

ΕΞΩΗΛΙΑΚΑ ΠΛΑΝΗΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

και η δυνατότητα υπάρξεως ζωής σε άλλους κόσμους

Ιωάννης Δ. Χατζηδημητρίου
Ομότιμος καθηγητής του Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης
Αντεπιστέλλον μέλος της Ακαδημίας Αθηνών

I. Εισαγωγή

Το πρόβλημα της υπάρξεως ζωής σε άλλους κόσμους απασχολεί την ανθρωπότητα εδώ και χιλιάδες χρόνια. Παρά τις προσπάθειες που γίνονται, δεν υπάρχουν μέχρι σήμερα ενδείξεις ζωής σε πλανήτες του δικού μας Ηλιακού Συστήματος, εκτός βέβαια από τη Γη. Είναι σαφές ότι δεν υπάρχει νοήμων ζωή στο Ηλιακό Σύστημα, αλλά οι προσπάθειες για την αναζήτηση κάποιων μορφών ζωής, έστω και πρωτόγονης, συνεχίζονται μέχρι σήμερα για τον Άρη και για τους δορυφόρους του Δία και του Κρόνου, διότι υπάρχουν ενδείξεις για ύπαρξη νερού σε υγρή μορφή κάτω από την επιφάνεια αυτών των σωμάτων.

Το ερώτημα που τίθεται τώρα είναι αν υπάρχει ζωή εκτός του Ηλιακού μας Συστήματος. Είναι φανερό ότι προϋπόθεση για τη δημιουργία ζωής κάπου στο σύμπαν είναι η ύπαρξη πλανητικών συστημάτων τα οποία να φέρουν πλανήτες στους οποίους οι συνθήκες θα είναι ευνοϊκές για ανάπτυξη ζωής. Μέχρι τα μέσα της δεκαετίας του 1990 δεν γνωρίζαμε τίποτα για ύπαρξη νέων πλανητικών συστημάτων και έτσι υπήρχε η εντύπωση ότι είμαστε μόνοι στο σύμπαν, αν και πολλοί πίστευαν ότι θα πρέπει να υπάρχουν πλανητικά συστήματα, όπως το δικό μας Ηλιακό Σύστημα. Και τότε έγινε το μεγάλο άλμα. Το 1995 ανακοινώθηκε, από την ομάδα του Michel Mayor και Didier Queloz στη Γενεύη, η πρώτη ανακάλυψη ενός πλανήτη ο οποίος περιφέρεται γύρω από ένα αστέρι όμοιο με τον δικό μας Ήλιο, τον αστέρα 51 του Πήγασου. Η μάζα του πλανήτη αυτού είναι της τάξεως μεγέθους του Δία και είναι πολύ κοντά προς τον αστέρα, είναι δηλαδή πολύ διαφορετικός από τη Γη μας.

Από τότε άρχισε μια πολύ έντονη επιστημονική δραστηριότητα, και μέχρι σήμερα (Φεβρουάριος 2009) έχουν ανακαλυφθεί:

- Πλανητικά Συστήματα: 288
- Πλανήτες: 340
- Γήινοι πλανήτες: 0

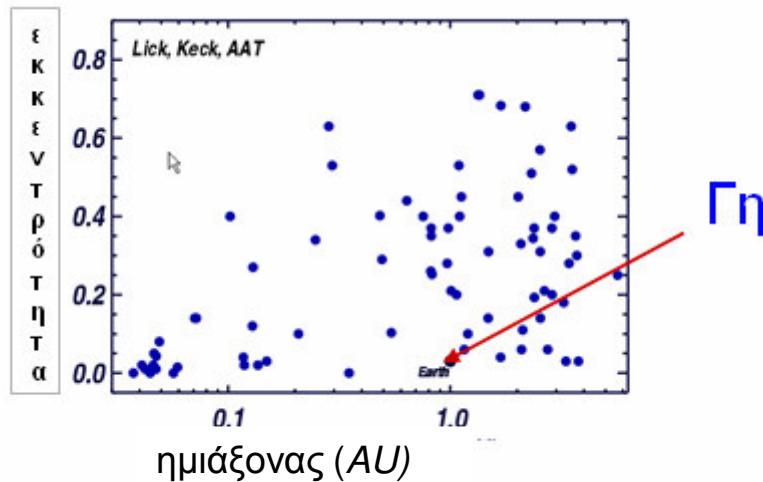
Παρατηρήστε ότι οι πλανήτες είναι περισσότεροι από τον αριθμό των πλανητικών συστημάτων, διότι μερικά πλανητικά συστήματα έχουν περισσότερους του ενός πλανήτες. Γνωρίζουμε πλανητικά συστήματα ακόμη και με 5 πλανήτες. Είναι ενδιαφέρον ότι κανένας από τους πλανήτες αυτούς δεν είναι όμοιος με τη Γη. Τα νέα αυτά πλανητικά συστήματα ονομάζονται *εξωηλιακά πλανητικά συστήματα*.

2. Τα νέα πλανητικά συστήματα

Τα εξωηλιακά πλανητικά συστήματα που ανακαλύφθηκαν μέχρι σήμερα είναι πολύ διαφορετικά από το δικό μας Ηλιακό Σύστημα. Οι περισσότεροι πλανήτες έχουν μεγάλες μάζες, κινούνται σε ελλειπτικές τροχιές με μεγάλες εκκεντρότητες και είναι μακριά από τον αστέρα (ήλιο). Υπάρχουν όμως και πλανήτες με μεγάλες μάζες οι οποίοι περιφέρονται γύρω από τον αστέρα σε πολύ μικρή απόσταση σε σχεδόν κυκλική τροχιά. Η *εκκεντρότητα* είναι μια παράμετρος η οποία εκφράζει την απόκλιση από την κυκλική τροχιά. Μια σχεδόν κυκλική τροχιά, όπως είναι η τροχιά της Γης και των περισσότερων πλανητών του Ηλιακού μας

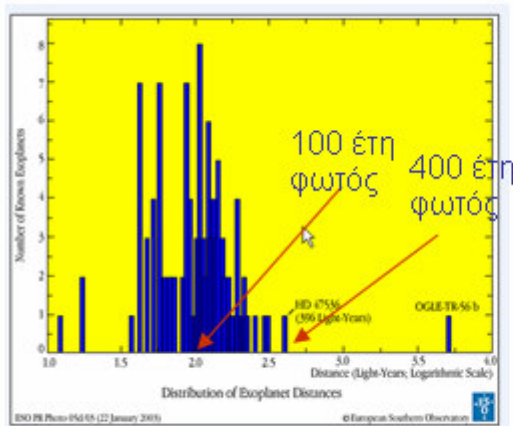
συστήματος, έχει εκκεντρότητα κοντά στο μηδέν. Όσο μεγαλύτερη είναι η εκκεντρότητα μιας τροχιάς τόσο πιο επιμήκης είναι η τροχιά. Αυτό σημαίνει ότι κατά τη διάρκεια μιας περιφοράς του πλανήτη γύρω από τον αστέρα, η απόσταση μεταβάλλεται και άλλοτε πλησιάζει πολύ προς τον αστέρα και άλλοτε απομακρύνεται σε μεγάλη απόσταση, σε αντίθεση με την κυκλική τροχιά όπου ο πλανήτης είναι σε σταθερή απόσταση από τον αστέρα.

Η κατανομή των εκκεντροτήτων των πλανητικών τροχιών ως προς τις διαστάσεις της τροχιάς (μεγάλος ημιάξονας) δίδεται στο Σχήμα 1.

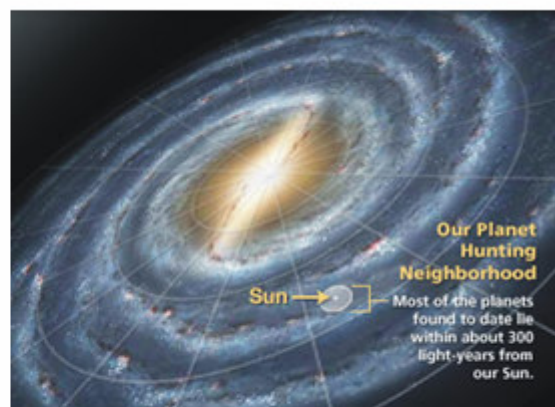


Σχήμα 1: Η κατανομή των εκκεντροτήτων των πλανητικών τροχιών ως προς τις διαστάσεις της τροχιάς (μεγάλος ημιάξονας). Παρατηρήστε ότι υπάρχουν πλανήτες πολύ κοντά στον αστέρα, με σχεδόν κυκλική τροχιά, αλλά οι περισσότεροι πλανήτες είναι σε μεγάλη απόσταση και έχουν μεγάλη εκκεντρότητα. Η κλίμακα των διαστάσεων (οριζόντιος άξονας) είναι λογαριθμική.

Η κατανομή των αποστάσεων των εξωηλιακών πλανητικών συστημάτων δίδεται στο Σχήμα 2α. Τα περισσότερα είναι σε μια ακτίνα 300 ετών φωτός, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2β.



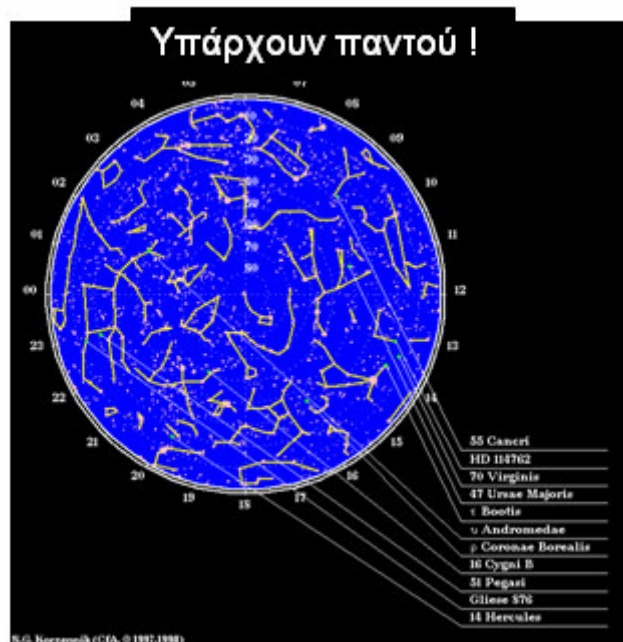
(α)



(β)

Σχήμα 2: (α) Η κατανομή των αποστάσεων των εξωηλιακών πλανητικών συστημάτων από τη Γη. Παρατηρήστε ότι η κλίμακα είναι λογαριθμική. (β) Η περιοχή του γαλαξία μας όπου παρατηρήθηκαν τα περισσότερα εξωηλιακά πλανητικά συστήματα, σε μια ακτίνα 300 ετών φωτός.

Τα νέα πλανητικά συστήματα είναι παντού στην ουράνιο σφαίρα. Στο Σχήμα 3 παρουσιάζεται η κατανομή μερικών από τα πιο γνωστά εξωηλιακά συστήματα.



Σχήμα 3: Η κατανομή ορισμένων εξωηλιακών πλανητικών συστημάτων στην ουράνιο σφαίρα.

3. Μέθοδοι ανιχνεύσεως πλανητικών συστημάτων

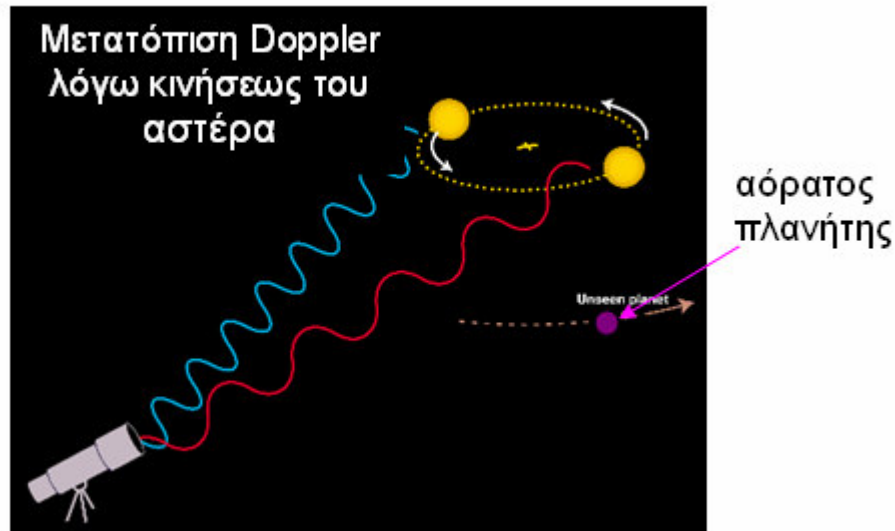
Υπάρχουν διάφοροι μέθοδοι για την ανακάλυψη πλανητικών συστημάτων. Όλες οι μέθοδοι είναι έμμεσοι, δηλαδή δεν παρατηρούμε άμεσα τον πλανήτη, αλλά παρατηρούμε τις συνέπειες που προκαλεί στον αστέρα του. Μόλις το Νοέμβριο του έτους 2008 είχαμε άμεση φωτογράφιση εξωηλιακών πλανητών, όπως θα εξηγήσουμε στην επόμενη παράγραφο.

Θα περιγράψουμε εδώ δύο από τις επικρατέστερες μεθόδους, τη μέθοδο των ακτινικών ταχυτήτων και τη μέθοδο των διαβάσεων του πλανήτη μπροστά από τον αστρικό δίσκο.

3.1 Η μέθοδος των ακτινικών ταχυτήτων

Συνήθως λέμε ότι ο ήλιος είναι ακίνητος και ότι ο πλανήτης διαγράφει μια ελλειπτική τροχιά γύρω από το Ήλιο - το γνωστό ηλιοκεντρικό σύστημα, που ισχύει προφανώς και για κάθε πλανητικό σύστημα. Στην πραγματικότητα τόσο ο ήλιος όσο και ο πλανήτης διαγράφουν *όμοιες* τροχιές γύρω από το κέντρο μάζας τους, το οποίο είναι ακίνητο ως προς κάποιο σύστημα αναφοράς (που ονομάζεται αδρανειακό σύστημα). Οι δύο αυτές όμοιες τροχιές δεν είναι όμως των ιδίων διαστάσεων, αλλά είναι αντιστρόφως ανάλογοι των μαζών. Έτσι, ο ήλιος διαγράφει μια ελλειπτική τροχιά πολύ μικρών διαστάσεων. Λόγω της κινήσεως του αστέρα γύρω από το κέντρο μάζας του συστήματος, άλλες φορές κινείται με κατεύθυνση προς εμάς και άλλες φορές στην αντίθετη κατεύθυνση, κατά τη διάρκεια μιας περιφοράς του πλανήτη γύρω από το ήλιο. Η κίνηση αυτή μπορεί να παρατηρηθεί.

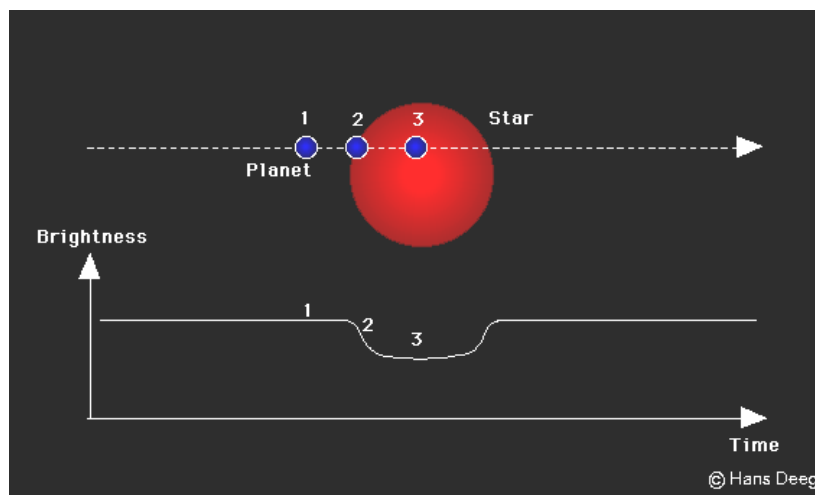
Στο Σχήμα 4 φαίνεται ο αστέρας και ο πλανήτης, οι οποίοι κινούνται γύρω από το κοινό κέντρο μάζας τους. Εμείς δεν βλέπουμε τον πλανήτη, διότι είναι πολύ αμυδρός, αλλά την κίνηση του αστέρα, ο οποίος άλλοτε κινείται προς εμάς, με αποτέλεσμα το φως που εκπέμπει να μετατοπίζεται προς το κυανούν και άλλοτε απομακρύνεται από εμάς, με αποτέλεσμα το φως του να μετατοπίζεται προς το ερυθρό (γνωστό από τη φυσική ως φαινόμενο Doppler). Από τη μεταβολή του φάσματος του φωτός μετρούμε την μεταβολή της ακτινικής ταχύτητας του αστέρα και υπολογίζουμε τα στοιχεία της τροχιάς του πλανήτη.



Σχήμα 4: Η μεταβολή της ακτινικής ταχύτητας του αστέρα, καθώς περιφέρεται γύρω από το κέντρο μάζας του συστήματος. Ο πλανήτης είναι αόρατος.

3.2 Η μέθοδος των διαβάσεων του πλανήτη μπροστά από τον αστέρα

Ας θεωρήσουμε ένα πλανητικό σύστημα και ας υποθέσουμε ότι βρισκόμαστε περίπου στο επίπεδο της πλανητικής τροχιάς. Καθώς ο πλανήτης περιφέρεται γύρω από τον αστέρα, θα περάσει μπροστά από τον αστρικό δίσκο. Αυτό έχει ως συνέπεια να μειωθεί η λαμπρότητα του αστέρα, έστω και αν η μεταβολή αυτή είναι πολύ μικρή, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5. Για έναν πλανήτη παρόμοιο με τη Γη, η μεταβολή της λαμπρότητας του αστέρα είναι περίπου το $1/10,000$, η οποία όμως είναι ανιχνεύσιμη. Η διάρκεια της διαβάσεως είναι από 2 μέχρι 16 ώρες.



Σχήμα 5: Η μεταβολή της λαμπρότητας του αστέρα καθώς περνάει ο πλανήτης από τον αστρικό δίσκο.

Εδώ θα πρέπει να παρατηρήσουμε ότι η λαμπρότητα ενός αστέρα μεταβάλλεται και λόγω εσωτερικών αιτιών. Για να είμαστε βέβαιοι ότι η μεταβολή της λαμπρότητας που παρατηρούμε οφείλεται σε διάβαση πλανήτη και όχι σε άλλα αίτια, πρέπει το φαινόμενο να είναι απολύτως περιοδικό. Αυτό σημαίνει ότι θα πρέπει να παρατηρήσουμε τουλάχιστον τρεις διαδοχικές διαβάσεις για να έχουμε αξιόπιστα αποτελέσματα, δηλαδή η παρατήρηση πρέπει να διαρκέσει τουλάχιστον τρεις πλανητικές περιόδους. Τονίζουμε ακόμη ότι για να γίνει δυνατή η παρατήρηση ενός πλανήτη γύρω από έναν αστέρα, θα πρέπει να είμαστε στο κατάλληλο

επίπεδο, το επίπεδο της πλανητικής τροχιάς, και συνεπώς η πιθανότητα ανιχνεύσεως είναι μικρή, αλλά όχι αμελητέα, όπως θα δούμε στα επόμενα.

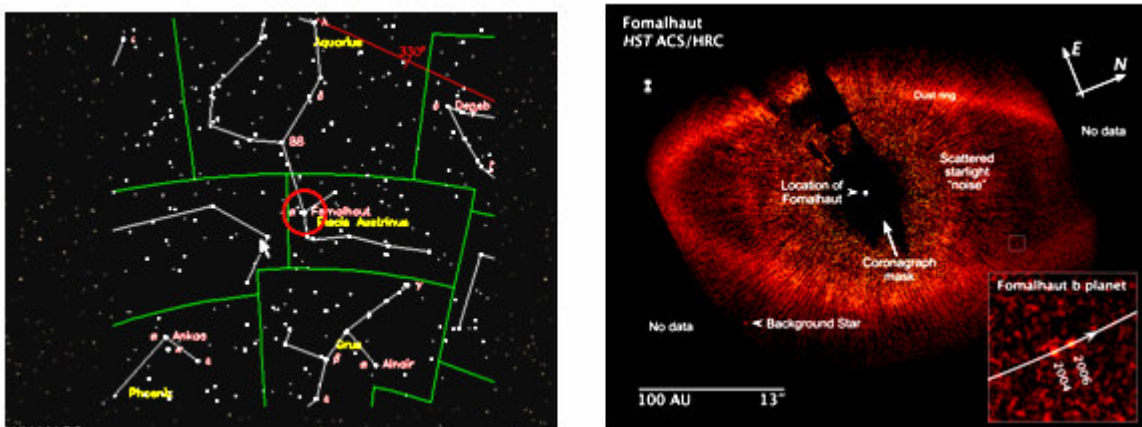
4. Άμεση παρατήρηση πλανητών

Οι δύο παραπάνω μέθοδοι ανιχνεύσεως πλανητών είναι έμμεσοι. Δεν παρατηρούμε τον πλανήτη, αλλά την επίδρασή του στον αστέρα. Με τη μέθοδο των ακτινικών ταχυτήτων παρατηρούμε την κίνηση του αστέρα γύρω από το κέντρο μάζας του συστήματος, ενώ με τη μέθοδο των διαβάσεων παρατηρούμε τη μεταβολή της λαμπρότητας του αστέρα, λόγω της κινήσεως ενός αόρατου πλανήτη. Το Νοέμβριο του έτους 2008 ανακοινώθηκε η άμεση παρατήρηση πλανητών. Θα αναφέρουμε δύο τέτοιες περιπτώσεις.

4.1 Ο αστέρας Fomalhaut στον αστερισμό του Νοτίου ιχθύος

Ο πρώτος εξωηλιακός πλανήτης που φωτογραφήθηκε είναι ένας πλανήτης γύρω από έναν λαμπρό αστέρα, τον Fomalhaut, στον αστερισμό του Νοτίου ιχθύος (Σχήμα 6α), που βρίσκεται σε απόσταση 25 ετών φωτός. Στο Σχήμα 6β φαίνεται ο αστέρας Fomalhaut και το νέφος σκόνης και μικρών σωματιδίων που τον περιβάλλει (το φωτεινότερο τμήμα στο σχήμα), με ακτίνα περίπου 133 AU (1 AU είναι η απόσταση Γης-Ηλίου). Ο δίσκος αυτός είναι παρόμοιος με τη ζώνη Kuiper που περιβάλλει το δικό μας Ηλιακό σύστημα, πέραν από την τροχιά του Ποσειδώνα. Ο πλανήτης ευρίσκεται στο εσωτερικό άκρο αυτής της ζώνης, η μάζα του είναι της τάξεως της μάζας του Δία, (αλλά μπορεί να είναι και μικρότερη, ίση προς τη μάζα του Ποσειδώνα), έχει μεγάλο ημιάξονα ίσο προς 115 AU, εκκεντρότητα περίπου ίση προς 0.11 και περίοδο 872 έτη. Η κίνησή του φαίνεται στο κάτω αριστερό τετράγωνο, όπου παρουσιάζονται οι θέσεις του τα έτη 2004 και 2006.

Η παρατήρηση έγινε από τον Paul Kalas και την ομάδα του στο Berkley. Αξίζει να σημειωθεί ότι η ύπαρξη της ζώνης μικρών σωμάτων που περιβάλλει τον πλανήτη ήταν γνωστή από χρόνια και είχε διαπιστωθεί ότι η ζώνη αυτή διαταράσσεται. Έτσι δημιουργήθηκε η υποψία ότι η διαταραχή αυτή οφείλεται στην ύπαρξη κάποιου, αόρατου τότε, πλανήτη, ο οποίος τελικά παρατηρήθηκε άμεσα με το διαστημικό τηλεσκόπιο Hubble. Στο Σχήμα 6β παρουσιάζεται ο χάρτης του ουρανού με τη θέση του αστέρα Fomalhaut.

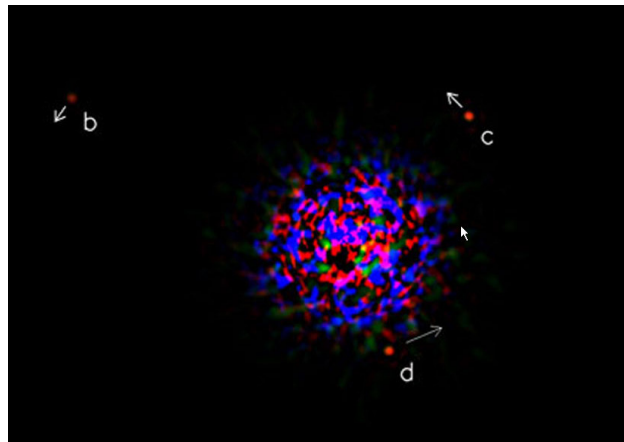


Σχήμα 6: (α) Ο αστερισμός του Νοτίου ημισφαιρίου όπου βρίσκεται ο Fomalhaut. (β) Άμεση παρατήρηση ενός πλανήτη που περιφέρεται γύρω από τον αστέρα Fomalhaut (οι θέσεις του τα έτη 2004 και 2006 φαίνονται στο κάτω δεξιά τετράγωνο). Ο αστέρας αυτός περιβάλλεται από νέφος σκόνης και μικρών σωματιδίων, παρόμοιο με τη ζώνη Kuiper στο δικό μας Ηλιακό Σύστημα.

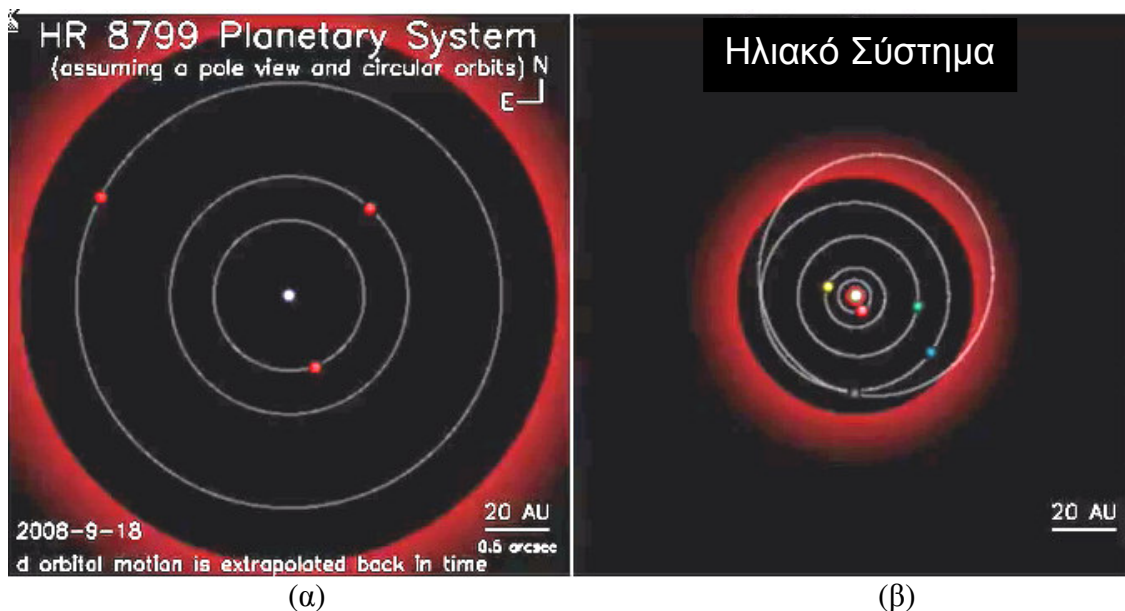
4.2 Ο αστέρας HR 8799 στον αστερισμό του Πήγασου

Άμεση παρατήρηση πλανητών είχαμε και γύρω από έναν άλλο αστέρα, τον HR 8799 στον αστερισμό του Πήγασου, σε απόσταση 129 ετών φωτός. Ο αστέρας έχει μάζα ίση προς 1,5 ηλιακές μάζες και περιφέρονται γύρω από αυτόν τρεις πλανήτες, όπως φωτογραφήθηκαν απευθείας (Σχήμα 7). Οι πλανήτες είναι σε μεγάλες αποστάσεις και έχουν μεγάλες μάζες, της τάξεως της μάζας του Δία. Ειδικότερα, οι τροχιές τους είναι περίπου κυκλικές με ακτίνες $24 AU$, $38 AU$ και $68 AU$ και έχουν μάζες 7, 10 και 10 μάζες Δία, αντίστοιχα. Στο σύστημα αυτό υπάρχει χώρος για ύπαρξη Γήινων πλανητών, που δεν παρατηρούνται.

Το πλανητικό αυτό σύστημα περιβάλλεται από δίσκο σκόνης και μικρών σωμάτων, παρόμοιο με τη ζώνη Kuiper του δικού μας Ηλιακού συστήματος, ο οποίος βρίσκεται σε ακτίνα $75 AU$. Η παρατήρηση έγινε με το Gemini North telescope and W.M. Keck Observatory στο Mauna Kea στη Hawaii.



Σχήμα 7: Οι τρεις πλανήτες που περιφέρονται γύρω από τον αστέρα HR 8799.



Σχήμα 8: (α) Το πλανητικό σύστημα HR 8799 με τους τρεις πλανήτες του σε κυκλική τροχιά.. (β) Το δικό μας Ηλιακό σύστημα, για σύγκριση. Παρατηρήσατε το νέφος σκόνης που περιβάλλει και τα δύο συστήματα.

5. Ύπαρξη ζωής σε άλλους κόσμους

Από τις μέχρι τώρα παρατηρήσεις γνωρίζουμε ότι υπάρχουν τρία είδη εξωηλιακών πλανητών:

- Αέριοι γίγαντες
- Θερμοί υπεργήινοι πλανήτες με πολύ μικρή περίοδο (τροχιά κοντά στον αστέρα)
- Παγωμένοι γίγαντες.

Η πρόκληση τώρα είναι να βρεθούν *Γήινοι πλανήτες σε κατοικήσιμη περιοχή*. Γήινος πλανήτης είναι ένας πλανήτης με μάζα περίπου ίση προς τη μάζα της Γης, ο οποίος περιφέρεται γύρω από έναν αστέρα όμοιο με τον Ήλιο μας, σε απόσταση 1 AU (μια ακτίνα Γης).

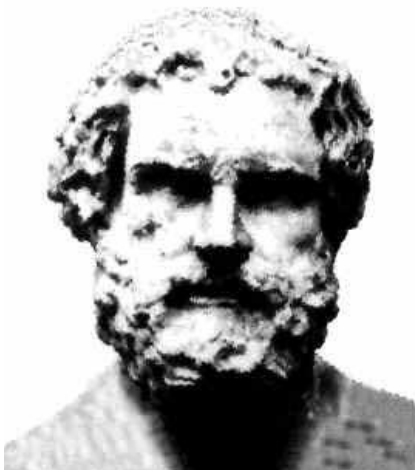
Το ιδιαίτερο ενδιαφέρον για Γήινους πλανήτες οφείλεται στο ότι εκεί είναι πιθανή η ύπαρξη ζωής, τουλάχιστον ζωής όπως τη γνωρίζουμε εμείς.

Μέχρι τώρα δεν είναι γνωστή η ύπαρξη Γήινων πλανητών, όπως ήδη αναφέραμε στην Εισαγωγή. Μήπως όμως υπάρχουν και δεν τους έχουμε ακόμη ανακαλύψει; Γνωρίζουμε ότι

- Υπάρχουν 100 δισεκατομμύρια αστέρες στο Γαλαξία μας (ο αριθμός αυτός μπορεί να είναι και μεγαλύτερος!). Ένα μεγάλο ποσοστό από τους αστέρες αυτούς έχει πλανήτες. (Το ποσοστό αυτό δεν είναι γνωστό, αλλά είναι αρκετά σημαντικό)
- Υπάρχουν 100 δισεκατομμύρια γαλαξίες!

Μήπως κάπου υπάρχει ζωή; Η ύπαρξη νοήμονος ζωής είναι άλλο θέμα!

Η ύπαρξη ζωής σε άλλους κόσμους απασχόλησε την ανθρωπότητα εδώ και χιλιάδες χρόνια. Από τους πρώτους που μίλησαν για ύπαρξη ζωής σε άλλους κόσμους είναι ο *Δημόκριτος* (460 – 370 π.Χ.):



Υπάρχουν άπειροι κόσμοι με διαφορετικά μεγέθη. Σε μερικούς από αυτούς δεν υπάρχει ούτε Ήλιος ούτε Σελήνη, σε άλλους τα δύο αυτά ουράνια αντικείμενα είναι μεγαλύτερα από όσο στον δικό μας κόσμο και σε άλλους περισσότερα. Τα διαστήματα μεταξύ των κόσμων είναι άνισα, σε μερικά μέρη υπάρχουν περισσότεροι κόσμοι, σε άλλα λιγότεροι, μερικοί αναπτύσσονται, μερικοί είναι στο αποκορύφωμα της ανάπτυξής τους και μερικοί παρακμάζουν. Αλλού οι κόσμοι δημιουργούνται και αλλού καταστρέφονται. Η καταστροφή τους οφείλεται στην αμοιβαία τους σύγκρουση.

Ένας άλλος φιλόσοφος της αρχαιότητας, ο *Επίκουρος* (300 π.Χ.), μίλησε επίσης για ύπαρξη ζωής σε άλλους κόσμους:

Υπάρχουν άπειροι κόσμοι και όμοιοι και διαφορετικοί από τον δικό μας κόσμο... Πρέπει να πιστέψουμε ότι σε όλους

τους κόσμους υπάρχουν ζωντανά όντα και πλανήτες και άλλα πράγματα που βλέπουμε στο δικό μας κόσμο.

Εκτός από την αρχαιότητα, υπήρξαν και διανοητές του μεσαίωνα , που μίλησαν για ύπαρξη ζωής σε άλλους κόσμους, όπως ο Giordano Bruno στο έργο του De l' infinito Universo e Mondi, 1584:



Υπάρχουν αναρίθμητοι Ήλιοι και αναρίθμητες Γαίες οι οποίες περιστρέφονται γύρω από τους ήλιους τους με τον ίδιο ακριβώς τρόπο όπως οι επτά πλανήτες του συστήματός μας... Οι αναρίθμητοι κόσμοι στο σύμπαν δεν είναι χειρότεροι ούτε λιγότερο κατοικήσιμοι από τη Γη μας.

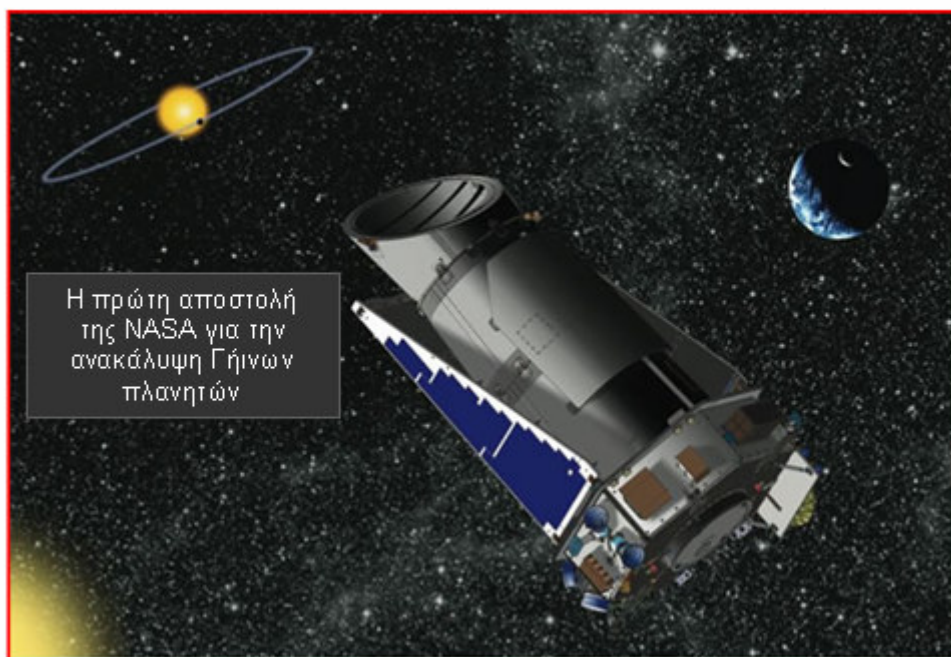
6. Αναζήτηση Γήινων πλανητών σε κατοικήσιμη περιοχή

6.1 Το πρόγραμμα Kepler

Όπως αναφέραμε, η ύπαρξη Γήινων πλανητών είναι σημαντική, διότι σε τέτοιους πλανήτες οι συνθήκες είναι ευνοϊκές για τη δημιουργία κάποιας μορφής ζωής. Για το σκοπό αυτό η NASA ανέπτυξε το πρόγραμμα Kepler για την ανακάλυψη Γήινων πλανητών:

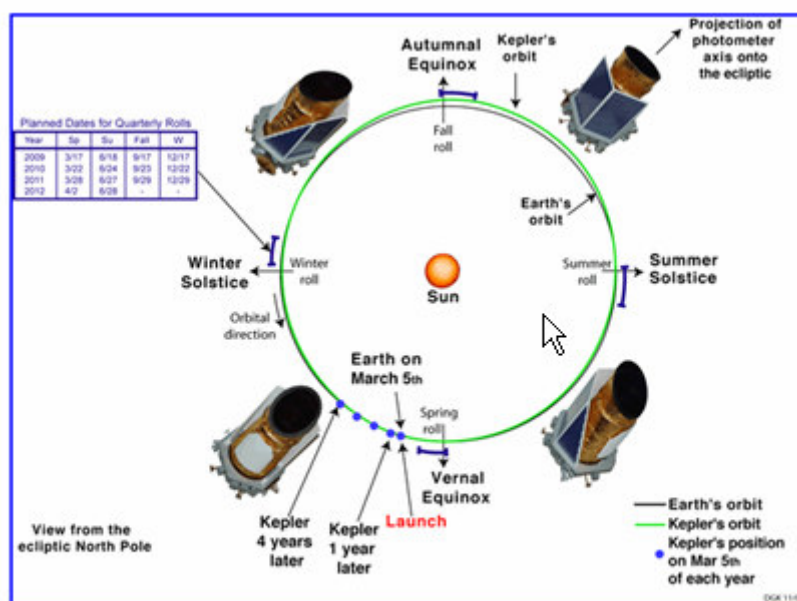


Χρησιμοποιείται η μέθοδος των διαβάσεων του πλανήτη μπροστά από τον αστέρα. Το πρόγραμμα αυτό προβλέπει την εκτόξευση ενός διαστημόπλοιου, το οποίο θα φέρει τηλεσκόπιο διαμέτρου 1 μέτρου και ειδικό φωτόμετρο (Σχήμα 9). Η εκτόξευση είναι προγραμματισμένη για την 6^η Μαρτίου 2009.



Σχήμα 9: Το διαστημόπλοιο του προγράμματος Kepler για την ανακάλυψη Γήινων πλανητών.

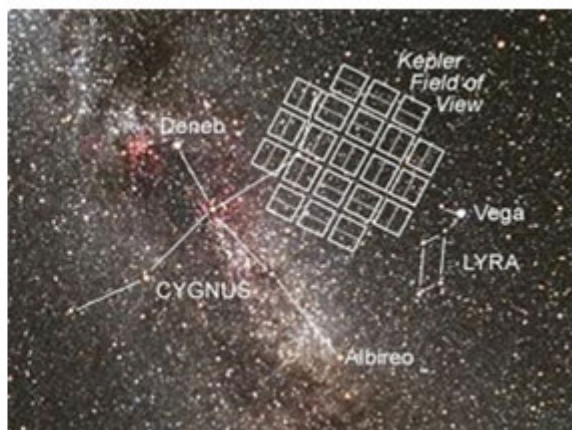
Η τροχιά του διαστημόπλοιου θα είναι ηλιοκεντρική, δηλαδή θα περιφέρεται γύρω από τον Ήλιο, με περίοδο 372,5 ημερών, που είναι λίγο μεγαλύτερη από ένα έτος, ώστε το διαστημόπλοιο θα μένει κάθε χρόνο λίγο πιο πίσω από τη Γη (Σχήμα 10).



Ηλιοκεντρική τροχιά της αποστολής Kepler

Σχήμα 10: Η ηλιοκεντρική τροχιά του διαστημόπλοιου του προγράμματος Kepler. Φαίνονται οι θέσεις του διαστημόπλοιου στις 5 Μαρτίου για τα επόμενα 4 χρόνια.

Ο χώρος του γαλαξία που θα ανιχνεύσει το πρόγραμμα καλύπτει μια απόσταση 3000 ετών φωτός, προς τον αστερισμό του Κύκνου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 11. Η κατεύθυνση του τηλεσκοπίου είναι έξω από το επίπεδο της τροχιάς της Γης γύρω από τον Ήλιο, ώστε το φως των αστερών να μη επισκιάζεται περιοδικά από τον Ήλιο και τη Σελήνη.



Σχήμα 11: (α) Ο χώρος στο γαλαξία στον οποίο θα αναζητήσει το πρόγραμμα Γήινους πλανήτες. (β) Η περιοχή του ουρανού, στην περιοχή του Κύκνου την οποία θα μελετήσει το πρόγραμμα Kepler.

Όπως ήδη αναφέραμε, η μέθοδος που θα χρησιμοποιηθεί για την ανακάλυψη εξωηλιακών πλανητικών συστημάτων είναι η μέθοδος των διαβάσεων του πλανήτη μπροστά από τον αστρικό δίσκο. Για να παρατηρήσουμε όμως τη διάβαση, θα πρέπει να είμαστε στο κατάλληλο επίπεδο, το οποίο δεν πρέπει να διαφέρει πολύ από το επίπεδο της πλανητικής τροχιάς. Αυτό σημαίνει ότι με τη μέθοδο αυτή θα μπορούσαμε να παρατηρήσουμε ένα πολύ μικρό ποσοστό από τα υπάρχοντα πλανητικά συστήματα στην περιοχή του ουρανού που μελετάμε. Η πιθανότητα για μια πλανητική τροχιά να είναι σωστά προσανατολισμένη, ώστε να παρατηρήσουμε διάβαση, είναι ίση προς το λόγο της διαμέτρου του πλανήτη προς τη διάμετρο της τροχιάς του. Για ένα Γήινο πλανήτη που περιφέρεται γύρω από έναν αστέρα σαν τον Ήλιο μας, η πιθανότητα είναι ίση προς 0,5%, δηλαδή σε κάθε 200 πλανητικά συστήματα εμείς θα παρατηρούμε μόνο το ένα. Πρέπει λοιπόν να παρατηρήσουμε χιλιάδες αστέρες για να ανακαλύψουμε πλανητικά συστήματα. Το πρόγραμμα Kepler θα μελετήσει 100 000 αστέρες.

Αν οι Γήινοι πλανήτες είναι αρκετοί, τότε αναμένεται να ανακαλυφθούν μερικές εκατοντάδες. Για πλανήτες στην κατοικήσιμη ζώνη, δηλαδή σε μια ζώνη με πλάτος γύρω στη μια αστρονομική μονάδα (ακτίνα της τροχιάς της Γης), ο χρόνος μεταξύ διαδοχικών διαβάσεων είναι περίπου ένα έτος. Συνεπώς, για αξιόπιστα αποτελέσματα (τρεις διαβάσεις), απαιτείται χρονικό διάστημα τουλάχιστον τριών ετών. Η διάρκεια του προγράμματος είναι τέσσερα έτη (με δυνατότητα να φθάσει μέχρι έξι).

6.2 Υπολογισμός των πλανητικών τροχιών

- Οι διαστάσεις της τροχιάς του πλανήτη υπολογίζονται από την περίοδο περιφοράς και τη μάζα του αστέρα (τρίτος νόμος του Kepler).
- Το μέγεθος του πλανήτη υπολογίζεται από το πόσο μειώνεται η λαμπρότητα του αστέρα και από το μέγεθος του αστέρα.
- Από τις διαστάσεις της τροχιάς του πλανήτη και τη θερμοκρασία του αστέρα υπολογίζεται η θερμοκρασία του πλανήτη.

6.3 Τι περιμένουμε να βρούμε

- Περίπου 50 πλανήτες μεγέθους όπως η Γη.
- Περίπου 185 πλανήτες με μέγεθος 1,3 Γήινες μάζες.
- Περίπου 640 πλανήτες με μέγεθος 2,2 Γήινες μάζες.
- Περίπου το 12% με δύο ή περισσότερους πλανήτες.

Η πιο ενδιαφέρουσα ανακάλυψη της αποστολής θα είναι η ανίχνευση πλανητών με μέγεθος όπως της Γης, στην κατοικήσιμη ζώνη αστερών όμοιων με τον Ήλιο μας. Αναμένονται πάντως και πολλές άλλες ανακαλύψεις για την ύπαρξη και τα χαρακτηριστικά πλανητών γύρω από άλλους αστέρες. Με την ολοκλήρωση του προγράμματος θα γνωρίζουμε πόσο συνηθισμένοι είναι οι Γήινοι πλανήτες στο γαλαξία μας. Ακόμα και αν βρεθούν πολύ λίγοι Γήινοι πλανήτες ή και κανένας, θα είναι σημαντικό. Θα οδηγηθούμε στο συμπέρασμα ότι οι Γήινοι πλανήτες είναι σπάνιοι, με αποτέλεσμα να αναθεωρήσουμε τις θεωρίες δημιουργίας της Γης.

7. Πλανήτες σε κατοικήσιμη ζώνη

7.1 Κατοικήσιμοι πλανήτες

Σε ένα πλανητικό σύστημα μπορεί να υπάρχουν περιοχές όπου οι πλανήτες που ενδεχομένως να υπάρχουν εκεί να είναι κατοικήσιμοι. Το βασικό χαρακτηριστικό για να αναπτυχθεί ζωή σε κάποιον πλανήτη είναι να υπάρχει νερό σε υγρή μορφή. Ένας πλανήτης θεωρείται κατοικήσιμος όταν πληρούνται οι παρακάτω προϋποθέσεις:

- Ο κεντρικός αστέρας (ήλιος) να μην έχει πολύ μεγάλη μάζα, διότι τότε εξελίσσεται πολύ γρήγορα, ούτε πολύ μικρή μάζα, διότι δεν θα εκπέμπει επαρκή θερμότητα.
- Η τροχιά του πλανήτη να είναι ευσταθής.
- Ο πλανήτης να μην έχει μεγάλη εκκεντρότητα, για να μην υπάρχουν μεγάλες μεταβολές της θερμότητας κατά τη διάρκεια του 'έτους' (Σχήμα 12).
- Να μην υπάρχει βομβαρδισμός από αστεροειδείς (η ύπαρξη ενός μεγάλου πλανήτη, όπως του Δία στο δικό μας Ηλιακό Σύστημα, μπορεί να αποτρέψει το φαινόμενο αυτό).
- Η απόσταση από τον αστέρα (ήλιο) να είναι τέτοια ώστε να υπάρχει νερό σε υγρή μορφή (Σχήμα 12).
- Ο πλανήτης να έχει στερεό φλοιό, για να διατηρηθεί το νερό στην επιφάνεια.
- Η μάζα του πλανήτη να μην είναι πολύ μεγάλη, διότι τότε η ατμόσφαιρά του θα αποτελείται από τα στοιχεία υδρογόνο και ήλιο, που δεν ευνοούν ανάπτυξη ζωής.
- Η μάζα του πλανήτη να μην είναι πολύ μικρή, γιατί δεν μπορεί να διατηρήσει ατμόσφαιρα.



Σχήμα 12: Πλανήτες σε διάφορες αποστάσεις από τον αστέρα. Όταν η τροχιά είναι πολύ ελλειπτική, τότε η θέση του πλανήτη μεταβάλλεται από την πολύ κρύα θέση στην πολύ ζεστή θέση. Στη μεσαία θέση υπάρχει νερό σε υγρή μορφή. Για να αναπτυχθεί ζωή θα πρέπει η τροχιά αυτού του πλανήτη να είναι σχεδόν κυκλική, για να μη υπάρχουν μεγάλες διακυμάνσεις στη θερμότητα κατά τη διάρκεια του έτους.

Για να γνωρίζουμε αν ένας πλανήτης μπορεί να συντηρήσει ζωή, θα πρέπει να ελέγξουμε τα παρακάτω:

- να αναζητήσουμε ενδείξεις ύπαρξης οξυγόνου και όζοντος
- να ερευνήσουμε αν υπάρχει νερό σε υγρή μορφή
- να αναλύσουμε το ανακλώμενο φως από τον πλανήτη για να δούμε αν ο πλανήτης έχει ατμόσφαιρα
- να αναζητήσουμε ενδείξεις βιολογικής δραστηριότητας (π.χ. μεθάνιο)

και να αποκλείσουμε άλλες ερμηνείες.

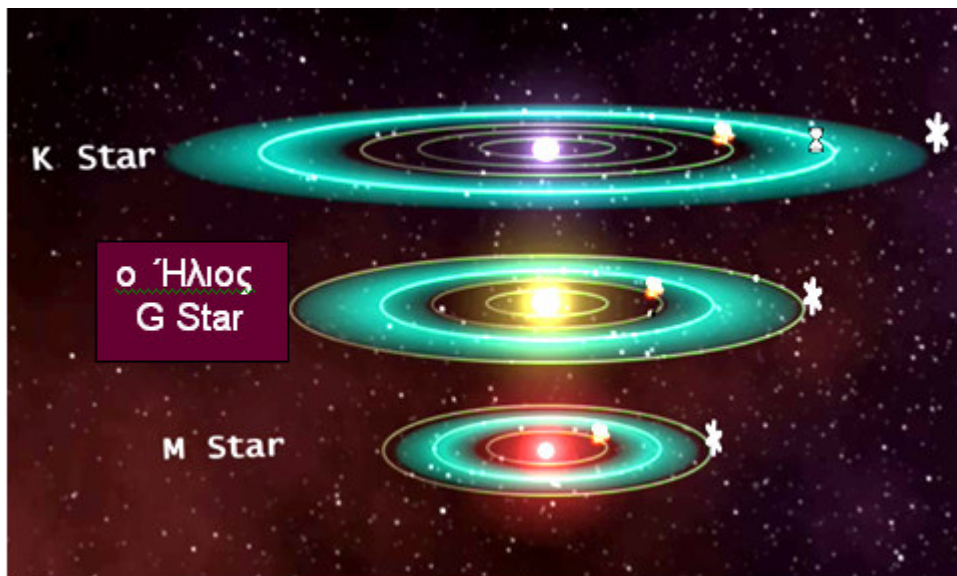
7.2 Κατοικήσιμες ζώνες σε διάφορα πλανητικά συστήματα

Σε κάθε πλανητικό σύστημα υπάρχει μια κατοικήσιμη περιοχή, δηλαδή μια ζώνη σχετικά μικρού εύρους, σε ορισμένη απόσταση από τον αστέρα. Το βασικό κριτήριο είναι η θερμότητα που δέχεται ο πλανήτης από τον αστέρα να είναι τέτοια, ώστε να υπάρχει νερό σε υγρή μορφή. Είναι φανερό ότι η ζώνη αυτή εξαρτάται από τον τύπο του αστέρα, δηλαδή από το πόση ενέργεια εκπέμπει. Στο δικό μας Ηλιακό Σύστημα η ζώνη αυτή περιλαμβάνει προφανώς την τροχιά της Γης και εκτείνεται από την τροχιά της Αφροδίτης, μέχρι την τροχιά του Άρη, χωρίς να περιλαμβάνει τους δύο αυτούς πλανήτες (Σχήμα 13).



Σχήμα 13: Η κατοικήσιμη ζώνη στο δικό μας Ηλιακό Σύστημα.

Σε αστέρες που είναι λαμπρότεροι από τον δικό μας Ήλιο, η κατοικήσιμη ζώνη είναι πιο μακριά από μια ακτίνα Γης, ενώ σε αστέρες λιγότερο λαμπρούς από τον Ήλιο μας, η κατοικήσιμη ζώνη είναι πλησιέστερα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 14.

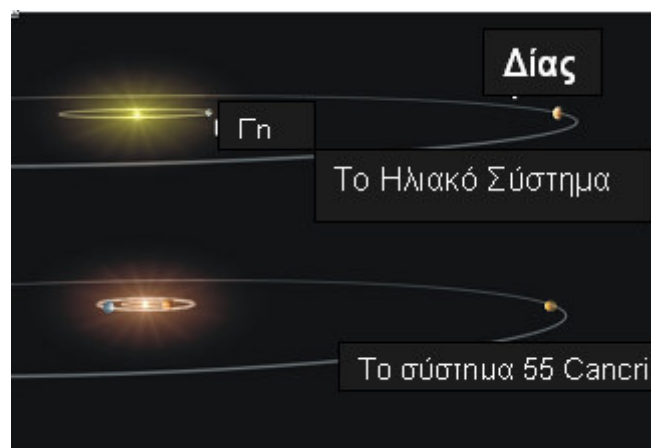


Σχήμα 14: Οι κατοικήσιμες ζώνες σε τρία πλανητικά συστήματα με αστέρες διαφορετικής λαμπρότητας (πράσινη ζώνη). Στο επάνω σύστημα ο αστέρας είναι λαμπρότερος από τον Ήλιο, ενώ στο κάτω σύστημα είναι αμυδρότερος. Το μεσαίο σύστημα είναι το Ηλιακό Σύστημα, για να γίνει η σύγκριση.

8. Ένα πλανητικό σύστημα που μοιάζει με το Ηλιακό Σύστημα

Θα παρουσιάσουμε τώρα ένα πλανητικό σύστημα με 5 πλανήτες που μοιάζει με το δικό μας Ηλιακό Σύστημα, το 55 Cnc, το οποίο βρίσκεται σε απόσταση 41 ετών φωτός στον αστερισμό του Καρκίνου. Στο σύστημα αυτό, το οποίο φαίνεται στο Σχήμα 15α, παρατηρούμε ότι

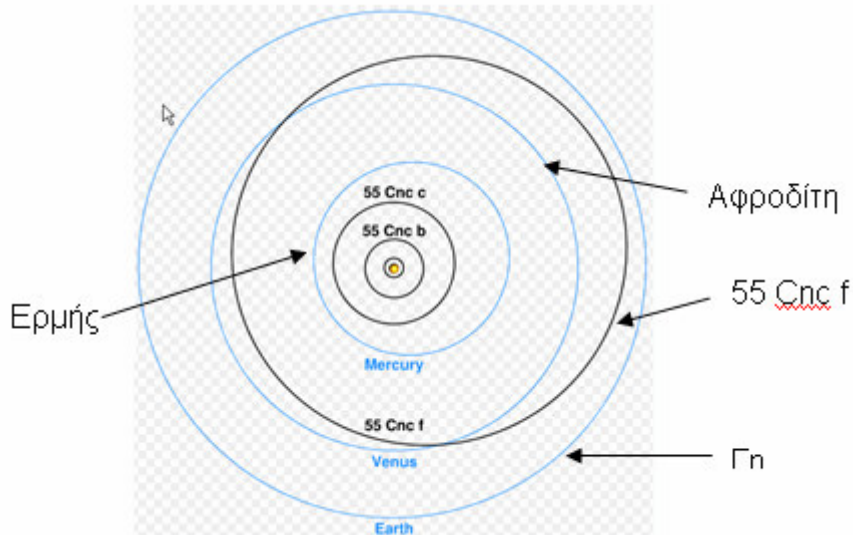
- Ο κεντρικός αστέρας έχει περίπου την ίδια μάζα και ηλικία με το δικό μας Ήλιο.
- Οι τροχιές των πλανητών είναι περίπου κυκλικές, όπως και στο δικό μας ηλιακό σύστημα.
- Και τα δύο συστήματα έχουν γιγάντιους πλανήτες στο εξωτερικό τους.
- Και τα δύο συστήματα έχουν μικρούς πλανήτες στο εσωτερικό τους.



Σχήμα 15: (α) Το πλανητικό σύστημα 55 Cnc (κάτω εικόνα) και το Ηλιακό Σύστημα (άνω εικόνα), για σύγκριση.

Υπάρχουν όμως και διαφορές, οι οποίες φαίνονται στο Σχήμα 16, όπου παρουσιάζονται οι τροχιές των τεσσάρων εσωτερικών πλανητών του 55 Cnc και οι τροχιές του Ερμή, της Αφροδίτης και της Γης, για σύγκριση.

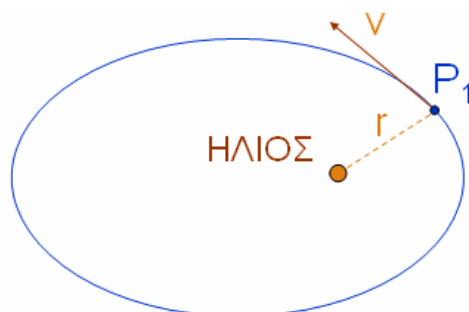
- Οι τέσσερις εσωτερικοί πλανήτες του 55 Cnc είναι πιο κοντά στον αστέρα (ήλιο) από ότι η Γη στον Ήλιο και έχουν όλοι μάζες μεγαλύτερες από την Γη.
- Ο τέταρτος πλανήτης (55 Cnc f), ο οποίος είναι στην κατοικήσιμη περιοχή, έχει μάζα ίση προς τη μισή μάζα του Κρόνου και περιφέρεται γύρω από τον ήλιο σε 260 ημέρες.



Σχήμα 16: Οι τροχιές των τεσσάρων εσωτερικών πλανητών του συστήματος 55 Cnc (μαύρο χρώμα) και οι τροχιές του Ερμή, της Αφροδίτης και της Γης (γαλάζιο χρώμα), για σύγκριση.

9. Δημιουργία ενός πλανητικού συστήματος. Ευστάθεια και χάος

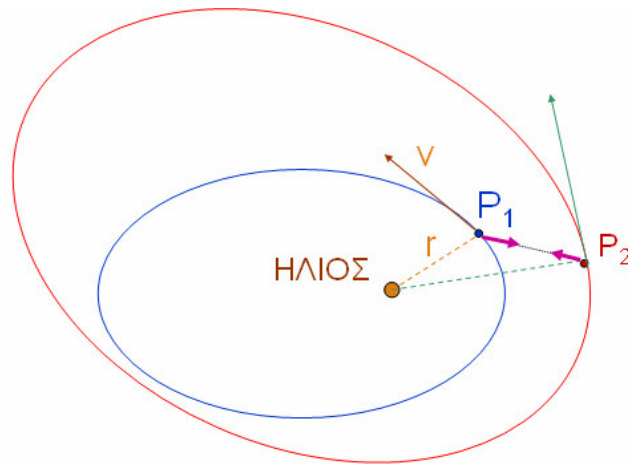
Ας προσπαθήσουμε να δημιουργήσουμε ένα πλανητικό σύστημα! Θα ξεκινήσουμε με έναν αστέρα και σε κάποια απόσταση από αυτόν θα εκτοξεύσουμε έναν πλανήτη (Σχήμα 17). Από την κλασική μηχανική είναι γνωστό ότι αν η ταχύτητα εκτοξεύσεως του πλανήτη δεν υπερβαίνει μια οριακή ταχύτητα (που ονομάζεται *ταχύτητα διαφυγής*) ο πλανήτης θα διαγράψει ελλειπτική τροχιά γύρω από τον αστέρα, με τη μία εστία της ελλείψεως στον αστέρα. (Σημειώνουμε ότι ειδική περίπτωση ελλείψεως είναι η περιφέρεια κύκλου). Πρόκειται για το γνωστό πρόβλημα των δύο σωμάτων, που είναι ένα από τα ελάχιστα προβλήματα στη φυσική που λύνονται. Έτσι δημιουργήσαμε ένα πλανητικό σύστημα με έναν πλανήτη, όπου η κίνηση είναι ομαλή και προβλέψιμη.



Σχήμα 17: Ο πλανήτης P_1 ο οποίος εκτοξεύεται από απόσταση r με ταχύτητα v γύρω από τον αστέρα. Η κίνηση είναι ελλειπτική.

Αν τώρα εκτοξεύσουμε και έναν δεύτερο πλανήτη στο ίδιο σύστημα, δεν σημαίνει ότι δημιουργήσαμε ένα ευσταθές πλανητικό σύστημα, δηλαδή ένα σύστημα το οποίο θα παραμείνει ευσταθές για δισεκατομμύρια χρόνια. Έχουμε τώρα τρία σώματα, τον αστέρα και τους δύο

πλανήτες, που είναι το περίφημο πρόβλημα των τριών σωμάτων (Σχήμα 18). Το πρόβλημα αυτό δεν λύνεται ακριβώς και σε ορισμένες μόνο καταστάσεις είναι ευσταθές. Η βαρυτική αλληλεπίδραση μεταξύ των πλανητών, όσο μικρές μάζες και αν έχουν, είναι σημαντική και μετά από κάποιο χρονικό διάστημα, το οποίο μπορεί να είναι και αρκετά μεγάλο, της τάξεως μερικών εκατομμυρίων ετών, αναπτύσσεται χαοτική κίνηση και το σύστημα αποσταθεροποιείται και μπορεί ακόμα και να διαλυθεί. Μόνο για ειδικές αρχικές θέσεις και ταχύτητες είναι δυνατόν να έχουμε ομαλή κίνηση, και αρκεί η μεταβολή μιας μόνο παραμέτρου για να αποσταθεροποιήσει το σύστημα, όπως θα δούμε στα επόμενα.



Σχήμα 18: Η πρόσθεση του δεύτερου πλανήτη, P_2 , μπορεί να καταστήσει το σύστημα ασταθές, λόγω της βαρυτικής αλληλεπίδρασης μεταξύ των δύο πλανητών.

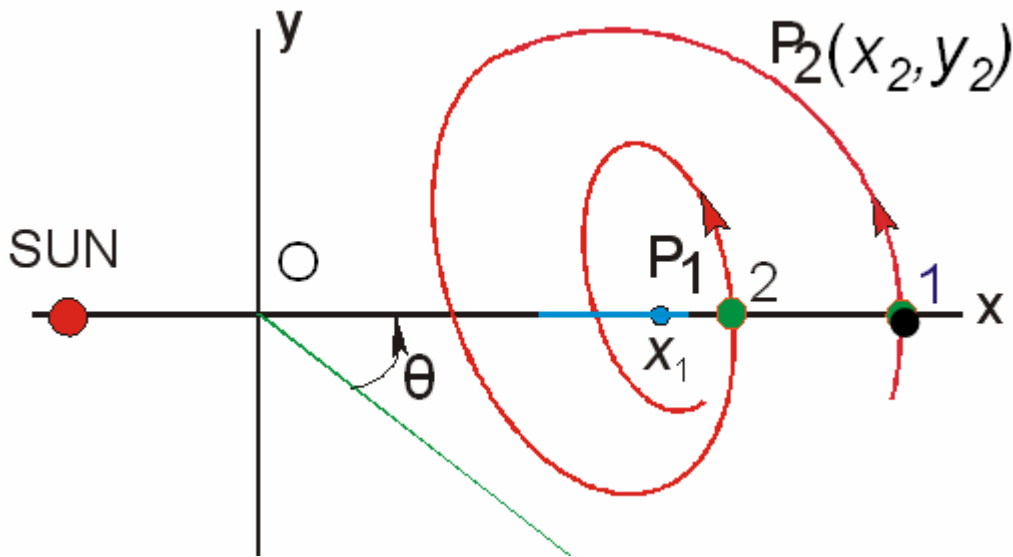
10. Δυναμική μελέτη της εξέλιξης ενός πλανητικού συστήματος. Η απεικόνιση Poincaré

Η μελέτη της εξέλιξης ενός δυναμικού συστήματος, και ειδικότερα ενός πλανητικού συστήματος με δύο πλανήτες, μπορεί να γίνει με διάφορες μεθόδους. Εδώ θα παρουσιάσουμε μια μέθοδο η οποία μας επιτρέπει να μελετήσουμε την εξέλιξη ενός πλανητικού συστήματος για μεγάλα χρονικά διαστήματα, όπου εμφανίζονται τα βασικά χαρακτηριστικά της κίνησης, χωρίς να ‘χαθούμε’ σε λεπτομέρειες που δεν έχουν σημασία. Πρόκειται για τη μέθοδο Poincaré, με την οποία μετατρέπουμε τη συνεχή ροή της κίνησης σε μια διάκριτη απεικόνιση, σε έναν χώρο λιγότερων διαστάσεων. Επιπλέον, με τη μέθοδο αυτή μπορούμε και να ‘δούμε’ γραφικά την εξέλιξη του συστήματος, σε κάποιο χώρο, και να διακρίνουμε την ομαλή από τη χαοτική κίνηση.

10.1. Το περιστρεφόμενο σύστημα αναφοράς

Ας θεωρήσουμε τρία σώματα, τον αστέρα και δύο πλανήτες, που κινούνται στο ίδιο επίπεδο (επίπεδο πρόβλημα των τριών σωμάτων), όπως φαίνεται και στο Σχήμα 18. Το κέντρο μάζας του συστήματος είναι ακίνητο ως προς κάποιο σύστημα αναφοράς, στο οποίο θα μελετήσουμε την κίνηση. Ορίζουμε ένα σύστημα συντεταγμένων xOy του οποίου ο άξονας Ox είναι η ευθεία που ορίζεται από τον αστέρα και τον πλανήτη P_1 , με αρχή O το κέντρο μάζας των δύο αυτών σωμάτων. Ο άξονας y είναι κάθετος στον άξονα x (Σχήμα 19). Το σύστημα αυτό είναι ένα μη ομοιόμορφο περιστρεφόμενο σύστημα αναφοράς. Ο πλανήτης P_1 κινείται πάντοτε στον άξονα Ox και ο πλανήτης P_2 στο επίπεδο xOy . Η θέση του περιστρεφόμενου συστήματος xOy στο χώρο (αδρανειακό σύστημα) ορίζεται από τη γωνία θ . Για να καθορίσουμε τη θέση των τριών πλανητών στο χώρο πρέπει να γνωρίζουμε: τη θέση x_1 του πλανήτη P_1 στον άξονα Ox , τη θέση

(x_2, y_2) του πλανήτη P_2 στο επίπεδο xOy και τη γωνία θ . Έχουμε δηλαδή τέσσερες βαθμούς ελευθερίας και τέσσερες συντεταγμένες, τις (x_1, x_2, y_2, θ) .



Σχήμα 19: Το περιστρεφόμενο σύστημα αναφοράς xOy . Ο πλανήτης P_1 κινείται στον άξονα Ox και ο πλανήτης P_2 στο επίπεδο xOy . Οι διαδοχικές τομές του πλανήτη P_2 με τον άξονα (κατά την ίδια φορά), σημεία $1, 2, \dots$ ορίζουν την απεικόνιση.

Στο σύστημα αυτό υπάρχουν δύο ποσότητες που διατηρούνται, η ενέργεια και η στροφορμή. Λόγω της διατηρήσεως της στροφορμής, είναι δυνατόν να περιορισθούμε στη μελέτη των πλανητών στο περιστρεφόμενο σύστημα μόνο και να αγνοήσουμε την κίνηση του περιστρεφόμενου συστήματος (διότι η γωνία θ είναι αγνοήσιμη, όπως λέγεται στη δυναμική). Έτσι οι μεταβλητές που χρειάζονται για τη μελέτη της κινήσεως του πλανητικού συστήματος στο περιστρεφόμενο σύστημα xOy είναι οι (x_1, x_2, y_2) . Έχουμε δηλαδή τρεις βαθμούς ελευθερίας, αντί για τέσσερες που είχαμε προηγουμένως και η κατάσταση του συστήματος καθορίζεται πλήρως από τις θέσεις και τις ταχύτητες, δηλαδή από τις μεταβλητές $(x_1, x_2, y_2, \dot{x}_1, \dot{x}_2, \dot{y}_2)$, όπου η τελεία παριστάνει παράγωγο ως προς το χρόνο, δηλαδή ταχύτητα. Οι μεταβλητές αυτές ορίζουν ένα χώρο έξι διαστάσεων, ο οποίος ονομάζεται *χώρος φάσεων*, και η εξέλιξη του συστήματος περιγράφεται με μια *συνεχή ροή* στο χώρο αυτό.

10.2 Η απεικόνιση Poincaré

Θεωρούμε το σύνολο των τροχιών που έχουν την ίδια ενέργεια, $H = h = \text{σταθερό}$. Καθώς ο πλανήτης P_2 κινείται στο επίπεδο xOy , τέμνει τον άξονα Ox (κατά την ίδια φορά) στα διαδοχικά σημεία $1, 2, \dots$, όπως φαίνεται στο Σχήμα 19. Στα σημεία αυτά είναι $y_2 = 0, \dot{y}_2 > 0$. Τα σημεία αυτά ορίζονται πλήρως από τέσσερες μόνο συντεταγμένες θέσεως και ταχύτητας, τις $(x_1, x_2, \dot{x}_1, \dot{x}_2)$, αντί των έξι που είχαμε προηγουμένως. Αυτό συμβαίνει διότι οι υπόλοιπες δύο μεταβλητές (y_2, \dot{y}_2) είναι γνωστές, διότι $y_2 = 0$ (από τον ορισμό της απεικόνισης) και το \dot{y}_2 υπολογίζεται από την ενέργεια $H = h = \text{σταθερό}$. Με τον τρόπο αυτό, θεωρώντας τις διαδοχικές τομές του πλανήτη P_2 με τον άξονα Ox , μετατρέψαμε τη συνεχή ροή στον χώρο των έξι διαστάσεων $(x_1, x_2, y_2, \dot{x}_1, \dot{x}_2, \dot{y}_2)$ σε μια ισοδύναμη *διάκριτη* ροή στο χώρο των τεσσάρων διαστάσεων $(x_1, x_2, \dot{x}_1, \dot{x}_2)$. Η απεικόνιση αυτή ονομάζεται απεικόνιση Poincaré.

Η μελέτη της εξέλιξης του συστήματος των δύο πλανητών περιορίστηκε σε ένα χώρο τεσσάρων διαστάσεων. Τα διαδοχικά σημεία της απεικόνισης μπορεί να κείνται σε μια ομαλή και περατωμένη επιφάνεια, οπότε η κίνηση του συστήματος είναι μια *ομαλή κίνηση* ή τα σημεία αυτά μπορεί να είναι διάχυτα στο χώρο, οπότε λέμε ότι η κίνηση είναι *χαοτική*. Στην τελευταία περίπτωση είναι δυνατόν τα διαδοχικά σημεία της απεικόνισης να εκτείνονται σε άπειρη απόσταση, το οποίο σημαίνει ότι το πλανητικό σύστημα διαλύεται: Ο ένας πλανήτης διαφεύγει σε άπειρη απόσταση και ο άλλος πλανήτης μαζί με τον αστέρα σχηματίζουν ένα ευσταθές πλανητικό σύστημα (πρόβλημα δύο σωμάτων).

11. Ένα πραγματικό εξωηλιακό πλανητικό σύστημα, το Gliese 876

Θα μελετήσουμε εδώ ένα γνωστό εξωηλιακό πλανητικό σύστημα, το Gliese 876. Το σύστημα αυτό βρίσκεται σε απόσταση 15.4 έτη φωτός από τη Γη και έχει δύο πλανήτες οι οποίοι είναι σε συντονισμό 2:1. Αυτό σημαίνει ότι στο χρονικό διάστημα που ο εξωτερικός πλανήτης διαγράφει μία περιφορά γύρω από τον αστέρα, ο εσωτερικός πλανήτης διαγράφει δύο περιφορές. Σημειώνουμε ότι όσο πιο κοντά είναι ένας πλανήτης προς τον αστέρα τόσο πιο γρήγορα περιστρέφεται. Π.χ. ο Ερμής και η Αφροδίτη στο δικό μας Ηλιακό Σύστημα έχουν περίοδο περιφοράς περί τον Ήλιο μικρότερη του ενός έτους, ενώ ο Άρης ή ο Δίας έχουν περίοδο περιφοράς μεγαλύτερη του έτους.

Οι παράμετροι του Gliese 876 δίδονται στον πάρα κάτω πίνακα.

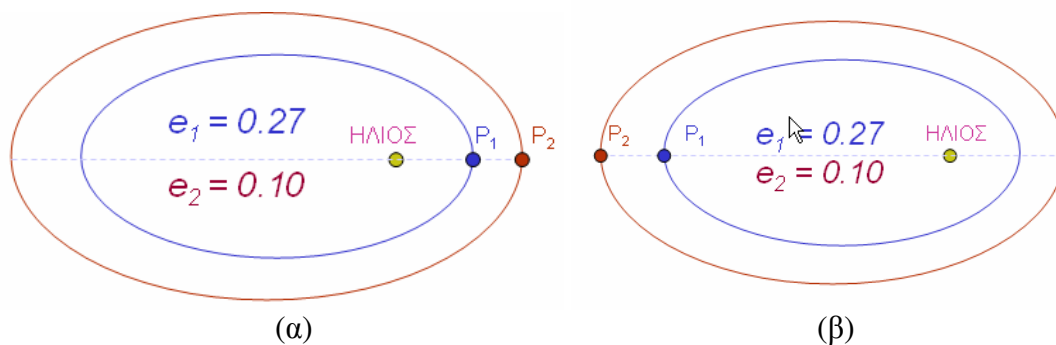
- $m_0=0.32$ μάζες Ηλίου, $m_1 = 1.89$ μάζες Δία, $m_2= 0.56$ μάζες Δία
- $a_1 = 0.13 AU$ $a_2 = 0.21 AU$ (μεγάλοι ημιμάξονες)
- $e_1 = 0.27$ $e_2 = 0.10$ (εκκεντρότητες)
- Περίοδοι: $T_1 = 30.1$ ημέρες $T_2 = 61.02$ ημέρες
- Λόγος περιόδων $T_2 / T_1 = 2.03$ (συντονισμός 2:1)

Οι ελλειπτικές τροχιές των πλανητών είναι προσανατολισμένες έτσι ώστε τα περιήλιά τους να είναι στην ίδια κατεύθυνση και σε κάποια χρονική στιγμή οι δύο πλανήτες βρίσκονται ταυτόχρονα στο περιήλιό τους.

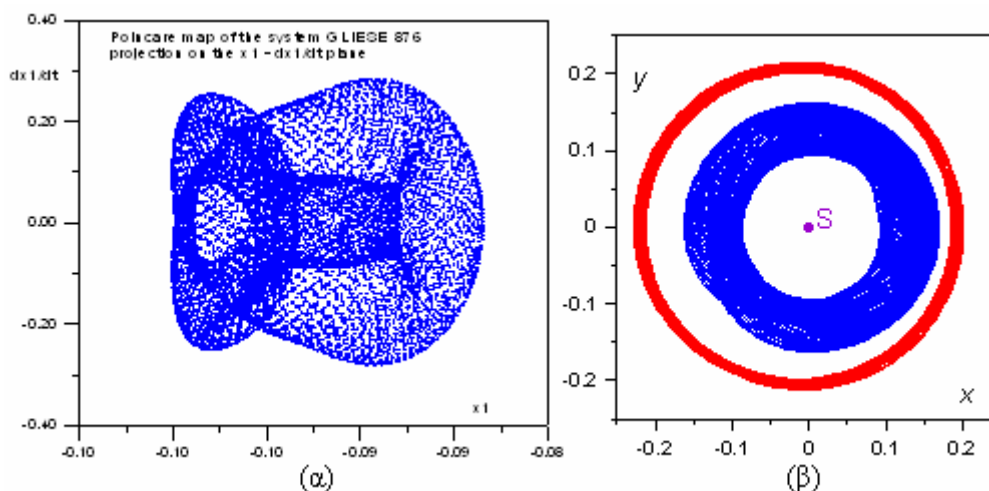
Οι συντονισμοί παίζουν σημαντικό ρόλο στη μελέτη της δυναμικής εξέλιξης ενός πλανητικού συστήματος, διότι αντιστοιχούν σε ακριβείς περιοδικές τροχιές στο περιστρεφόμενο σύστημα αναφοράς xOy . Οι περιοδικές αυτές κινήσεις καθορίζουν τις καταστάσεις εκείνες στις οποίες μπορούν να υπάρξουν ευσταθή πλανητικά συστήματα. Αυτό συμβαίνει στην περιοχή ευσταθών περιοδικών τροχιών και όπως θα δούμε το σύστημα Gliese 876 βρίσκεται σε ευσταθή περιοχή. Μια μικρή μεταβολή όμως στις παραμέτρους του συστήματος, μπορεί να μετατρέψει το σύστημα από ευσταθές σε χαοτικό.

11.1 Η ευσταθής κατάσταση

Η θέση του συστήματος Gliese 876 παρουσιάζεται σχηματικά στο Σχήμα 20α. Οι δύο πλανήτες έχουν τα περιήλιά τους στην ίδια κατεύθυνση και οι δύο πλανήτες ξεκινούν από τα περιήλιά τους. Αυτή είναι μια ευσταθής κατάσταση και το σύστημα εκτελεί μια ομαλή, περατωμένη κίνηση, όπως φαίνεται στην απεικόνιση Poincaré, στο Σχήμα 21α.



Σχήμα 20: (α) Ευσταθής κατάσταση: οι πλανήτες στο περιήλιο. (β) Ασταθής κατάσταση, οι πλανήτες στο αφήλιο. Όλα τα άλλα στοιχεία των τροχιών είναι τα ίδια. (Τα σχήματα δεν είναι με κλίμακα).



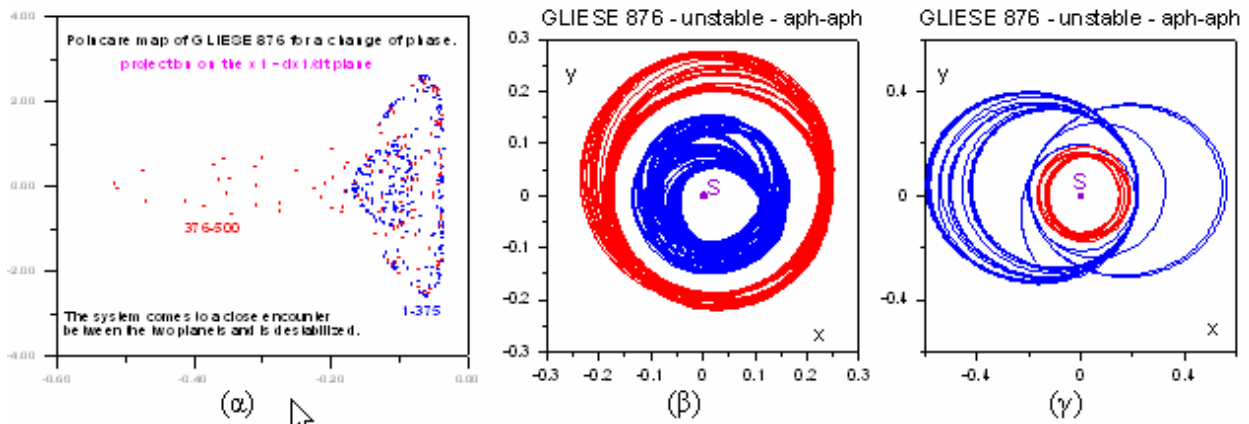
Σχήμα 21: (α) Η απεικόνιση Poïncaré για την ευσταθή κατάσταση (οι δύο πλανήτες στο περιήλιο). (β) Οι τροχιές των δύο πλανητών στο χώρο (αδρανειακό σύστημα). Οι πλανήτες κινούνται σε διαφορετικούς χώρους και δεν τέμνονται.

Στο Σχήμα 21α παρουσιάζεται η απεικόνιση Poïncaré για την ευσταθή κατάσταση. Η απεικόνιση των διαδοχικών σημείων είναι στο χώρο των τεσσάρων διαστάσεων $(x_1, x_2, \dot{x}_1, \dot{x}_2)$. Εδώ παρουσιάζουμε την προβολή στο επίπεδο (x_1, \dot{x}_1) . Παρατηρούμε ότι τα διαδοχικά σημεία κείνται επάνω σε μια ομαλή επιφάνεια, το οποίο σημαίνει ότι η κίνηση είναι ομαλή και περατωμένη. Στο Σχήμα 21β φαίνονται οι τροχιές των δύο πλανητών στο χώρο. Παρατηρούμε ότι οι δύο πλανήτες κινούνται σε διακριτούς χώρους, έτσι ώστε να μη πλησιάζουν πολύ μεταξύ τους και συνεπώς η βαρυτική αλληλεπίδραση να μην είναι σημαντική.

11.2 Η ασταθής κατάσταση και η δημιουργία χάους

Θα μετατοπίσουμε τώρα τους δύο πλανήτες από το περιήλιό τους στο αφήλιο, αφήνοντας όλα τα άλλα στοιχεία αμετάβλητα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 20β. Η εξέλιξη του συστήματος αλλάζει δραματικά και από ομαλή περατωμένη κίνηση γίνεται τώρα χαοτική και τελικά ο ένας πλανήτης διαφεύγει στο άπειρο. Αυτό φαίνεται από την απεικόνιση Poïncaré του Σχήματος 22α. Στην αρχή τα διαδοχικά σημεία της απεικόνισης φαίνεται να κείνται σε μια μάλλον ομαλή και περατωμένη επιφάνεια (γαλάζια σημεία), αλλά πολύ γρήγορα η χαοτική κίνηση γίνεται εμφανής (κόκκινα σημεία) και το σύστημα διαλύεται. Αυτό φαίνεται και από την τροχιά των δύο πλανητών, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 22β. Οι δύο πλανήτες κινούνται σε διακριτούς χώρους, αν και η σύγκριση με την ομαλή κίνηση του Σχήματος 21β δείχνει ότι η τροχιά στην περίπτωση αυτή παρουσιάζει ενδείξεις αστάθειας. Πράγματι, μετά από κάποιο διάστημα οι δύο πλανήτες πλησιάζουν πολύ μεταξύ τους, με αποτέλεσμα την αποσταθεροποίηση του

συστήματος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 22γ. Ο εσωτερικός πλανήτης έχει γίνει εξωτερικός και ο εξωτερικός έγινε εσωτερικός, και αυτό επαναλαμβάνεται έως ότου το σύστημα διαλυθεί.



Σχήμα 22: (α) Η απεικόνιση Poincaré της ασταθούς κατάστασης. (β) Οι τροχιές των δύο πλανητών στο χώρο, στο αρχικό στάδιο. (γ) Οι τροχιές μετά από κάποιο διάστημα. Η κίνηση είναι χαοτική.

12. Μερικές σκέψεις

Από τις μέχρι σήμερα παρατηρήσεις δεν μπορούμε να πούμε με βεβαιότητα αν υπάρχει ζωή στο σύμπαν, έστω και σε πρωτόγονη μορφή. Πλανητικά συστήματα υπάρχουν πολλά, αλλά οι πλανήτες τους είναι πολύ διαφορετικοί από τη Γη. Κανένας από τους πλανήτες αυτούς δεν είναι Γήινος πλανήτης. Σε τέσσερα χρόνια, με την ολοκλήρωση του προγράμματος Kepler, θα γνωρίζουμε αν ο πλανήτης μας είναι μοναδικός ή αν υπάρχουν πολλοί πλανήτες όμοιοι με τον δικό μας. Αυτό όμως δεν σημαίνει ότι σε ένα Γήινο πλανήτη, που ενδεχομένως θα ανακαλύψουμε, θα έχει αναπτυχθεί ζωή!

Είναι η Γη μοναδική ή υπάρχουν πολλοί Γήινοι πλανήτες με τα ίδια χαρακτηριστικά; Στο σημείο αυτό αναφέρουμε ότι αν η Σελήνη ήταν μικρότερη, ο άξονας της Γης θα εκτελούσε χαοτική κίνηση, με αποτέλεσμα την αστάθεια του κλίματος. Και είναι γνωστό ότι η Σελήνη είναι, ως προς τη μάζα της Γης, πολύ μεγαλύτερη από τους άλλους δορυφόρους που γνωρίζουμε (σχετικά με τη μάζα του πλανήτη τους)!

Εάν αποδειχθεί ότι υπάρχουν νοήμονα όντα σε άλλους κόσμους, θα είναι αυτό ένα σοκ για την ανθρωπότητα;

Βρέθηκε παλαιότερα η ανθρωπότητα σε τέτοια κατάσταση; Όταν ανακαλύφθηκε η Αμερική πριν από πέντε αιώνες, ή η Αυστραλία αργότερα, και διαπιστώθηκε ότι υπάρχουν και σε αυτούς τους 'νέους κόσμους' νοήμονα όντα, πώς αντέδρασε ο τότε πολιτισμένος κόσμος; Είναι πολύ διαφορετική η τότε κατάσταση από την ενδεχόμενη ανακάλυψη, σήμερα, νοήμονος ζωής σε κάποιο εξωπλανήτη;

Βιβλιογραφία

- Πληροφορίες για την ανακάλυψη εξωηλιακών πλανητικών συστημάτων βρίσκονται στην ιστοσελίδα: <http://exoplanets.eu>, η οποία διατηρείται από τον [Jean Schneider](#) CNRS/LUTH - Paris Observatory
- Ιστοσελίδα της NASA για την ανακάλυψη πλανητών: <http://planetquest.jpl.nasa.gov>
- Ιστοσελίδα της NASA για το πρόγραμμα Kepler: <http://www.kepler.arc.nasa.gov>

- Η πρώτη ανακοίνωση για την ανακάλυψη εξωηλιακού πλανήτη: MAYOR, M. AND QUELOZ, D. (1995): *A Jupiter-mass companion to a solar-type star*, Nature **378**, 355.
- Η απευθείας παρατήρηση του πλανήτη στον Fomalhaut: KALAS, PAUL *et al.* (2008): *Optical Images of an Exosolar Planet 25 Light-Years from Earth*. Science **322**, 1345–1348.
- Η απευθείας παρατήρηση των πλανητών στον HR 8799: MAROIS C., MacINTOSH B., BARMAN T., ZUCKERMAN B., SONG I., PATIENCE J., LAFRENIERE D. & DOYON R., (2008): *Direct Imaging of Multiple Planets Orbiting the Star HR 8799*, Science **322** , 1348
- Η δυναμική των εξωηλιακών πλανητικών συστημάτων μελετάται στην εργασία: John D. Hadjidemetriou (2006): *Symmetric and Asymmetric Librations in Extrasolar Planetary Systems: A global view*, Cel. Mech & Dyn. Astron. **95**, 225-244.