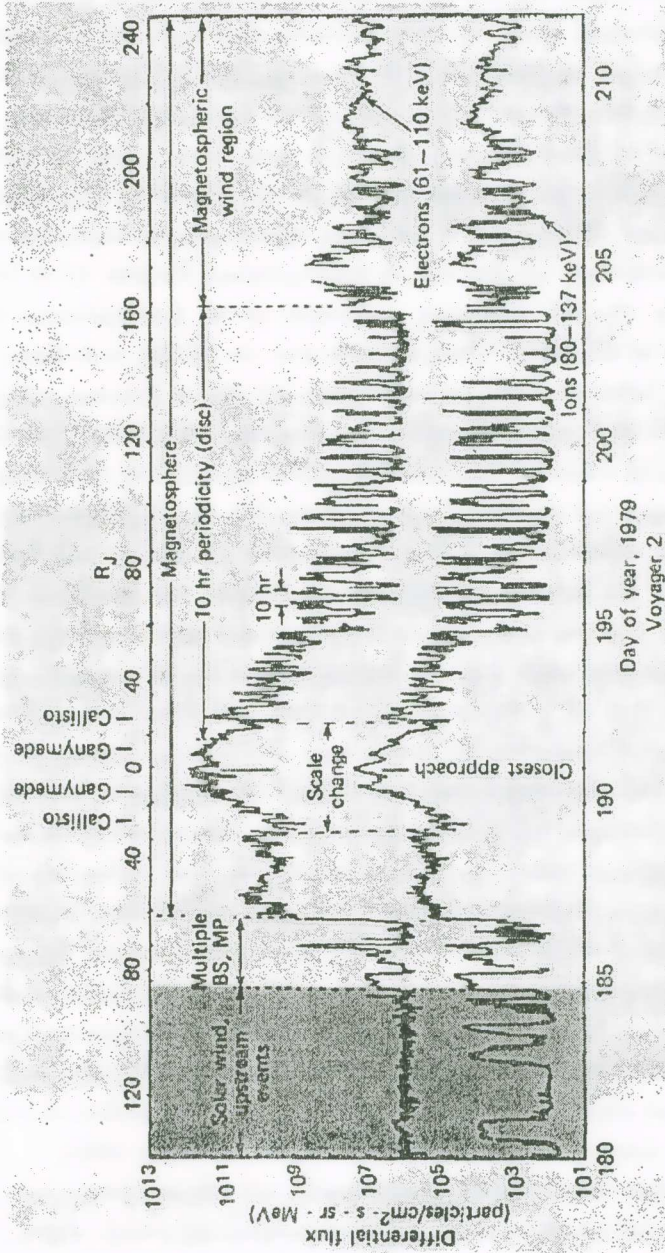


Εικόνα 8. Σχηματική παράσταση της μαγνητόσφαιρας του Δία (NAS/NRC, 1994). Τò διαστημόπλοιο Voyager εισήλθε στη μαγνητόσφαιρα στην περίν-τό-μεσημέρι περιοχή και βγήκε από τις πρώτες περιώες περιοχές. Τò δυτικό τμήμα της μαγνητόσφαιρας εξερευνήθηκε από τò διαστημόπλοιο Ulysses τò Φεβρουάριο τού 1992. Οι λεπτομέρειες της εικόνας άναλυνται στο κείμενο.

ριτίου—, μπορούν να εισέλθουν στη μαγνητόσφαιρα άπειθείας στην επιφάνεια ή, όπως είναι και πιο πιθανό, παγώνουν πάνω στην επιφάνεια και μετά εξαχνίζονται και στέλνονται απότομα μακριά. Μετά τον ιονισμό από φωτόνια ή μαγνητοσφαιρικά σωματίδια, αυτά τα νέα βαριά ιόντα, κυρίως νάτριο και όξυγόνο, παγιδεύονται μαγνητικά από το συμπεριστροφόμενο μαγνητικό πλανητικό πεδίο. Στην τροχιά της 'Ηώς ένα έλικοειδές ψυχρού πλάσματος, που αποτελείται κυρίως από νάτριο και όξυγόνο, περικλείει το Δία. Το διαστημόπλοιο Voyager μέτρησε πυκνότητες ιόντων στο έλικοειδές ύψηλές ως και 2000 ανά cm^{-3} , αρκετά ύψηλές για να επηρεάσουν τη διάδοση ραδιοκυμάτων και κυμάτων πλάσματος, που δημιουργούνται μέσα στην τροχιά της 'Ηώς. 'Επιπρόσθετα, φαίνεται να υπάρχει εκεί ένα κλειστό αγωγίμο κύκλωμα μεταξὺ της 'Ιονόσφαιρας τοῦ Δία καὶ τὴν 'Ηώ, που περιορίζεται σὲ ρεύματα που ρέουν κατὰ μῆκος τῶν γραμμῶν τοῦ πεδίου τοῦ Δία. 'Ενα τέτοιο κύκλωμα θὰ συμπληρωνόταν ἀπὸ τὶς ἰονόσφαιρες τοῦ Δία καὶ τῆς 'Ηώς. 'Η σχετικὴ κίνηση μεταξὺ τῆς 'Ηώς καὶ τοῦ ὑπόλοιπου κυκλώματος ἐπάγει μιὰ μεγάλη καθαρὰ ἡλεκτρομαγνητικὴ δύναμη περίπου 600 kV, μὲ ροὴ ρεύματος 2-3 MA ὅπως μετρήθηκε ἀπὸ τὸν Voyager 1 [Ness, 1979].

'Ενα θαυμαστὸ χαρακτηριστικὸ τοῦ περιβάλλοντος τοῦ Δία εἶναι ὁ μεγάλος ἀριθμὸς ἐνεργειακῶν ιόντων καὶ ἡλεκτρονίων, που βρίσκονται ἐκεῖ καὶ διαφεύγουν ἀπὸ τὴ μαγνητόσφαιρα. Οἱ ἐνέργειες τῶν ιόντων κυμαίνονται ἀπὸ τὰ 30 keV μέχρι καὶ πάνω ἀπὸ τὰ 100 MeV, ἐνῶ οἱ ἐνέργειες τῶν ἡλεκτρονίων κυμαίνονται ἀπὸ μερικὰ keV μέχρι πάνω ἀπὸ τὰ 40 MeV. Αὐτὸ που πιστευόταν πρὶν ἀπὸ τὸ 1974 ἦταν ὅτι εἶναι ἡλεκτρόνια κοσμικῶν ἀκτίνων που διαφεύγουν ἀπὸ τὴ μαγνητόσφαιρα τοῦ Δία καὶ γεμίζουν ὁλόκληρο τὸ ἡλιακὸ σύστημα [Pyle and Simpson, 1977]. 'Ενεργειακὰ ιόντα περίπου $>30 \text{ keV}$ ἐπίσης διαφεύγουν ἀπὸ τὴ μαγνητόσφαιρα καὶ ἔχουν παρατηρηθεῖ ὡς διακριτὲς αὐξήσεις στὴν ἔνταση μέχρι περίπου τὰ 0.7 AU ἀπὸ τὸν πλανήτη [Zwickl, 1981]. Μετρήσεις τῆς σύνθεσης τῶν ιόντων στὴ μαγνητόσφαιρα δείχνουν νάτριο σὲ πολὺ μεγαλύτερη περιεκτικότητά ἀπ' ὅ,τι στὸ ἡλιακὸ σύστημα ὁλόκληρο [Hamilton et al. 1981].

Τὸ τεράστιο μέγεθος τῆς μαγνητόσφαιρας τοῦ Δία φαίνεται στὴν Εἰκ. 9, που δείχνει τὸ ρυθμὸ μετρήσεων ἀνιχνευτῶν στὸ διαστημόπλοιο Voyager 2, καθὼς διέσχισε τὴ μαγνητόσφαιρα τὸ 1979. 'Υπάρχουν δύο ἀσυνήθιστα φαινόμενα στὸ πλάσμα τῆς μαγνητόσφαιρας τοῦ Δία: α) μιὰ 10ωρη περιοδικότητα στὴν πυκνότητα πλάσματος, που σχετίζεται μὲ τὴν περιστροφή τοῦ πλανήτη αὐτοῦ, φάνηκε πολὺ καθαρὰ κατὰ τὴ διάρκεια τῆς πρὸς τὰ ἔξω τροχιᾶς τοῦ Voyager, β) πολλαπλὲς συναντήσεις πλανητικοῦ κρουστικοῦ μετώπου καὶ μαγνητόπαυσης τόσο μέσα ὅσο καὶ ἔξω ἀπὸ τὸ σύνορο ὑποδηλώνουν μεγάλη μεταβλητότητα στὴν ἰσορροπία πιέσεως



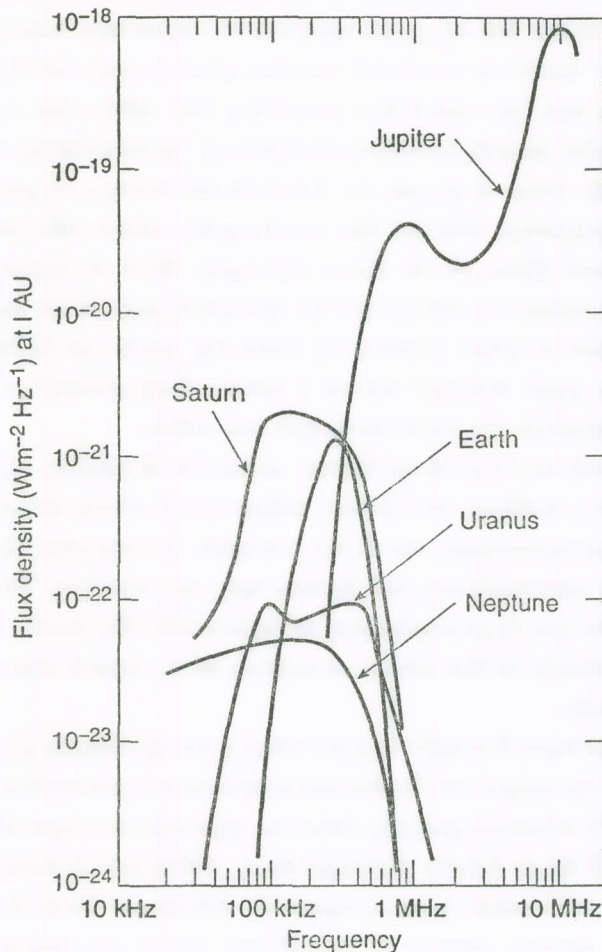
Εικόνα 9. Η μορφή του ρυθμού μετρήσεων των ιόντων που μετρήθηκε κατά τη συνάντηση του Voyager 2 με το Δία. Οι σημειώσεις BS και MP δείχνουν τη συνάντηση του διαστημοπλοίου με το τόξοειδές μέτωπο του πλανήτη και τη μαγνητόπαυση αντίστοιχα. Ο Voyager 2 πέρασε πάνω από 30 μέρες μέσα στη μαγνητόσφαιρα του Δία (Krimigis et al., 1981).

μεταξύ του ήλιακού ανέμου και του πλανητικού μαγνητικού πεδίου. Μια λεπτομερής συζήτηση του μηχανισμού αυτής της περιοδικότητας είναι πέρα από το σκοπό αυτού του άρθρου και μπορεί να βρεθεί στον Hillet et al. [1983]. Ένα προφίλ εντάσεως παρόμοιο με εκείνο των ιόντων υπάρχει και για τα ηλεκτρόνια [Krimigis, 1981]. Η σχετιζόμενη με τα ηλεκτρόνια περιοδικότητα συνεχίζεται καθώς τα ηλεκτρόνια διαφεύγουν στο διαπλανητικό μέσο και πλησιάζουν την τροχιά της Γης, όπως είπωθηκε νωρίτερα. Είναι αξιόλογο ότι η φάση της περιοδικότητας παρέμεινε σταθερή από την πρώτη συνάντηση του Δία από το διαστημόπλοιο Pioneer 10 το 1973 και συνεχίστηκε μέχρι την πιο πρόσφατη συνάντηση με το διαστημόπλοιο Ulysses το 1992 [Simpson et al., 1992]. Όπως φαίνεται από τον αριθμό, οι εντάσεις συνεχίζουν να αυξάνουν βαθιά μέσα στη μαγνητόσφαιρα του Δία με ενέργειες που φτάνουν μέχρι πάνω από 10 MeV για τα ηλεκτρόνια και πάνω από τα 100 MeV για τα ιόντα.

Αυτά τα υψηλής ενέργειας ηλεκτρόνια παράγουν μερικές από τις έντονες ραδιοεκπομπές σύγχροτρον του πλανήτη, όπως φαίνονται από τη Γη. Χάρτες των ραδιοεκπομπών από το τηλεσκόπιο μεγάλης διάταξης στο N. Μεξικό μάς επιτρέπουν να παρατηρήσουμε τις δομικές και προσωρινές αλλαγές στο έσωτερικό της μαγνητόσφαιρας του Δία για αποστάσεις ~ 3 ακτίνων Δία από το κέντρο του πλανήτη. Τα ραδιοφάσματα στην Εικ. 10 περιλαμβάνουν τις ακτινοβολίες του Δία. Αυτές εκτείνονται από τις χαμηλότερες συχνότητες, που έχουν σχέση με το φεγγάρι. Ήδη και πιθανότερα είναι το αποτέλεσμα της έντονης ηλεκτρομαγνητικής σύζευξης μεταξύ του δορυφόρου, του ελικοειδούς του πλάσματος και της πάνω ιονόσφαιρας ή ατμόσφαιρας του Δία, και μέχρι τα λίγα δέκατα των MHz, που έχουν σχέση με τις ακτινοβολίες του σύγχροτρον από υψηλής ενέργειας ηλεκτρόνια στην έσωτερική μαγνητόσφαιρα. Παρατηρούμε ότι η ακτινοβολία του Δία είναι σημαντικά πιο έντονη από ό,τι εκείνη του Ποσειδώνα, της Γης, του Ουρανού και του Κρόνου [Gurnett et al., 1995]. Άρκετοι μηχανισμοί έχουν προταθεί για να εξηγήσουν τα επιταχυνόμενα ηλεκτρόνια και ιόντα στη μαγνητόσφαιρα του Δία. Οι μηχανισμοί περιλαμβάνουν αδιαβατικές ή σχεδόν αδιαβατικές διαδικασίες, οι οποίες μπορούν, διαμέσου επαναλαμβανόμενων κύκλων, να αυξήσουν την ενέργεια ενός σωματιδίου σε εκείνη που παρατηρείται στη μαγνητόσφαιρα του Δία [Goertz 1978, Cheng 1980].

Είναι ενδιαφέρον να εκτιμηθεί η συνολική μάζα και ισορροπία ενέργειας στο γύρω από το Δία περιβάλλον μαγνητοσφαιρικό σύστημα [Krimigis et al., 1981]. Η Ήδη παράγει κατ'επίκρίση 2×10^{28} ιόντα/sec, που αντιπροσωπεύει μία εισροή ενέργειας 2×10^{19} ergs/sec. Η εισροή από το ουδέτερο νέφος στην τροχιά της Ήδης είναι περίπου όμοια. Η άνω ατμόσφαιρα του Δία συμβάλλει όπως είναι υπολογισμένο, 10^{28} ιόντα υδρογόνου ανά sec με μια ενέργεια 3×10^{21} ergs/sec που προέρχεται από την

περιφορά του Δία. Τέλος, ο ήλιακός άνεμος συνεισφέρει 10^{28} ιόντα υδρογόνου/sec και ίσως 3×10^{20} ergs/sec. Παρατηρήσεις ενεργειακών σωματιδίων υποδηλώνουν ότι η απώλεια πλάσματος διαμέσου της νυχτερινής πλευράς του μαγνητοσφαιρικού ανέμου είναι κατά προσέγγιση 2×10^{27} ιόντα/sec και 2×10^{20} ergs/sec. Ίόντα που κατακρημνίζονται για να σχηματίσουν το Σέλας, αποθηκεύουν περίπου 2×10^{21} ergs/sec. Το μέγεθος αυτών των αριθμών υποδηλώνει ότι μόνον η περιστροφή του Δία μπορεί να οδηγήσει αυτή τη γιγαντιαία μαγνητόσφαιρα. Έτσι η μαγνητόσφαιρα



Εικόνα 10. Σύγκριση του φάσματος ραδιοεκπομπής της ακτινοβολίας που φτάνει από τη Γῆ, το Δία, τον Κρόνο, τον Ουράνο και τον Ποσειδώνα, προσαρμοσμένη σε μια σταθερή απόσταση από τον πλανήτη (τροποποιημένο από τον Gurnett, 1995).

τοῦ Δία, ἡ ὁποία ὀδηγεῖται ἔσωθεν ἀπὸ τὴν περιστροφή τοῦ κεντρικοῦ σώματος καὶ τῆς ὁποίας τὸ πλάσμα ποὺ προέρχεται ἀπὸ ἐσωτερικὲς πηγές, θεωρεῖται σήμερα ὡς τὸ καλύτερο καὶ μόνο ἀνάλογο τῶν φυσικῶν διεργασιῶν ποὺ ἴσως δροῦν σὲ ἀστροφυσικὰ σώματα ὅπως οἱ παλλόμενες ραδιοπηγές (pulsars).

Κ Ρ Ο Ν Ο Σ

Εἶχε θεωρηθεῖ ὅτι ὁ Κρόνος, ὁ ὁποῖος εἶναι σὲ διπλάσια ἀπόσταση ἀπὸ τὸν ἥλιο ἀπ' ὅ,τι ὁ Δίας καὶ εἶναι παρόμοιου μεγέθους καὶ ρυθμοῦ περιστροφῆς (Πίνακας 1) θὰ μοιράζονταν πολλὰ ἀπὸ τὰ χαρακτηριστικὰ τοῦ γιγαντιαίου πλανήτη τοῦ ἡλιακοῦ συστήματος παρ' ὅλο ὅτι ἡ πυκνότητά του εἶναι μόνον ἡ μισή τοῦ Δία ($\sim 7 \text{ cm}^{-3}$), ὁ μόνος πλανήτης ποὺ ἔχει πυκνότητα μικρότερη ἀπὸ αὐτὴν τοῦ νεροῦ. Παρὰ τὶς ὁμοιότητες ὑπῆρξαν ἀρκετὲς ἐκπλήξεις σὲ σχέση μετὰ τὶς συναντήσεις τῶν Pioneer 11 καὶ τοῦ Voyager, ὅπως τὸ γεγονός ὅτι ἡ ἔνταση τοῦ πλανητικοῦ μαγνητικοῦ πεδίου ἦταν 10 φορές μικρότερη ἀπὸ τοῦ Δία, καὶ ἡ σχεδὸν τέλεια εὐθυγράμμιση τοῦ μαγνητικοῦ διπολικοῦ ἄξονα μετὰ τὸν ἄξονα περιφορᾶς. Αὐτὸ τὸ γεγονός δίνει ἔμφαση στὸ πόσο πολλὰ πρέπει νὰ μάθουμε γιὰ τὸν πλανητικὸ μαγνητισμὸ καὶ τὰ μαγνητικὰ δυναμῶ. Πράγματι τὸ μικρὸ μέγεθος τῆς διπολικῆς ροπῆς τοῦ Κρόνου δηλώνει ὅτι ὁ πλανήτης ἔχει μικρὸ ἀγώγιμο πυρήνα ἢ κάποια ἀργή μεταβολή στὸ δυναμὸ ποὺ ἐνδεχομένως ἐπηρεάζει τὸν προσανατολισμὸ τοῦ πεδίου.

Ἡ μικρὴ μαγνητικὴ ροπή τοῦ Κρόνου περιορίζει τὸ μέγεθος τῆς μαγνητόσφαιρας ὑπὸ κανονικὲς συνθῆκες τοῦ ἡλιακοῦ ἀνέμου (JGR εἰδικὴ ἔκδοση 1980, 1983). Ὅπως μετὰ τὶς μαγνητοπαύσεις τῶν ἄλλων πλανητῶν, ἡ ἐνισχυμένη πίεση τοῦ ἡλιακοῦ ἀνέμου ὥθει τὴ μαγνητόπαυση τοῦ Κρόνου πρὸς τὸν πλανήτη. Τὸ διαστημόπλοιο Voyager 2 συνάντησε τὴ μαγνητόπαυση σὲ περίπου $19.7 R_S$ (ἀκτίνα Κρόνου) ἐνῶ τὸ Voyager 1 ἀνακάλυψε τὰ ἴδια σύνορα σὲ περίπου $26 R_S$ ἀρκετὰ πέρα ἀπὸ τὴν τροχιά τῆς σελήνης Τιτάν.

Τὸ διαστημόπλοιο Voyager 1 βρῆκε ἔνδειξη γιὰ τὴν ὑπαρξὴ ψυχροῦ πλάσματος ποὺ περιβάλλει τὴν τροχιά τοῦ Τιτάν καὶ ἐκτείνεται στὴ μαγνητόπαυση τῆς προσήλιας πλευρᾶς. Τὸ πείρασμα χαμηλῆς ἐνέργειας φορτισμένων σωματιδίων LECP στὰ Voyager 1 καὶ 2 ἔδωσε ἔνδειξη (Krimigis et al., 1983) γιὰ τὴν ὑπαρξὴ θερμοῦ πλάσματος στὴ μαγνητόσφαιρα μετὰ χαρακτηριστικὲς ἐνέργειες $\sim 20\text{--}55 \text{ keV}$. Αὕτῃ ἡ θερμοῦ πλάσματος περιοχὴ φαίνεται νὰ περιορίζεται μετὰ τῶν τροχιῶν τοῦ Τέθι καὶ τῆς Ρέας καὶ πιθανὸν περικυκλώνει τὸν πλανήτη. Ὑπάρχει ἐπίσης ἐπαρκὲς θερμὸ πλάσμα στὴν ἐξωτερικὴ μαγνητόσφαιρα ὅπου ὁ λόγος πίεσης β εἶναι $\sim 0,5$ ἕως 1, γιὰ νὰ

υποδείξει ότι ή άλληλεπίδραση μεταξύ του ήλιακού ανέμου και του Κρόνου είναι περισσότερο όμοια με την άλληλεπίδραση στον Δία παρά στη Γή ιδιαίτερα κατά τη συνάντηση του Voyager 2. Πρέπει να ληφθεϊ ύπ' όψη εντούτοις ότι τὰ τρία περάσματα από τον πλανήτη ήταν ανεπαρκή για να χαρακτηρίσουν τις «συνήθειες» συνθήκες πλάσματος ή τη δυναμική της μαγνητόσφαιρας. Αυτό ελπίζεται να επιτευχθεϊ κατά τη διάρκεια της αποστολής Cassini όπου το διαστημόπλοιο θα μπει σε τροχιά γύρω από τον Κρόνο και θα εξερευνήσει το περιβάλλον για μια περίοδο 4 ετών περίπου.

Όπως έχει υποδειχθεϊ νωρίτερα, μοναδικό χαρακτηριστικό των μαγνητοσφαιρών των έξωτερικών πλανητών, είναι το γεγονός ότι άρκετοί δορυφόροι είναι ένσωματωμένοι σ' αυτές. Στην περίπτωση του Δία οί δορυφόροι είναι πηγές πλάσματος, για παράδειγμα τὰ ήφαιστεια της Ιούς και οί έκτινάξεις ύλης από την Ευρώπη. Δέν υπάρχει καλύτερο παράδειγμα τέτοιων άλληλεπιδράσεων από την περίπτωση του Κρόνου όπου, επιπρόσθετα στους δορυφόρους, υπάρχουν επίσης άρκετοί δακτύλιοι, περιλαμβανομένου του δακτυλίου E, ή άκτίνα του όποιου είναι ~4-6 R_S. Οί πληθυσμοί των ενεργειακών σωματιδίων μειώνονται στην περιοχή που μοιράζονται ο δακτύλιος E και οί δορυφόροι Διώνη και Τέθης. Αυτό μπορεί να όφείλεται εν μέρει στην άπορρόφηση σωματιδίων από το ύλικό του δακτυλίου και των φεγγαριών που είναι ένσωματωμένο στη μαγνητόσφαιρα. Έάν τὰ σωματίδια του δακτυλίου E άπορροφούν χαμηλής ενέργειας ιόντα με την πρόσκρουση, τὰ ιόντα θα έκτινάξουν ύλη από τους κόκκους. Βασιζόμενος σ' αυτή τη διαδικασία μπορεί κανείς να υπολογίσει ότι εάν ο δακτύλιος E άποτελεϊται από 10 micron σωματίδια, και τὰ προσκρούοντα ιόντα είναι πρωτόνια, θα επίζησει το πολύ ~10⁵ έτη. Είναι έκπληκτικό ότι υπάρχουν πηγές χαμηλής ενέργειας ιόντων (πιθανόν O⁺) και ήλεκτρονίων στο έσωτερικό της τροχιάς του Έγκέλαδου. Η φύση της πηγής δέν είναι άκόμη γνωστή.

Μια από τις σημαντικές ανακαλύψεις του Pioneer 11 και Voyager 1 ήταν ή παρουσία ύψηλης ενέργειας πρωτονίων και ήλεκτρονίων (κλίμακα 50 MeV) στην έσωτερική μαγνητόσφαιρα του πλανήτη. Πιστεύεται ότι ή προέλευση τέτοιων ύψηλης ενέργειας σωματιδίων όφείλεται στο γεγονός ότι γαλαξιακές κοσμικές άκτίνες έχουν εύκολη πρόσβαση στη μαγνητόσφαιρα του Κρόνου, στις σελήνες και τους δακτυλίους εξ αίτίας της μικρής μαγνητικής ροπής του πλανήτη και μπορεί να άλληλεπιδράσουν και να παράγουν νετρόνια από αυτές τις ύλες. Τέτοια νετρόνια άποσυντίθενται σε πρωτόνια και ήλεκτρόνια άμφότερα παγιδευμένα στο πλανητικό μαγνητικό πεδίο. Πολλά πάντως από τὰ πρότυπα άπορρόφσεως αυτών των μορίων στην έσωτερική μαγνητόσφαιρα δέν είναι εύκολο να γίνουν κατανοητά συσχετιζόμενα με τήλ άπορρόφηση των πλανητικών σεληνών [Carbary et al., 1983]. Οί έπιπτώσεις αυτής της έλλειψης της θεωρητικής κατανόησης μπορεί να επηρεάσει την έπιλογή για την

τροχιά παρεμβολής του διαστημοπλοίου Cassini στὸν Κρόνο, ὅταν αὐτὸ θὰ φθάσει ἐκεῖ τὸ 2004.

Ο Υ Ρ Α Ν Ο Σ

Μία ἀπὸ τὶς πιὸ πολὺπλοκες μαγνητόσφαιρες στὸ ἡλιακὸ σύστημα εἶναι ἐκείνη ποὺ περιβάλλει τὸν Οὐρανό, ὁ ὁποῖος εἶναι μοναδικὸς μεταξὺ τῶν πλανητῶν στὸ ὅτι ὁ ἄξονας περιστροφῆς του βρίσκεται σχεδὸν στὸ ἐπίπεδο τῆς τροχιάς του γύρω ἀπὸ τὸν ἥλιο μᾶλλον παρὰ κάθετα πρὸς αὐτὸ (Πίνακας 2). Πρὶν ἀπὸ τὴν 24ῃ Ἰανουαρίου 1986 θεωροῦνταν ὅτι ὁ διπολικὸς ἄξονας τοῦ μαγνητικοῦ πεδίου τοῦ Οὐρανοῦ εἶναι πιθανότατα περίπου παράλληλος μὲ τὸν ἄξονα περιστροφῆς, ὅπως συμβαίνει μὲ τοὺς ἄλλους πλανῆτες. Ἐὰν αὐτὸ ἦταν ἔτσι, ὁ ἡλιακὸς ἄνεμος θὰ ἔπεφτε σὲ διπολικὸ μαγνητικὸ πεδίο προσανατολισμένο 90° πρὸς ἐκεῖνο τῶν ἄλλων πλανητικῶν μαγνητοσφαιρῶν.

Ἐπιπλέον, τὸ χρόνο συναντήσεως τοῦ Voyager 2 ὁ ἄξων περιστροφῆς τοῦ πλανήτη ἔδειχνε περίπου πρὸς τὸν ἥλιο, ἔτσι ὥστε ὁ ἡλιακὸς ἄνεμος νὰ προσέπιπτε σὲ μιὰ «πολική» περιοχὴ τοῦ πλανήτη. Αὐτὲς οἱ ὑποθέσεις, βασισμένες στὴ γνώση μας γιὰ τὴ μαγνητόσφαιρα τῶν ἄλλων πλανητῶν, ἀποδείχθηκαν λανθασμένες.

Τὸ μαγνητικὸ πεδίο τοῦ Οὐρανοῦ μετρήθηκε ἀπὸ τὸν Voyager νὰ ἔχει κλίση μὲ γωνία $\sim 60^\circ$ πρὸς τὸν ἄξονα περιστροφῆς, ἡ μεγαλύτερη τέτοια κλίση ἀπὸ ὁποιοδήποτε ἄλλο πλανήτη καὶ παρόμοια μὲ τοὺς πλάγιους περιστροφεῖς ποὺ συνάγονται ἀπὸ μερικὰ ἀστροφυσικὰ ἀντικείμενα (Πίνακας 2) [Ness et al., 1986]. Ἡ διπολικὴ ροπὴ εἶναι μετατοπισμένη κατὰ $\sim 0.3 R_U$ (Ἀκτίνες Οὐρανοῦ) κατὰ μῆκος τοῦ ἄξονα τῆς πλανητικῆς περιστροφῆς πρὸς τὴ νυχτερινὴ πλευρὰ τοῦ πλανήτη. Ἡ ἔνταση τοῦ ἰσημερινοῦ πεδίου ~ 0.23 Gauss εἶναι κάπως μικρότερη ἀπὸ ἐκείνη τοῦ Κρόνου καὶ ἡ ἀπόσταση stand-off τῆς μαγνητόπαυσης σὲ ὅρους πλανητικῶν ἀκτίνων (Πίνακας 2) εἶναι ἐπίσης παρόμοια. Μέσα στὴ μαγνητόσφαιρα εἶναι παγιδευμένοι μεγάλοι ἀριθμοὶ ἐνεργειακῶν ἠλεκτρονίων ἀλλὰ σχετικὰ χαμηλότεροι ἀριθμοὶ ἐνεργειακῶν ἰόντων, ὅταν συγκριθοῦν μὲ τὸ Δία καὶ τὸν Κρόνο. Τὸ χαμηλῆς πυκνότητος ($\sim 1 \text{ cm}^{-3}$) πλάσμα ἀποτελεῖται κυρίως ἀπὸ πρωτόνια [Bridge et al., 1986] μὲ μιὰ ὑπερβολικὰ χαμηλὴ (10^{-4}) ἀναλογία ἥλιου πρὸς Πρωτόνια στὶς μέγιστες (MeV) ἐνέργειες (Krimigis et al., 1986a). Ἡ ραδιενέργεια παγιδευμένη μέσα στὸ μαγνητικὸ πεδίο τοῦ Οὐρανοῦ εἶναι ἐπηρεασμένη σημαντικὰ ἀπὸ τὴν ἀπορρόφηση ἀπὸ τοὺς κυριότερους δορυφόρους τοῦ Οὐρανοῦ.

Πλανητικὲς ραδιοεκπομπὲς ποὺ ἐκτείνονται 30-800 KHz βρίσκονται νὰ εἶναι ἐντονότερες στὴ νυχτερινὴ πλευρὰ τοῦ πλανήτη [Warwick et al., 1986] ἐνῶ κύματα πλάσματος μὲ συχνότητες τόσο χαμηλές ὅσο 10 Hz βρίσκονται σὲ ὅλη τὴ μαγνητό-

σφαίρα [Gurnet et al., 1986]. 'Ο Οὐρανός είναι μοναδικός μεταξὺ τῶν πλανητικῶν μαγνητοσφαιρῶν ποὺ ἐρευνήθηκαν μέχρι τώρα στὸ ὅτι τὸ β τοῦ πλάσματος εἶναι λιγότερο ἀπὸ ~ 0.1 , δηλ. ὅ,τι πιὸ κοντινὸ σὲ μιὰ «κενὴ» μαγνητόσφαιρα ἔχει παρατηρηθεῖ μέχρι τώρα. 'Η πυκνότητα τῶν ζωνῶν ἀκτινοβολίας εἶναι τέτοια ὥστε ὁ βομβαρδισμὸς τῶν ἐνεργειακῶν πρωτονίων τοῦ πάγου μεθανίου θὰ τὸ μετέτρεπε σὲ μαῦρο κατὰλοιπο μὲ πολὺ μικρὴ ἀνακλαστικότητα μέσα σὲ λίγα ἑκατομμύρια χρόνια τὸ πολὺ, κάτι ποὺ θὰ ὀδηγοῦσε στὴ θεώρηση ὅτι οἱ σκοτεινοὶ δακτύλιοι τοῦ Οὐρανοῦ ἀποτελοῦνται ἴσως ἀπὸ πάγο μεθανίου [Krimigis et al., 1989]. Τὸ μαγνητικὸ ἰσημερινὸ στρῶμα πλάσματος τῆς μαγνητόσφαιρας τοῦ Οὐρανοῦ τελικὰ εὐθυγραμμίζεται στὴν ἀντι-ἡλιακὴ κατεύθυνση σὲ ἀποστάσεις κατὰ προσέγγιση $< 20 R_U$ ἀπὸ τὸν πλανήτη. 'Ο Οὐρανὸς ἐπίσης βρέθηκε ὅτι κατέχει μιὰ ἐκτεταμένη ὕδρογονοῦχο κορὼνα ποὺ μπορεῖ νὰ ἀποτελεῖ μιὰ πηγὴ πλάσματος μέσα στὴ μαγνητόσφαιρα. Τὰ φεγγάρια τοῦ Οὐρανοῦ δὲν ἐμφανίζονται νὰ εἶναι σημαντικὲς πηγὲς πλάσματος, ἀντίθετα μὲ τίς περιπτώσεις τοῦ Δία καὶ τοῦ Κρόνου, ἀλλὰ ἐνεργοῦν σὰν ἀπορροφητῆρες παγιδευμένων σωματιδίων (Krimigis et al., 1986a). Οἱ ραδιοεκπομπὲς τοῦ Οὐρανοῦ, παρόλο ὅτι εἶναι παρόμοιες μὲ ἐκεῖνες τοῦ Κρόνου σὲ φασματώδη ἔκταση, εἶναι λιγότερες σὲ ἀπόλυτη ἰσχὺ μεγέθους περίπου μιᾶς τάξεως (Εἰκ. 10, Gurnett, 1995).

Π Ο Σ Ε Ι Δ Ω Ν Α Σ

“Ὅπως στὴν περίπτωση μὲ τὴ συνάντηση τοῦ Οὐρανοῦ τὸ πέρασμα τοῦ Voyager 2 ἀπὸ τὸν Ποσειδῶνα τὴν 25ῃ Αὐγούστου 1989 ἔφερε ἓναν ἀριθμὸ ἀπροσδόκητων εὗρημάτων. Μεταξὺ αὐτῶν ἦταν ἡ ἀνακάλυψη τῶν δύο στενῶν καὶ δύο ἐκτεταμένων δακτυλίων ποὺ περιβάλλουν τὸν πλανήτη καὶ ἔξι νέα φεγγάρια σὲ κυκλικὴ ἀριστερόστροφη τροχιά, ὅλα ἀρκετὰ μέσα στὴν δεξιόστροφη τροχιά τοῦ Τρίτωνα. 'Ο Τρίτων ἔχει μιὰ ὑψηλὴ ἀνακλαστικὴ καὶ γεωλογικὰ νέα ἐπιφάνεια πάνω σὲ λεπτὴ ἄζωτοῦχο ἀτμόσφαιρα καὶ τουλάχιστον δύο ἐνεργοὺς πίδακες.

'Η πρώτη ἄμεση ἔνδειξη ἑνὸς μαγνητικοῦ πεδίου τοῦ Ποσειδῶνα προῆλθε ἀπὸ τίς ραδιοεκπομπὲς ποὺ ἀνακαλύφθηκαν περίπου 8 ἡμέρες πρὶν ἀπὸ τὴν πλησιέστερη προσέγγιση σὲ ἀπόσταση $417 \sim R_N$ (ἀκτίνες Ποσειδῶνα). Μία ἀνασκοπικὴ ἐξέταση τῶν στοιχείων ἀποκάλυψε ὅτι οἱ ραδιοεκπομπὲς ὑπῆρχαν τόσο νωρὶς ὅσο 30 ἡμέρες πρὶν ἀπὸ τὴν πλησιέστερη προσέγγιση καὶ παρουσίαζε μιὰ περιοδικότητα 16.11 ὥρες [Warwick et al., 1989].

Τὸ μαγνητικὸ πεδίο τοῦ πλανήτη εἶχε κλίση μὲ γωνία $\sim 47^\circ$ σὲ σχέση μὲ τὸν ἄξονα περιστροφῆς καὶ μετατόπισης $\sim 0.55 R_N$ στὸ Νότιο ἡμισφαίριο καὶ μακριὰ ἀπὸ τὸν ἄξονα περιστροφῆς τοῦ Ποσειδῶνα. 'Η πρὸς τὰ ἔσω μαγνητόπαυση δὲν προσδιο-

ρίστηκε καλά διότι ο Voyager εισήλθε σε πολύ κεκλιμένο μαγνητικό πεδίο, σε πολύ ύψηλο μαγνητικό γεωγραφικό πλάτος, επιτρέποντας την πρώτη παρατήρηση μιᾶς «πολικῆς» μαγνητόσφαιρας ὅπου ὁ ἥλιακός ἄνεμος προσπίπτει στὴν μαγνητική πολική περιοχή παρὰ στὸν ἰσημερινό. Μιὰ βαθμιαία ἐμφάνιση μαγνητόπαυσης συνέβη μεταξὺ 26.5 καὶ 23 πλανητικῶν ἀκτίνων (Πίνακας 2). Κοντὰ στὸν πλανήτη ($< 4 R_N$) τὸ μαγνητικό πεδίο ἐκδηλώνεται φτωχὰ ἀπὸ ἓνα διπολικὸ καὶ περιέχει τετραπολικούς καὶ ὀκταπολικούς ὅρους [Ness et al., 1989]. Ἡ διπολικὴ ροπή εἶναι 0.133 gauss R_N^3 ἀλλὰ ἐπειδὴ ὑπάρχει μεγάλη μετατόπιση, τὸ ἐπιφανειακὸ πεδίο εἶναι πολὺ ἀσύμμετρα κυμαίνόμενο ἀπὸ μέγιστο ~ 4 gauss στὸ Νότιο ἡμισφαίριο σὲ ἓνα ἐλάχιστο < 0.1 gauss στὸ Βόρειο ἡμισφαίριο. Καθὼς τὸ μαγνητικὸ πεδίο περιστρέφεται μὲ τὸν πλανήτη μὲ 16.11 ὥρες περίοδο, δορυφόροι καὶ δακτυλιοειδῆ σωματίδια σαρώνουν μεγάλης ἀκτίνας μαγνητικὸ πλάτος καὶ ἐνεργοῦν σὰν ἀπορροφητῆρες τῶν πληθυσμῶν φορτισμένων σωματιδίων ποὺ βρίσκονται παγιδευμένα μέσα στὴ μαγνητόσφαιρα τοῦ πλανήτη (Mauk et al., 1991).

Ἡ μέγιστη πυκνότητα πλάσματος ποὺ παρατηρήθηκε ἐντὸς τῆς μαγνητόσφαιρας ἦταν $\sim 1.4 \text{ cm}^{-3}$, ἡ μικρότερη ποὺ ἔχει παρατηρηθεῖ ἀπὸ τὸν Voyager σὲ ὅποια-δήποτε μαγνητόσφαιρα. Τὸ πλάσμα ἀποτελεῖται ἀπὸ ἐλαφρὰ (μάζα 1-5 AMU) καὶ βαρέα (μάζα 10-40 AMU) συστατικὰ ἰόντα. Τὸ μεγαλύτερο μέρος πλάσματος βρίσκεται συγκεντρωμένο σὲ ἓνα πλασματοφλοιοῦ κοντὰ στὸν πλανήτη. Ἡ πιὸ πιθανὴ πηγὴ γιὰ τὰ ἐλαφρὰ ἰόντα εἶναι ἡ ἀτμόσφαιρα τοῦ Ποσειδώνα, ἐνῶ τὰ βαρέα ἰόντα πιθανὸν διαφεύγουν ἀπὸ τὴν ἀτμόσφαιρα τοῦ Τρίτωνα [Belcher et al., 1989]. Ὁ πληθυσμὸς ἐνεργειακῶν σωματιδίων περιλαμβάνει ὑδρογόνο, μεμονωμένα ἰονισμένα μόρια ὑδρογόνου καὶ μερικὸ ἥλιο σὲ σχετικὲς περιεκτικότητες 1300 πρὸς 1 καὶ πρὸς 0.1 [Krimigis et al., 1989]. Ἄν καὶ ἐνεργειακὰ ἰόντα καὶ ἠλεκτρόνια ἐθεάθησαν διαμέσου τῆς μαγνητόσφαιρας, ὑψηλότερης ἐνέργειας ($> 200 \text{ KeV}$) σωματίδια περιορίστηκαν ἐντὸς τῆς τροχιακῆς ἀκτίνας τοῦ Τρίτωνα. Αὐτοὶ καθὼς καὶ ἄλλοι παράγοντες δηλώνουν ὅτι ὁ Τρίτων παίζει ἓνα καθοριστικὸ ρόλο στὸν ἔλεγχο τῶν ἔξω περιοχῶν τῆς μαγνητόσφαιρας τοῦ Ποσειδώνα. Κοντὰ στὴν πλησιέστερη προσέγγιση, παρατηρήθηκαν ἄπαλές ροὲς σωματιδίων ποὺ μοιάζουν μὲ ἐκεῖνες τῆς περιοχῆς τοῦ σέλαος τῆς Γῆς.

Σημαντικὲς ροὲς ἐνεργειακῶν ($< 1 \text{ MeV}$) παγιδευμένων ἠλεκτρονίων καὶ πρωτονίων ἐπίσης μετρήθηκαν μέσα στὴ μαγνητόσφαιρα. Μέγιστες ἐντάσεις συμβαίνουν κοντὰ στὰ $7 R_N$ ἐλαττωμένες πρὸς τὰ ἔσω ὡς ἀποτέλεσμα τῆς ἀπορρόφησης τῶν σωματιδίων ἀπὸ δορυφόρους καὶ σωματίδια δακτυλίου. Ἀρκετὰ διακεκριμένα φαινόμενα ἀπορρόφησης σωματιδίων φαίνονται στὶς ροὲς ἠλεκτρονίων καὶ πρωτονίων ποὺ μετρήθηκαν ἀπὸ τὸν Voyager.

Οἱ ραδιοεκρήξεις ἀπὸ τὸν Ποσειδώνα ποὺ ἀναφέρονται νωρίτερα εἶχαν ἔντονη

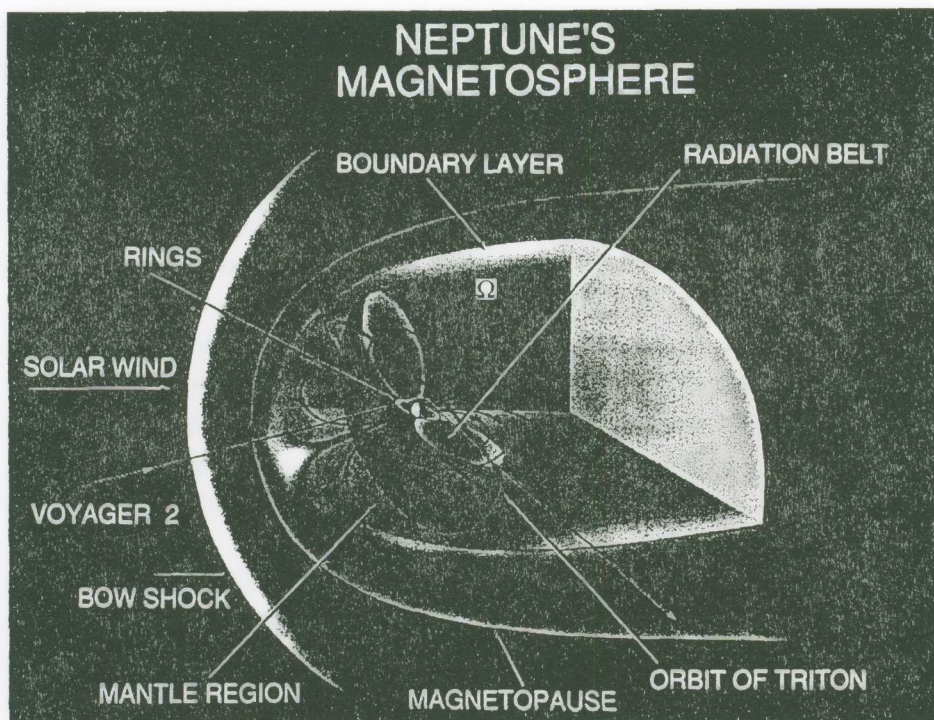
πολικότητα και συνέβησαν στο εύρος συχνότητας 100-1300 KHz (Εικόνα 10). Αυτά θεωρούνται ότι προέρχονται κοντά από το Νότιο μαγνητικό πόλο και ότι έχουν τα χαρακτηριστικά ενός παγκατευθυντικού ραδιοπομπού. Ένα περισσότερο διαδεδομένο είδος άπαλης έκπομπής ανακαλύφθηκε στην κλίμακα συχνοτήτων 20-865 KHz. Η πόλωση αυτών των εκπομπών ήταν μεταβλητή σε οποιαδήποτε εποχή αλλά το πρότυπο επαναλαμβανόταν σε κάθε πλανητική περιφορά. Έδω ή έρμηνεία είναι εκείνη της στενής περιφοράς ραδιοδέσμης ή όποια περιοδικά σαρώνεται έγκαρσίως από τους διαστημικούς ανιχνευτές [Warwick et al., 1989].

Πολλά τυπικά κύματα πλάσματος ανακαλύφθηκαν από το όργανο Plasma Wave κατά τη διάρκεια της συνάντησης. Αυτά περιλαμβάνουν ταλαντώσεις πλάσματος ηλεκτρονίων στον ήλιακό άνεμο αντίθετα προς τη διεύθυνση του κρουστικού κύματος, ηλεκτροστατική διαταραχή στο κρουστικό κύμα και στο μαγνητοκάλυμμα hiss, κύματα ηλεκτρον, κύκλοτρον, ανώτερα υβριδικά και κύματα αντηχήσεως στην έσω μαγνητόσφαιρα [Gurnett et al., 1989].

Έκπομπες του σέλαος στον Ποσειδώνα παρατηρήθηκαν σε H-Lyman β (1025 Å) και έχουν καταρχήν έντοπιστεί στη νυχτερινή πλευρά του Ποσειδώνα με συνολική εκπεμπόμενη ισχύ $\sim 5 \times 10^7$ watts. Η μετρηθεῖσα ροή των ηλεκτρονίων και ιόντων χαμηλής ενέργειας πάνω από την πολική περιοχή $\sim 5 \times 10^{-4}$ erg/cm²/sec προκύπτει σε μια υπολογισμένη ισχύ εισροής $\sim 3 \times 10^7$ watts, σημαντικά λιγότερη από οποιοδήποτε άλλο πλανήτη [Krimigis et al., 1990]. Τα χαρακτηριστικά της μαγνητόσφαιρας του Ποσειδώνα συνοψίζονται στην Εικόνα 11 [Krimigis et al., 1989].

ΠΛΟΥΤΩΝΑΣ

Το σύστημα του Πλούτωνα/Χάροντα απομένει ακόμη να έρευνηθεί με ρομποτικά διαστημόπλοια και είναι άπíθανο να προσεγγιστεί πριν από το 2010 το νωρίτερο με το διαστημόπλοιο Pluto Express, που τώρα βρίσκεται στο στάδιο σχεδιασμού. Οί γνωστές ιδιότητες του Πλούτωνα αναφέρονται στον Πίνακα 1· είναι ο μικρότερος πλανήτης στο ήλιακό σύστημα, μικρότερος και της Σελήνης, αλλά έχει ατμόσφαιρα, αποτελούμενη κυρίως από μεθάνιο, τουλάχιστον όταν ο πλανήτης βρίσκεται μέσα στην τροχιά του Ποσειδώνα. Η ατμόσφαιρα τελικά παγώνει έξω καθώς ο Πλούτωνας κινείται προς το αφήλιο στα 39.4 AU. Δεν είναι δυνατό από τις παρούσες τηλεσκοπικές παρατηρήσεις, συμπεριλαμβανομένων αυτών του διαστημικού τηλεσκοπίου Hubble, να συμπεράνουμε οποιαδήποτε ένδειξη ότι ο Πλούτωνας έχει μαγνητόσφαιρα. Κρίνοντας από το μικρό μέγεθος και τη σχετικά άργη περιστροφή του, είναι άπíθανο ο πλανήτης να έχει έσωτερικό μαγνητικό πεδίο. Έπειδή, παρόλα



Εικόνα 11. Προσλαμβανόμενο μοντέλο της μαγνητόσφαιρας του Ποσειδώνα, όπως θα μπορούσε να φαίνεται τη στιγμή της εισόδου του Voyager στην περιοχή αιχμής. Οι κύριες περιοχές είναι ή περιοχή του μανδύα, με τα παγιδευμένα σωματίδια, ή ζώνη ακτινοβολίας, που καθορίζεται από την τροχιά του Τρίτωνα, και το συνοριακό στρώμα στην πλευρά της νύκτας.

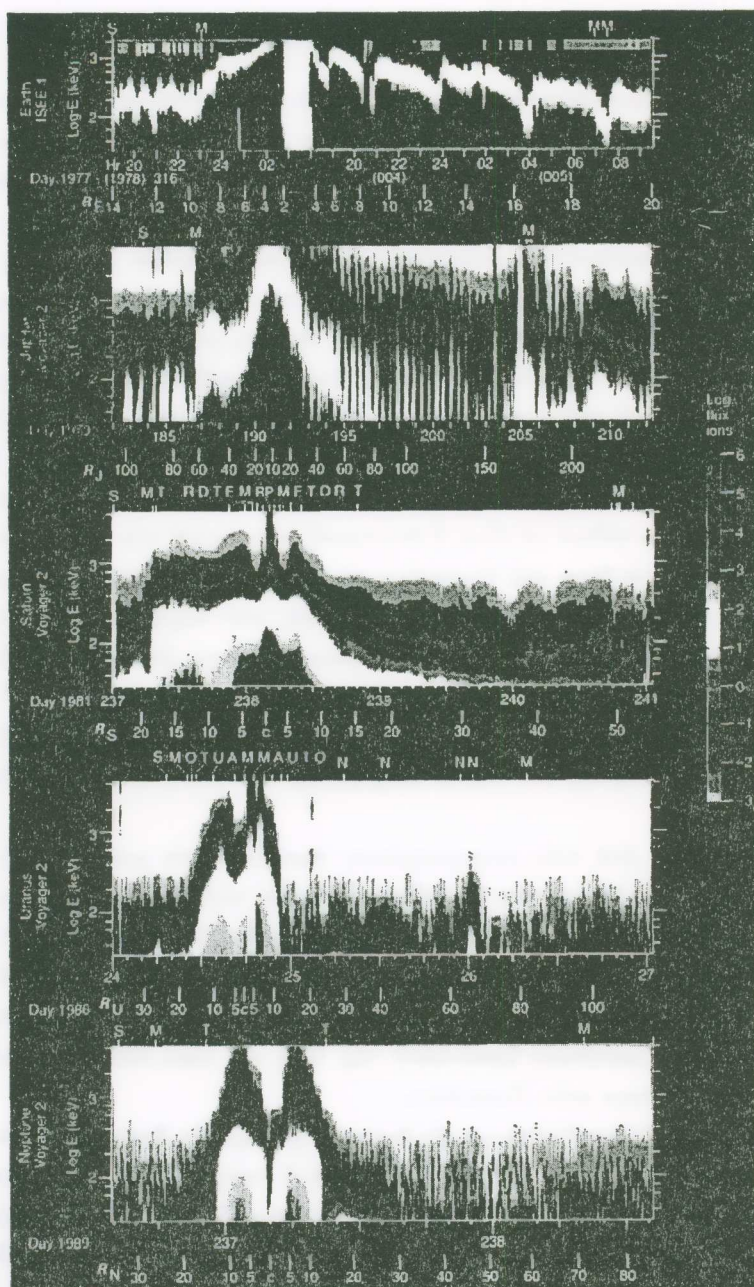
αυτά, ο ήλιακός άνεμος εκτείνεται πέρα από την τροχιά του Πλούτωνα, είναι πιθανό ή αλληλεπίδραση μεταξύ Πλούτωνα και ήλιακού ανέμου να μοιάζει με εκείνη των άλλων πλανητικών σωμάτων που έχουν ατμόσφαιρα, όπως της 'Αφροδίτης, του 'Αρη ή ακόμη των κομητών. Έτσι μπορούμε να αναμένουμε ότι μια υποτιθέμενη μαγνητόσφαιρα, όμοια με εκείνη αυτών των πλανητών μπορεί να υπάρχει, όταν ή ατμόσφαιρα είναι σε κατάσταση αερίου μέσα στη θέση περιήλιου του Πλούτωνα [Bagenal and McNutt, 1989]. Είναι επίσης πιθανό ότι ο ίδιος ο δορυφόρος Χάρων έχει κάποια ατμόσφαιρα και θα μπορούσε κάλλιστα να είναι μέσα στην περιοχή αλληλεπίδρασης του ήλιακού ανέμου με τον Πλούτωνα. Η έρευνα των λεπτομερειών μιας τέτοιας αλληλεπίδρασης θα πρέπει προφανώς να περιμένει την απόστολή στον Πλούτωνα [Stern, 1992].

ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΜΑΓΝΗΤΟΣΦΑΙΡΩΝ

Είδαμε από την προηγούμενη αναφορά ότι οι μαγνητόσφαιρες του ήλιακού συστήματος μοιράζονται ένα μεγάλο αριθμό κοινών χαρακτηριστικών. Το όλικό τους σχήμα είναι ασύμμετρο εξαιτίας της ροής του ήλιακού ανέμου: συμπιέζεται στην προσήλια πλευρά και εκτείνεται μέσα σε μια μακριά μαγνητοουρά στην αφήλια πλευρά. Αυτό μορφοποιεί τη μαγνητόσφαιρα σε μια τεράστια μαγνητική κοιλότητα γεμάτη με ένα μεγάλο αριθμό παγιδευμένων σωματιδίων, που κυμαίνονται σε ενέργεια από μερικά ηλεκτρονιοβόλτ σε δεκάδες μεγαηλεκτρονιοβόλτ. Αυτά επιταχύνονται επί τόπου εξαιτίας διαδικασιών που περιλαμβάνουν ηλεκτρικά ρεύματα και ηλεκτρομαγνητικά πεδία, και παράγουν ποικιλία φαινομένων με κλίμακες χρόνου από λίγα χιλιοστά του δευτερολέπτου ως αρκετά λεπτά και ώρες. Η είσοδος ενέργειας της μαγνητόσφαιρας είναι κυρίως ο ήλιακός άνεμος για τους έσωτερικούς πλανήτες αλλά είναι πιθανό να είναι ή πλανητική περιστροφή για τους άλλους πλανήτες. Τα ενεργειακά ιόντα και ηλεκτρόνια προσπίπτουν στις πολικές περιοχές των μαγνητισμένων πλανητών σε μεγάλους αριθμούς και παράγουν έκπομπες του σέλαος σε εκτεινόμενες περιοχές μήκους κύματος με ισχύ από $\sim 10^7$ Watt στον Ουράνο μέχρι $\sim 10^{14}$ Watt στον Δία, με τη Γη ενδιάμεσα στα $\sim 10^{11}$ Watt. Πρόσθετα, κάθε μαγνητόσφαιρα των μαγνητισμένων πλανητών παράγει ραδιοεκπομπές (με πιθανή εξαίρεση τον Έρμη) μετρημένες σε μεγάλες αποστάσεις από τους πλανήτες.

Έτσι καθένας από τους μαγνητισμένους πλανήτες είναι μια ραδιοπηγή στον ουράνο, με μερικούς να παράγουν περιοδικές έκπομπες που ανάγκοι την έσωτερική περιστροφή των πλανητών. Οι πηγές πλάσματος είναι τόσο έξωτερικές όσο και έσωτερικές με συμβολή από τον ήλιακό άνεμο, τις πλανητικές ατμόσφαιρες, τις ιονόσφαιρες, τις πλανητικές επιφάνειες διαμέσου έκβολων, καθώς επίσης τις άπειθεις αεριώδεις εισόδους μέσω των μοναδικών ήφαιστειών της 'Ιοϋς και πολύ πιθανό από τα αέρια του δορυφόρου Τρίτωνα στον Ποσειδώνα.

Μερικές από τις όμοιότητες και τις διαφορές μεταξύ των διαφόρων πλανητικών μαγνητοσφαιρών εικονίζονται στην Είχ. 12. Έδω οι ενεργειακοί πληθυσμοί των ιόντων για τις μαγνητόσφαιρες της Γης, του Δία, Κρόνου, Ουράνου και Ποσειδώνα εμφανίζονται σε μια κοινή κλίμακα εντάσεως, καλύπτοντας το δυναμικό πεδίο των $\sim 10^9$. Παρατηρούμε ότι η ασθενέστερη όλων των μαγνητοσφαιρών είναι του Ποσειδώνα, ενώ η ισχυρότερη εκείνη του Δία. Επίσης βλέπουμε ότι όποτεδήποτε το διαστημόπλοιο πλησίασε τον πλανήτη αρκετά κοντά ώστε τα σωματίδια να απορροφηθούν είτε από πλανητικούς δορυφόρους ή δακτυλούς, π.χ. Ουράνος και Ποσειδώνας, ή την



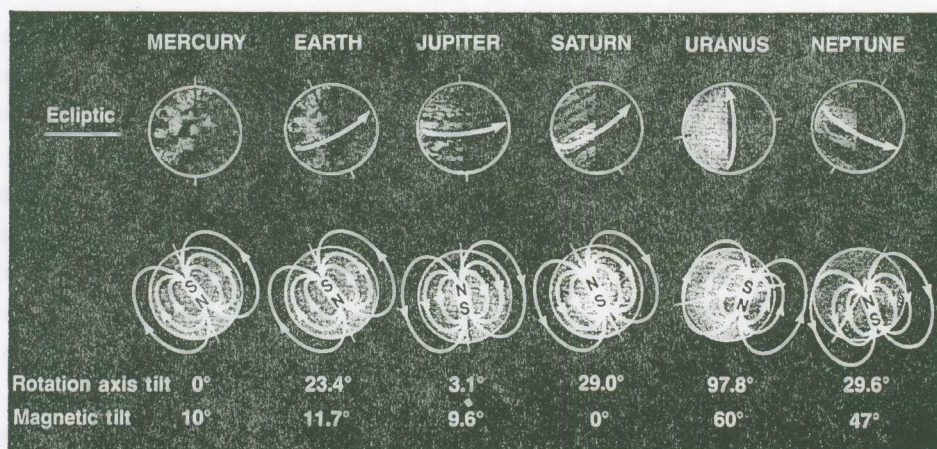
Εικόνα 12. Φασματογράμματα έντασης που συνοψίζουν τις μετρήσεις φορτισμένων σωματιδίων χαμηλής ενέργειας σε (άπό κάτω προς τα πάνω) Ποσειδώννα, Ουρανό, Κρόνο και Δία. Για σύγκριση το πάνω τμήμα δείχνει τα αποτελέσματα για τη Γῆ, όπως συλλέχθηκαν από το πείραμα ανίχνευσης ενεργειακών σωματιδίων πάνω στο διαστημόπλοιο ISEE 3 (προσφορά του D. J. Williams). Τα διαγράμματα δείχνουν την ένταση ροής των σωματιδίων ως συνάρτηση του χρόνου (πάνω κλίμακα) με την απόσταση σε μονάδες πλανητικών ακτίνων (κάτω κλίμακα) σημειωμένες για κάθε πλανήτη.

ατμόσφαιρα (Γ₇), υπάρχει ένα ελάχιστο στην ένταση τῆς ἀκτινοβολίας στὸ ἐσωτερικὸ τμήμα τῆς τροχιάς καὶ μιὰ αὐξηση πάλι πρὸς τὰ ἔξω. Ἡ ένταση αὐξάνει μεταβλητὰ καθὼς κανεῖς πλησιάζει κοντύτερα στὸν πλανήτη καὶ μετὰ τὴν πλησιέστερη προσέγγιση, περνᾷ διαμέσου μιᾶς δευτερεύουσας κορυφῆς ποὺ συνεχίζει νὰ ἐλαττώνεται καθὼς τὸ διαστημόπλοιο τελικὰ διαφεύγει ἀπὸ τὴ μαγνητόσφαιρα διαμέσου τῆς ἀνατολικῆς πλευρᾶς τῆς μαγνητόπαυσης. "Ἐνα πιὸ ἐκπληκτικὸ γνῶρισμα εἶναι ἡ 10ωρη περιοδικότητα, ποὺ ἐκδηλώνεται στὴν περίπτωση τοῦ Δία, ἰδιαίτερα στὴν νυκτερινὴ πλευρά, ἀλλὰ δὲν γίνεται φανερό, σὲ μερικὲς ἀπὸ τὶς ἄλλες πλανητικὲς συναντήσεις. Στὴν πραγματικότητα τέτοια περιοδικότητα ὑπάρχει στὴν περίπτωση τοῦ Κρόνου [Carbary and Krimigis, 1982], ἀλλὰ δὲν εἶναι φανερὴ σὲ ἄλλες συναντήσεις, διότι ἡ διάρκεια αὐτῶν ἦταν σχετικὰ σύντομη ὅταν συγκρίθηκε μὲ τὴν πλανητικὴ περίοδο περιστροφῆς. Σημειώνεται ὅτι σὲ ὅρους πλανητικῶν ἀκτίνων (Πίνακας 2) ἡ μαγνητόσφαιρα τοῦ Δία εἶναι ἡ μεγαλύτερη ὅλων, ἀκολουθοῦμενη ἀπὸ ἐκείνη τῶν ἄλλων ἔξωτερικῶν πλανητῶν, μὲ τὴ μαγνητόσφαιρα τοῦ Ἑρμῆ νὰ ἔχει τὸ μικρότερο μέγεθος. Ὅπως παρατηρήθηκε νωρίτερα τὸ διαστημόπλοιο Voyager χρειάστηκε πολὺ πάνω τῶν 4 ἐβδομάδων γιὰ νὰ διασχίσει τὴ μαγνητόσφαιρα τοῦ Δία καὶ τὰ ἀποτελέσματα τῶν πίσω ἰόντων καὶ τῶν μπροστὰ σωματιδίων, ποὺ διαφεύγουν ἀπὸ τὴ μαγνητόσφαιρα, ἦταν ὁρατὰ γιὰ ἀρκετοὺς μῆνες πρὶν καὶ μετὰ τὴν πλησιέστερη προσέγγιση τοῦ πλανήτη. Σὲ ἀντίθεση, ἡ μαγνητόσφαιρα τῆς Γῆς διασχίστηκε ἀπὸ τὸ διαστημόπλοιο Galileo σὲ λιγότερο ἀπὸ 8 ὥρες.

"Ἐνα πιὸ σημαντικὸ χαρακτηριστικὸ τῶν πλανητικῶν μαγνητικῶν πεδίων εἶναι ἡ γωνία μεταξὺ τοῦ ἄξονα περιστροφῆς τοῦ πλανήτη καὶ τοῦ μαγνητικοῦ ἄξονα. Ἡ Εἰκ. 13 συγκρίνει τὰ εὐρήματα τοῦ Voyager μὲ ὅσα γνωρίζουμε γιὰ τὰ μαγνητικὰ πεδία τῆς Γῆς καὶ τοῦ Ἑρμῆ. Αὐτὴ ἡ γωνία εἶναι σχετικὰ μικρὴ γιὰ ὅλους τοὺς πλανήτες μὲ ἐξάιρεση τὸν Οὐρανὸ καὶ τὸν Ποσειδῶνα. Ἀρχικὰ θεωροῦνταν ὅτι ἡ μεγάλη γωνία στὸν Οὐρανὸ ὀφειλόταν στὸ γεγονὸς ὅτι ὁ ἄξονας περιστροφῆς τοῦ πλανήτη βρίσκεται πιὸ κοντὰ στὸ ἐπίπεδο τῆς ἐκλειπτικῆς. Ὑπῆρξε ἀκόμη μιὰ κάποια σκέψη ὅτι τὸ πλανητικὸ πεδίο βρισκόταν στὴ διαδικασία νὰ ὑποστῇ ἀναστροφή, ἐνῶ γινόταν ἡ συνάντηση τοῦ Voyager μὲ τὸν Ποσειδῶνα [Ness et al., 1986].

Πάντως, τὸ Voyager 2 στὸν Ποσειδῶνα, βρῆκε ὅτι τὸ μαγνητικὸ πεδίο εἶχε κλίση 47° πρὸς τὸν ἄξονα περιστροφῆς παρὰ τὸ ὅτι ὁ ἄξονας περιστροφῆς τοῦ Ποσειδῶνα δὲν ἔχει τόσο έντονη κλίση ὅσο αὐτὸς τοῦ Οὐρανοῦ. Αὐτὸ δὲν ἀναμενόταν. Ἐπιπρόσθετα, ὁ ἄξονας τοῦ μαγνητικοῦ πεδίου μετατοπίστηκε πάνω ἀπὸ τὸ μισὸ μιᾶς πλανητικῆς ἀκτίνας ἀπὸ τὸ κέντρο τοῦ πλανήτη. "Ἐτσι ὁ Οὐρανὸς καὶ ὁ Ποσειδῶνας φαίνεται νὰ καταλαμβάνουν μιὰ ξεχωριστὴ καὶ διακριτὴ κατηγορία στὰ πλανητικὰ δυναμὰ χαρακτηριζόμενα ἀπὸ μεγάλη κλίση διπόλου καὶ σύνθετες γεωμετρίες (τετραπολικὴ

ροπή συγκρίσιμη πρὸς τὴ διπολική [Ness et al., 1989]). Σὲ ἀντίθεση, ἡ Γῆ, ὁ Δίας καὶ ὁ Κρόνος ἔχουν πεδία μὲ μικρὴ κλίση διπόλου καὶ σχετικὰ μικρὴ τετραπολική συμβολή (<10% τοῦ διπόλου). Αὐτὲς οἱ διαφορὲς ἔχουν βαθιὲς συνέπειες γιὰ τὸ ἐσωτερικὸ τῶν πλανητῶν. Ἐχει προταθεῖ ὅτι ἡ δημιουργία δυναμὸ στὸν Οὐρανὸ καὶ τὸν Ποσειδῶνα εἶναι σὲ μιὰ περιοχὴ πολὺ ἀπομακρυσμένη ἀπὸ τὸ κέντρο τοῦ πλανήτη [Connerney et al., 1987] σὲ ἓνα ρευστὸ καὶ ἐπάγοντα ἐνέργεια «μανδύα πάγου», ποὺ ἀποτελεῖται ἀπὸ H_2O , ἀμμωνία καὶ μεθάνιο. Ὁ «μανδύας πάγου» ἀποτελεῖ τὰ 2/3 τῆς ὅλικης μάζας τῶν πλανητῶν σύμφωνα μὲ σύγχρονα πρότυπα τοῦ ἐσωτερικοῦ τους



Εἰκόνα 13. Σύγκριση τῶν σχέσεων μεταξὺ τοῦ μαγνητικοῦ ἄξονα καὶ τοῦ ἄξονα περιστροφῆς τῶν πλανητῶν ποὺ ἔχουν σημαντικὲς μαγνητόσφαιρες. Ἡ γωνία μεταξὺ τῶν δύο ἄξόνων εἶναι μέγιστη γιὰ τὸν Οὐρανὸ (Krimigis, 1992).

[Hubbard and McFarlane, 1980]. Τὸ ὑπόλοιπο ἐδρεύει σὲ ἓνα μικρὸ κεντρικὸ πυρῆνα πετρώματος, ὑψηλῆς θερμοκρασίας συμπύκνωσης καὶ μέτριας ἀτμόσφαιρας ἡλίου καὶ ὑδρογόνου. Ἡ ἡλεκτρικὴ ἀγωγιμότητα αὐτοῦ τοῦ «μανδύα πάγου», ποὺ ἀποδίδεται στὴν ἐπιφερόμενη πίεση ἰονισμοῦ, παρέχει τὴ ροὴ ρεύματος ποὺ προκύπτει στὸ ὑποτιθέμενο μηχανισμό δυναμὸ, ποὺ δημιουργεῖ τὸ πλανητικὸ μαγνητικὸ πεδίο. Ἡ γενικὴ κατάσταση σχετικὰ μὲ τὸν πλανητικὸ μαγνητισμὸ ἀντανάκλᾳ τὸ χαμηλὸ ἐπίπεδο γνώσεων τοῦ μηχανισμοῦ δυναμὸ στὸ σύνολό του, τόσο γιὰ τὸ ἥλια-κὸ ὅσο καὶ γιὰ τὰ πλανητικὰ δυναμὸ.

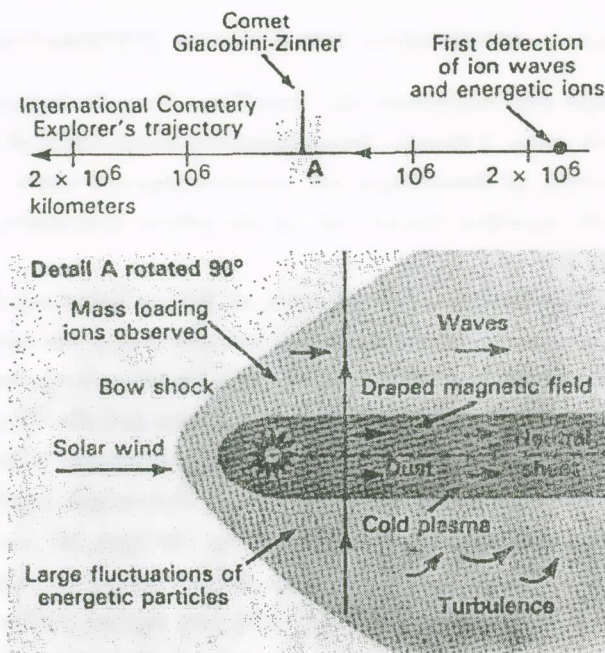
ΑΛΛΑ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΑ ΤΟΥ ΗΛΙΑΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Όπως είδαμε στην περίπτωση της Ἀφροδίτης, όπου δὲν ὑπάρχει γνωστὸ ἐσωτερικὸ μαγνητικὸ πεδίο, ὁ ἥλιακὸς ἄνεμος ἐντούτοις ἀλληλεπιδρᾷ μὲ τὴν ἰονόσφαιρα ἐκείνου τοῦ πλανήτη μὲ ἀποτέλεσμα μιὰ μαγνητοσφαιρικὸ τύπου ἀλληλεπίδραση, συμπίεσμένη στὴν προσήλια πλευρά, καὶ μὲ μία μᾶλλον ἐκτεταμένη οὐρὰ στὴν νυκτερινή πλευρά.

Παρόμοιες ἀλληλεπιδράσεις ἀναμένονται σὲ ἄλλα σώματα τοῦ ἥλιακοῦ συστήματος, ὅπως τοὺς κομήτες. Ἡ παρουσία τῶν ἰοντικῶν οὐρῶν τῶν κομητῶν χρησιμοποιήθηκε ἀπὸ τὸν Biermann (1951) γιὰ νὰ δείξει ἐπαγωγικὰ τὴν ὑπαρξὴ τοῦ ἥλιακοῦ ἀνέμου, δηλ. τοῦ ἀγώγιμου ἀερίου ποὺ ἐκπέμπεται ἀπὸ τὸν ἥλιο. Ἀργότερα ὁ Alfvén (1957) πρότεινε τὴ γενικὴ διαμόρφωση τοῦ μαγνητικοῦ πεδίου καὶ τοῦ περιβάλλοντος τοῦ πλάσματος κατὰ τὴ διάρκεια ἀλληλεπίδρασης ἑνὸς κομήτη μὲ τὸν ἥλιακὸ ἄνεμο, συμπεριλαμβανόμενης τῆς συσσώρευσης τῶν γραμμῶν μαγνητικοῦ πεδίου καὶ τῆς παρουσίας ἑνὸς ρευματοφλοιοῦ στὴν ἀφήλια πλευρὰ τοῦ κομήτη. Αὐτὲς οἱ προβλέψεις πρωτοελέγχθηκαν μὲ τὴν ἀπελευθέρωση ἀερίων (Λιθίου, Βαρίου) στὸν ἥλιακὸ ἄνεμο κατὰ τὴ διάρκεια τοῦ προγράμματος ἐνεργῶν πειραμάτων ἀνίχνευσης μαγνητοσφαιρικῶν σωματιδίων (AMPTE: Krimigis et al., 1986b).

Παρατηρήθηκε ἡ ὑπαρξὴ διαμαγνητικῆς κοιλότητος καὶ ἡ συσσώρευση γραμμῶν μαγνητικοῦ πεδίου, καθὼς καὶ ὁ σχηματισμὸς ἑνὸς τοξοειδοῦς κρουστικοῦ κύματος. Ἐπιπλέον ἡ παγίδευση καὶ μεταφορὰ ἰόντων ἀπὸ τὸ διαπλανητικὸ ἡλεκτρικὸ πεδίο $\vec{E} = -\frac{1}{c} (\vec{V} \times \vec{B})$ παρατηρήθηκε καὶ μετρήθηκε λεπτομερῶς.

Κατὰ τὸ πρόσφατο παρελθόν, διαστημόπλοια συνάντησαν τοὺς κομήτες Giacobini-Zinner (11 Σεπτεμβρίου 1985), Halley (8 ἕως 13 Μαρτίου 1986) καὶ Grigg-Skjellerup (10 Ἰουλίου 1992). Οἱ συναντήσεις βασικὰ ἐπιβεβαίωσαν ἀρκετὲς προηγούμενες προσδοκίες ἀλλὰ δημιούργησαν ἐπίσης ἕνα ἀριθμὸ ἀπροσδόκητων ἀποτελεσμάτων. Ἡ Εἰκόνα 16 ἀνακεφαλαιώνει τὰ εὐρήματα ποὺ ἐπιτεύχθηκαν ἀπὸ τὸ Ἀμερικανικὸ Διαστημόπλοιο Διεθνοῦς Ἐξερεύνησης Κομητῶν (ICE) στὴν πρώτη συνάντησή μὲ κομήτη (Science, εἰδικὴ ἔκδοση 1986). Ἡ σκοτεινὴ περιοχὴ μὲ τὴν ἐκτεταμένη οὐρὰ στὸ διάγραμμα ἀντιπροσωπεύει τὸ ὄρατὸ μέρος τοῦ κομήτη, ὅπως αὐτὸς φαίνεται σὲ φωτογραφίες ἀπὸ τὴ γῆ. Τὸ διαστημόπλοιο πέρασε περίπου 7800 km πίσω ἀπὸ τὸν πυρήνα τοῦ κομήτη. Ἡ εἰκόνα δείχνει ὅτι ἡ πρώτη ἀνίχνευση τῶν κυμάτων ἰόντων μαζί μὲ τὴν παρουσία τῶν ἰόντων κομήτη συνέβη πάνω ἀπὸ 2.000.000 km ἀπὸ τὸν πυρήνα. Τὰ ἰόντα ἦταν ἀέρια τοῦ κομήτη, ποὺ φωτοϊονίστηκαν, παρὰσύρθηκαν ἀπὸ τὸ ἡλεκτρικὸ πεδίο τοῦ ἥλιακοῦ ἀνέμου καὶ ἐπιταχύνθηκαν σὲ ἐνέρ-



Εικόνα 14. Ἡ πρώτη συνάντηση διαστημοπλοίου με κομήτη. Τὸ διαστημόπλοιο «Διεθνὴς Ἐξερευνητὴς Κομητῶν» (ICE) πέρασε κοντὰ στὰ 7.800 km πίσω ἀπὸ τὸν πυρήνα τοῦ κομήτη καὶ ἀπόκτησε πλούσιες πληροφορίες γιὰ τὴν ἀλληλεπίδραση τοῦ θερμοῦ ρέοντος πλάσματος τοῦ ἡλιακοῦ ἀνέμου μετὸ ψυχρὸ ἀέριο τοῦ κομήτη ποὺ ἐκπέμπεται ἀπ' αὐτόν. Ποικίλες περιοχὲς τοῦ διαστήματος γύρω ἀπὸ τὸν κομήτη σημειώνονται ἐδῶ (Lanzerotti and Krimigis, 1986).

γειες ὑψηλὲς ὡς 300 KeV γιὰ τὰ βαρύτερα εἶδη (πιθανότατα CO_2^+). Σὲ ἀπόσταση περίπου 127.000 km τὸ κρουστικὸ κύμα τοῦ κομήτη παρατηρήθηκε ὅπως ἀναμενόταν πρὶο κοντὰ στὸν πυρήνα (βλέπε εἰκ. 14), ἀναγνωρίστηκε μιὰ ταραχώδης περιοχὴ ὅπου ὁ ἡλιακὸς ἀνεμὸς εἶχε σημαντικὰ ἐπιβραδυνθεῖ λόγω «μαζικῆς φόρτωσης» ἀπὸ ἰόντα τοῦ κομήτη. Μέσα σὲ ἀπόσταση περίπου 8.000 km ἀπὸ τὴν ἀντι-ἡλιακὴ κατεύθυνση παρατηρήθηκε μιὰ περιοχὴ ψυχροῦ πλάσματος συνοδευόμενη ἀπὸ μιὰ γενικὴ ἐλάττωση στὰ ἐνεργειακὰ ἰόντα καὶ ἓνα ἐλάχιστο στὴν ἔνταση τοῦ μαγνητικοῦ πεδίου, ποὺ μοιάζει με διαμαγνητικὴ κοιλότητα, στὴ διάσχιση τοῦ ρευματοφλοιοῦ. Τὸ μέγιστο μαγνητικὸ πεδίο στοὺς λοβούς τοῦ κομήτη ἦταν περίπου 16nT.

Ἡ συνάντηση τοῦ κομήτη τοῦ Halley τὸ Μάρτιο 1986 ἀπὸ ἓνα διεθνὴ στολίσκο διαστημοπλοίων (Nature 1986) παρουσίασε ἀποτελέσματα ὅμοια μετὰ ἐκεῖνα τοῦ κομήτη Giacobini-Zinner. Τὰ Σοβιετικὰ διαστημόπλοια Vega 1 καὶ 2, ποὺ πέρασαν

σέ απόσταση 8.000 km από την προς τόν ήλιο πλευρά του κομήτη Halley, φωτογράφησαν τόν πυρήνα του, παρατήρησαν την περίοδο περιστροφής του (περίπου 53 ώρες) και προσδιόρισαν ρυθμό δημιουργίας αερίων της τάξης $\sim 10^{30}$ μόρια/sec με βαριά ιόντα όπως C^+ , CO_2^+ , H_2O^+ και CH_4^+ που αναγνωρίστηκαν με εύκρινεια. Ήνεργειακά ιόντα σέ μερικές εκατοντάδες keV παρατηρήθηκαν σέ αποστάσεις μέχρι και 10^7 km από τόν πυρήνα του κομήτη. Παρόμοια εύρηματα επιτεύχθηκαν από την Ήαπωνική αποστολή Planet A και τó διαστημόπλοιο Giotto της Ευρωπαϊκής Διαστημικής Ένωσης, τó όποιο πέρασε κοντότερα στόν πυρήνα στήν προσήλια πλευρά (περίπου 610 km). Όπως συνέβη και στήν περίπτωση της συνάντησης του ICE με τόν Giacobini-Zinner, έτσι και στόν Halley παρατηρήθηκε κάλυψη των γραμμών του πεδίου με μιá περιοχή ψυχρού πλάσματος. Τó κρουστικό κύμα παρατηρήθηκε ότι είναι μακρύτερα από τόν πυρήνα (περίπου 4×10^5 km) άπ' ό,τι του Giacobini-Zinner, που όφείλεται στόν ύψηλότερο ρυθμό παραγωγής αερίου στόν Halley. Τó Giotto συνάντησε επίσης τόν κομήτη Grig-Skjellerup τó 1992, ό όποιος είχε παρόμοια χαρακτηριστικά στόν τομέα των σωματιδίων και του πεδίου.

Οί τρόποι δυναμικής άλληλεπίδρασης μεταξύ ήλιακού άνεμου και άστεροειδών δέν είναι καλά έδραιωμένες έπí του παρόντος. Τó διαστημόπλοιο Galileo συνάντησε τούς άστεροειδείς Gaspra και Ida άπό μακρινή άπόσταση (1.200 km τόν πρώτο και 1.500 km τó δεύτερο). Τά όργανα μέτρησης μαγνητικού πεδίου του διαστημόπλοιου παρατήρησαν κάποιες ταραχώδεις άλλαγές στό μαγνητικό πεδίο των άστεροειδών, οί όποίες μπορούν νά άποδοθούν στήν άλληλεπίδρασή τους με τόν ήλιακό άνεμο [Kivelson et al., 1993]. Ή πρώτη δυνατότητα έλέγχου της παρουσίας ή άπουσίας άλληλεπίδρασης μεταξύ άστεροειδούς και ήλιακού άνεμου θά δοθεί τόν Ήανουάριο του 1999, όταν τó διαστημόπλοιο NEAR, που έκτοξεύθηκε τόν Φεβρ. του 1996, θά συναντηθεί με τόν άστεροειδή Eros. Τó διαστημόπλοιο NEAR θά βρίσκεται σέ τροχιά γύρω άπό τόν Eros σέ άπόσταση 15 km και θά έδραιώσει άναμφίβολα τη λεπτομερή μέτρηση όποιασδήποτε άλληλεπίδρασης μαγνητικού πεδίου με τόν ήλιακό άνεμο [Farquhar et al., 1995].

Τελικά θά πρέπει νά σημειωθεί ότι οί πλανητικοί δορυφόροι μπορεί νά θεωρηθοún ως άντικείμενα που δυναμικά κατέχουν πολύπλοκα μαγνητικά πεδία ή άτμόσφαιρες που μπορεί νά άλληλεπιδροún είτε με τó πλάσμα του ήλιακού άνεμου είτε με τó μαγνητοσφαιρικό πλάσμα του παρόντος σώματος. Ήδιαίτερα ή Ήώ μπορεί νά έχει μιá λεπτή άτμόσφαιρα και πολύπλοκο μαγνητικό πεδίο, τά όποια μαζί θά μπορούσαν νά παράγουν μιá μικρή δορυφορική μαγνητόσφαιρα, καθώς εκείνη του Δία άποσύρεται άπό την Ήώ λόγω της περιστροφής του Δία. Ένας συγκεκριμένος προσδιορισμός της άλληλεπίδρασης θά μπορούσε κάλλιστα νά συμβεί όταν τά δεδομένα του Galileo, που

άποκτήθηκαν τὸ Δεκέμβριο τοῦ 1995, φθάσουν στὴ Γῆ τὸ καλοκαίρι τοῦ 1996. Μιὰ πρόσφατη κοινοποίηση [Kivelson et al., 1996] δείχνει τὴν πιθανὴ παρουσία μαγνητικού πεδίου στὴν Ἡώ.

Ἡ καλύτερη ἀπόδειξη μαγνητόσφαιρας μέσα σὲ μαγνητόσφαιρα (Journal of Geophysical Res., 1982) δίνεται ἀπὸ τὸ δορυφόρο τοῦ Κρόνου, Τιτάνα, τοῦ ὁποίου ἡ ἐπιφανειακὴ ἀτμοσφαιρικὴ πίεση εἶναι περίπου 1.6 φορές ἐκείνης τῆς Γῆς. Ὁ Voyager 1 βρῆκε ὅτι ὁ Τιτάνας δὲν ἔχει πολὺπλοκο μαγνητικὸ πεδίο, ἀλλὰ ἡ ἀτμόσφαιρα καὶ ἡ ἰονόσφαιρά του σχηματίζουν μιὰ κοιλότητα στὴν περιστρεφόμενη μαγνητόσφαιρα τοῦ Κρόνου. Αὐτὴ ἡ κοιλότητα σχηματίζεται μέσω ἑνὸς μηχανισμοῦ ὁμοίου πρὸς ἐκεῖνον μὲ τὸν ὁποῖο ὁ ρέων ἡλιακὸς ἄνεμος παρασύρει μιὰ μαγνητόσφαιρα γύρω ἀπὸ τὴν Ἀφροδίτη. Ὁ Voyager 1 βρῆκε ὅτι ὁ Τιτάνας ἔχει μιὰ μαγνητοουρὰ μὲ κάποια κλίση πρὸς τὸ πλάσμα ποὺ περιστρέφεται μὲ τὸν Κρόνο. Ἡ ροὴ πλάσματος διακόπτεται ἐγκαρσίως τῆς μαγνητοουρᾶς. Θὰ πρέπει ἐπίσης νὰ σημειωθεῖ πὼς ἐνίοτε ὁ Τιτάνας βρίσκεται ἔξω ἀπὸ τὴν κύρια μαγνητόσφαιρα τοῦ Κρόνου, ἰδιαίτερα στὸ ὑψῆλιο σημεῖο καὶ τότε εἶναι ἐκτεθειμένος σὲ ἄμεση ἀλληλεπίδραση μὲ τὸν ἡλιακὸ ἄνεμο. Αὐτὰ τὰ χαρακτηριστικὰ ἀλληλεπίδρασης τοῦ Τιτάνα θὰ ἐρευνηθοῦν πλήρως ὅταν τὸ διαστημικὸ σκάφος Cassini, ποὺ πρόκειται νὰ ἐκτοξευθεῖ τὸν Ὀκτώβριο τοῦ 1997, φθάσει στὸν Κρόνο καὶ ἐκτελέσει ἕνα μεγάλο ἀριθμὸ συναντήσεων ἀπὸ κοντινὴ ἀπόσταση (περίπου 900 km) μὲ τὸν Τιτάνα. Οἱ ἴδιες γενικὲς παρατηρήσεις μπορεῖ νὰ γίνουν γιὰ τὸν Τρίτωνα, δορυφόρο τοῦ Ποσειδώνα, τοῦ ὁποίου ἡ λεπτὴ ἀτμόσφαιρα φαίνεται νὰ συμβάλει στὸ μαγνητοσφαιρικὸ πλάσμα ποὺ εἶναι παγιδευμένο μέσα στὴ μαγνητόσφαιρα τοῦ πλανῆτη [Decker and Cheng, 1994].

ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΕΣ ΜΑΓΝΗΤΟΣΦΑΙΡΕΣ

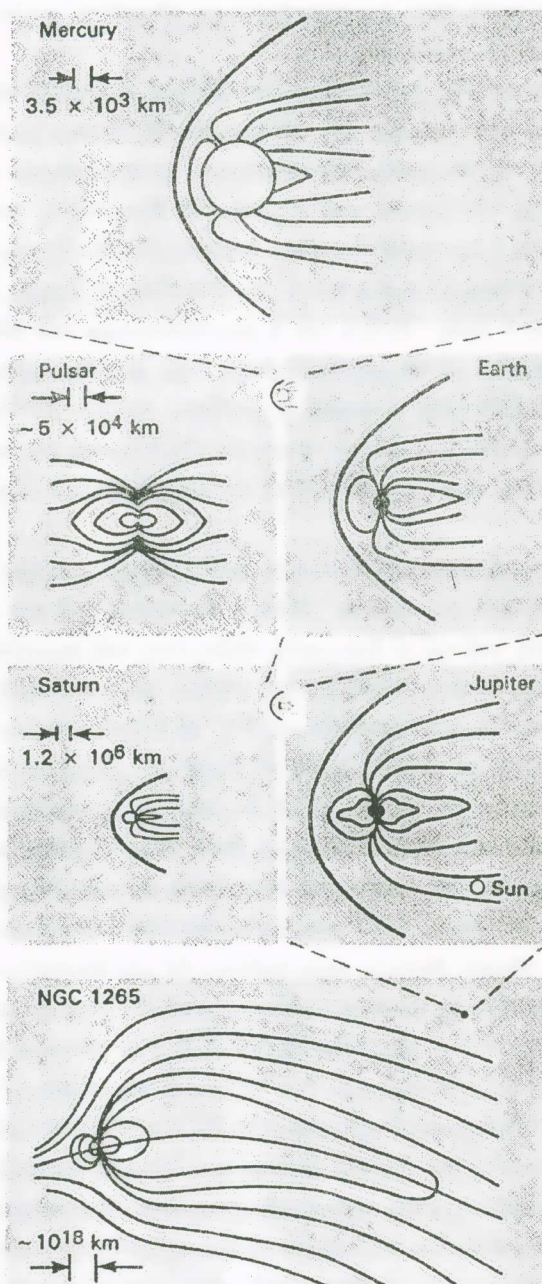
Εἶδαμε ὅτι ἡ ἰονισμένη ὕλη σὲ πλανητικὲς κλίμακες ὅπουδῆποτε στὸ ἡλιακὸ σύστημα ὀργανώνεται ἀποτελεσματικὰ ἀπὸ τὰ ἐσωτερικὰ μαγνητικὰ πεδία ἢ τὶς ἰονισμένες ἀτμόσφαιρες τῶν πλανητῶν καὶ δορυφόρων. Οἱ προκύπτουσες μαγνητόσφαιρες εἶναι στὴν οὐσία «κυψέλες» πλάσματος, ἡμιαπομονωμένες καὶ ἄρκετὰ διαφορετικὲς ἀπὸ τὶς γειτονικὲς περιοχὲς πλάσματος. Οἱ πλανητικὲς μαγνητόσφαιρες μοιράζονται πολλὰ γενικὰ χαρακτηριστικὰ, ὅπως σημειώθηκε παραπάνω, ἀλλὰ τὸ πιὸ σημαντικὸ εἶναι ἡ ἱκανότητα νὰ ἐπιταχύνουν ἰόντα καὶ ἡλεκτρόνια ἀπὸ θερμικὲς ἐνέργειες σὲ δεκάδες καὶ ἑκατοντάδες μεγαβόλτ. Πολλὲς βασικὲς διεργασίες καὶ ἀστάθειες πλάσματος, ὅπως ἡ ἐπανασύνδεση τῶν γραμμῶν μαγνητικοῦ πεδίου, οἱ ἀλληλεπιδράσεις κυμάτων καὶ σωματιδίων, τὰ ἡλεκτροστατικὰ διπλὰ στρώματα καὶ ἡ ἀστάθεια Kevin - Helmholtz λαμβάνουν χώρα σὲ πλανητικὲς μαγνητόσφαιρες. Ἕνα διακριτικὸ χα-

ρακτηριστικό είναι κατά πόσο η μαγνητόσφαιρα οδηγείται κυρίως από τον ήλιακό άνεμο ή την πλανητική περιστροφή.

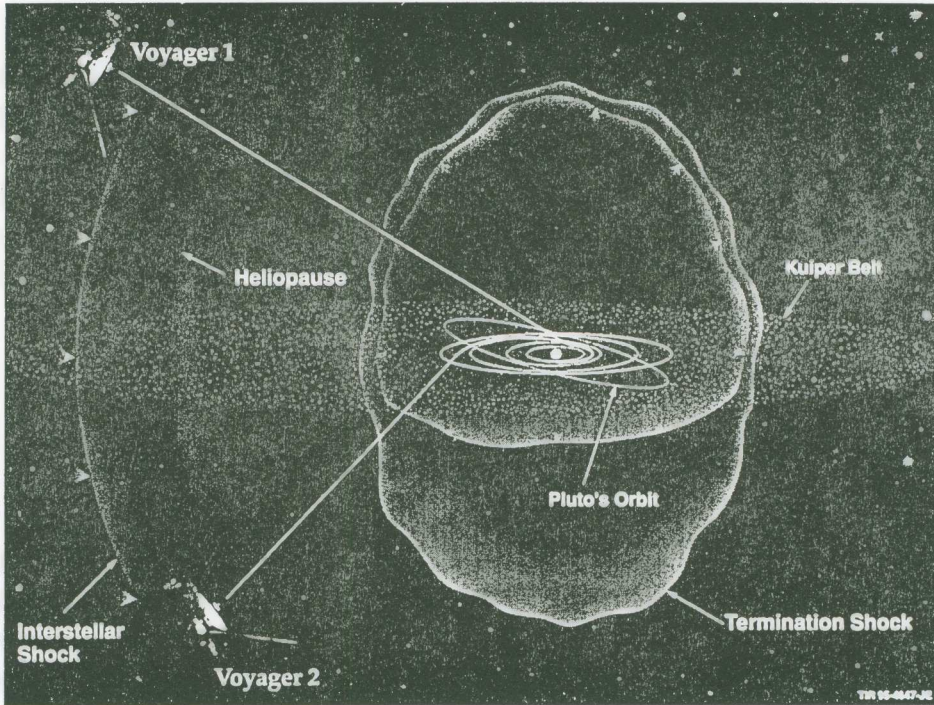
Η βασική έννοια της μαγνητόσφαιρας βρίσκει εφαρμογή σε πολλά φαινόμενα που παρατηρούνται στο γαλαξία και το σύμπαν. Η Εικόνα 15 ανακεφαλαιώνει τα σχετικά μεγέθη και τη γεωμετρία των διαφόρων μαγνητοσφαιρών που υπάρχουν στο ήλιακό σύστημα και, επαγωγικά, στο σύμπαν. Η έρευνηση του ήλιακού συστήματος μάς διδάξε ότι η ιονισμένη ύλη είναι οργανωμένη σε κλίμακες που κυμαίνονται από 10 km, που αντιστοιχεί σε ένα μικρό πλανήτη όπως ο Έρμης, μέχρι μερικά εκατομμύρια km όπως ο Δίας. Ακόμη και η μαγνητόσφαιρα του Δία όμως ωχριά σε μέγεθος όταν συγκριθεί με τη μαγνητόσφαιρα ενός μεγάλου ραδιογαλαξία, όπως ο New Galactic Catalog 1265 με κλίμακα μεγέθους περίπου 10^{18} km. Επίσης είναι ενδιαφέρον ότι τα μεγέθη των μαγνητοσφαιρών της Γης και των παλλόμενων ραδιοπηγών (pulsars) είναι παρόμοια, αν και οι σχετικές ενέργειες είναι πολύ διαφορετικές.

Τα πλανητικά και αστρικά μαγνητικά πεδία οργανώνουν την ιονισμένη ύλη σε αστρικά και γαλαξιακά συστήματα. Αυτή η οργάνωση για την αστροφυσική έχει προφανείς συνέπειες, μια και οι διεργασίες πλάσματος που περιπλέκονται, συχνά παράγουν ραδιοακτίνες, ακτίνες-X και ακτίνες γάμμα, οι οποίες διαδίδονται σε μεγάλες αποστάσεις και μπορούν να ανιχνευθούν στη Γη. Η ανίχνευση τέτοιων εκπομπών επιβεβαιώνει την ύπαρξη και μερικές φορές τη δομή των μαγνητοσφαιρών που διαπερνούν το γαλαξία μας και το σύμπαν. Αυτό αναδεικνύει τη σπουδαιότητα της μελέτης των μαγνητοσφαιρών στο ήλιακό σύστημα, διότι είναι οι μόνες στις οποίες έχουμε πρόσβαση για μετρήσεις επί τόπου που επιτρέπουν να μελετήσουμε τη μικροφυσική και τα φαινόμενα που δημιουργούν μεγάλες συναθροίσεις πλάσματος όπως αυτήν του NGC 1265. Μόνο τέτοιες βασικές παρατηρήσεις θα μάς επιτρέψουν να καταλάβουμε σωστά και να συσχετίσουμε τις παρατηρήσεις μακρινών αστροφυσικών αντικειμένων.

Τέλος, είναι σημαντικό να τονίσουμε ότι το ήλιακό σύστημα από μόνο του μπορεί να θεωρηθεί ως η μαγνητόσφαιρα του Ήλιου, ή ονομαζόμενη Ήλιόσφαιρα. Ένα ιδεατό σχήμα της Ήλιόσφαιρας φαίνεται στην Εικόνα 16. Έδω βλέπουμε μια εγκάρσια τομή του πλάσματος του ήλιακού ανέμου που απομακρύνεται από τον Ήλιο, και τελικά έχει σαν αποτέλεσμα ένα τερματικό κρουστικό κύμα πέρα από τις τροχιές όλων των πλανητών και ακόμα πιο μακριά σε ένα τοξοειδές κρουστικό κύμα, το οποίο σημειώνει το σύνορο μεταξύ του διαστρικού μέσου και της επιρροής του Ήλιου. Οι τροχιές των δύο διαστημοπλοίων Voyager είναι ένθετες και σημειώνουν διεύθυνση στην οποία περιμένουμε να λάβει χώρα η τελευταία «συνάντηση» μεταξύ του διαστημοπλοίου Voyager και της άκρης του ήλιακού συστήματος. Η ακριβής απόστα-



Εικόνα 15. Μαγνητόσφαιρες του ηλιακού συστήματος σε σύγκριση με την υποθετική μαγνητόσφαιρα ενός pulsar και του NGC 1265. Παρατηρήστε την ομοιότητα σε κλίμακα μεταξύ της μαγνητόσφαιρας της Γης και του pulsar, παρόλο που οι σχετικές ενέργειες είναι πάρα πολύ διαφορετικές.



Εικόνα 16. Τò σχήμα τῆς μαγνητόσφαιρας τοῦ Ἡλίου (τῆς Ἡλιοσφαιρας) ὥσως μοιάζει με αὐτὸ τῶν περιοχῶν πλάσματος πού ἐξερευνήθηκαν ἀπὸ τοὺς Voyager. Τὰ διαστημόπλοια Voyager 1 καὶ 2 βρίσκονται τώρα σὲ πορεία πού ὁδηγεῖ ἔξω ἀπὸ τὸ ἡλιακὸ σύστημα. Κάποια στιγμή στὸν ἐπόμενο αἰῶνα ἓνα ἀπ' αὐτὰ θὰ περάσει τὴν ἡλιόπαυση καὶ θὰ μπεῖ στὸ διαστρικό διάστημα (προσφορά τοῦ R. L. McNutt, Jr.).

ση δὲν εἶναι γνωστὴ καὶ οἱ ἀριθμοὶ πού ὑπολογίζονται ἀπὸ τρέχουσες παρατηρήσεις δίνουν ἐλάχιστη ἀπόσταση 80 AU καὶ μεγίστη 150-200 AU (*Journal of Geophys. Research*, Special Issue, 1993). Ἀναμένεται ὅτι τὰ Voyager, θὰ συνεχίσουν νὰ ἔχουν ἱκανοποιητικὴ ἐνέργεια γιὰ νὰ λειτουργήσουν μέχρι τὸ ἔτος 2017, ὅταν ὁ Voyager 1 θὰ ἔχει φτάσει σὲ μιὰ ἀπόσταση ~133 AU, δηλαδή ~20 δισεκατομμύρια km μακριὰ ἀπὸ τὴ Γῆ. Αὐτὸς θὰ εἶναι περίπου ὁ καιρὸς στὸν ὁποῖο θὰ ἔχουμε ἀποκτήσει μιὰ πρώτη κοντινὴ ματιὰ στὴν ἀλληλεπίδραση τοῦ ἡλιακοῦ ἀνέμου με τὸν πλανήτη Πλούτωνα. Θὰ μπορούσε λοιπὸν νὰ εἰπωθεῖ ὅτι ἡ γνώση μας γιὰ τὶς ἀλληλεπιδράσεις τοῦ ἡλιακοῦ ἀνέμου με ὅλα τὰ σώματα τοῦ ἡλιακοῦ συστήματος καὶ τὸ διαστρικό ὄριο δὲ θὰ εἶναι ὁλοκληρωμένη πρὶν ἀπὸ τὶς ἀρχές τοῦ 21ου αἰῶνα.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αυτή η εργασία στηρίχτηκε πολύ σέ προηγούμενες μελέτες τοῦ θέματος ἀπὸ τοὺς Lanzerotti and Krimigis (*Physics Today*, 1985), ἀπὸ τὸν Krimigis (1988) καὶ ἀπὸ συζητήσεις μὲ πολλοὺς συναδέλφους στὸ Ἑργαστήριο Ἐφαρμοσμένης Φυσικῆς καὶ ἄλλοῦ. Ἡ εργασία ὑποστηρίχθηκε κατὰ ἓνα μέρος ἀπὸ τὴ NASA καὶ ἀπὸ τὸ Task 1 τοῦ συμβολαίου N00039-95-C-0002 μεταξὺ τοῦ Πανεπιστημίου Johns Hopkins καὶ τοῦ Ναυτικοῦ. Εὐχαριστίες ἐκφράζονται στοὺς κ.κ. Σιδηρόπουλο καὶ Δαγκλῆ γιὰ τὴν βοήθειά τους στὴν μετάφραση τοῦ κειμένου.

SUMMARY

**The New Solar System: Solar Activity and the Solar Wind Interaction
with the Planets**

Since the onset of space exploration some forty years ago, there has been a revolutionary leap forward in our knowledge of the solar system, to the point where we can justifiably say that we now know a «new solar system». This newness does not only refer to images of planetary surfaces and atmospheres but, most important, to aspects that are not readily observable at visible or infrared wavelengths, such as the magnetic fields and plasma envelopes (magnetospheres) of each object that are of fundamental importance to the formation of the solar system. The sun, at the center of the system, is highly variable and is the principal source of energy that drives the dynamics of solar system magnetospheres through the variability of the solar wind, which expands into the interplanetary medium at about 500 km/sec to at least 10 billion km, and perhaps farther than 15 billion km. The solar wind envelopes planetary magnetic fields, compressing them on the sunward side and extending them into long tails on the nightside. Inside these magnetospheres the plasma is accelerated through betatron and other mechanisms to energies extending to hundreds of MeV close to the planet and to tens of MeV farther out. The largest magnetosphere is that of Jupiter, dwarfing the size of the solar disk and containing plasma that originates principally from the volcanoes of the satellite Io. Jupiter's moon Ganymede and probably Io possess intrinsic magnetic fields that are embedded within the Jovian magnetosphere plasma. Strong radio emissions emanate from most planetary magnetospheres, with those at Jupiter extending to tens of MHz, while for the other planets

cutoffs are on the order of one MHz. Planetary magnetic moments range from $<10^{21}$ gauss cm³ for Venus to $\sim 1.5 \times 10^{30}$ gauss cm³ for Jupiter, while the tilt of the magnetic dipole axis with respect to the planetary rotation axis ranges from $\sim 0^\circ$ at Saturn to 60° at Uranus. Magnetospheres in the solar system constitute veritable plasma laboratories where a variety of phenomena ranging from magnetic field turbulence and reconnection to wave-particle interactions and plasma instabilities of all kinds are observed and modeled in detail. These in-situ studies are invaluable tools in the interpretation of phenomena sensed remotely in astrophysical objects ranging from pulsars to entire galaxies. To complete the exploration of the solar system plasma environment, we still need to investigate in-situ the Pluto-Charon system, the boundary of the heliosphere with the interstellar medium, and the vicinity of the sun itself at ranges ≤ 2 million km.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- H. Alfvén, «On the Theory of Comet Tails», *Tellus* **9**, 92-96 (1957).
- F. Bagenal and R. L. McNutt, Jr., «Pluto's Interaction with the Solar Wind», *Geophys. Res. Lett.* **16**, 1229-1232 (1989).
- J. W. Belcher, H. S. Bridge, F. Bagenal, B. Coppi, O. Divers, A. Eviatar, G. S. Gordon, Jr., A. J. Lazarus, R. L. McNutt, Jr., K. W. Ogilvie, J. D. Richardson, G. L. Siscoe, E. C. Sittler, Jr., J. T. Steinberg, J. D. Sullivan, A. Szabo, L. Villanueva, V. M. Vasyliunas and M. Zhang, «Plasma Observations Near Neptune: Initial Results from Voyager 2», *Science* **246**, 1478-1483 (1989).
- H. S. Bridge, J. W. Belcher, B. Coppi, A. J. Lazarus, R. L. McNutt, Jr., S. Olbert, J. D. Richardson, M. R. Sands, R. S. Selesnick, J. D. Sullivan, R. E. Hartle, K. W. Ogilvie, E. C. Sittler, Jr., F. Bagenal, R. S. Wolff, V. M. Vasyliunas, G. L. Siscoe, C. K. Goertz, and A. Eviatar, «Plasma Observations Near Uranus: Initial Results from Voyager 2», *Science* **233**, 89-93 (1986).
- L. Biermann, «Kometenschweife und Solare Korpuskularstrahlung», *Z. Angew. Phys.* **29**, 274-286 (1951).
- J. F. Carbary and S. M. Krimigis, «Charged Particle Periodicity in the Saturnian Magnetosphere», *Geophys. Res. Lett.* **9**, 1073-1076 (1982).
- J. F. Carbary, S. M. Krimigis and W. H. Ip, «Energetic Particle Microsignatures of Saturn's Satellites», *J. Geophys. Res.* **88**, 8947-8958 (1983).
- A. F. Cheng, «Effects of Io's Volcanoes on the Plasma Torus and Jupiter's Magnetosphere», *Astrophys. J.* **242**, 812 (1980).

- J. E. P. Connerney, M. H. Acuña and N. F. Ness, «The Magnetic Field of Uranus», *J. Geophys. Res.* **92**, 15329 (1987).
- J. E. P. Connerney and N. F. Ness, in *Mercury*, F. Vilas, C. Chapman, M. S. Matthews, eds. University of Arizona Press, Tucson, pp. 494-513 (1988).
- R. B. Decker and A. F. Cheng, «A Model of Triton's Role in Neptune's Magnetosphere», *J. Geophys. Res.* **99**, 19027-19045 (1994).
- R. W. Farquhar, D. W. Dunham and J. V. McAdams, «NEAR Mission Overview and Trajectory Design», *J. Astronaut. Sci.* **43**, 353-372 (1995).
- C. K. Goertz, «Energization of Charged Particles in Jupiter's Outer Magnetosphere», *J. Geophys. Res.* **83**, 3145-3150 (1978).
- T. Gombosi (editor), «Plasma Environments of Non-Magnetic Planets», *Proc. 4th COSPAR Colloquium*, Pergamon Press (1993).
- D. A. Gurnett, W. S. Kurth, R. L. Poynter, L. J. Granroth, I. H. Cairns, W. M. Macek, S. L. Moses, F. V. Coroniti, C. F. Kennel and D. D. Barbosa, «First Plasma Wave Observations at Uranus», *Science* **246**, 1494-1498 (1989).
- D. A. Gurnett, «Solar System Plasma Waves», *75th Anniversary of URSI*, Brussels (April 27 1995).
- D. C. Hamilton, G. Gloeckler, S. M. Krimigis and L. J. Lanzerotti, «Composition of Non-Thermal Ions in the Jovian Magnetosphere», *J. Geophys. Res.* **86**, 8301-8318 (1981).
- T. W. Hill, A. J. Dessler and C. K. Goertz, in *Physics of the Jovian Magnetosphere*, A. J. Dessler, ed., Cambridge, p. 353 (1983).
- W. B. Hubbard and J. J. McFarlane, «Structure and Evolution of Uranus and Neptune», *J. Geophys. Res.* **85**, 225-234 (1980).
- J. Geophys. Res.* **85**, Pioneer Saturn issue, 5651 (1980).
- J. Geophys. Res.* **86**, Voyager Mission to Jupiter issue, 8123 (1981).
- J. Geophys. Res.* **87**, Titan issue, 1351-1418 (1982).
- J. Geophys. Res.* **88**, Voyager Saturn issue, 8625 (1983).
- J. Geophys. Res.* **98**, «Boundaries of the Heliosphere», 15121-15220 (1993).
- M. G. Kivelson, K. K. Khurana, R. J. Walker, C. T. Russell, J. A. Linker, D. J. Southwood, C. Polanskey, «A Magnetic Signature at Io: Initial Report from the Galileo Magnetometer», *Science* **273**, 337-340 (1996).
- M. G. Kivelson, L. F. Bargatze, K. K. Khurana, D. J. Southwood, R. J. Walker and P. J. Coleman, Jr., «Magnetic Field Signatures Near Galileo's Closest Approach to Gaspra», *Science* **261**, 331-335 (1993).
- S. M. Krimigis, «Planetary Magnetospheres: The *in situ* Astrophysical Laboratories», *Proc. 17th International Cosmic Ray Conference* **12**, 229-272 (1981).
- S. M. Krimigis, J. F. Carbary, E. P. Keath, C. O. Bostrom, W. I. Axford, G. Gloeckler, L. J. Lanzerotti, and T. P. Armstrong, «Characteristics of Hot Plasma in the Jovian Magnetosphere: Results from the Voyager Spacecraft», *J. Geophys. Res.* **86**, 8227-8257 (1981).
- S. M. Krimigis, J. F. Carbary, E. P. Keath, T. P. Armstrong, L. J. Lan-

- zerotti, and G. Gloeckler, «General Characteristics of Hot Plasma and Energetic Particles in the Saturnian Magnetosphere: Results from the Voyager Spacecraft», *J. Geophys. Res.* **88**, 8871-8892 (1983).
- S. M. Krimigis, T. P. Armstrong, W. I. Axford, A. F. Cheng, G. Gloeckler, D. C. Hamilton, E. P. Keath, L. J. Lanzerotti and B. H. Mauk, «The Magnetosphere of Uranus: Hot Plasma and Radiation Environment», *Science* **233**, 97-101 (1986a).
- S. M. Krimigis, G. Haerendel, G. Gloeckler, R. W. McEntire, E. G. Shelley, R. B. Decker, G. Paschman, T. A. Potemra, F. W. Scarf, A. L. Brinca, and H. Luhr, «AMPTE Lithium Tracer Releases in the Solar Wind: Observations Inside the Magnetosphere», *J. Geophys. Res.* **91**, 1339-1353 (1986b).
- S. M. Krimigis, «The Sun and the Sun-Earth Connection», *J. Brit. Interpl. Soc.* **41**, 63-80 (1988).
- S. M. Krimigis, T. P. Armstrong, W. I. Axford, C. O. Bostrom, A. F. Cheng, G. Gloeckler, D. C. Hamilton, E. P. Keath, L. J. Lanzerotti, B. H. Mauk, and J. A. Van Allen, «Hot Plasma and Energetic Particles in Neptune's Magnetosphere», *Science* **246**, 1483-1489 (1989).
- S. M. Krimigis, «The Encounter of Voyager 2 with Neptune's Magnetosphere», *Magnetospheric Physics: Achievements and Prospects*, B. Hultqvist and C.-G. Fälthammer (eds.), Plenum Press, New York, NY, pp. 41-60 (1990).
- S. M. Krimigis, «The Magnetosphere of Neptune», *The Planetary Report, Volume XII*, **2**, 10 (1992).
- L. J. Lanzerotti and S. M. Krimigis, «Comparative Magnetospheres», *Physics Today*, **38**, 25-34 (1985).
- L. J. Lanzerotti and S. M. Krimigis, «Comparative Magnetospheres», *Johns Hopkins APL Tech. Digest* **7**, 335-347 (1986).
- B. H. Mauk, E. P. Keath, M. Kane, S. M. Krimigis, A. F. Cheng, M. H. Acuña, T. P. Armstrong and N. F. Ness, «The Magnetosphere of Neptune: Hot Plasmas and Energetic Particles», *J. Geophys. Res.* **96**, 19061-19084 (1991).
- B. H. Mauk, S. M. Krimigis, A. F. Cheng, and R. S. Selesnick, in *Neptune and Triton*, D. Cruikshank (ed.), University of Arizona Press, pp. 169-232 (1995).
- National Research Council, «An Integrated Strategy for the Planetary Sciences», Space Studies Board, NRC, Washington, DC (1994).
- Nature* **321**, «Encounters with Comet Halley», 259-365 (1986).
- N. F. Ness, «The Magnetic Fields of Mercury, Mars and Moon», *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.* **7**, 249-288 (1979).
- N. F. Ness, M. H. Acuña, R. P. Lepping, L. F. Burlaga, K. W. Behannon and F. M. Neubauer, «Magnetic Field Studies at Jupiter by Voyager 1: Preliminary Results», *Science* **204**, 982-987 (1979).
- N. F. Ness, M. H. Acuña, K. W. Behannon, L. F. Burlaga, J. E. P. Connerney, R. P. Lepping and F. M. Neubauer, «Magnetic Fields at Uranus», *Science* **233**, 85-89 (1986).

- N. F. Ness, M. H. Acuña, L. F. Burlaga, J. E. P. Connerney, R. P. Lepping, and F. M. Neubauer, «Magnetic Fields at Neptune», *Science* **246**, 1473-1478 (1989).
- K. R. Pyle and J. A. Simpson, «The Jovian Relativistic Electron Distribution in Interplanetary Space from 1 to 11 AU: Evidence for a Continuously Emitting 'Point' Source», *Astrophys. J.* **215**, L89 (1977).
- C. T. Russell, in *Solar System Plasma Physics*, C. F. Kennel, L. J. Lanzerotti, and E. N. Parker, eds., North Holland, Amsterdam, **2**, p. 207 (1979).
- Science* **232**, The Explorer Mission to Comet Giacobini-Zinner issue, 353-385 (1986).
- J. A. Simpson et al., «Energetic Charged-Particle Phenomena in the Jovian Magnetosphere: First Results from the Ulysses COSPIN Collaboration», *Science* **257**, 1543-1550 (1992).
- S. A. Stern, «The Pluto-Charon System», *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **30**, 185-233 (1992).
- J. W. Warwick, D. W. Evans, J. H. Romig, C. B. Sawyer, M. D. Desch, M. L. Kaiser, J. K. Alexander, T. D. Carr, D. H. Staelin, S. Gulkis, R. L. Poynter, M. Aubier, A. Boischot, Y. Leblanc, A. Lecacheux, B. M. Pedersen, and P. Zarka, «Voyager 2 Radio Observations of Uranus», *Science* **233**, 102-106 (1986).
- J. W. Warwick, D. W. Evans, G. R. Peltzer, R. G. Peltzer, J. H. Romig, C. B. Sawyer, A. C. Riddle, A. E. Schweitzer, M. D. Desch, M. L. Kaiser et al., «Voyager Planetary Radio Astronomy at Neptune», *Science* **243**, 1498-1501 (1989).
- A. V. Zakharov, «The Plasma Environment of Mars: Phobos Mission Results, in Venus and Mars: Atmospheres, Ionospheres, and Solar Wind Interactions», Luhman, Tarrallay, and Pepin (eds.), *Geophysical Monograph 66*, AGU Press, Washington, DC (1992).
- R. D. Zwickl, S. M. Krimigis, J. F. Carbary, E. P. Keath, T. P. Armstrong, D. C. Hamilton, and G. Gloeckler, «Energetic Particle Events (≥ 30 keV) of Jovian Origin Observed by Voyager 1 and 2 in Interplanetary Space», *J. Geophys. Res.* **86**, 8125-8140 (1981).

ΠΙΝΑΚΑΣ 1

Πλανητικές ιδιότητες

	Απόσταση από τον Ήλιο (AU)	Ακτίνα (10 ³ km)	Περίοδος περιστροφής	Κλίση άξονα περιστροφής (μοίρες)	Μέση Πυκνότητα	Βαρύτητα Επιφανείας	Ταχύτητα Διαφυγής
Ερμής	0.4	2.44	58.6	0.0	5.4	2.8	4.2
Αφροδίτη	0.7	6.10	243	177.4	5.2	8.9	10.4
Γη	1.0	6.37	1	23.4	5.5	9.8	11.2
Αρης	1.5	3.38	1.02	25.2	3.9	3.7	5
Δίας	5.2	71.4	0.41	3.1	1.3	22.9	60
Κρόνος	9.5	60.4	0.44	25.3	0.7	9.0	36
Ουρανός	19.2	25.6	0.72	97.9	1.18	7.8	21
Ποσειδώνας	30.0	25.3	0.67	28.3	1.64	11.0	24
Πλούτωνας	39.4	1.15	6.39	122.5	2.03	0.4	1.2

ΛΟΓΟΙ

ΠΙΝΑΚΑΣ 2

Πλανητικές μαγνητικές ιδιότητες

Διπολική Ροπή (gauss cm ³)	Μαγνητικό πεδίο έπιφανείας στον ισημερινό (gauss)	Πολικότητα (σχετικά με τη Γῆ)	Γωνία Μαγνητικοῦ Ἀξονα (μοῖρες πρὸς τὸν ἄξονα περιστροφῆς)	Πηγές Πλάσματος	Τυπικὴ Θέση Μαγνητόπλευρης (planetary radii)
Ἑρμῆς $\sim 6 \times 10^{22}$	0.0035	Ἰδία	~ 10	W:	1.1
Ἀφροδίτη $< 10^{21}$	$< 0-0003$	Ἰδία	—	A	1.1
Γῆ 8×10^{25}	0.31	Ἰδία	11.5	W,A	10
Ἀρης $2.5 \times 10^{22}(;)$	0.00065(;)	Ἀντιθετῇ(;)	—	;	;
Δίας 1.5×10^{30}	4.1	Ἀντιθετῇ	~ 10	W,A,S	60-100
Κρόνος 1.5×10^{29}	0.4	Ἀντιθετῇ	< 1	W,A,S	20-25
Οὐρανός 3.9×10^{27}	0.23**	Ἀντιθετῇ	60	A,S(;)	18-25
Ποσειδῶνας 2×10^{27}	0.13	Ἀντιθετῇ	47	A,S	23-26.5

* W = ἡλιακὸς ἄνεμος, A = ἀτμόσφαιρα, S = δορυφόροι.

** Λόγω τῆς διπολικῆς ροπῆς, τὸ μαγνητικὸ πεδίο ἐπιφανείας κυμαίνεται ἀπὸ 0.1 σὲ 1.1 gauss.