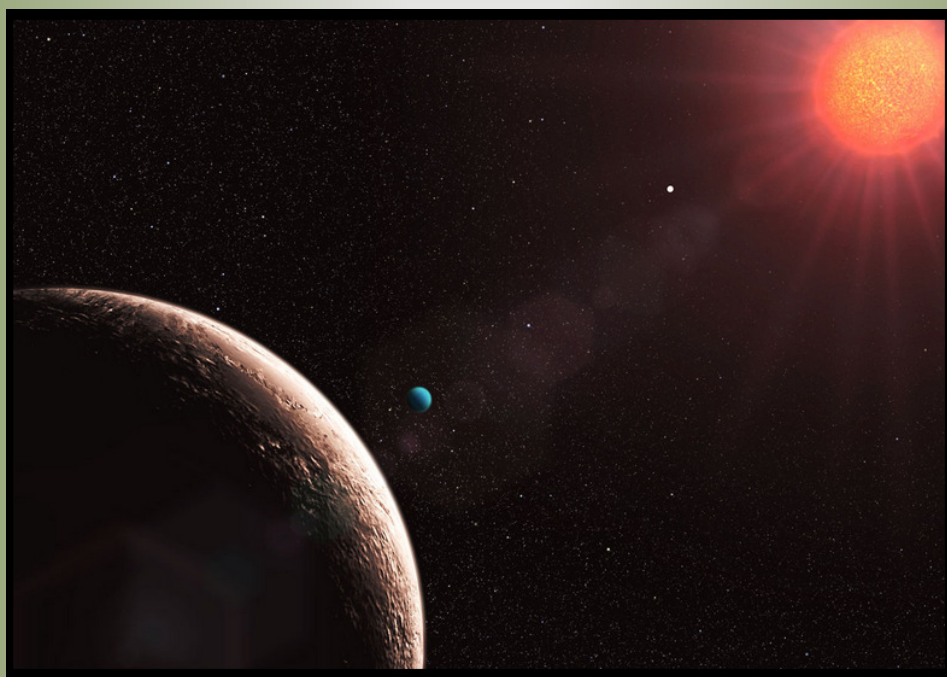


ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ  
ΤΟΜΕΑΣ ΑΣΤΡΟΦΥΣΙΚΗΣ ΑΣΤΡΟΝΟΜΙΑΣ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

# Στατιστική Μελέτη Εξωπλανητών

Ερευνητική εργασία στο πλαίσιο του Μεταπτυχιακού Διπλώματος  
Ειδίκευσης στην Αστροφυσική

Πετροπούλου Αφροδίτη  
Α.Μ: 200957



Επίβλεψη: Καθηγητής Παναγιώτης Γ. Νιάρχος

ΑΘΗΝΑ 2011

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

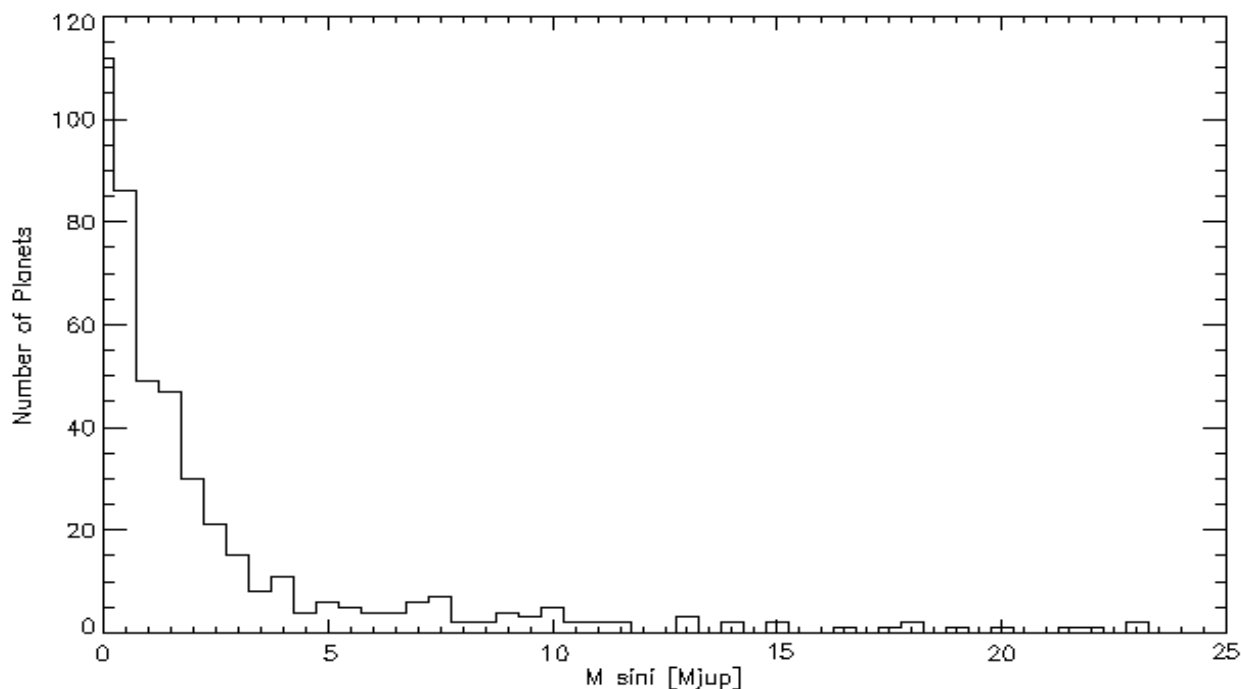
1. Εισαγωγή.....	2
2. Από το Ηλιακό Πλανητικό Σύστημα στα Εξωηλιακά.....	3
3. Μέθοδοι Ανίχνευσης Πλανητών.....	4
4. Σύγκριση Μεθόδων Ανίχνευσης Πλανητών.....	12
5. Τα Πρώτα Βήματα.....	17
6. Οι Πρώτοι Εξωηλιακοί Πλανήτες.....	20
7. Ανακάλυψη του Πρώτου Πλανήτη Γύρω Από Άστρο της Κύριας Ακολουθίας.....	22
8. Προϋποθέσεις για την Ανάπτυξη Ζωής στους Πλανήτες.....	26
9. Η Κατανομή της Περιόδου Περιφοράς.....	30
10. Εκκεντρότητα.....	37
10.1 Διάγραμμα Εκκεντρότητας - Περιόδου.....	38
11. Μεταλλικότητα.....	49
11.1 Μάζα πλανητών.....	54
11.2 Περίοδος.....	55
11.3 Εκκεντρότητα.....	57
12. Αστρική Πολλαπλότητα.....	58
12.1 Διάγραμμα Μάζας - Περιόδου.....	58
12.2 Διάγραμμα Εκκεντρότητας - Περιόδου.....	59
13. Διάγραμμα μάζας - ακτίνας.....	63
14. Εξωπλανήτες με $M_{\text{sin}i} < 20 M_{\text{earth}}$ .....	68
14.1 Περίοδος.....	69
14.2 Εκκεντρότητα.....	70
14.3 Κεντρικός Αστéρας.....	70
15. Πολλαπλά Πλανητικά Συστήματα.....	72
15.1 Διάγραμμα Μάζας - Περιόδου.....	72
15.2 Διάγραμμα Περιόδου - Εκκεντρότητας.....	74
15.3 Μεταλλικότητα.....	75
16. Μελλοντικά Προγράμματα Ανίχνευσης Εξωηλιακών Πλανητικών Συστημάτων.....	77
16. Συμπεράσματα.....	80
17. Βιβλιογραφία.....	81

# 1. Εισαγωγή

Είκοσι χρόνια μετά την ανακάλυψη των πρώτων εξωηλιακών πλανητών γύρω από τον millisecond pulsar PSR B1257+12, έχουν ανακαλυφθεί 454 εξωπλανήτες, ένα στατιστικά σημαντικό δείγμα για τον καθορισμό των κατανομών των πλανητικών χαρακτηριστικών. Η μεγάλη ποικιλία που παρουσιάζουν τόσο στα τροχιακά χαρακτηριστικά τους όσο και στις μάζες τους αλλά και στις μεταλλικότητες των κεντρικών τους αστέρων κάνει τη στατιστική μελέτη των χαρακτηριστικών τους ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα.

Από τη μελέτη των χαρακτηριστικών αυτών μπορούμε να διατυπώσουμε, να επιβεβαιώσουμε ή και να καταρρίψουμε θεωρίες για το σχηματισμό των πλανητών. Έχουν βρεθεί γίγαντες πλανήτες να περιφέρονται πολύ κοντά στον κεντρικό αστέρα, κάτι που έρχεται σε αντίθεση με την πρόβλεψη του καθιερωμένου μοντέλου (Pollack et al. 1996) ότι οι πλανήτες αυτοί σχηματίζονται από κόκκους πάγου στην εξωτερική περιοχή του συστήματος, όπου η θερμοκρασία του αστρικού νεφελώματος δεν είναι τόσο υψηλή. Για να προσαρμοστεί το παραπάνω σενάριο με τις παρατηρήσεις είναι απαραίτητη μία διαδικασία μετανάστευσης των πλανητών, δηλαδή μετακίνησής τους από την περιοχή σχηματισμού τους, που θα τους φέρει πιο κοντά στον κεντρικό αστέρα (Lin et al. 1996, Morton et al. 2011). Μία άλλη θεωρία είναι ο σχηματισμός τους κοντά στον κεντρικό αστέρα εξαιτίας ασταθειών στο δίσκο (Boss 2001, 2002).

Οι ελάχιστες μάζες των πλανητών που έχουν ανακαλυφθεί μέχρι σήμερα κυμαίνονται από  $1.9 M_{\text{Earth}}$  έως  $23 M_{\text{Jup}}$ . Η κατανομή των μαζών των γνωστών εξωπλανητών (exoplanets.org) φαίνεται στο Σχήμα 1.1. Η κατανομή ακολουθεί νόμο δύναμης  $dN/dM \propto M^{-1.1}$ .



Σχήμα 1.1 Κατανομή των ελαχίστων μαζών των 454 γνωστών εξωπλανητών. Το  $dM$  ισούται με  $0.5 M_{\text{Jup}}$ .

## 2. Από το Ηλιακό Πλανητικό Σύστημα στα Εξωηλιακά

Στο ταξίδι της αναζήτησης εξωηλιακών πλανητικών συστημάτων σημαντική είναι η κατανόηση των νόμων που διέπουν το ηλιακό μας σύστημα, αφού οι ιδιότητές του μπορεί να επαναλαμβάνονται και σε άλλα συστήματα.

Από το ηλιακό σύστημα ξέρουμε ότι η απόσταση ενός πλανήτη από τον Ήλιο επηρεάζει τη θερμοκρασία του. Όσο πιο κοντά είναι ένας πλανήτης στον Ήλιο, τόσο πιο πολύ φως δέχεται και συνεπώς τόσο πιο θερμός είναι, σε αντίθεση με τους παγωμένους μακρινούς πλανήτες. Η σωστή θερμοκρασία είναι πολύ σημαντική για την ανάπτυξη της ζωής, η οποία χρειάζεται θερμοκρασίες στις οποίες το νερό είναι στην υγρή κατάσταση. Άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν τη θερμοκρασία είναι η περιεκτικότητα της ατμόσφαιράς τους σε διοξείδιο του άνθρακα, νερό και όζον το οποίο παγιδεύει τη θερμότητα από το άστρο. Επίσης η θερμοκρασία εξαρτάται από το άστρο γύρω από το οποίο βρίσκονται οι πλανήτες, καθώς επίσης και από το κατά πόσο μπορεί και ο ίδιος ο πλανήτης να παράγει ενέργεια (ένα ποσοστό της ενέργειας που αποβάλλουν οι μεγάλοι πλανήτες του ηλιακού μας συστήματος το παράγουν οι ίδιοι, λόγω της συρρικνώσεως τους κάτω από το ίδιο το βαρυτικό τους πεδίο).

Η απόσταση ενός πλανήτη από το κεντρικό άστρο καθορίζει την περίοδο περιφοράς του πλανήτη γύρω από αυτό. Συγκεκριμένα, όσο πιο μακριά βρίσκεται ο πλανήτης τόσο περισσότερο χρόνο χρειάζεται για να κάνει μία περιφορά. Αυτό συμβαίνει για δύο λόγους. Ο πρώτος είναι γιατί, όσο πιο μακριά είναι, τόσο μεγαλύτερη είναι η τροχιά και άρα χρειάζεται περισσότερο χρόνο να ολοκληρώσει μία περιφορά. Ο δεύτερος είναι ότι όσο πιο μακριά βρίσκεται ο πλανήτης, τόσο πιο αργά κινείται αφού η βαρυτική έλξη που δέχεται από το άστρο είναι μικρότερη. Αυτή η σχέση μεταξύ απόστασης και περιόδου περιφοράς είναι πολύ χρήσιμη στην εξερεύνηση εξωηλιακών πλανητικών συστημάτων. Αν, για παράδειγμα, ξέρουμε ότι ένας πλανήτης περιφέρεται γύρω από το άστρο με μία συγκεκριμένη περίοδο, μπορούμε, χωρίς να έχουμε δει τον πλανήτη, να υπολογίσουμε την απόσταση από τον κεντρικό αστέρα. Υπάρχει βέβαια ένα πρόβλημα στον υπολογισμό, επειδή υπάρχουν άστρα με μάζες διαφορετικές από τον Ήλιο. Αστέρες με μικρότερη μάζα από εκείνη του Ήλιου ασκούν μικρότερη βαρυτική έλξη στους πλανήτες, οι οποίοι κινούνται λίγο πιο αργά από τους πλανήτες γύρω από τον Ήλιο στις αντίστοιχες αποστάσεις. Το αντίθετο συμβαίνει με άστρα με μάζα μεγαλύτερη από εκείνη του Ήλιου.

Οι κινήσεις των πλανητών γύρω από τον Ήλιο δείχνουν ότι οι πλανήτες κινούνται στην ίδια κατεύθυνση με την περιστροφή του Ήλιου. Επίσης όλες οι τροχιές των πλανητών βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο, επειδή όλοι οι πλανήτες σχηματίστηκαν από ένα δίσκο υλικού που περικύκλωνε το νεογέννητο Ήλιο. Είναι πιθανό οι τροχιές των πλανητών άλλων πλανητικών συστημάτων να βρίσκονται επίσης σε ένα επίπεδο.

Είναι επίσης πολύ χρήσιμο το σχήμα των τροχιών των πλανητών. Οι πλανητικές τροχιές είναι ελλειπτικές, αλλά οι περισσότερες έχουν τόσο μικρή εκκεντρότητα ώστε να θεωρούνται σχεδόν κυκλικές. Η εκκεντρότητα βοηθάει τους αστρονόμους στην ανακάλυψη πλανητών. Τα διπλά συστήματα αστέρων έχουν τροχιές με μεγάλες τιμές εκκεντρότητας. Αν λοιπόν ανιχνευθεί κάποιο αόρατο αντικείμενο, μπορούμε από το είδος της τροχιάς να καταλάβουμε αν το αντικείμενο είναι πλανήτης ή όχι.

Μία θεωρία για τη δημιουργία των πλανητών είναι ότι οι πλανήτες προέρχονται από ένα δίσκο αερίου και σκόνης που περιστρεφόταν γύρω από τον νεογέννητο Ήλιο. Το

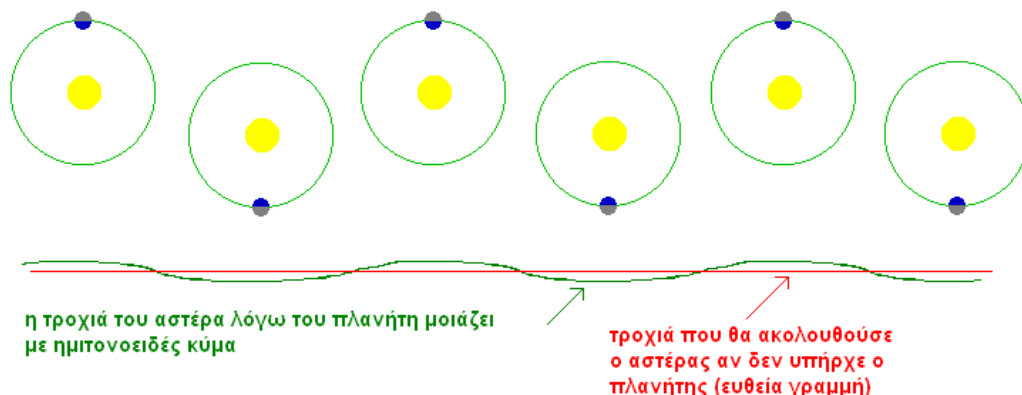
εσωτερικό μέρος του δίσκου περιστρεφόταν γρήγορα με αποτέλεσμα να αναπτυχθούν μεγάλες θερμοκρασίες. Αυτό είχε σαν συνέπεια να μπορέσουν να συμπυκνωθούν μόνο σώματα με μεγάλη θερμοκρασία τήξης, όπως ο βράχος και ο σίδηρος. Οι ουσίες αυτές ενώθηκαν σε μικρά αντικείμενα σαν αστεροειδείς, τα οποία σχημάτισαν τους τέσσερις εσωτερικούς πλανήτες του ηλιακού μας συστήματος. Στο εξωτερικό, κρύο μέρος του δίσκου, ο πάγος συμπυκνώθηκε και έγινε μέρος των πλανητών. Εξαιτίας αυτού του επιπλέον υλικού και της μεγάλης επιφάνειας του εξωτερικού δίσκου, οι εξωτερικοί πλανήτες έγιναν μεγαλύτεροι. Η βαρύτητά τους παγίδευσε αέριο υλικό, κυρίως υδρογόνο και ήλιο από το δίσκο, κάνοντας το Δία και τον Κρόνο πολύ μεγαλύτερους από τους άλλους πλανήτες.

Σύμφωνα με τη παραπάνω θεωρία πρέπει να υπάρχουν πολλοί εξωηλιακοί πλανήτες, αφού πολλά άστρα θα εξελίχθηκαν με τον ίδιο τρόπο, όπως ο Ήλιος.

### 3. Μέθοδοι Ανίχνευσης Πλανητών

Υπάρχουν επτά μέθοδοι ανίχνευσης πλανητών. Αυτές περιληπτικά είναι οι εξής:

- ✚ **Η αστρομετρία.** Με τη μέθοδο αυτή βρίσκουμε την ακριβή θέση του αστέρα και ψάχνουμε για μικρές μεταβολές της, που μπορεί να προκαλούνται από τη βαρυτική έλξη κάποιου πλανήτη που πιθανόν να βρίσκεται σε τροχιά γύρω του. Για τον προσδιορισμό της θέσης χρησιμοποιούνται φασματογράφοι υψηλής διασποράς, φασματογράφοι αμυδρών αντικειμένων, υψηλής ταχύτητας φωτόμετρα, κάμερες αμυδρών αντικειμένων, κάμερες ευρέως πεδίου και μεγάλης ακρίβειας αισθητήρες οδήγησης έτσι ώστε το τηλεσκόπιο να παρακολουθεί τον αστέρα. Παρακάτω δίνεται σχηματικά η μέθοδος αυτή:



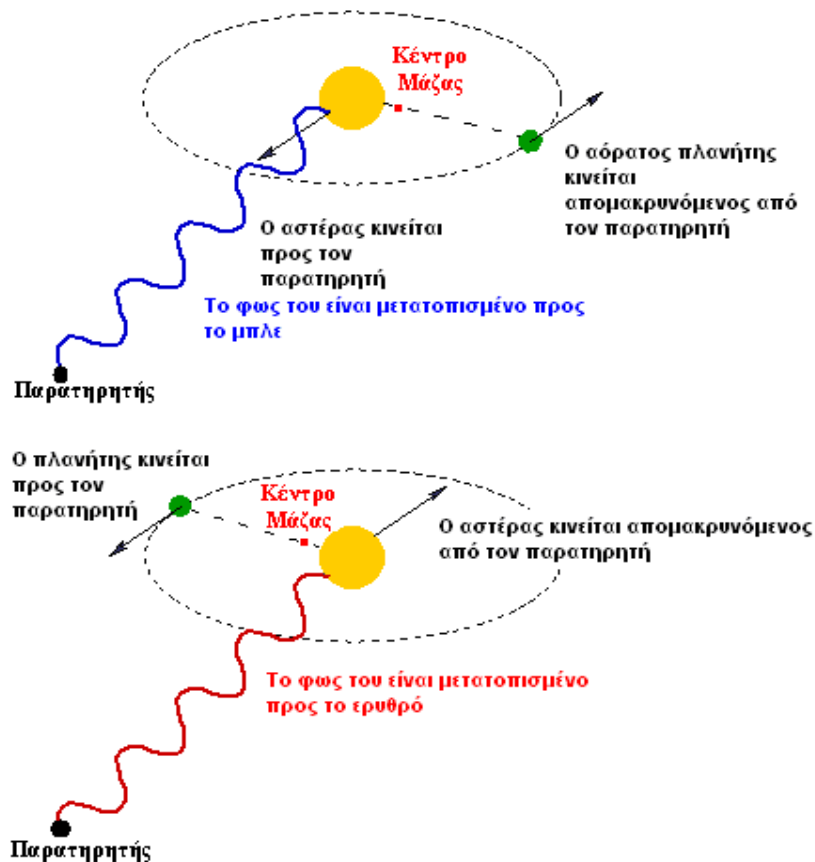
**Σχήμα 3.1** Καθώς ο πλανήτης περιφέρεται γύρω από τον κεντρικό αστέρα, η τροχιά που διαγράφει ο αστέρας αυτός μοιάζει με ημιτονοειδές κύμα. Αν ο πλανήτης δεν υπήρχε, τότε η τροχιά του αστέρα θα ήταν ευθεία.

- ✚ **Η τεχνική Doppler.** Το φαινόμενο Doppler είναι η μεταβολή της συχνότητας (ή του μήκους) ενός κύματος λόγω της σχετικής κίνησης του παρατηρητή ως προς

την πηγή. Με τη μέθοδο αυτή παρατηρούμε τυχόν μεταβολές στις ακτινικές ταχύτητες των αστέρων που μπορεί να προκαλεί κάποιος πλανήτης, μελετώντας τις μετατοπίσεις  $\Delta\lambda$  των φασματικών γραμμών των φασμάτων τους.

Συγκεκριμένα ισχύει  $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\Delta f}{f} = \frac{u}{c} \Rightarrow \Delta f = \frac{u}{\lambda}$  (αφού  $c = \lambda \cdot f \Rightarrow \lambda = \frac{c}{f}$ ) απ'

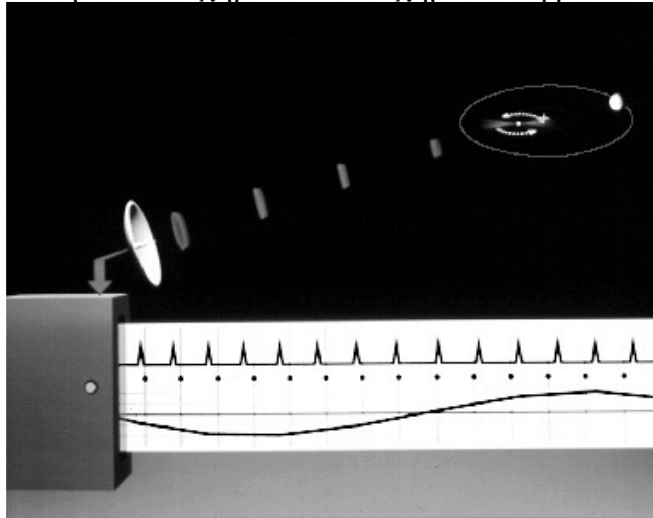
όπου μπορούμε να υπολογίσουμε την ακτινική ταχύτητα  $u$  του αστέρα (όπου  $f$  η συχνότητα και  $\lambda$  το μήκος κύματος στο οποίο αντιστοιχεί η φασματική γραμμή και  $c$  η ταχύτητα του φωτός). Παρακάτω δίνεται σχηματικά το φαινόμενο Doppler:



**Σχήμα 3.2** Καθώς ο αστέρας και ο πλανήτης κινούνται γύρω από το κέντρο μάζας του συστήματος, ο αστέρας άλλες φορές πλησιάζει τον παρατηρητή και άλλες απομακρύνεται από αυτόν. Όταν ο αστέρας κινείται προς τον παρατηρητή οι φασματικές γραμμές στο φάσμα του είναι μετατοπισμένες προς το μπλε, ενώ όταν ο αστέρας απομακρύνεται από τον παρατηρητή οι φασματικές γραμμές στο φάσμα του είναι μετατοπισμένες προς το ερυθρό.

- ✚ **Η μέτρηση του χρόνου μεταξύ δύο παλμών των pulsars.** Αν κάποιος αστέρας νετρονίων έχει γύρω του πλανήτη, τότε τα δύο αυτά σώματα θα κινούνται γύρω από το κοινό κέντρο μάζας. Καθώς ο pulsar θα απομακρύνεται από τον παρατηρητή, ο χρόνος μεταξύ δύο παλμών θα είναι ελαφρώς μεγαλύτερος, ενώ

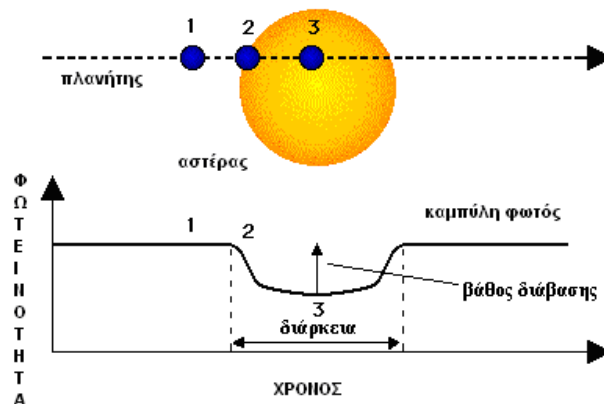
όταν ο pulsar πλησιάζει τον παρατηρητή ο χρόνος αυτός θα είναι λίγο μικρότερος. Στο παρακάτω σχήμα δίνεται σχηματικά η μέθοδος αυτή:



**Σχήμα 3.3** Καθώς ο pulsar και ο πλανήτης κινούνται γύρω από το κέντρο μάζας του συστήματος, ο pulsar άλλες φορές πλησιάζει τον παρατηρητή και άλλες απομακρύνεται από αυτόν. Όταν ο pulsar κινείται προς τον παρατηρητή, ο χρόνος μεταξύ δύο παλμών είναι ελαφρώς μικρότερος. Το αντίθετο συμβαίνει όταν ο pulsar απομακρύνεται από τον παρατηρητή (<http://www.risorsegratis.it>).

✚ **Η μέθοδος της διάβασης.** Η μέθοδος αυτή στηρίζεται στη μέτρηση της φαινόμενης λαμπρότητας του αστέρα. Αν κάποιος πλανήτης περάσει μπροστά από τον αστέρα τότε θα κρύψει ένα μέρος του φωτός του αστέρα, οπότε και θα έχουμε μείωση της φαινόμενης λαμπρότητάς του, και έτσι ο πλανήτης αυτός θα γίνει αντιληπτός. Για να παρατηρηθεί η διάβαση απαιτείται σχεδόν τέλεια ευθυγράμμιση μεταξύ παρατηρητή, πλανήτη και αστέρα. Η διάβαση εμφανίζεται περιοδικά, με μία περίοδο ίδια με την περίοδο περιφοράς του πλανήτη γύρω από τον αστέρα.

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται γραφικά η μέθοδος αυτή:



**Σχήμα 3.4** Η φαινόμενη λαμπρότητα του αστέρα μειώνεται καθώς ο πλανήτης διέρχεται μπροστά από αυτόν, με αποτέλεσμα ο πλανήτης να γίνεται αντιληπτός από τον παρατηρητή (<http://www.cornellcollege.edu>).

Η πιθανότητα  $P_{tr}$  να φαίνεται η διάβαση σε ένα πλανητικό σύστημα, είναι ανάλογη της ακτίνας  $R$  του αστέρα και αντιστρόφως ανάλογη του μεγάλου ημιάξονα  $a$  της τροχιάς:

$$P_{tr} = \frac{R}{a} \quad (3.1)$$

Η πλανητική διάβαση, με βάση την καμπύλη φωτός του διπλού συστήματος αστέρα - πλανήτη, εξαρτάται από τρεις παραμέτρους: το βάθος, τη διάρκεια και το σχήμα της διάβασης.

Το σχήμα της διάβασης μπορεί να είναι σχήματος  $U$  για κεντρική διάβαση και σχήματος  $V$  για μη κεντρική διάβαση.

Το βάθος της διάβασης δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta F = \frac{F_{off} - F_{on}}{F_{off}} = \left( \frac{r}{R} \right)^2 \quad (3.2)$$

όπου  $F_{off}$  είναι η παρατηρούμενη αστρική ροή εκτός διάβασης,  $F_{on}$  η παρατηρούμενη αστρική ροή κατά τη διάρκεια της διάβασης και  $r$  η ακτίνα του πλανήτη. Στην παραπάνω σχέση έχουμε παραβλέψει το φαινόμενο της αμαύρωσης του αστρικού χείλους κατά το οποίο ο αστέρας φαίνεται πιο λαμπρός στο κέντρο του δίσκου από ότι στο χείλος. Λαμβάνοντάς το υπόψη η διάβαση είναι λίγο βαθύτερη από  $(r/R)^2$  και το σχήμα της είναι λίγο πιο στρογγυλό.

Η διάρκεια της διάβασης  $d$ , θεωρώντας την πλανητική τροχιά κυκλική, είναι:

$$d \cong \frac{PR}{\pi a} \sqrt{\left(1 - \frac{r}{R}\right)^2 - \left(\frac{a}{R} \cos i\right)^2} \quad (3.3)$$

όπου  $P$  η περίοδος περιφοράς του πλανήτη και  $i$  η κλίση της τροχιάς του πλανήτη σε σχέση με την ακτίνα παρατήρησης. Για μεγαλύτερη ευκολία στους υπολογισμούς χρησιμοποιείται η σχέση:

$$d \cong 13 \sqrt{1 - b^2} \frac{R}{M^{1/3}} P^{1/3} \quad (3.4)$$

όπου  $M$  η μάζα του αστέρα και  $b = a \cos i / R$ .

Άλλη μία σημαντική παράμετρος είναι η διάρκεια εισόδου ή εξόδου του πλανήτη που δίνεται από τη σχέση:

$$t \cong d \frac{r}{R} \sqrt{1 - b^2} \quad (3.5)$$

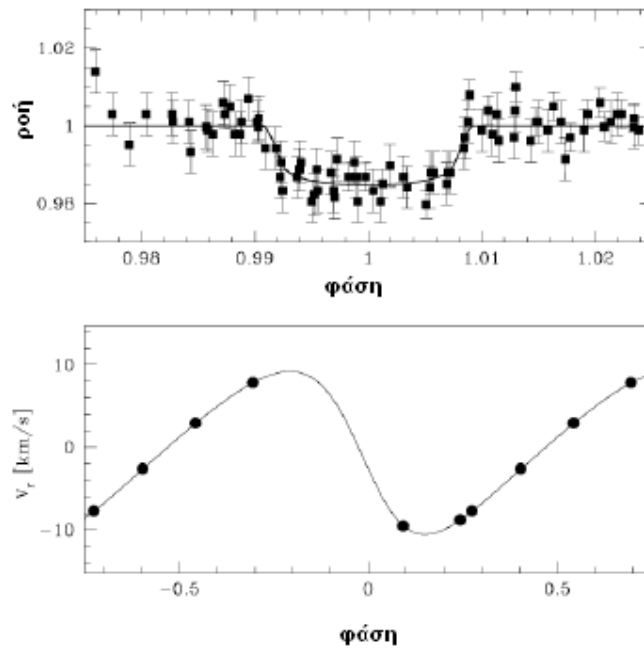


Η διάρκεια της διάβασης σε περίπτωση ελλειπτικής τροχιάς είναι:

$$d = 2 \sqrt{\frac{1 - (\rho \cos i)^2}{(R + r)^2}} (R + r) \frac{\sqrt{1 - e^2}}{1 + e \cos \phi} \left( \frac{P}{2\pi GM} \right)^{1/3} \quad (3.6)$$

όπου  $\rho$  η απόσταση μεταξύ αστέρα και πλανήτη κατά τη διάρκεια της διάβασης που αντιστοιχεί σε φάση  $\phi$  και  $e$  η εκκεντρότητα της τροχιάς.

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται ένα παράδειγμα διάβασης:

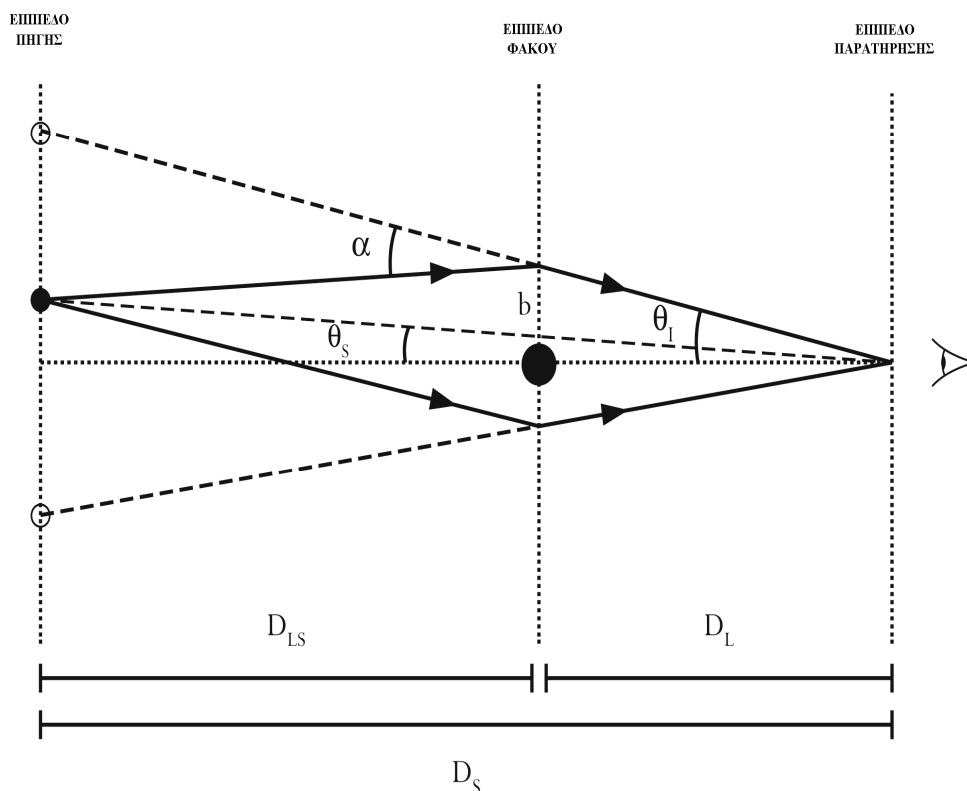


**Σχήμα 3.5** Στο πάνω σχήμα φαίνεται η μείωση της ροής καθώς ο πλανήτης περνά μπροστά από τον αστέρα. Στο κάτω σχήμα φαίνεται η μεταβολή της ακτινικής ταχύτητας του αστέρα. Όταν ο πλανήτης βρίσκεται ολόκληρος μπροστά από τον αστέρα (φάση = 1), η ακτινική ταχύτητα είναι ίση με μηδέν αφού τόσο ο αστέρας, όσο και ο πλανήτης, κινούνται κάθετα στην οπτική ακτίνα ([www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org)).

✚ **Το φαινόμενο του βαρυτικού microlensing.** Όταν ένας αστέρας βρίσκεται μπροστά από έναν άλλο, τότε το βαρυτικό πεδίο του κοντινότερου αστέρα δρα σαν φακός μεγεθύνοντας τον άλλο αστέρα. Το ίδιο μπορεί να προκαλέσει και το βαρυτικό πεδίο ενός πλανήτη έτσι ώστε αυτός να γίνει ανιχνεύσιμος.

Η ακτίνα του Einstein (ή γωνία του Einstein) είναι η γωνιακή ακτίνα του δίσκου του Einstein στην περίπτωση της τέλει ευθυγράμμισης. Εξαρτάται από τη μάζα ( $M$ ) του αντικειμένου που δρα σαν φακός (π.χ. πλανήτη), από την απόσταση ( $d_L$ ) του αντικειμένου αυτού καθώς επίσης και από την απόσταση ( $d_S$ ) της πηγής:

$$\theta_E = \sqrt{\frac{4GM}{c^2} \frac{d_S - d_L}{d_S d_L}} \quad (3.7)$$



**Σχήμα 3.6** Στο παραπάνω σχήμα φαίνονται οι αποστάσεις  $d_L$ ,  $d_S$  και  $d_{LS}$ , που αντιστοιχούν στην απόσταση μεταξύ επιπέδου φακού και επιπέδου παρατήρησης, στην απόσταση μεταξύ επιπέδου πηγής και επιπέδου παρατήρησης και στην απόσταση μεταξύ επιπέδου πηγής και επιπέδου φακού αντίστοιχα. Για τη γωνία  $\alpha$  ισχύει:  $\alpha = (4GM)/(c^2 \theta d_L)$  ([www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org)).

Το φαινόμενο του βαρυτικού microlensing διαρκεί όσο η γωνιακή απόσταση μεταξύ της πηγής και του αντικειμένου που δρα σαν φακός είναι μικρότερη από  $\theta_E$ . Κατά τη διάρκεια του φαινομένου η φωτεινότητα της πηγής ενισχύεται κατά ένα παράγοντα  $A$ . Ο παράγοντας αυτός εξαρτάται από την εγγύτητα της ευθυγράμμισης ανάμεσα στον παρατηρητή, την πηγή και του αντικειμένου που δρα σαν φακός.

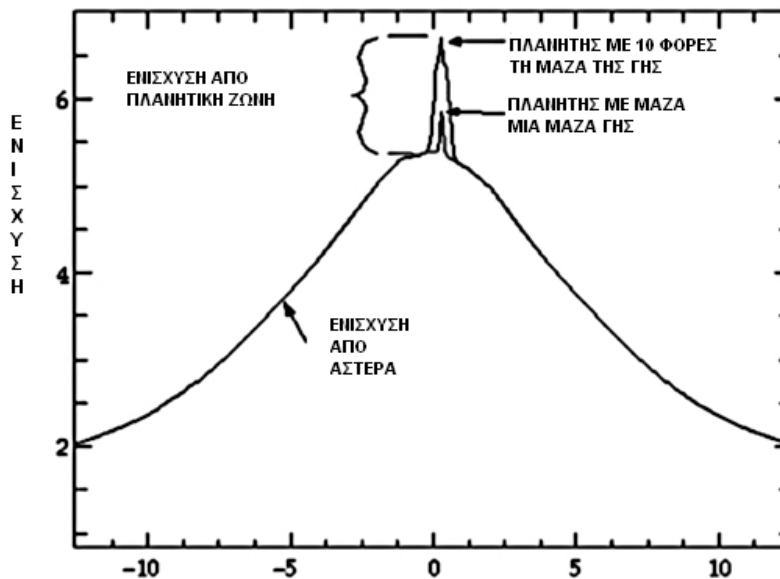
$$A(u) = \frac{u^2 + 2}{u\sqrt{u^2 + 4}} \quad (3.8)$$

Ο καθαρός αριθμός  $u$  καθορίζεται από τη γωνιακή απόσταση μεταξύ του αντικειμένου που δρα σαν φακός και της πηγής, διαιρεμένη με τη γωνία  $\theta_E$ . Ο παράγοντας  $A(u)$  είναι πάντα μεγαλύτερος από τη μονάδα. Γι' αυτό το φαινόμενο του βαρυτικού microlensing μπορεί μόνο να αυξήσει τη λαμπρότητα της πηγής και όχι να τη μειώσει. Όσο το  $u$  μικραίνει, δηλαδή όσο φακός και πηγή πλησιάζουν στην ευθυγράμμιση, τόσο ο παράγοντας  $A(u)$  μεγαλώνει. Όταν το  $u$  πλησιάζει το άπειρο, ο παράγοντας  $A(u)$  πλησιάζει τη μονάδα (αφήνει πρακτικά

τη λαμπρότητα της πηγής αμετάβλητη). Το  $u$  αλλάζει σημαντικά σε μικρό χρονικό διάστημα. Η σχετική χρονική κλίμακα καλείται χρόνος Einstein  $t_E$  και ορίζεται ως ο χρόνος που χρειάζεται το αντικείμενο που δρα σαν φακός για να καλύψει γωνιακή απόσταση ίση με  $\theta_E$ . Η συνάρτηση  $u(t)$  καθορίζεται από το πυθαγόρειο θεώρημα:

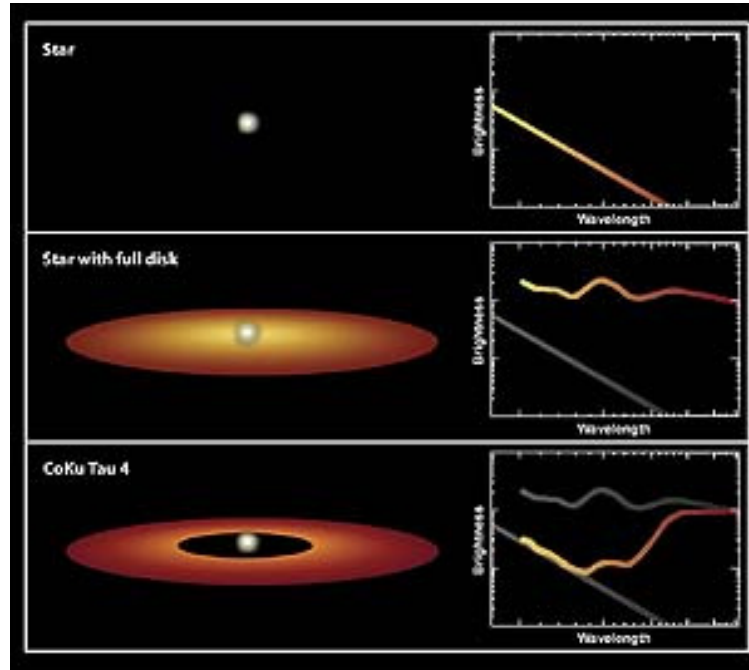
$$u(t) = \sqrt{u_{\min}^2 + \left(\frac{t-t_0}{t_E}\right)^2} \quad (3.9)$$

Το  $u_{\min}$  καθορίζει την κορυφή της λαμπρότητας του φαινομένου. Στο παρακάτω διάγραμμα δίνεται σχηματικά το φαινόμενο του βαρυτικού microlensing:



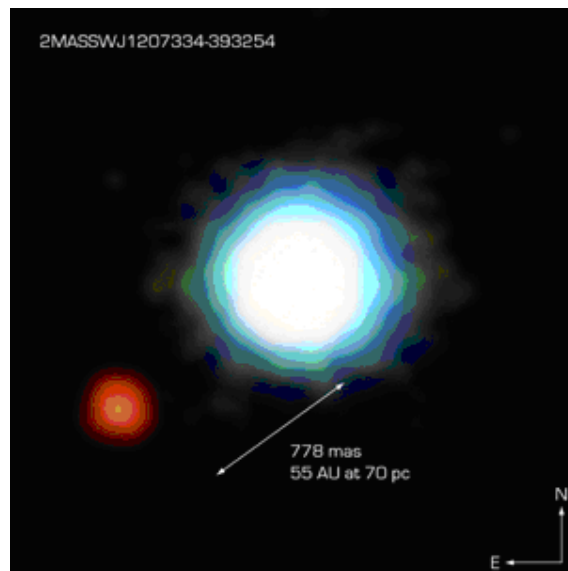
**Σχήμα 3.7** Καθώς παρατηρητής, πλανήτης και αστέρας πλησιάζουν στην ευθυγράμμιση, παρατηρείται ενίσχυση της λαμπρότητας του αστέρα (γίνεται μέγιστη τη στιγμή της τέλει ευθυγράμμισης). Σε αυτή την περίπτωση (που η ενίσχυση οφείλεται σε πλανήτη) παρατηρείται απότομη αύξηση της λαμπρότητας του αστέρα. Στην περίπτωση που η ενίσχυση οφείλεται σε αστέρα, η αύξηση της λαμπρότητας του εξεταζόμενου αστέρα είναι πιο ομαλή (<http://www.markelowitz.com/exobiology.htm>).

- ✚ **Δίσκοι γύρω από άστρα.** Δίσκοι σκόνης περιβάλλουν πολλά άστρα και μπορούν να ανιχνευθούν επειδή απορροφούν αστρική ακτινοβολία την οποία επανεκπέμπουν στα υπέρυθρα μήκη κύματος. Χαρακτηριστικά αυτών των δίσκων μπορεί να υποδηλώνουν την ύπαρξη σχηματισμένων πλανητών. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται το υπέρυθρο φάσμα ενός μεμονωμένου αστέρα και δύο αστέρων με δίσκο σκόνης γύρω τους:



**Σχήμα 3.8** Πάνω: υπέρυθρο φάσμα αστέρα χωρίς δίσκο σκόνης γύρω του  
 Μέσον: υπέρυθρο φάσμα αστέρα με πλήρη δίσκο σκόνης γύρω του  
 Κάτω: υπέρυθρο φάσμα αστέρα με δακτύλιο σκόνης γύρω του  
 (<http://www.spitzer.caltech.edu>)

- + **Άμεση παρατήρηση.** Σε ορισμένες περιπτώσεις μπορούν ορισμένα τηλεσκόπια να διακρίνουν απευθείας πλανήτες. Αυτό είναι πιο εύκολο όταν οι πλανήτες είναι μεγάλοι και μακριά από το κεντρικό άστρο.

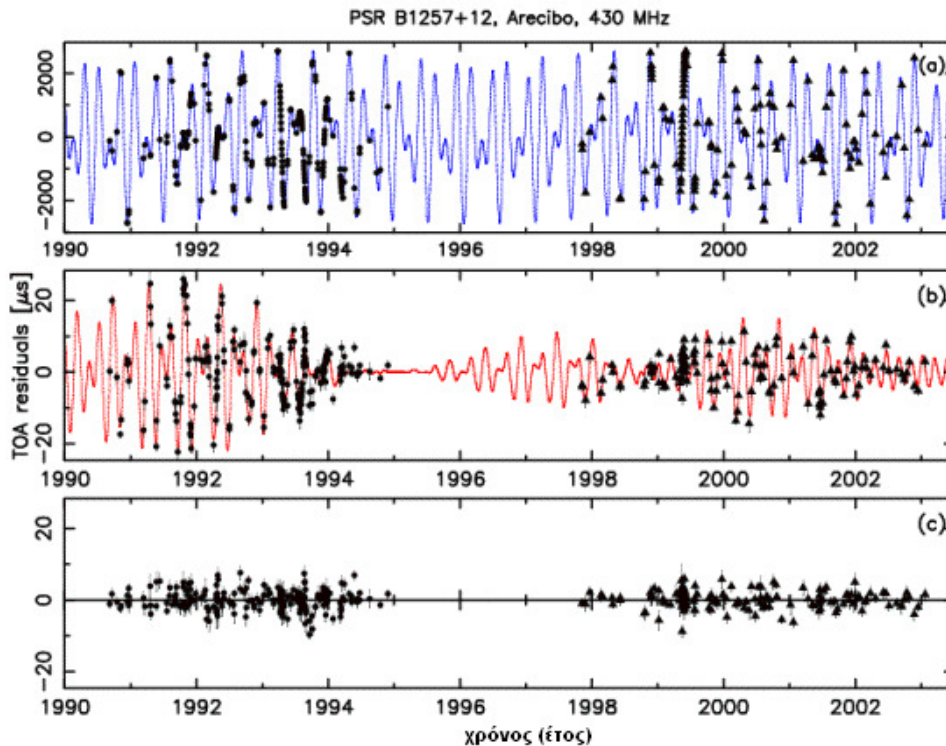


**Σχήμα 3.9** Ο καφέ νάνος 2M1207 και ο συνοδός πλανήτης του (<http://www.eso.org>).

## 4. Σύγκριση Μεθόδων Ανίχνευσης Πλανητών

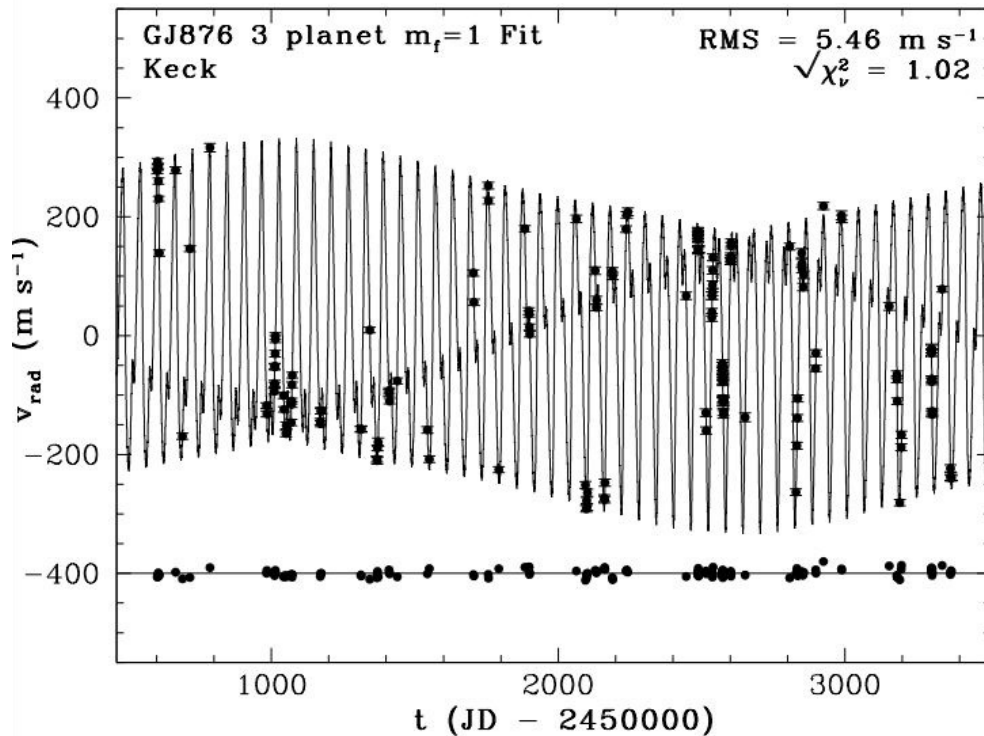
Μία νέα εποχή ξεκίνησε για την αστρονομία μετά την ανακάλυψη των πρώτων εξωηλιακών πλανητών. Νέες τεχνικές έπρεπε να βρεθούν για την ανίχνευση πλανητών με ακόμη μικρότερες μάζες, σαν τη Γη, έξω από το ηλιακό μας σύστημα.

Η μέτρηση του χρόνου μεταξύ των παλμών ενός pulsar είναι μία σίγουρη μέθοδος για να εξακριβωθεί το κατά πόσο ο pulsar αυτός έχει πλανήτες ή όχι σε τροχιά γύρω του. Η μέθοδος αυτή είναι πολύ ακριβής, γι' αυτό και οι πρώτοι εξωηλιακοί πλανήτες που ανακαλύφθηκαν ήταν με αυτό τον τρόπο. Ένα παράδειγμα δεδομένων αυτής της μεθόδου φαίνεται στο Σχήμα 4.1:



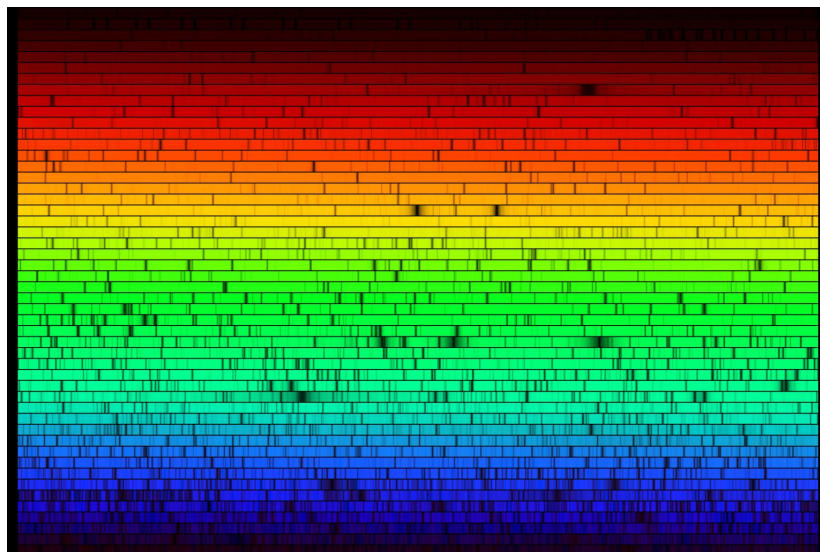
**Σχήμα 4.1** Μεταβολή της περιόδου περιστροφής του pulsar PSR B1257+12 μεταξύ των ετών 1990 και 2004 (<http://iopscience.iop.org>).

Για τον εντοπισμό πλανητών με μικρή περίοδο περιφοράς, η τεχνική Doppler αποδείχθηκε καλύτερη από την αστρομετρία. Ένα παράδειγμα δεδομένων ακτινικών ταχυτήτων δίνεται στο Σχήμα 4.2:



Σχήμα 4.2 Ακτινικές ταχύτητες του GJ 876 (<http://hera.ph1.uni-koeln.de>).

Το παραπάνω διάγραμμα δείχνει πραγματικές μετρήσεις ακτινικών ταχυτήτων του άστρου GJ 876 μεταξύ 1996 και 2005. Οι μετρήσεις έγιναν με το τηλεσκόπιο Keck 1. Οι ταχύτητες έχουν αναπαραχθεί με ένα θεωρητικό μοντέλο τριών πλανητών, που περιλαμβάνει τις βαρυντικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ των πλανητών. Οι διαφορές μεταξύ παρατηρούμενων και θεωρητικών ταχυτήτων φαίνονται στο κάτω μέρος, με RMS = 5.5 m/sec.



Σχήμα 4.3 Φάσμα αστρικού φωτός του GJ 876 ([exoplanets.org](http://exoplanets.org)).

Στο Σχήμα 4.3 δίνεται το φάσμα του αστρικού φωτός του GJ 876, από το φασματογράφο HIRES του τηλεσκοπίου Keck, που έχει αναβαθμιστεί με καινούρια ψηφιακή κάμερα και οπτικά μέρη, ώστε να βελτιστοποιηθεί η ανίχνευση πλανητών με τη μέθοδο Doppler. Στο φάσμα φαίνονται οι μετατοπίσεις Doppler καθώς ο αστέρας κινείται στο διάστημα λόγω της βαρυτικής έλξης των πλανητών που βρίσκονται σε τροχιά γύρω του.

Παρόλα αυτά η αστρομετρία επανήλθε με μία νέα τεχνική: το συμβολόμετρο. Αυτό εκμεταλλεύεται την κυματική φύση του φωτός και συνδυάζει το φως που δέχεται από δύο ή και περισσότερα διαφορετικά τηλεσκόπια ώστε να αποδώσει καλύτερη εικόνα του ουρανού. Κάθε τηλεσκόπιο δέχεται τα μέγιστα και τα ελάχιστα των κυμάτων φωτός ενός άστρου και συγκρίνοντάς τα με αυτά από κάποιο άλλο τηλεσκόπιο αποκαλύπτεται η ακριβής θέση του άστρου. Το συμβολόμετρο χρησιμοποιείται πολύ στη ραδιοαστρονομία, αλλά στα οπτικά μήκη κύματος είναι πολύ πιο δύσκολο να κατασκευαστεί, γιατί τα μικρά μήκη κύματος της οπτικής ακτινοβολίας απαιτούν τα εξαρτήματα του συμβολομέτρου να είναι σχεδόν τέλεια.

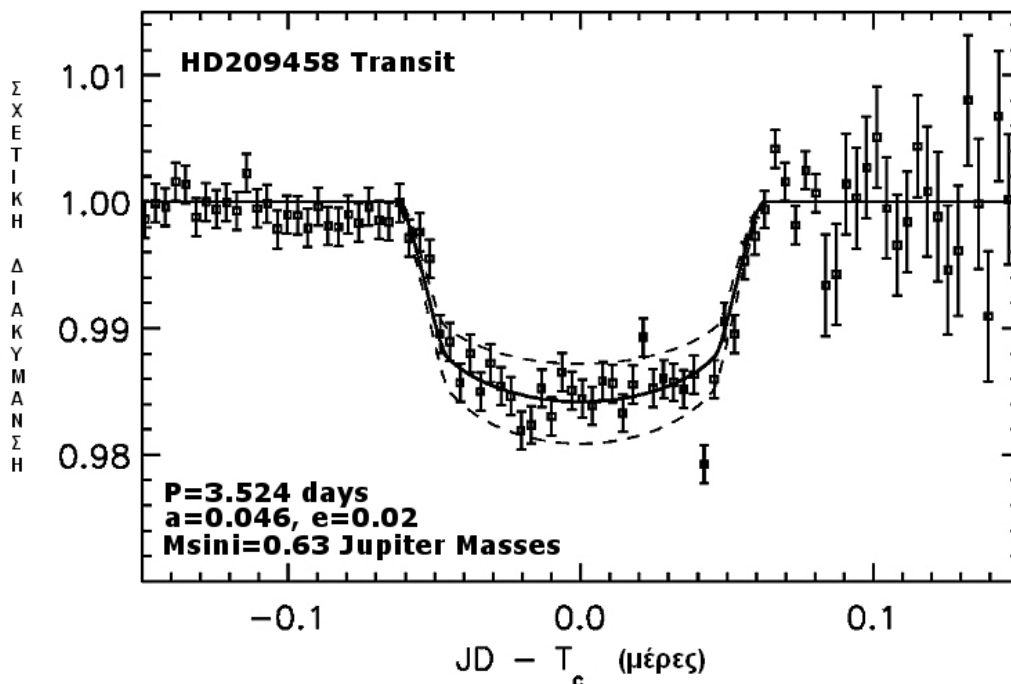
Στη διάρκεια της δεκαετίας του '80, η ομάδα του Shao κατασκεύασε ένα οπτικό συμβολόμετρο (Σανγκάι, Κίνα), αλλά η ακρίβειά του δεν ήταν καλύτερη από 1 milliarcsecond, ίδια με αυτή που είχε πετύχει ο Gatewood με το πολύ πιο απλό και οικονομικό MAP (Croswell 1999). Αυτό το όριο πίστευαν ότι οφειλόταν στην γήινη ατμόσφαιρα. Όταν όμως παρατηρούνταν διπλά συστήματα αστέρων, το συμβολόμετρο έδινε τις θέσεις των αστέρων σε σύγκριση μεταξύ τους και πετύχαινε ακρίβεια δέκα φορές καλύτερη από το υποτιθέμενο όριο. Έτσι οι αστρονόμοι κατάλαβαν ότι η ατμόσφαιρα διέκοπτε εξίσου τα κύματα φωτός και από τα δύο άστρα, αφού ήταν τόσο κοντά μεταξύ τους και το φως τους ακολουθούσε σχεδόν την ίδια πορεία μέσα στην ατμόσφαιρα. Έτσι το συμβολόμετρο μπορούσε να βρει την ακριβή θέση ενός αστέρα συγκρίνοντάς τον με ένα κοντινό αστέρα αναφοράς. Η ομάδα του Shao παρατήρησε ότι τα αποτελέσματα ήταν καλύτερα όταν παρατηρούσαν στο υπέρυθρο. Για το σκοπό αυτό κατασκεύασαν ένα ισχυρό συμβολόμετρο υπέρυθρου στο όρος Palomar της Καλιφόρνια. Αποτελούνταν από δύο τηλεσκόπια σε απόσταση 100 μέτρων και μπορούσε να εντοπίσει τις θέσεις των αστέρων με ακρίβεια 50 microarcseconds. Αν ο Ήλιος βρισκόταν σε απόσταση 10 ετών φωτός, ο Δίας θα του προκαλούσε μία μετατόπιση 1600 microarcseconds, ο Ποσειδώνας 510 microarcseconds και η Γη 1 microarcsecond.

Τα πλεονεκτήματα της αστρομετρίας έναντι της τεχνικής Doppler είναι δύο. Πρώτον, η αστρομετρία μπορεί να καθορίσει την πραγματική μάζα του πλανήτη και όχι ένα κατώτερο όριο όπως η τεχνική Doppler. Δεύτερον, η ακρίβεια των ακτινικών ταχυτήτων που υπολογίζονται με την τεχνική Doppler περιορίζεται από το ίδιο το άστρο εξαιτίας της ηλιακής δραστηριότητας που επηρεάζει το φάσμα. Οι κηλίδες στους αστέρες δεν επιτρέπουν στην τεχνική Doppler να μετρήσει μικρές μετατοπίσεις των αστέρων αυτών, όπως γίνεται με την αστρομετρία.

Ο Gatewood χρησιμοποίησε το τηλεσκόπιο Keck για να συνδυάσει την αστρομετρία με την τεχνική Doppler, με σκοπό να μετρήσει τις μετατοπίσεις των αστέρων κατά μήκος της οπτικής ακτίνας καθώς επίσης και κάθετα σε αυτή. Χρησιμοποίησε ένα νέο όργανο, το πολυκαναλικό αστρομετρικό φωτόμετρο με φασματογράφο (MAPS). Ο φασματογράφος, που είχε σχεδιαστεί από τον Robert McMillan και μετρούσε τις μετατοπίσεις Doppler, είχε ακρίβεια 2 με 3 m/sec.

Παρόλες τις νέες τεχνικές ο Shao ήθελε να κάνει άμεσες παρατηρήσεις των πλανητών που είχαν ανακαλυφθεί και βρίσκονταν σε τροχιές πολύ κοντινές στα άστρα, εκμεταλλευόμενος τη θερμότητά τους.

Μία άλλη μέθοδος ανίχνευσης πλανητών, όπως ήδη αναφέρθηκε, είναι η μέθοδος της διάβασης. Για να μπορεί να ανιχνευθεί ο πλανήτης με αυτή τη μέθοδο πρέπει η γωνία που σχηματίζει η οπτική ακτίνα με το επίπεδο της τροχιάς του πλανήτη να είναι μικρή. Αν ανιχνευθεί κάποια μείωση της λαμπρότητας, οι αστρονόμοι μπορούν να δουν αν αυτή είναι επαναλαμβανόμενη και να προσδιορίσουν τη περίοδο περιφοράς του πλανήτη. Η τεχνική αυτή λειτουργεί όταν οι πλανήτες βρίσκονται κοντά στον αστέρα. Σε αντίθετη περίπτωση η μείωση της λαμπρότητας θα ήταν πολύ μικρή. Για παράδειγμα αν παρατηρούσαμε το ηλιακό μας σύστημα ο Δίας θα μείωνε τη λαμπρότητα του Ήλιου μόλις κατά 1%, ενώ η Γη μόνο κατά 0.01%. Επιπλέον όταν ο πλανήτης είναι κοντά, η περίοδος του είναι μικρή και σε μικρό χρονικό διάστημα μπορούν να γίνουν αρκετές παρατηρήσεις που να επιβεβαιώνουν την ύπαρξή του. Οι καλύτεροι αστέρες που μπορούν να παρατηρηθούν με αυτή την τεχνική είναι οι κόκκινοι νάνοι οι οποίοι είναι μικροί και έτσι αν ένας πλανήτης περνούσε από μπροστά τους θα μείωνε πολύ τη λαμπρότητά τους.



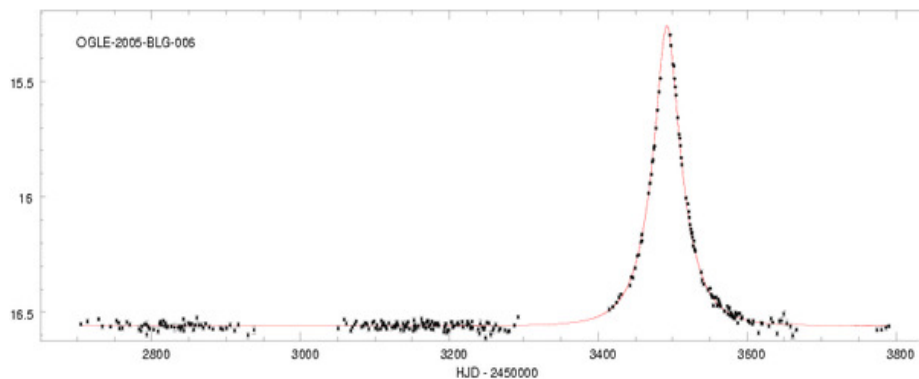
**Σχήμα 4.4** Μείωση της λαμπρότητας του αστέρα HD209458 λόγω της διάβασης πλανήτη από μπροστά του ([www.hao.ucar.edu](http://www.hao.ucar.edu)).

Η τεχνική αυτή θα μπορούσε να εφαρμοστεί σε διπλά συστήματα αστέρων στα οποία ο αστέρας που περιφέρεται γύρω από τον άλλο κρύβει ένα μέρος του φωτός του. Έτσι οι αστρονόμοι καταλαβαίνουν αν η οπτική ακτίνα βρίσκεται στο επίπεδο του συστήματος των δύο αστέρων και στη συνέχεια μπορούν να χρησιμοποιήσουν την προηγούμενη τεχνική για την ανίχνευση πλανητών, που αν υπάρχουν θα πρέπει να βρίσκονται στο



ίδιο επίπεδο με αυτό του συστήματος των αστερών. Το πρόβλημα έγκειται στο γεγονός ότι είναι δύσκολο σε διπλά συστήματα αστερών να μπορέσουν να σχηματιστούν πλανήτες γύρω από τον ένα αστέρα λόγω της βαρύτητας του άλλου. Αν όμως οι δύο αστέρες βρίσκονται αρκετά μακριά, τότε ο σχηματισμός πλανητών είναι πιθανός.

Όταν ένας αστέρας περνάει ακριβώς μπροστά από έναν άλλο, το βαρυτικό πεδίο του κοντινότερου αστέρα δρα σαν φακός μεγεθύνοντας το φως του μακρινότερου αστέρα, λόγω του φαινομένου του βαρυτικού μικροφακού (microlensing). Αν κάποιος αστέρας έχει πλανήτη, τότε το βαρυτικό πεδίο του πλανήτη αυτού μπορεί να προκαλέσει το ίδιο αποτέλεσμα στον αστέρα, δηλαδή να τον μεγεθύνει για κάποιες ώρες και έτσι να μπορέσει ο πλανήτης να ανιχνευθεί. Το πρόβλημα είναι ότι οι πλανήτες έχουν πολύ μικρή μάζα οπότε το φαινόμενο είναι πολύ μικρό σε ένταση και χρόνο. Επίσης είναι δύσκολο η γεωμετρία του συστήματος να είναι τέτοια ώστε το φαινόμενο να είναι παρατηρήσιμο. Ένα διάγραμμα ανίχνευσης πλανήτη με τη μέθοδο αυτή δίνεται στο Σχήμα 4.5:



**Σχήμα 4.5** Μεγέθυνση του αστέρα OGLE-2005-BLG-006 λόγω της παρουσίας πλανήτη (www.wikipedia.org)

Η τεχνική αυτή είναι όμως η μόνη που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την ανίχνευση πλανητών στο μεσοαστρικό χώρο, οι οποίοι δεν περιφέρονται γύρω από άστρα. Οι πλανήτες αυτοί μπορεί να έχουν προέλθει από εκρήξεις υπερκαινοφανών ή να εκτοξεύθηκαν λόγω της βαρύτητας μεγάλων πλανητών που κινήθηκαν από το εξωτερικό μέρος του πλανητικού τους συστήματος προς το εσωτερικό. Η δεύτερη αυτή περίπτωση μπορεί να συνέβη και στον αστέρα 51 Pegasi.

Για να απαλλαγούμε από την επίδραση της ατμόσφαιρας στο φως που λαμβάνουμε, χρησιμοποιείται σήμερα η προσαρμοστική οπτική (adaptive optics). Το σύστημα παρατηρεί έναν αστέρα αναφοράς και διορθώνει τις προκαλούμενες από την ατμόσφαιρα της Γης διαταραχές του φωτός, κάνοντας χρήση ενός καθρέφτη που ανακλά το φως με τέτοιο τρόπο ώστε να παίρνουμε διαρκώς τη διορθωμένη εικόνα.

Στόχος παραμένει η άμεση παρατήρηση όσο το δυνατό περισσότερων πλανητών. Για το σκοπό αυτό χρειαζόμαστε ένα αστρομετρικό συμβολόμετρο σε τροχιά, ευαίσθητο στην υπέρυθη ακτινοβολία, που μπορεί να δώσει απευθείας εικόνες πλανητών σαν τη Γη και ίσως να ανιχνεύσει πιθανή ύπαρξη ζωής. Το συμβολόμετρο μπορεί να αποσβέσει το φως ενός αστέρα προσθέτοντας τα μέγιστα των κυμάτων φωτός που λαμβάνει από ένα τηλεσκόπιο και τα ελάχιστα που δέχεται από κάποιο άλλο. Το φως από τα μη

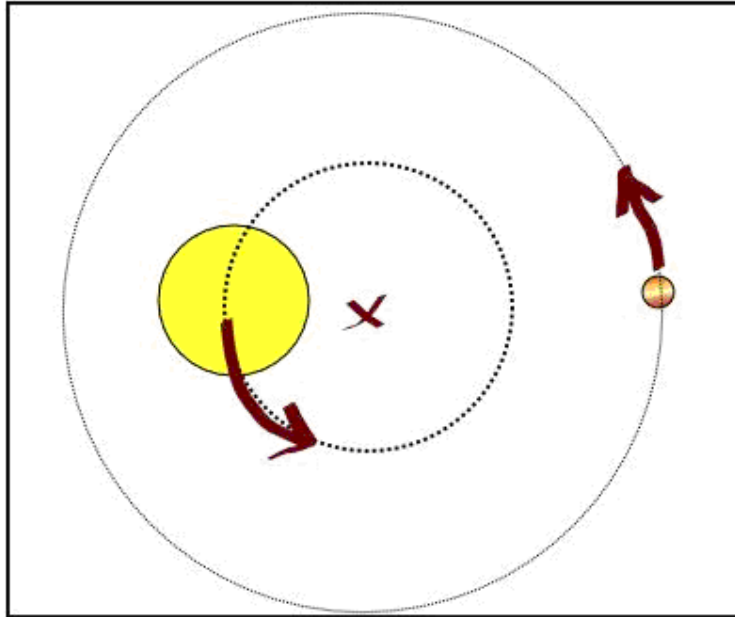
κεντραρισμένα αντικείμενα, όπως οι πλανήτες, δεν θα αποσβεσθεί. Οι πλανήτες μπορούν να παρατηρηθούν στα υπέρυθρα μήκη κύματος, γιατί όλα τα αντικείμενα εκπέμπουν υπέρυθρη ακτινοβολία λόγω της θερμότητάς τους. Για καλύτερα αποτελέσματα έχει προταθεί το συμβολόμετρο να τοποθετηθεί μακριά από τον Ήλιο, περίπου στην απόσταση του Δία όπου τόσο η μεσοπλανητική σκόνη, όσο και το ίδιο το συμβολόμετρο θα έχουν αρκετά μικρή θερμοκρασία ώστε να αποφευχθεί επιπλέον υπέρυθρη ακτινοβολία που θα μπορούσε να προκαλέσει προβλήματα στις παρατηρήσεις.

## 5. Τα Πρώτα Βήματα

Οι αστρονόμοι θεωρούν ότι άστρα σαν τον Ήλιο αποτελούν τους καλύτερους στόχους για την αναζήτηση νέων πλανητών. Επίσης πιο πιθανή είναι η ανακάλυψη πλανητών γύρω από μεμονωμένους αστέρες, αφού σε διπλά ή τριπλά συστήματα αστέρων η βαρύτητα του ενός άστρου μπορεί να διώξει μακριά τους πλανήτες του άλλου ή ακόμα και να αποτρέψει το σχηματισμό τους. Πλανήτες θα μπορούσαν βέβαια να υπάρχουν και γύρω από διπλά συστήματα αστέρων, αν ήταν σε τροχιές τέτοιες που να περικλείουν και τα δύο άστρα ή τα δύο άστρα να ήταν αρκετά μακριά ώστε να μπορεί το καθένα να έχει το δικό του πλανητικό σύστημα.

Κάποτε πίστευαν ότι οι αστέρες Σείριος και Προκύων ήταν μεμονωμένοι αστέρες. Στη συνέχεια όμως η αστρομετρία έδειξε ότι και οι δύο είχαν αόρατους συνοδούς. Εφόσον λοιπόν η αστρομετρία μπορούσε να ανακαλύψει αόρατους αστέρες, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί και για την ανακάλυψη πλανητών. Φυσικά κάτι τέτοιο δε θα ήταν καθόλου εύκολο αφού η ταλάντωση που προκαλεί ένας πλανήτης είναι πολύ μικρότερη από αυτή που προκαλεί ένα άστρο. Για παράδειγμα, αν κοιτούσαμε τον Ήλιο από μία απόσταση 10 ετών φωτός, θα βλέπαμε ότι ο Δίας του προκαλεί μία μετατόπιση 1.6 milliarcsec. Η μετατόπιση από τους άλλους πλανήτες θα ήταν ακόμα μικρότερη.

Περισσότερο από τη μάζα του αντικειμένου, αυτό που επηρεάζει τη μετατόπιση ενός άστρου είναι η απόσταση του αντικειμένου από αυτό. Συγκεκριμένα, όσο πιο μακριά είναι το αντικείμενο, τόσο μεγαλύτερη η μετατόπιση. Αυτό συμβαίνει γιατί το σύστημα αστέρα - αντικειμένου περιστρέφεται γύρω από το κοινό κέντρο μάζας, το οποίο είναι πιο μακριά από τον αστέρα όσο απομακρύνεται το αντικείμενο. Έτσι, για παράδειγμα, ενώ ο Ουρανός και ο Ποσειδώνας έχουν σχεδόν ίδιες μάζες, ο Ποσειδώνας, που βρίσκεται πιο μακριά, προκαλεί διπλάσια μετατόπιση στον Ήλιο.

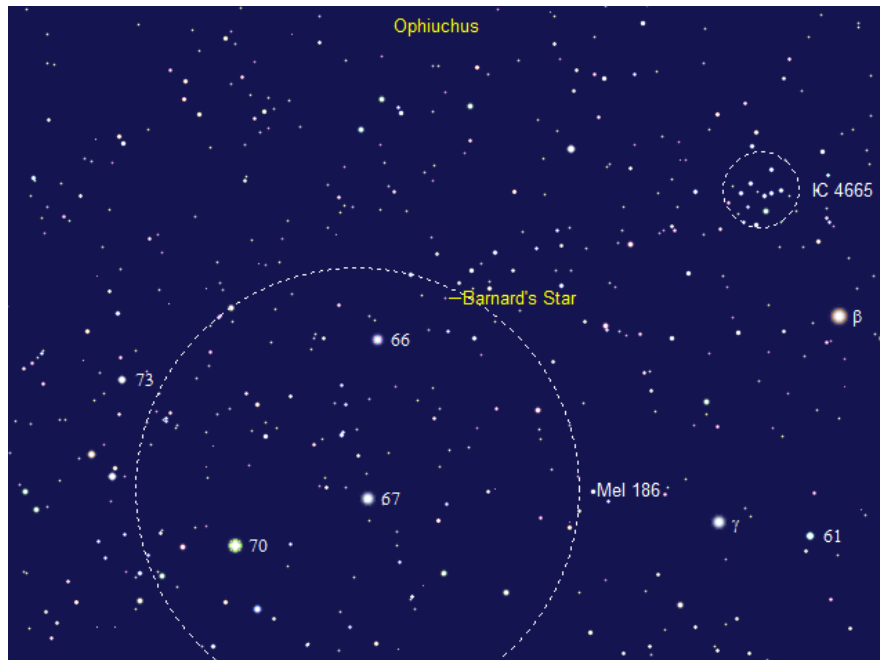


**Σχήμα 5.1** Το σύστημα αστέρα - πλανήτη κινείται γύρω από το κοινό κέντρο μάζας (www.wikipedia.org)

Οι αστρονόμοι που χρησιμοποιούν την αστρομετρία για την ανίχνευση πλανητών επικεντρώνονται στα κοντινά άστρα όπου η μετατόπιση θα φαίνεται μεγαλύτερη και θα είναι ευκολότερο να μετρηθεί. Στις αρχές της δεκαετίας του '40 δύο κοντινοί αστέρες, ο 70 Ophiuchi και ο 61 Cygni φαίνονταν να μετατοπίζονται. Αν η μετατόπιση αυτή οφειλόταν σε πλανήτες, τότε αυτοί θα έπρεπε να είχαν δέκα φορές τη μάζα του Δία. Αυτοί όμως δεν θα ήταν πλανήτες αλλά καφέ νάνοι, δηλαδή άστρα πολύ μικρά, στους πυρήνες των οποίων δεν μπορεί να γίνει η ανάφλεξη του υδρογόνου ώστε να αρχίσουν οι πυρηνικές αντιδράσεις. Μέχρι τότε κανένας καφέ νάνος δεν είχε ανακαλυφθεί.

Ένα ερώτημα που απασχόλησε για καιρό τους αστρονόμους είναι πότε ένα αντικείμενο μπορεί να χαρακτηριστεί ως πλανήτης. Πόσο μεγάλος μπορεί να είναι ένας πλανήτης ή αντίστοιχα πόσο μικρός μπορεί να είναι ένας αστέρας; Οι καφέ νάνοι είναι ή όχι αστέρες; Τελικά η Διεθνής Αστρονομική Ένωση κατέληξε το 2001 στο ότι η μέγιστη μάζα που μπορεί να έχουν οι πλανήτες είναι περίπου 13 φορές η μάζα του Δία (για αντικείμενα με ποσοστό μετάλλων ίσο με αυτό του Ήλιου), η οποία είναι η ελάχιστη μάζα που πρέπει να έχει ένα ουράνιο σώμα ώστε να αρχίσει η καύση του δευτερίου στον πυρήνα του. Αντικείμενα με μεγαλύτερη μάζα είναι άστρα. Επίσης ελεύθερα ουράνια σώματα που βρίσκονται σε νεαρά αστρικά νεφελώματα και τα οποία έχουν μάζα μικρότερη από την οριακή μάζα για τη θερμοπυρηνική ανάφλεξη του δευτερίου, δεν θεωρούνται πλανήτες αλλά υπο-καφέ νάνοι (sub-brown dwarfs).

Το 1916 ο Αμερικανός αστρονόμος Edward Emerson Barnard ανακάλυψε στον αστερισμό Ophiuchus έναν αστέρα με μεγάλη ίδια κίνηση, συγκρίνοντάς τον με τη θέση του το 1894. Η μεγάλη ίδια κίνηση του αστέρα του Barnard, όπως ονομάστηκε, υποδήλωνε ότι βρισκόταν σε κοντινή απόσταση.



Σχήμα 5.2 Στο παραπάνω σχήμα φαίνεται η ίδια κίνηση του αστέρα του Barnard (<http://www.nightskyinfo.com>)

Στις αρχές της δεκαετίας του '60 ο αστρονόμος Peter van de Kamp μελετώντας πάνω από 2000 φωτογραφικές πλάκες, παρατήρησε ότι η ίδια κίνηση του αστέρα του Barnard φαινόταν να παρεκκλίνει από την ευθεία πορεία που έπρεπε να ακολουθεί. Η μόνη εξήγηση ήταν ότι έπρεπε να είχε έναν αόρατο συνοδό ο οποίος υπολογίστηκε ότι πρέπει να έχει 60% περισσότερη μάζα από το Δία και να περιφέρεται με περίοδο 24 χρόνων. Μέχρι το 1969 ο Van de Kamp μελέτησε 3000 φωτογραφικές πλάκες του αστέρα του Barnard και υπολόγισε ότι πρέπει να υπάρχουν δύο πλανήτες σαν τον Δία και τον Κρόνο με περιόδους περιφοράς 12 και 20 χρόνια, αντίστοιχα. Ο αστέρας θα μπορούσε να έχει και μικρότερους πλανήτες σαν τη Γη που να μην μπορούσαν να ανιχνευθούν. Οι αστρονόμοι George Gatewood και Eichhorn ανέλαβαν να κάνουν περαιτέρω μελέτες στον αστέρα του Barnard ώστε να επιβεβαιώσουν την ανακάλυψη του Van de Kamp. Οι φωτογραφικές πλάκες που χρησιμοποίησαν προήλθαν από δύο διαφορετικά παρατηρητήρια, του Allegheny στο Pittsburgh και του Van Vleck στο Connecticut. Για να μετρήσει τη θέση του αστέρα του Barnard, ο Gatewood χρησιμοποίησε πιο πολλούς αστέρες αναφοράς από τον Van de Kamp και ο Eichhorn ανέπτυξε πιο αποτελεσματική τεχνική ώστε να βρει την ακριβή τροχιά του αστέρα χρησιμοποιώντας πολύ λιγότερα δεδομένα (241 φωτογραφικές πλάκες). Βρήκαν ότι το μονοπάτι που ακολουθούσε ο αστέρας ήταν ευθύ, κάτι που είχε βρει και ο αστρονόμος Nicholas Wagman. Η μετατόπιση που είχε παρατηρήσει ο Van de Kamp οφειλόταν προφανώς στο τηλεσκόπιο που είχε χρησιμοποιήσει. Αυτό απογοήτευσε τους κυνηγούς πλανητών που πίστευαν ότι είχε επιτέλους ανακαλυφθεί το πρώτο εξωηλιακό πλανητικό σύστημα.

## 6. Οι Πρώτοι Εξωηλιακοί Πλανήτες

Η ανακάλυψη των pulsars ήταν πολύ σημαντική για την αστρονομία. Λίγο καιρό μετά την ανακάλυψη του πρώτου pulsar οι αστρονόμοι ανακάλυψαν ότι ο Crub pulsar πρέπει να είχε ένα πλανήτη σε τροχιά γύρω του. Η θεωρία αυτή στηριζόταν στη μέτρηση του χρόνου μεταξύ δύο παλμών του pulsar. Η βαρυτική έλξη ενός πλανήτη θα έκανε τον pulsar να κινείται περιοδικά έτσι ώστε άλλες φορές να πλησιάζει τη Γη και άλλες φορές να απομακρύνεται. Όταν θα πλησίαζε τη Γη ο παλμός θα χρειαζόταν λιγότερο χρόνο για να φτάσει στη Γη, ενώ όταν απομακρυνόταν ο χρόνος αυτός θα ήταν μεγαλύτερος. Δηλαδή, ένας πλανήτης θα έκανε την περίοδο του pulsar να μην είναι σταθερή. Δυστυχώς αργότερα διαπιστώθηκε ότι ο πλανήτης δεν υπήρχε και ότι η περίοδος κυμαινόταν λόγω θορύβου.

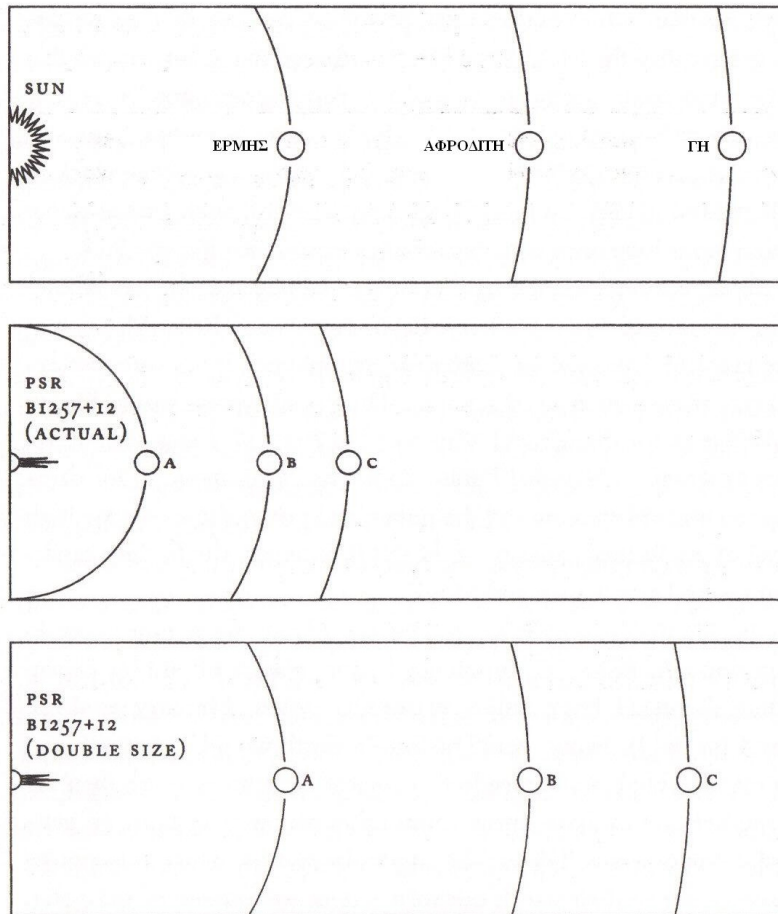
Το 1991 ο Setnam Sherman υποψιαζόταν ότι κάποιο αντικείμενο ήταν σε τροχιά γύρω από τον pulsar PSR B1829-10 λόγω της περιοδικής διακύμανσης της περιόδου του. Υπολόγισε ότι, αν υπήρχε πραγματικά κάποιο αντικείμενο σε τροχιά, τότε αυτό θα έπρεπε να έχει το μέγεθος ενός πλανήτη. Βάζοντας τα δεδομένα σε ένα πλανητικό μοντέλο είδε ότι ταίριαζαν. Ο πλανήτης έπρεπε να έχει τη μάζα του Ουρανού, να βρίσκεται σε τόση απόσταση από τον pulsar όσο και η Αφροδίτη από τον Ήλιο και να έχει περίοδο περιφοράς έξι μήνες. Τελικά αποδείχθηκε ότι ούτε αυτός ο πλανήτης υπήρχε. Το πρώτο λάθος ήταν ότι δεν είχαν την ακριβή θέση του pulsar. Επίσης η ακριβής θέση της Γης ήταν επίσης σημαντική, αφού η Γη κινείται σε τροχιά με ακτίνα οκτώ λεπτών φωτός, ενώ οι παλμοί που φτάνουν από τον pulsar είναι τρεις το δευτερόλεπτο. Το δεύτερο λάθος ήταν ότι στο μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε, η τροχιά της Γης γύρω από τον Ήλιο θεωρήθηκε κυκλική. Αυτό δημιούργησε μία φαινομενικά περιοδική μεταβολή της περιόδου του pulsar.

Το 1990 ο millisecond pulsar PSR B1257+12 παρατηρήθηκε ότι δεν ταίριαζε με κανένα χρονικό μοντέλο πρόβλεψης του πότε ακριβώς θα φτάσει ο κάθε παλμός στη Γη. Αυτό πίστεψαν ότι μπορεί να οφειλόταν στο ότι δεν είχαν την ακριβή θέση του pulsar. Το 1991 ο αστρονόμος Alex Wolszczan άρχισε να αντιλαμβάνεται ότι αυτό που φαινόταν σαν δύο ξεχωριστές περιοδοί στα δεδομένα, θα μπορούσε να προκαλείται από πλανήτες. Η μόνη δυσκολία ήταν η ακριβής θέση του pulsar. Όταν είχε τη βελτιωμένη θέση του pulsar και βάζοντας στο πλανητικό μοντέλο μικρές εκκεντρότητες στις τροχιές των πλανητών βρήκε ότι τα δεδομένα συμφωνούσαν απόλυτα. Υπολόγισε πως πρέπει να υπήρχαν δύο πλανήτες με λίγες φορές τη μάζα της Γης και με τον εσωτερικό πλανήτη να έχει μάζα λίγο μεγαλύτερη από τον εξωτερικό. Ο εσωτερικός πλανήτης είχε περίοδο 67 ημέρες, ενώ ο εξωτερικός 98 ημέρες. Αργότερα ανακαλύφθηκε και τρίτος πλανήτης με τροχιά πιο κοντά στον pulsar από τους άλλους δύο, με μάζα λίγο μεγαλύτερη από αυτή της Σελήνης. Αυτό αποδεικνύει πόσο ευαίσθητοι είναι οι περίοδοι περιστροφής των pulsars σε οποιοδήποτε αντικείμενο σε τροχιά γύρω τους. Έτσι το 1991 ανακαλύφθηκαν οι πρώτοι εξωηλιακοί πλανήτες και μάλιστα γύρω από ένα εντελώς ασυνήθιστο αστέρα.

Οι πλανήτες αυτοί μοιάζουν με τους τρεις πλησιέστερους στον Ήλιο πλανήτες. Η κύρια διαφορά τους είναι ότι επειδή ο pulsar έχει μεγαλύτερη μάζα από τον Ήλιο, οι πλανήτες του pulsar περιφέρονται πιο γρήγορα γύρω από αυτόν, από ότι οι πλανήτες του ηλιακού συστήματος γύρω από τον Ήλιο. Αν όμως διπλασιάσουμε τις τροχιές των πλανητών του pulsar, τότε αυτές θα συμπέσουν με τις τροχιές του Ερμή, της Αφροδίτης

και της Γης. Αυτό υποδηλώνει ότι είναι πιθανό και άλλα ηλιακά συστήματα να υπακούουν στο νόμο των Titius - Bode για το πλανητικό σύστημα. Επιπλέον οι μάζες των πλανητών του pulsar μοιάζουν με τις μάζες του Ερμή, της Αφροδίτης και της Γης. Ακόμη οι τροχιές και των τριών πλανητών είναι σχεδόν κυκλικές.

Τα παραπάνω φαίνονται στο Σχήμα 6.1:



**Σχήμα 6.1** Οι αποστάσεις των τριών εσωτερικών πλανητών του Ήλιου (πάνω εικόνα) μοιάζουν με αυτές των πλανητών του pulsar (κεντρική εικόνα). Αν οι αποστάσεις των πλανητών του pulsar διπλασιαστούν (κάτω εικόνα), ταιριάζουν σχεδόν ακριβώς με τις αποστάσεις του Ερμή, της Αφροδίτης και της Γης από τον Ήλιο (Croswell 1999).

Τα ερωτήματα για το πώς ένας pulsar μπορεί να έχει πλανήτες είναι πολλά. Τα άστρα που καταλήγουν σε pulsars είναι άστρα μεγάλης μάζας, φασματικού τύπου O ή B που κατά την εξέλιξή τους διαστέλλονται σε κόκκινους υπεργίγαντες τύπου M. Άρα κατά τη διάρκεια της ζωής τους τα άστρα αυτά πρέπει να καταπίνουν τους εσωτερικούς τους πλανήτες. Επίσης υπάρχει πρόβλημα όταν οι αστέρες αυτοί εκρήγνυνται. Η έκρηξη μπορεί να μην καταστρέφει τους πλανήτες αλλά τους εκτινάσσει στο διάστημα, γιατί αν ξαφνικά ένα άστρο χάσει μεγάλο μέρος της μάζας του τότε το βαρυτικό του πεδίο δεν είναι πια αρκετά ισχυρό ώστε να μπορέσει να τους συγκρατήσει.

Μια πιθανή εξήγηση για την ύπαρξη πλανητών γύρω από pulsars είναι η εξής: ένας παλιός αστέρας νετρονίων (έχει μειωθεί η συχνότητα περιστροφής του) μπορεί να

ξαναενεργοποιηθεί αν προσπίπτει πάνω του υλικό από ένα συνοδό αστέρα. Έτσι ο αστέρας νετρονίων θα περιστρέφεται όλο και πιο γρήγορα μέχρι που θα γίνει ένας millisecond pulsar. Ο αναγεννημένος αυτός pulsar μπορεί να καταστρέψει το συνοδό του και έτσι να δημιουργηθεί ένας δίσκος υλικού που μπορεί να οδηγήσει στη δημιουργία πλανητών.

## 7. Ανακάλυψη του Πρώτου Πλανήτη Γύρω Από Άστρο της Κύριας Ακολουθίας

Παρόλο που οι πρώτοι πλανήτες είχαν ήδη ανακαλυφθεί, οι “κυνηγοί” πλανητών έψαχναν να βρουν πλανήτες γύρω από άστρα που βρίσκονται στη κύρια ακολουθία. Οι πιο εύκολα ανιχνεύσιμοι πλανήτες είναι οι μεγάλοι πλανήτες σαν τον Δία. Οι πλανήτες αυτοί εκτός του ότι αποτελούν τους πιο εύκολους στόχους, είναι και πολύ σημαντικοί για την εξέλιξη της ζωής. Παρόλο που οι ίδιοι δεν μπορούν να φιλοξενήσουν ζωή, μπορούν να την προστατέψουν. Πριν από 4.6 δισεκατομμύρια χρόνια, όταν σχηματιζόνταν οι πλανήτες, αμέτρητοι κομήτες περιπλανιούνταν στο ηλιακό σύστημα. Πολλοί από αυτούς συγκρούστηκαν μεταξύ τους και σχημάτισαν τους πυρήνες των τεσσάρων γιγάντων του ηλιακού μας συστήματος, του Δία, του Κρόνου, του Ουρανού και του Ποσειδώνα. Η βαρύτητα του Δία και του Κρόνου έδωσε μακριά τρισεκατομμύρια κομήτες από το ηλιακό σύστημα, αφήνοντας ελάχιστους που να έχουν πιθανότητα να συγκρουστούν με τους πλανήτες. Συχνές συγκρούσεις κομητών με τη Γη θα είχαν αποτρέψει τη δημιουργία εξελιγμένης μορφής ζωής στον πλανήτη.

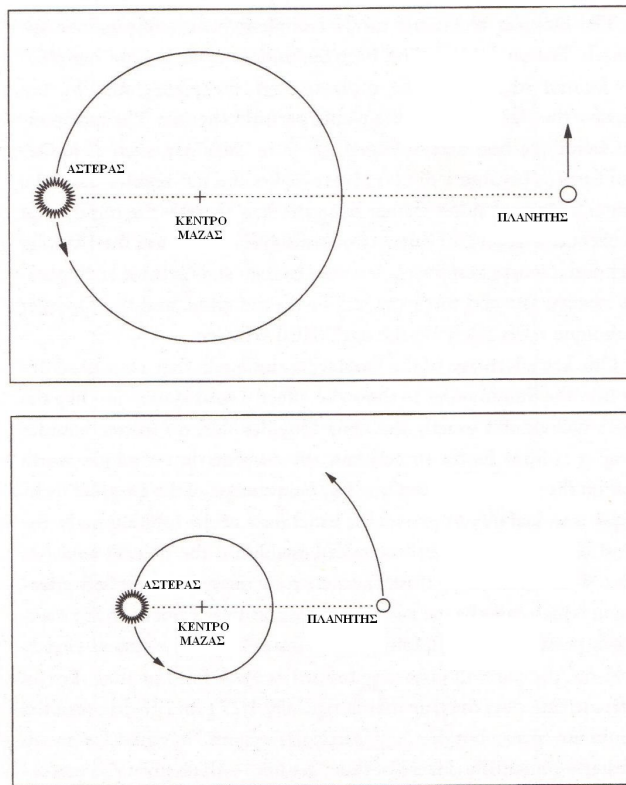
Εξίσου σημαντική στην ανάπτυξη ζωής στη Γη είναι και η παρουσία της Σελήνης. Η Σελήνη είναι αυτή που σταθεροποίησε την κλίση του άξονα της Γης στις 23.4°. Η κλίση αυτή κυμαίνεται μεταξύ 22° και 24.6° κάθε 41000 χρόνια. Χωρίς τη Σελήνη η κλίση του άξονα θα ταλαντευόταν μεταξύ 0° και 85° κάτι που θα μπορούσε να οδηγήσει σε δραματικές κλιματικές αλλαγές.

Για την ανακάλυψη πλανητών σαν τον Δία, οι αστρονόμοι που χρησιμοποιούσαν ως μέθοδο ανίχνευσης την αστρομετρία, ανέπτυξαν πιο ευαίσθητες μεθόδους και όργανα, όπως το πολυκαναλικό αστρομετρικό φωτόμετρο (MAP), που χρησιμοποιεί ηλεκτρονικούς ανιχνευτές για να μετρήσει τις θέσεις των πλανητών με μεγαλύτερη ακρίβεια από τις φωτογραφικές πλάκες. Τα αποτελέσματα ήταν αρνητικά. Κανένας πλανήτης δεν μπόρεσε να ανιχνευθεί.

Αρνητικά ήταν και τα αποτελέσματα αυτών που προσπαθούσαν να ανιχνεύσουν πλανήτες με την τεχνική Doppler. Σε αντίθεση με την αστρομετρία που ψάχνει για μετατοπίσεις των αστέρων σε επίπεδο κάθετο στην οπτική ακτίνα, η τεχνική Doppler ανιχνεύει κινήσεις κατά μήκος της οπτικής ακτίνας. Όταν ένας αστέρας πλησιάζει ή απομακρύνεται από τη Γη τότε στο φάσμα του παρατηρείται μετατόπιση των φασματικών γραμμών προς το μπλε και το ερυθρό, αντίστοιχα. Από τη μετατόπιση αυτή μπορεί να μετρηθεί η ακτινική του ταχύτητα.

Και οι δύο παραπάνω τεχνικές εφαρμόζονται καλύτερα σε μεγάλους πλανήτες σε τροχιά γύρω από μικρά άστρα, αφού σε αυτή την περίπτωση θα έχουμε μεγαλύτερη μετατόπιση του άστρου. Η αστρομετρία ανιχνεύει ευκολότερα πλανήτες μακριά από το κεντρικό άστρο, αφού όσο πιο μακριά είναι ο πλανήτης τόσο πιο μακριά θα είναι το

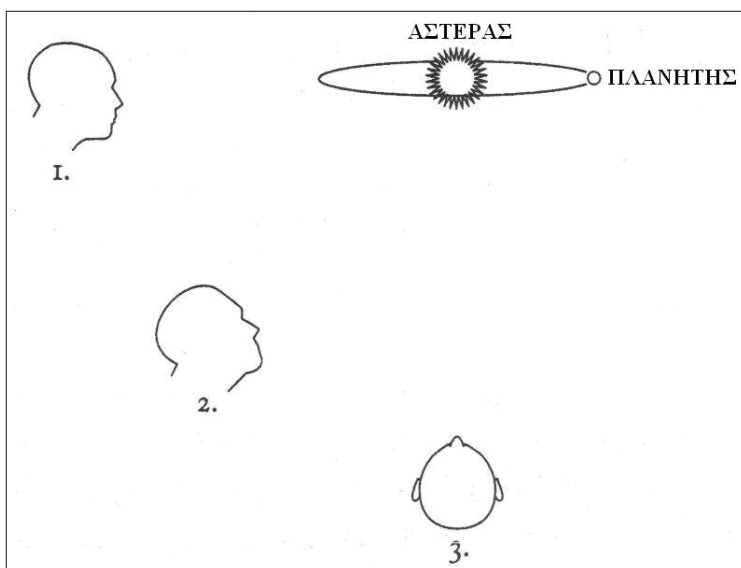
κέντρο μάζας του συστήματος αστέρα - πλανήτη και συνεπώς μεγαλύτερη η μετατόπιση του αστέρα, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα:



**Σχήμα 7.1** Όταν ο πλανήτης βρίσκεται σε τροχιά μακριά από τον αστέρα (πάνω εικόνα), η μετατόπιση του αστέρα είναι μεγαλύτερη από ότι θα ήταν αν ο πλανήτης κινούνταν κοντά σε αυτόν (κάτω εικόνα) (Croswell 1999).

Η τεχνική Doppler αντίθετα λειτουργεί καλύτερα όταν οι πλανήτες βρίσκονται κοντά στον κεντρικό αστέρα, καθώς αυτοί κινούνται πιο γρήγορα και αναγκάζουν και τον αστέρα να κάνει το ίδιο και άρα να είναι ανιχνεύσιμες οι μεταβολές στην ακτινική του ταχύτητα. Ένα μεγάλο πλεονέκτημα της τεχνικής Doppler είναι ότι λειτουργεί σε όποια απόσταση και αν είναι ο αστέρας αφού το φάσμα του θα είναι το ίδιο. Αντίθετα η αστρομετρία μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο για κοντινά άστρα. Το μειονέκτημα της τεχνικής Doppler είναι ότι δε μπορεί να υπολογίσει τη μάζα του πλανήτη, παρά μόνο να δώσει ένα κατώτερο όριο της μάζας του. Το κατώτερο αυτό όριο αντιστοιχεί στην περίπτωση που το επίπεδο της τροχιάς του πλανήτη βρίσκεται κατά μήκος της οπτικής ακτίνας. Στην ενδιάμεση περίπτωση η πραγματική μάζα του πλανήτη θα είναι 1.27 φορές μεγαλύτερη από την ελάχιστη μάζα. Υπάρχουν βέβαια και περιπτώσεις στις οποίες ο πλανήτης θα έχει πολύ μεγαλύτερη μάζα από την ελάχιστη.





**Σχήμα 7.2** Το φάσμα που ένας παρατηρητής παίρνει από ένα πλανητικό σύστημα εξαρτάται από τον προσανατολισμό του συστήματος. Αν το επίπεδο του συστήματος βρίσκεται κατά μήκος της οπτικής ακτίνας (1), τότε ο παρατηρητής βλέπει τον αστέρα να πλησιάζει και να απομακρύνεται με την μέγιστη ταχύτητα. Αν ο παρατηρητής βλέπει το πλανητικό σύστημα από άλλη γωνία (2), τότε το φαινόμενο Doppler είναι λιγότερο έντονο. Αν το επίπεδο του πλανητικού συστήματος είναι κάθετο στην οπτική ακτίνα (3), ο παρατηρητής δε θα δει απολύτως τίποτα, αφού ο αστέρας δε θα πλησιάζει, ούτε θα απομακρύνεται ως προς αυτόν. Για το λόγω αυτό οι παρατηρητές που χρησιμοποιούν τη μέθοδο Doppler συνήθως δεν μπορούν να καθορίσουν τη μάζα του πλανήτη: το φαινόμενο Doppler θα είναι πιο έντονο στην περίπτωση του παρατηρητή (1) από ότι στις περιπτώσεις (2) και (3), παρόλο που το παρατηρούμενο σύστημα είναι το ίδιο (Croswell 1999).

Για την ανακάλυψη πλανητών με την τεχνική Doppler, μία ομάδα Καναδών αστρονόμων έφτασαν σε ακρίβεια των 1000 m/sec. Αυτή η ακρίβεια όμως δεν είναι αρκετή για να ανιχνεύσει πλανήτες, αφού η ακτινική ταχύτητα που αναπτύσσει ο Ήλιος λόγω του Δία είναι μόλις 12.5 m/sec. Για καλύτερη ακρίβεια οι αστρονόμοι Campbell και Walker και η ομάδα τους έκαναν παρατηρήσεις μέσω κλωβού που περιείχε φθοριούχο υδρογόνο, ένα θανατηφόρο αέριο. Με την τεχνική αυτή έφταναν σε ακρίβεια 15 m/sec, μόλις ικανή να ανιχνεύει πλανήτες περίπου στο μέγεθος του Δία.

Ο αστρονόμος Michel Mayor του παρατηρητηρίου Geneva στην Ελβετία, μαζί με το φοιτητή Didier Queloz, ανέπτυξαν μία τεχνική Doppler τέτοιας ακριβείας που θα μπορούσε να ανιχνεύσει αόρατους πλανήτες. Χρησιμοποίησαν το παρατηρητήριο Haute-Provence στη νότια Γαλλία και πέτυχαν ακρίβεια στην ακτινική ταχύτητα περίπου 13 m/sec, όμοια με εκείνη που προκαλεί ο Δίας στον Ήλιο και περίπου ίδια με αυτή που είχαν πετύχει και οι Καναδοί, χωρίς όμως τη χρήση του θανατηφόρου φθοριούχου υδρογόνου. Αντίθετα πέτυχαν τη μεγάλη ακρίβεια με ταυτόχρονη παρατήρηση του αστέρα και μίας λάμπας και συγκρίνοντας τα δύο φάσματα.

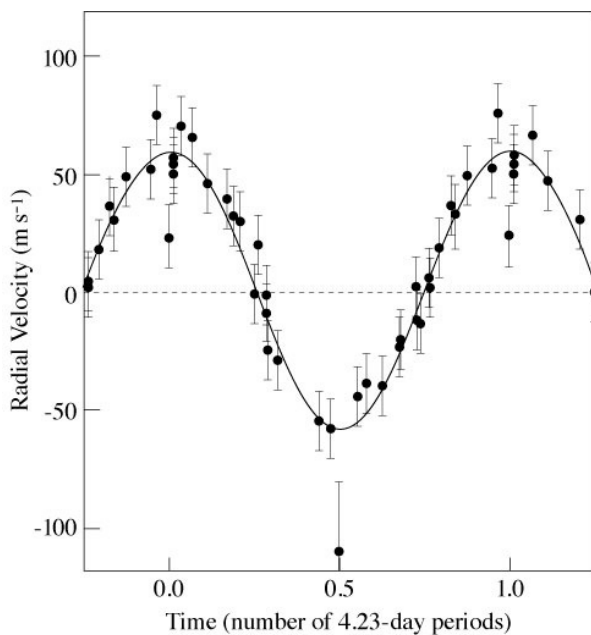
Οι Mayor και Queloz επέλεξαν 142 αστέρες για παρατήρηση, περισσότερους από κάθε άλλη ομάδα αστρονόμων. Οι μεγαλύτεροι ανταγωνιστές τους, μία ομάδα από την Καλιφόρνια, αναγκάστηκαν να μειώσουν τα δεδομένα τους λόγω των υψηλών υπολογιστικών απαιτήσεων. Ο Queloz όμως, σχεδίασε ένα σύστημα που έδινε τις

μετατοπίσεις Doppler λίγα λεπτά μετά από την παρατήρηση του αστέρα. Η μετατόπιση Doppler εμφανιζόταν σαν ένας αριθμός στην οθόνη του υπολογιστή.

Όλοι οι αστέρες που οι Mayor και Queloz είχαν επιλέξει ήταν αστέρες φασματικού τύπου G και K. Σαν πρώτο στόχο, το Σεπτέμβριο του 1994, είχαν την παρατήρηση του αστέρα 51 Pegasi, έναν αστέρα φασματικού τύπου G, όπως ο Ήλιος, που βρίσκεται σε απόσταση 50 ετών φωτός από τη Γη. Τα αποτελέσματα που πήραν ήταν περίεργα και αποφάσισαν να παρατηρήσουν ξανά τον αστέρα. Οι ταχύτητες του 51 Pegasi διέφεραν μεταξύ τους κατά 60 m/sec, πάνω από 4 φορές την ακρίβεια του φασματογράφου.

Στην αρχή πίστεψαν ότι οι διαφορές στη ταχύτητα οφείλονταν σε κάποιο λάθος του φασματογράφου. Αργότερα όμως παρατήρησαν ότι η ταχύτητα του 51 Pegasi μεταβαλλόταν περιοδικά κάθε 4 μέρες, όπως ακριβώς θα συνέβαινε αν είχε πλανήτη (Σχήμα 7.3). Υπολόγισαν ότι ο πλανήτης θα έπρεπε να έχει περίπου τη μισή μάζα του Δία. Η μικρή όμως περίοδος των 4 ημερών σήμαινε ότι ο γιγαντιαίος αυτός πλανήτης βρίσκεται σε τροχιά πιο κοντά στον 51 Pegasi από ότι ο Ερμής στον Ήλιο!

Οι παρατηρήσεις σταμάτησαν για τέσσερις μήνες όταν ο 51 Pegasi χάθηκε πίσω από τον Ήλιο. Οι Mayor και Queloz είχαν χρόνο να μελετήσουν τα μέχρι τότε δεδομένα τους και να προβλέψουν την ταχύτητα που θα είχε ο αστέρας όταν θα ξαναεμφανιζόταν. Στις αρχές του Ιουλίου του 1995, μόλις ο 51 Pegasi ξεπρόβαλε στον ορίζοντα, παρατήρησαν τον αστέρα και υπολόγισαν την ταχύτητά του και βρήκαν ότι συνέπιπτε με την προβλεπόμενη.



**Σχήμα 7.3** Ο αστέρας 51 Pegasi πλησιάζει και απομακρύνεται ως προς εμάς με περίοδο 4.2 ημερών εξαιτίας του πλανήτη που βρίσκεται σε τροχιά γύρω του (<http://ase.tufts.edu>).

Παρόλα αυτά υπήρχαν και άλλες εξηγήσεις για τις μεταβολές που παρατηρούνταν στην ταχύτητα του 51 Pegasi. Θα μπορούσε ο αστέρας να πάλλεται με περίοδο 4 ημερών. Όταν πάλλεται ένας αστέρας, η επιφάνειά του άλλες φορές πλησιάζει τη Γη και άλλες φορές απομακρύνεται, δημιουργώντας ένα φαινόμενο Doppler. Όταν όμως ο αστέρας είναι παλλόμενος μεταβάλλεται και η λαμπρότητά του. Οι Mayor και Queloz

έκαναν μετρήσεις της λαμπρότητας του 51 Pegasi και κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι ο αστέρας δεν παλλόταν. Θα μπορούσε επίσης το περιοδικό φαινόμενο Doppler να οφείλεται και σε κηλίδες. Σε αυτή την περίπτωση θα παρατηρούνταν ισχυρά μαγνητικά πεδία που όμως ο 51 Pegasi δεν είχε. Οπότε και αυτή η υπόθεση καταρρίφθηκε.

Υπήρχε όμως και η περίπτωση η μάζα του αντικειμένου να ήταν μεγαλύτερη, οπότε αντί για πλανήτη να είχαμε καφέ ή κόκκινο νάνο. Οι υπολογισμοί έδειξαν ότι η πιθανότητα ο πλανήτης να είχε μάζα πάνω από 4 φορές τη μάζα του Δία ήταν 1%, ενώ η πιθανότητα να είχε τόση μάζα ώστε να θεωρείται κόκκινος νάνος ήταν μόλις 0.0025%. Οι αστρονόμοι χρησιμοποίησαν τη περιστροφή του αστέρα για να επιβεβαιώσουν ότι δεν έβλεπαν τον πόλο του αστέρα. Όταν ένας αστέρας περιστρέφεται, το φάσμα από το ένα άκρο του είναι μετατοπισμένο προς το μπλε, ενώ του άλλου προς το ερυθρό. Όταν όμως βλέπουμε τον πόλο του αστέρα δεν παρατηρείται καμία μετατόπιση των φασματικών γραμμών. Το αποτέλεσμα από την ανάλυση του φάσματος ήταν ότι δεν έβλεπαν τον πόλο του αστέρα. Οπότε ο συνοδός του 51 Pegasi, που ονομάζεται 51 Pegasi b, είχε τη μάζα ενός πλανήτη. Στις 6 Οκτωβρίου 1995 ανακοινώθηκε η ανακάλυψη του πρώτου πλανήτη γύρω από ένα κανονικό άστρο.

## 8. Προϋποθέσεις για την Ανάπτυξη Ζωής στους Πλανήτες

Απαραίτητη προϋπόθεση για την ανάπτυξη ζωής στους πλανήτες είναι η ύπαρξη ενός κεντρικού αστέρα, ο οποίος μετατρέπει τα δύο ελαφρύτερα στοιχεία της φύσης, υδρογόνο και ήλιο, σε βαρύτερα χημικά στοιχεία μέσω πυρηνικών αντιδράσεων στον πυρήνα του. Στο τέλος της ζωής τους τα άστρα ελευθερώνουν τα στοιχεία αυτά στο διάστημα είτε με μία βίαιη έκρηξη (άστρα με μεγαλύτερη μάζα), είτε αποβάλλοντας την ατμόσφαιρά τους (άστρα με μικρότερη μάζα).

Τα στοιχεία αυτά θα ήταν άχρηστα, αν δεν ανακυκλώνονταν σχηματίζοντας άλλα άστρα και πλανήτες. Γι' αυτό η δεύτερη προϋπόθεση για ζωή είναι οι γαλαξίες. Μάλιστα όχι όλοι οι γαλαξίες, αφού τα στοιχεία αυτά θα μπορούσαν να διαφύγουν από το βαρυτικό πεδίο των μικρών γαλαξιών. Αντίθετα μεγάλοι γαλαξίες σαν τον δικό μας, οι οποίοι περιέχουν δισεκατομμύρια άστρα, συγκρατούν με τη βαρύτητά τους τα υλικά που έχει ελευθερωθεί από τα άστρα στα τελευταία στάδια της ζωής τους, το οποίο με τη σειρά του εμπλουτίζει τα νέφη αερίων και σκόνης στα οποία συντελείται η γέννηση νέων άστρων με βαριά χημικά στοιχεία. Τέτοια νέφη στο γαλαξία μας παράγουν περίπου δέκα άστρα το χρόνο το καθένα. Αν κάθε ένα από αυτά τα άστρα είχε δέκα πλανήτες σε τροχιά γύρω του, τότε από κάθε νέφος θα είχαμε εκατό νέους πλανήτες ετησίως.

Οι πλανήτες είναι η τρίτη προϋπόθεση για ζωή. Ένας πλανήτης που θα μπορούσε να επιτρέψει την ανάπτυξη ζωής θα έπρεπε να έχει στερεό υπόβαθρο όπου θα εμφανιζόταν και θα εξελισσόταν η ζωή, καθώς επίσης και υγρές επιφάνειες και ατμόσφαιρα. Παρόλα αυτά, οι πιο εύκολα ανιχνεύσιμοι πλανήτες είναι πλανήτες σαν τον Δία και τον Κρόνο, αέριοι γίγαντες στους οποίους πιθανότατα δεν μπορεί να αναπτυχθεί ζωή. Για το λόγο αυτό, υπέρτατος στόχος είναι η ανακάλυψη μικρών, πετρωδών πλανητών σαν τη Γη.

Η τέταρτη προϋπόθεση για την ύπαρξη ζωής είναι και πάλι τα άστρα, αφού είναι αυτά που φωτίζουν και ζεσταίνουν τους πλανήτες. Ο Ήλιος κρατάει το νερό στη Γη σε

υγρή μορφή, απαραίτητη για την ανάπτυξη ζωής. Επίσης η ενέργεια από τον Ήλιο τροφοδοτεί τη ζωή στη Γη. Άστρα πιο λαμπρά από τον Ήλιο, φασματικού τύπου O, B και A, καίνε τα αποθέματά τους τόσο γρήγορα που προηγμένη μορφή ζωής δε θα προλάβαινε να αναπτυχθεί στους πλανήτες γύρω τους. Άστρα μικρότερα και λιγότερο φωτεινά από τον Ήλιο για να μπορέσουν να ζεστάνουν ένα πλανήτη, θα έπρεπε ο πλανήτης αυτός να βρίσκεται πολύ κοντά στο άστρο. Σε αυτή όμως την περίπτωση η βαρύτητα του άστρου θα ανάγκαζε τον πλανήτη να έχει συνεχώς γυρισμένο προς τη μεριά του το ίδιο ημισφαίριο. Αυτό θα είχε ως συνέπεια το ένα ημισφαίριο να είναι πολύ θερμό, ενώ το άλλο παγωμένο. Ο Ήλιος συνιστά λοιπόν το τέλειο άστρο για την ανάπτυξη ζωής. Το 4% των άστρων του γαλαξία μας είναι άστρα σαν τον Ήλιο.

Στην αλυσίδα αυτή των προϋποθέσεων για τη ζωή ο πιο αδύναμος κρίκος είναι οι πλανήτες επειδή είναι δύσκολο να ανιχνευθούν και να μελετηθούν, όπως είναι προφανές από τα παραπάνω.

Τον Απρίλιο του 2007 ανακαλύφθηκε ο πρώτος εξωηλιακός πλανήτης με μέγεθος συγκρίσιμο με αυτό της Γης. Η ανακάλυψη έγινε με τη χρήση του οργάνου HARPS του τηλεσκοπίου 3.6 μέτρων στο European Southern Observatory στο La Silla, Chile. Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε ήταν η αστρομετρία. Πρόκειται για τον πλανήτη Gliese 581 C που βρίσκεται σε τροχιά γύρω από το άστρο Gliese 581, ένα κόκκινο νάνο, σε απόσταση 20.5 ετών φωτός και με μάζα ίση με το ένα τρίτο της μάζας του Ήλιου.

Ο πλανήτης είναι ο μικρότερος που έχει ανακαλυφθεί, μόλις 50% μεγαλύτερος από τη Γη, και βρίσκεται σε τέτοια απόσταση από τον κεντρικό αστέρα που να επιτρέπει στο νερό να βρίσκεται σε υγρή μορφή κάτι που είναι απαραίτητο για την ανάπτυξη της ζωής. Η περίοδος περιφοράς του πλανήτη γύρω από τον κεντρικό αστέρα είναι 13 μέρες. Σύμφωνα με μοντέλα εκτιμάται ότι ο Gliese 581 C είτε είναι πετρώδης πλανήτης σαν τη Γη, είτε είναι καλυμμένος με νερό και ότι η θερμοκρασία του κυμαίνεται μεταξύ 0°C και 40°C.

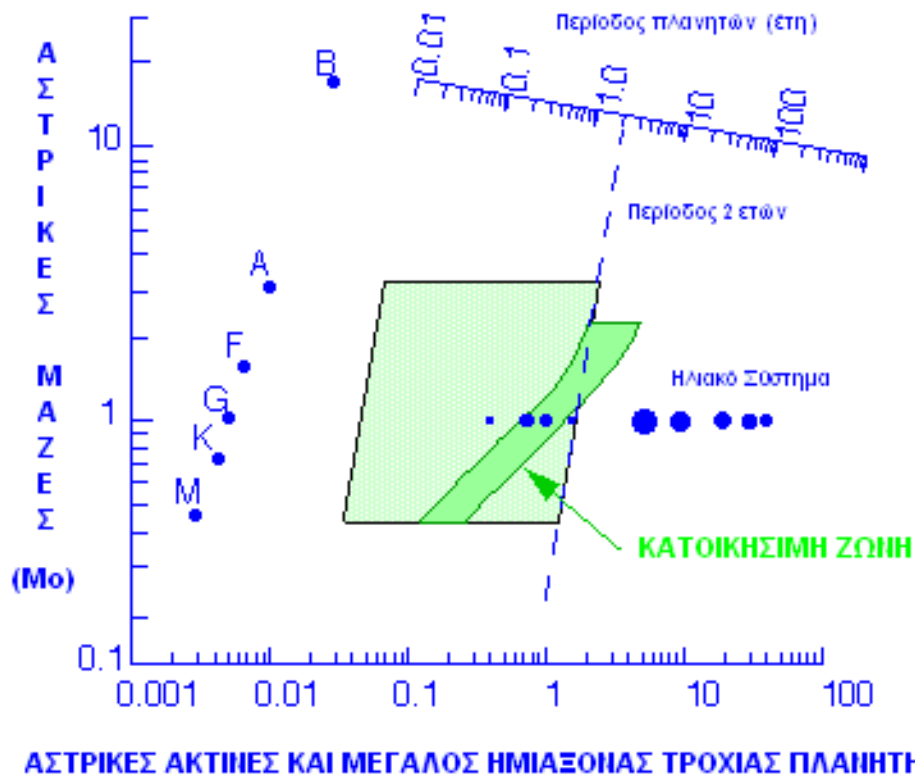
Στο ίδιο πλανητικό σύστημα έχουν ανακαλυφθεί άλλοι δύο πλανήτες από την ίδια ομάδα επιστημόνων, με μάζες 8 και 15 φορές τη μάζα της Γης.



**Σχήμα 8.1** Καλλιτεχνική άποψη του πλανήτη Gliese 581 c (<http://deep-sky-blog.blogspot.com>).

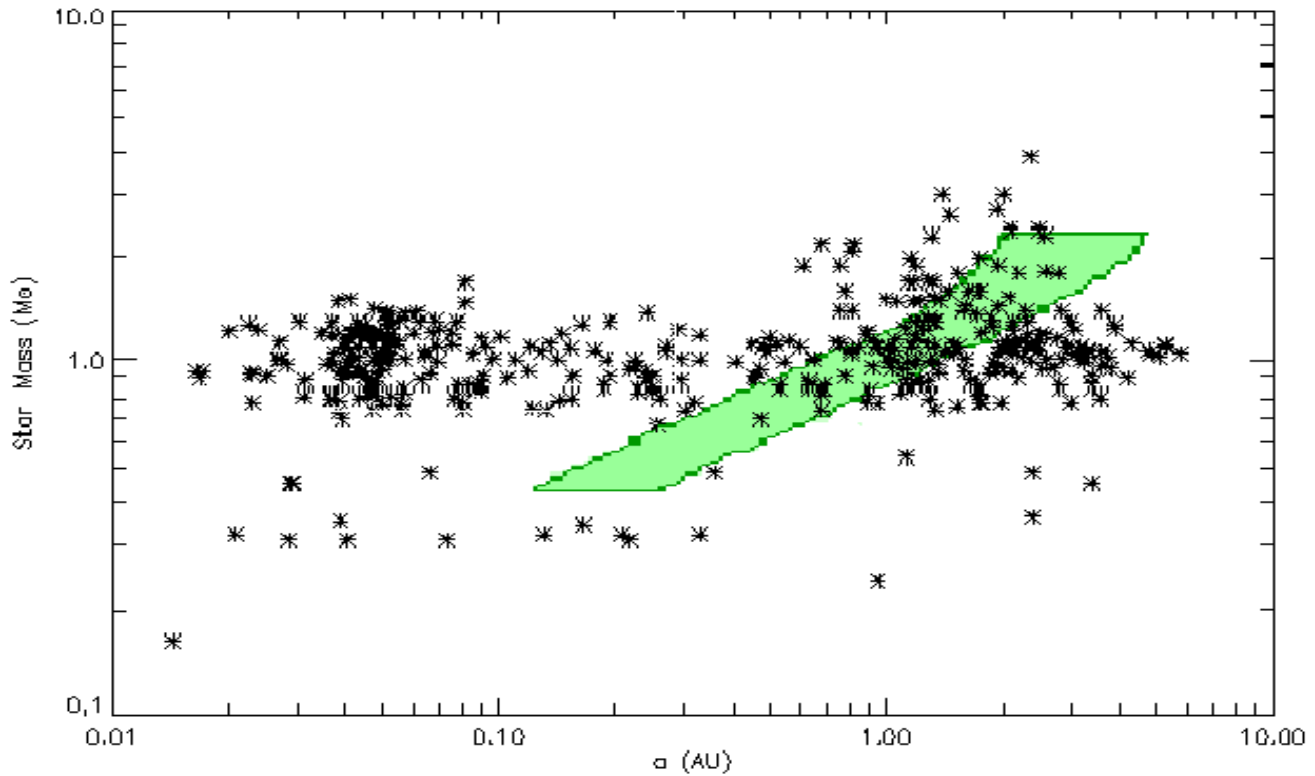
Η απόσταση στην οποία πρέπει να βρίσκεται ένας πλανήτης από τον κεντρικό αστέρα γύρω από τον οποίο περιφέρεται, ώστε να έχει τις απαραίτητες προϋποθέσεις για την ανάπτυξη ζωής, εξαρτάται από τον φασματικό τύπο του αστέρα. Η απόσταση αυτή είναι μεγαλύτερη για αστέρες μεγαλύτερης λαμπρότητας από του Ήλιου και μικρότερη

για αστέρες μικρότερης λαμπρότητας. Σύμφωνα με την παραπάνω συνθήκη μπορεί να σχεδιαστεί η κατοικήσιμη ζώνη, η οποία φαίνεται στο Σχήμα 8.2:



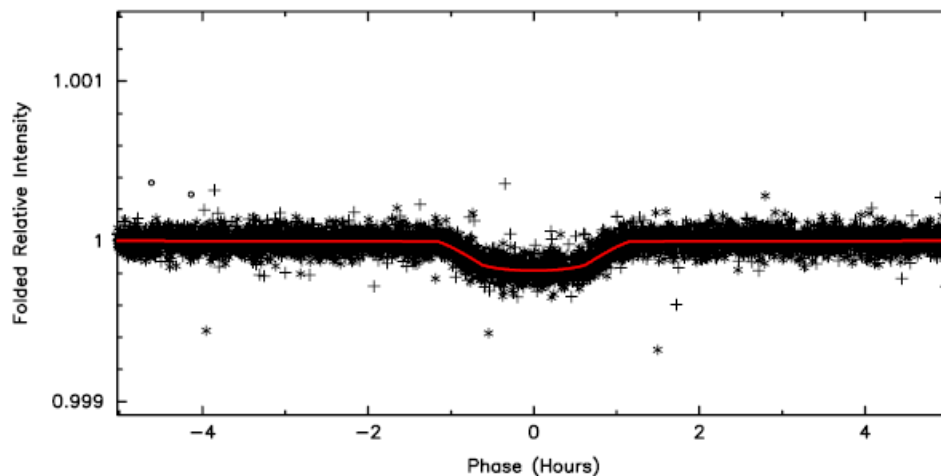
**Σχήμα 8.2** Απόσταση που μπορεί να έχει ένας πλανήτης από το άστρο (ανάλογα με τον τύπο του άστρου γύρω από το οποίο περιστρέφεται) ώστε να μπορεί να έχει συνθήκες ευνοϊκές για την ανάπτυξη ζωής (<http://www.solstation.com>).

Στο Σχήμα 8.3 δίνεται το διάγραμμα του μεγάλου ημιάξονα συναρτήσει της αστρικής μάζας για τους γνωστούς εξωπλανήτες, στο οποίο απεικονίζεται και η κατοικήσιμη ζώνη. Στο διάγραμμα δεν συμπεριλαμβάνονται πλανήτες που περιφέρονται γύρω από μέλη διπλών συστημάτων. Αν και αρκετοί από τους γνωστούς εξωπλανήτες βρίσκονται στη κατοικήσιμη ζώνη, οι περισσότεροι από αυτούς είναι πλανήτες μεγάλης μάζας (γίγαντες πλανήτες), στους οποίους δεν θα μπορούσε να αναπτυχθεί ζωή.



**Σχήμα 8.3** Διάγραμμα του μεγάλου ημιάξονα συναρτήσει της αστρικής μάζας για τους γνωστούς εξωπλανήτες, στο οποίο δεν συμπεριλαμβάνονται πλανήτες που περιφέρονται γύρω από μέλη διπλών συστημάτων. Η περιοχή με το πράσινο χρώμα είναι η κατοικήσιμη ζώνη.

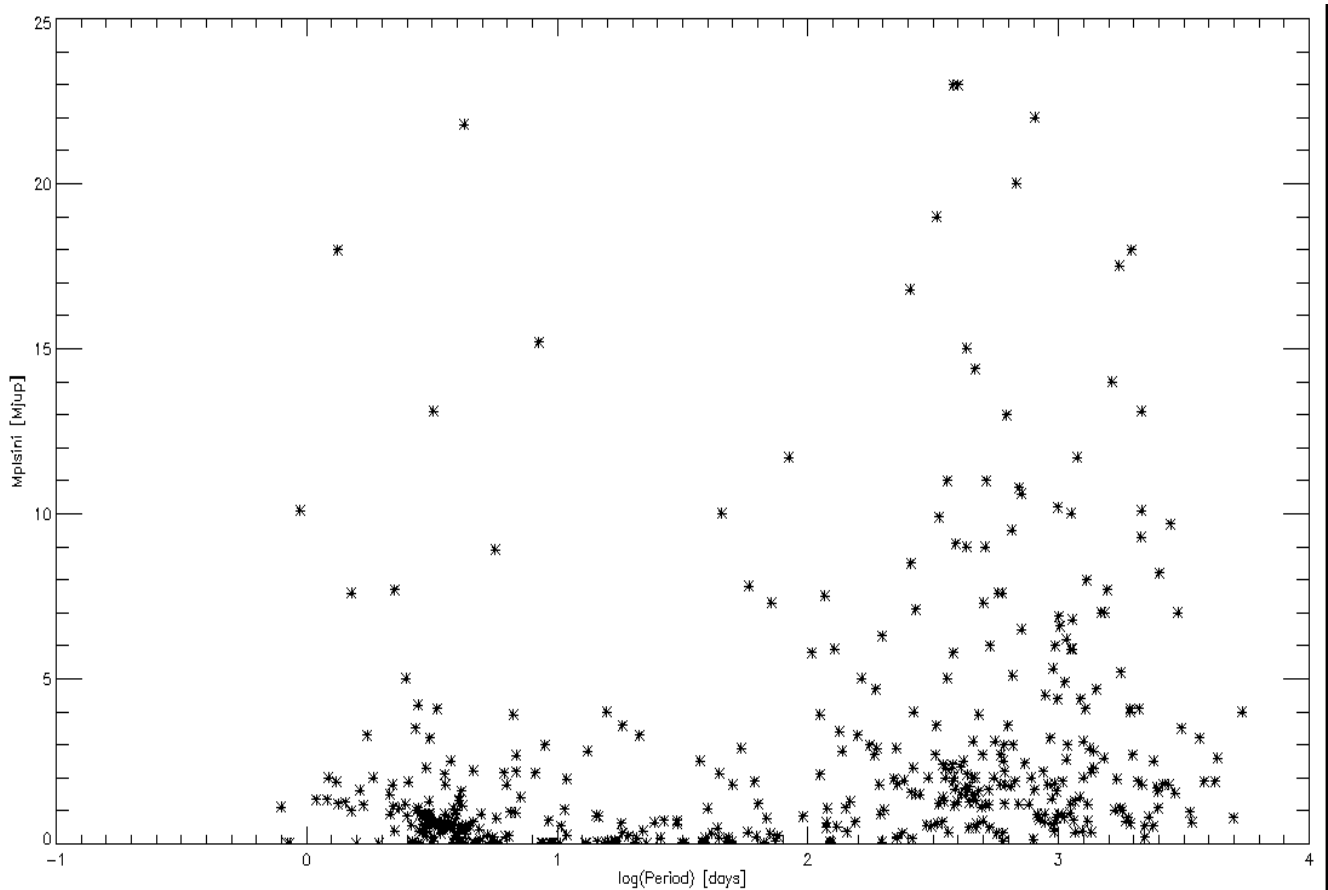
Η αποστολή *Kepler*, που εκτοξεύθηκε το 2009, έχει σκοπό την ανακάλυψη με τη μέθοδο της διάβασης πλανήτες μέσα ή κοντά στη κατοικήσιμη ζώνη γύρω από αστέρες ηλιακού τύπου. Πρόσφατα ανακαλύφθηκε ο *Kepler 10b*, ο πρώτος στερεός πλανήτης της αποστολής, μάζας 4.56 φορές τη μάζα της Γης (Batalha et al. 2011). Στο Σχήμα 8.4 δίνεται η καμπύλη φωτός του *Kepler 10*.



**Σχήμα 8.4** Καμπύλη φωτός του *Kepler 10* κεντραρισμένη στη φάση μηδέν που ορίζεται σαν ο χρόνος της κεντρικής διάβασης (Batalha et al. 2011).

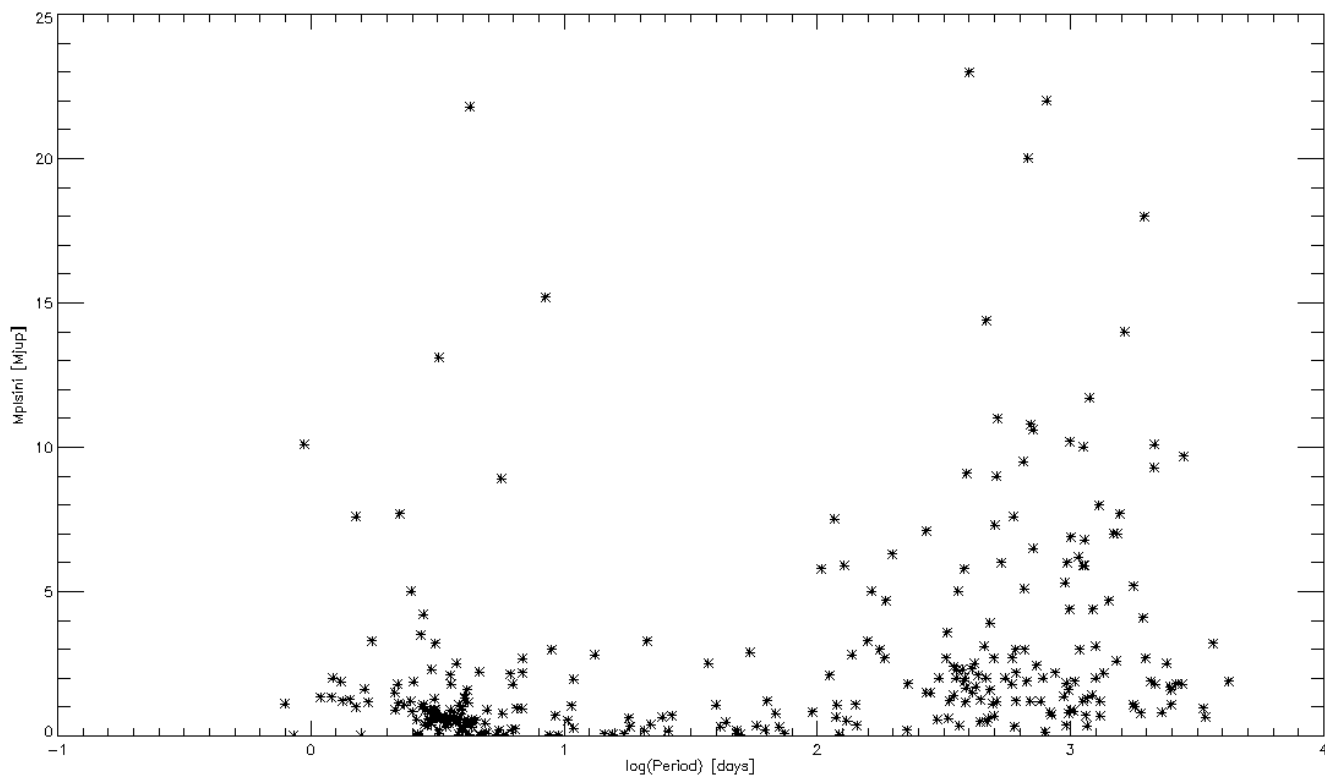
## 9. Η Κατανομή της Περιόδου Περιφοράς

Συγκρίνοντας τα χαρακτηριστικά των μικρής και μεγάλης μάζας πλανητών, το πρώτο που μπορούμε να παρατηρήσουμε είναι ο μικρός αριθμός πλανητών μεγάλης μάζας σε τροχιές μικρής περιόδου. Όπως βλέπουμε στα Σχήματα 9.1 και 9.2 υπάρχουν ελάχιστοι πλανήτες με μάζα μεγαλύτερη από  $3 M_{\text{Jup}}$  με περίοδο περιφοράς μικρότερη των 10 ημερών.



Σχήμα 9.1 Οι ελάχιστες μάζες συναρτήσει των περιόδων περιφοράς των γνωστών εξωπλανητών.

Η σχέση μάζας - περιόδου για πλανήτες που περιφέρονται γύρω από μέλη διπλών αστρικών συστημάτων ή που ανήκουν σε πολλαπλό πλανητικό σύστημα μπορεί να διαφέρει από αυτή των πλανητών γύρω από μεμονωμένους αστέρες λόγω διαφορετικών διαδικασιών σχηματισμού και εξέλιξης. Για το λόγο αυτό σχηματίζουμε το διάγραμμα μάζας συναρτήσει της περιόδου μόνο για εξωπλανήτες που περιφέρονται γύρω από μεμονωμένους αστέρες και που δεν ανήκουν σε πολλαπλό πλανητικό σύστημα (Σχήμα 9.2).

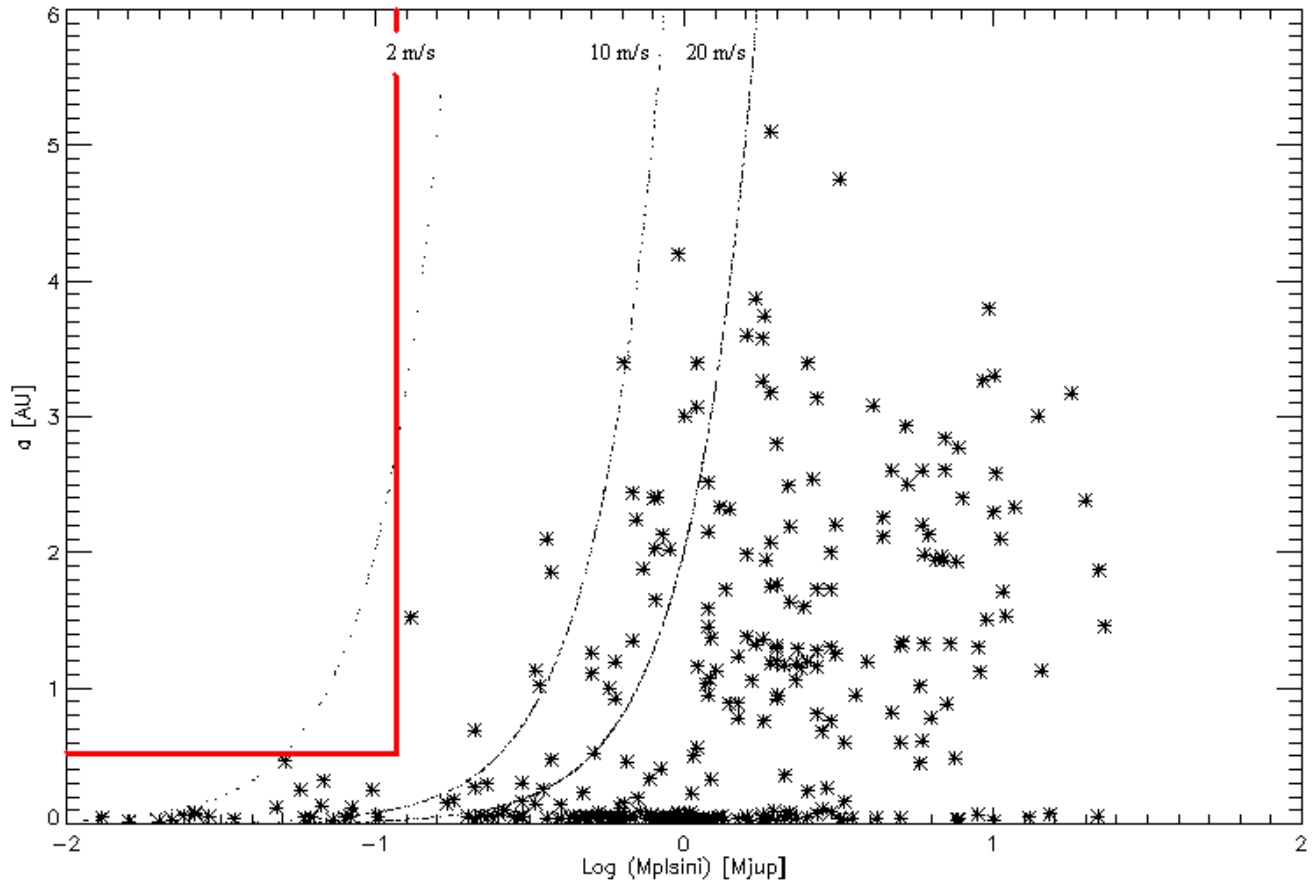


**Σχήμα 9.2** Οι ελάχιστες μάζες συναρτήσει των περιόδων περιφοράς των εξωπλανητών που περιφέρονται γύρω από μεμονωμένους αστέρες και δεν ανήκουν σε πολλαπλό πλανητικό σύστημα.

Μία άλλη παρατήρηση που μπορούμε να κάνουμε είναι ο μικρός αριθμός εξωπλανητών με περιόδους από 10 έως 100 ημέρες. Επίσης όλοι οι εξωπλανήτες που δεν ανήκουν σε πολλαπλό πλανητικό σύστημα, περιφέρονται γύρω από μεμονωμένους αστέρες και έχουν περιόδους περιφοράς μεταξύ 10 και 100 ημερών, έχουν, όπως φαίνεται στο Σχήμα 9.2, ελάχιστες μάζες κάτω από 3  $M_{\text{Jup}}$ . Η παραπάνω περιοχή στην κατανομή της περιόδου μπορεί επομένως να αποτελεί μία μεταβατική περιοχή μεταξύ δύο κατηγοριών πλανητών που έχουν υποστεί διαφορετικού τύπου μετανάστευση.

Η έλλειψη πλανητών με μάζες κάτω από 0.5  $M_{\text{Jup}}$  με περιόδους μεγαλύτερες των 1000 ημερών που παρατηρείται στο Σχήμα 9.2 οφείλεται στη χρήση της τεχνικής Doppler, η οποία κάνει δύσκολη την ανίχνευση πλανητών μικρής μάζας σε μεγάλες αποστάσεις από τον κεντρικό αστέρα. Το χαρακτηριστικό αυτό γίνεται εμφανές αν κατασκευάσουμε το διάγραμμα της ελάχιστης μάζας του πλανήτη σε λογαριθμική κλίμακα συναρτήσει του μεγάλου ημιάξονα της τροχιάς (Σχήμα 9.3), στο οποίο κανένας πλανήτης δεν υπάρχει στην περιοχή που ορίζεται από τις κόκκινες γραμμές. Για καλύτερη αντίληψη της επίδρασης της τεχνικής Doppler, έχουμε σχεδιάσει στο διάγραμμα τις γραμμές που υποδεικνύουν τις μέγιστες τιμές του μεγάλου ημιάξονα της τροχιάς για δεδομένες ελάχιστες μάζες πλανητών που βρίσκονται σε κυκλική τροχιά γύρω από έναν αστέρα μάζας ίσης με τη μάζα του Ήλιου στις οποίες μπορούν να ανιχνευθούν οι πλανήτες αυτοί για ημι-πλάτη μεταβολής της καμπύλης ακτινικών ταχυτήτων  $K = 2 \text{ m/s}$ ,  $10 \text{ m/s}$  και  $20 \text{ m/s}$ .





**Σχήμα 9.3** Διάγραμμα ελάχιστης μάζας συναρτήσει του μεγάλου ημιάξονα της τροχιάς. Οι διακεκομμένες γραμμές υποδεικνύουν τις μέγιστες τιμές του μεγάλου ημιάξονα της τροχιάς, για δεδομένες ελάχιστες μάζες πλανητών που βρίσκονται σε κυκλική τροχιά γύρω από έναν αστέρα μάζας ίσης με τη μάζα του Ήλιου, στις οποίες μπορούν να ανιχνευθούν οι πλανήτες αυτοί, για ημι-πλάτη μεταβολής της καμπύλης ακτινικών ταχυτήτων  $K = 2\text{m/s}$ ,  $10\text{m/s}$  και  $20\text{m/s}$ .

Στο διάγραμμα του σχήματος 9.3 βλέπουμε ότι δεν υπάρχει κανένας πλανήτης με  $\log(M\sin i) < -0.93$  σε απόσταση μεγαλύτερη από  $0.5\text{ AU}$  (περιοχή που ορίζεται από τις κόκκινες γραμμές). Για να δούμε αν αυτή η απουσία πλανητών οφείλεται στη χρήση της τεχνικής Doppler ή στο μικρό στατιστικό δείγμα, κάνουμε προσομοιώσεις Monte Carlo.

### Μέθοδος Monte Carlo

Για σύστημα πλανήτη - αστέρα, με μάζες  $M_{pl}$  και  $M_{st}$ , αντίστοιχα, ισχύουν οι παρακάτω εξισώσεις:

- 1) Εξίσωση του κέντρου μάζας:

$$M_{st}d_1 = M_{pl}d_2$$

όπου  $d_1$  και  $d_2$  οι αντίστοιχες αποστάσεις από το κέντρο μάζας

- 2) Ο 3ος νόμος του Kepler:

$$(M_{st} + M_{pl})P^2 = (d_1 + d_2)^3 = a_{pl}^3 \quad (9.1)$$

όπου  $P$  και  $a_{pl}$  είναι η περίοδος περιφοράς του πλανήτη και ο μεγάλος ημιάξονας της τροχιάς του, αντίστοιχα.

3) Για κυκλικές τροχιές, η τροχιακή γραμμική ταχύτητα  $V$  ισούται με:

$$V = 2\pi a_{pl}/P \quad (9.2)$$

4) Το ημι-πλάτος της μεταβολής της καμπύλης των ακτινικών ταχυτήτων ισούται με:

$$K = V \sin(i) \quad (9.3)$$

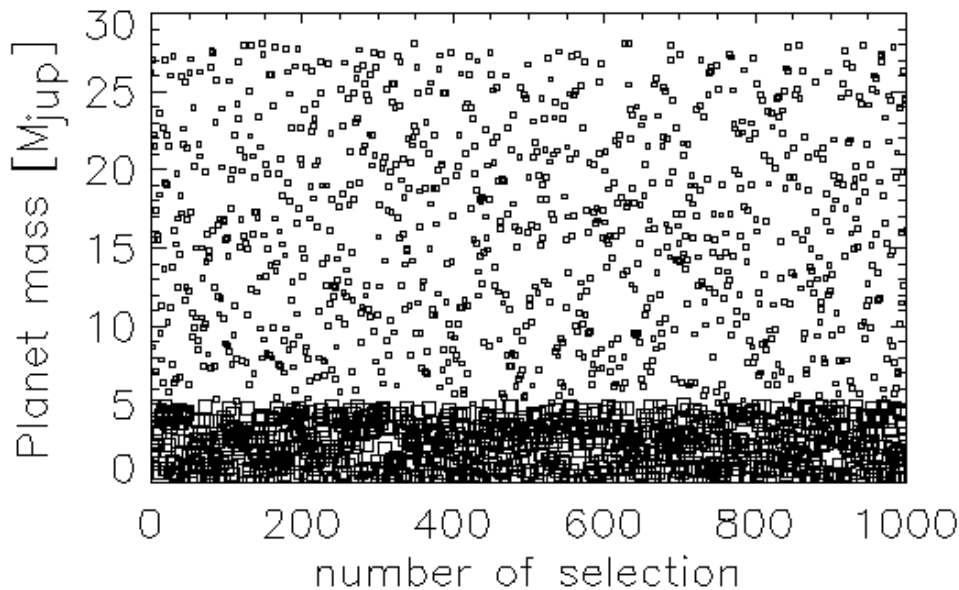
όπου  $i$  είναι η κλίση της πλανητικής τροχιάς ως προς το κάθετο στην οπτική ακτίνα επίπεδο.

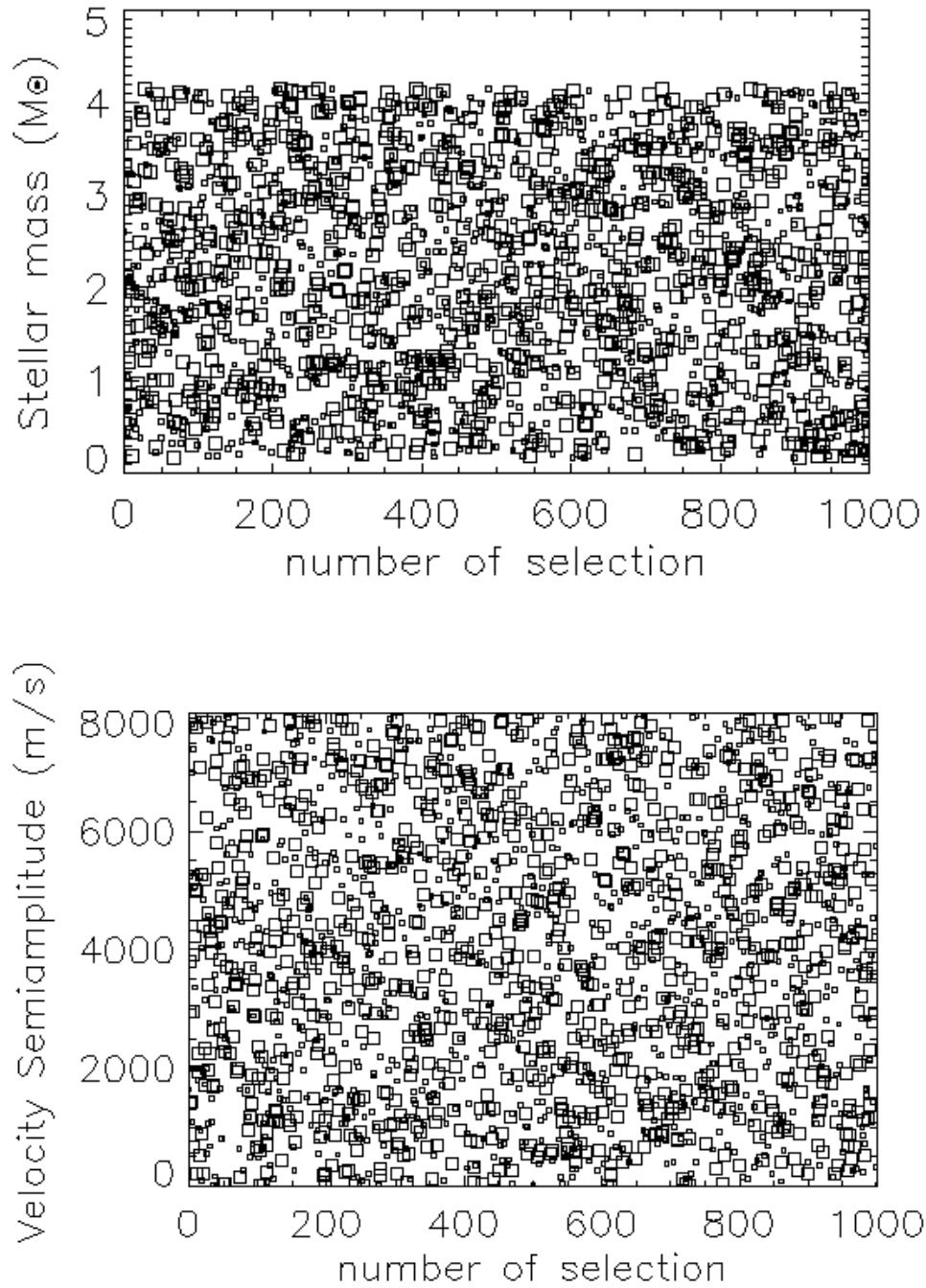
Συνδυάζοντας τις παραπάνω εξισώσεις προκύπτει:

$$\frac{M_{pl}^3 \sin^3 i}{(M_{st} + M_{pl})^2} = P \left( \frac{K}{2\pi} \right)^3 \quad (9.4)$$

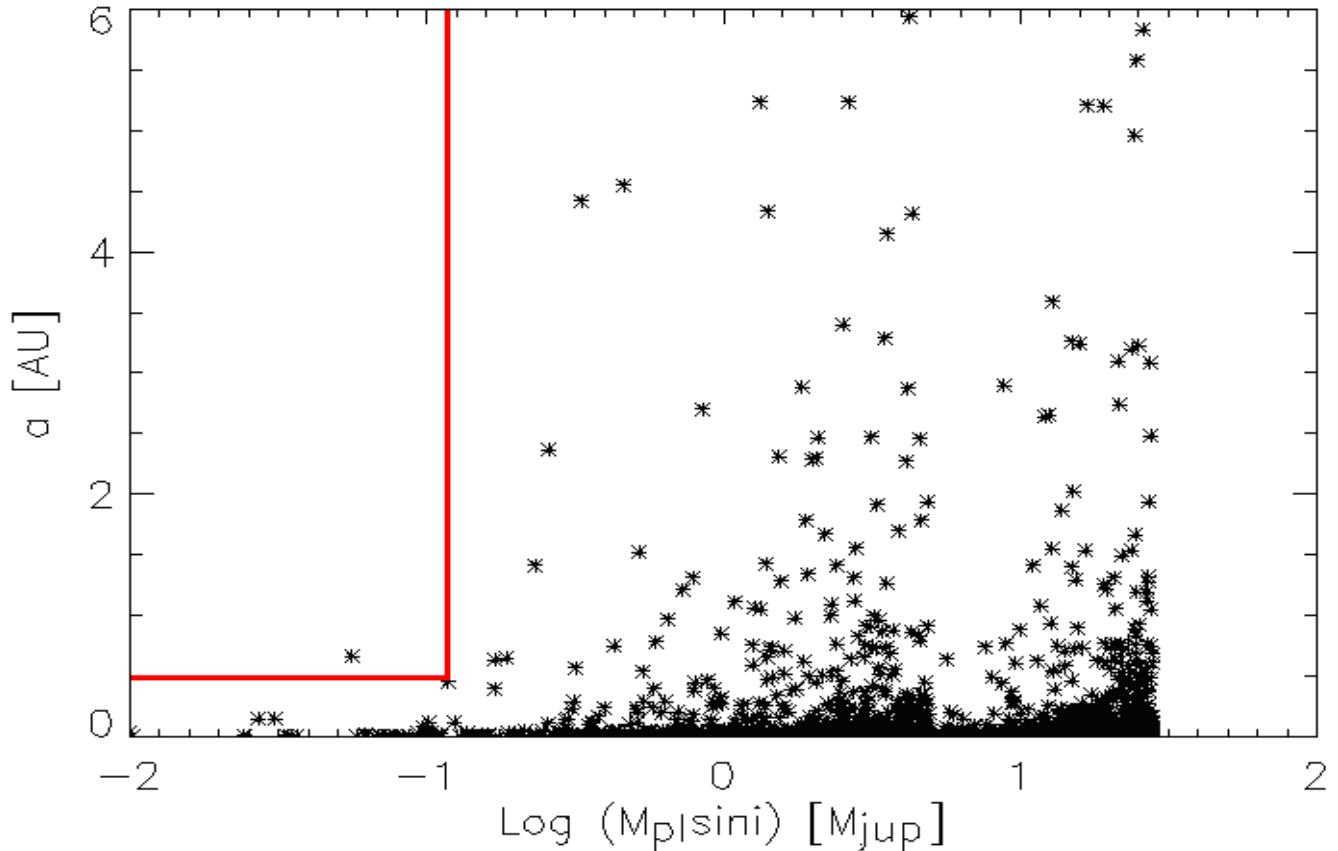
Παίρνοντας αρχικά ένα σύνολο ψευδοτυχαίων αριθμών για τις μάζες των πλανητών (από 0.005 έως 23  $M_{jup}$ ), για τις μάζες των αστέρων (από 0.16 έως 4 μάζες Ηλίου) και για το ημι-πλάτος της μεταβολής της καμπύλης των ακτινικών ταχυτήτων (από 1.5m/s έως 8000m/s) (Σχήμα 9.4), υπολογίζουμε από την εξίσωση (9.4) την περίοδο και στη συνέχεια από τη σχέση (9.1) υπολογίζουμε τον μεγάλο ημιάξονα της τροχιάς.

Προσπαθούμε το δείγμα που θα πάρουμε να μοιάζει με τις παρατηρήσεις και για το λόγο αυτό παίρνουμε 10000 πλανήτες από τους οποίους οι 1600 έχουν μάζες πάνω από 5  $M_{jup}$  και οι 8400 κάτω από 5  $M_{jup}$ , ίδιο δηλαδή ποσοστό με αυτό των παρατηρήσεων (έχουν παρατηρηθεί 71 πλανήτες με μάζες πάνω από 5  $M_{jup}$  και 383 πλανήτες με μάζες κάτω από 5  $M_{jup}$ ). Η επιλογή του ορίου στις 5  $M_{jup}$  έγινε βάσει του διαγράμματος του Σχήματος 9.2 όπου και παρατηρούμε μία διαφορετική συμπεριφορά πάνω από την τιμή αυτή.





**Σχήμα 9.4** Οι ψευδοτυχαίοι αριθμοί για τις μάζες των πλανητών (9.4α), για τις μάζες των αστέρων (9.4β) και για το ημι-πλάτος της μεταβολής της καμπύλης των ακτινικών ταχυτήτων (9.4γ).



**Σχήμα 9.5** Διάγραμμα ελάχιστης μάζας συναρτήσει του μεγάλου ημιάξονα της τροχιάς όπως προκύπτει από τη μέθοδο Monte Carlo, θεωρώντας τις τροχιές των πλανητών κυκλικές.

Μετά από  $10^4$  επαναλήψεις βρίσκουμε ότι η πιθανότητα κατάληψης της περιοχής του διαγράμματος που ορίζεται από τις κόκκινες γραμμές είναι  $P = 0.00087$ , και επομένως η απουσία πλανητών σε αυτή την περιοχή οφείλεται στη χρήση της τεχνικής Doppler και όχι στο δείγμα των εξωπλανητών.

### *Θεωρητική προσέγγιση των παρατηρήσεων*

#### *Μικρός ρυθμός μετανάστευσης των πλανητών μεγάλης μάζας*

Μία πιθανή εξήγηση του μικρού αριθμού πλανητών μεγάλης μάζας σε τροχιές μικρής περιόδου, που είδαμε παραπάνω, είναι η μικρή πιθανότητα μετανάστευσης για τους πλανήτες μεγάλης μάζας. Σύμφωνα με προσομοιώσεις, όταν η μάζα του πλανήτη φτάσει ένα μεγάλο ποσοστό της χαρακτηριστικής μάζας του πρωτοπλανητικού δίσκου με τον οποίο αλληλεπιδρά, η αδράνεια του πλανήτη γίνεται σημαντική, με αποτέλεσμα να επιβραδύνεται η τροχιακή του εξέλιξη (Trilling et al. 1998; Nelson et al. 2000). Επίσης χρειάζεται περισσότερο χρόνο να ανοίξει κενό στο δίσκο για πλανήτες μεγάλης μάζας, περισσότερο από το χρόνο ζωής του δίσκου, ώστε να ξεκινήσει η μετανάστευση τύπου II (Trilling et al. 2002). Η μετανάστευση τύπου II οφείλεται στη δημιουργία κενού στο

δίσκο από πρωτοπλανήτες μάζας μεγαλύτερης από  $10 M_{\text{earth}}$  και στη συνέχεια, καθώς υλικό συνεχίζει να εισέρχεται στο κενό, ο πρωτοπλανήτης κινείται προς το εσωτερικό του δίσκου προσαύξησης.

Οι Trilling et al. το 2002 έκαναν χρήση ενός μοντέλου στο οποίο υπέθεσαν αυθόρμητη μετανάστευση τύπου II, χωρίς κάποιον μηχανισμό επιβράδυνσης στο κέντρο και αγνοώντας τη μετανάστευση τύπου I λόγω της εξαιρετικά μικρής της κλίμακας χρόνου που επιφέρει θεωρητικό πρόβλημα στον σχηματισμό των πλανητών. Η μετανάστευση τύπου I οφείλεται στο γεγονός ότι το κύμα πυκνότητας στην εξωτερική περιοχή της τροχιάς του πλανήτη του ασκεί συνήθως μεγαλύτερη ροπή από το εσωτερικό με αποτέλεσμα ο πλανήτης να χάνει στροφορμή και να κινείται προς το εσωτερικό του δίσκου. Έδειξαν ότι, για πανομοιότυπες αρχικές συνθήκες δίσκου, οι ψευδο-πλανήτες που επιβίωναν κοντά στο κέντρο του δίσκου ήταν αυτοί με τις μικρότερες μάζες και αυτοί που επιβίωναν μακριά ήταν αυτοί με τις μεγαλύτερες μάζες. Βρήκαν επίσης ότι οι πλανήτες που σχηματίζονται μακριά από το κέντρο δεν μεταναστεύουν γρήγορα και ότι οι πλανήτες μεγάλης μάζας μεταναστεύουν σε μεγάλες κλίμακες χρόνου. Επομένως θα έπρεπε να υπάρχουν περισσότεροι πλανήτες μεγάλης μάζας σε ενδιάμεσες και μεγάλες τιμές του μεγάλου ημιάξονα από ότι σε μικρές. Αντίθετα, το μεγαλύτερο ποσοστό του πληθυσμού των πλανητών με μικρές περιόδους πρέπει να αποτελείται από πλανήτες μικρής μάζας, όπως και παρατηρείται.

#### *Αλληλεπίδραση μεταξύ κεντρικού αστέρα και πλανήτη*

Διάφορα σενάρια, εκτός από αυτό της μετανάστευσης των πλανητών, που αφορούν τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ του κεντρικού αστέρα και του πλανήτη, έχουν προταθεί ώστε να μπορέσει να εξηγηθεί η απουσία μεγάλου αριθμού πλανητών μεγάλης μάζας σε τροχιές μικρής περιόδου.

Οι Patzold και Rauer (2002) πρότειναν να εξηγηθεί η παραπάνω απουσία με παλιρροϊκές αλληλεπιδράσεις μεταξύ του πλανήτη και του κεντρικού αστέρα. Αν η τροχιακή περίοδος του πλανήτη είναι μικρότερη από την περίοδο περιστροφής του αστέρα, η παλιρροϊκή τριβή θα επιταχύνει τον αστέρα, ενώ ο μεγάλος ημιάξονας της πλανητικής τροχιάς θα μικρύνει, με αποτέλεσμα να φτάσει στο λοβό Roche του κεντρικού αστέρα σε μικρή χρονική κλίμακα. Η παραπάνω διαδικασία είναι γρηγορότερη για πλανήτες μεγάλης μάζας, με συνέπεια να παρατηρείται η απουσία μεγάλου αριθμού τέτοιων πλανητών σε τροχιές μικρής περιόδου.

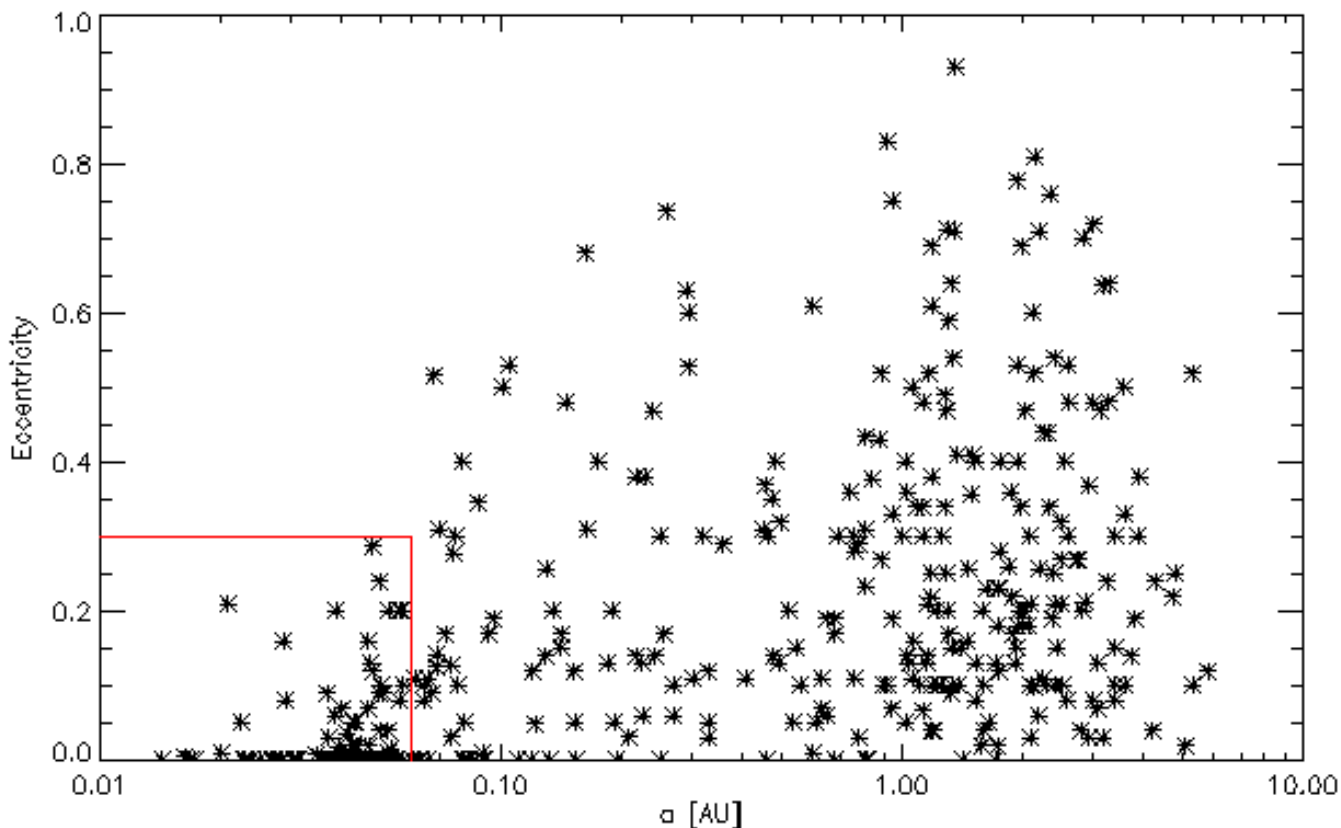
Οι Trilling et al. (1998) είχαν επίσης υποθέσει μεταφορά μάζας από τον πλανήτη στον αστέρα. Κάποιοι από τους ψευδο-πλανήτες στις προσομοιώσεις τους έφταναν το όριο του λοβού Roche, με αποτέλεσμα να ξεκινάει ο πλανήτης να χάνει μάζα.

Μία άλλη θεωρία είναι η εξάτμιση της ατμόσφαιρας του πλανήτη, όταν αυτός βρίσκεται πολύ κοντά στον κεντρικό αστέρα, με συνέπεια την απώλεια μάζας. Μελέτες βασισμένες στην  $T_{\text{eff}}$  κοντινών στον κεντρικό αστέρα πλανητών, έδειξαν ότι η εξάτμιση του υδρογόνου δεν είναι αποτελεσματική στην περίπτωση των γνωστών 'Hot Jupiters' (Mayor & Udry 2000).

## 10. Εκκεντρότητα

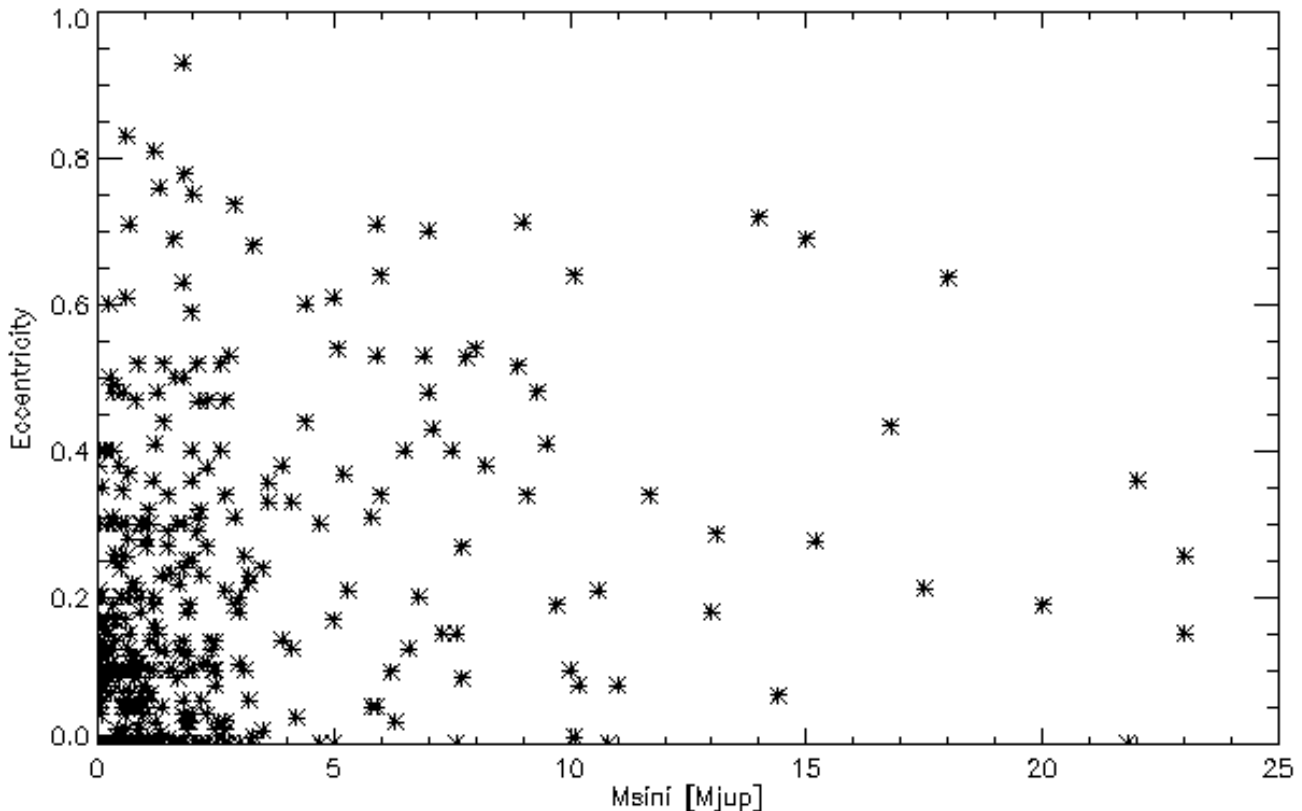
Οι εκκεντρότητες της τροχιάς των γνωστών πλανητών καταλαμβάνουν όλο το εύρος από 0 έως 1. Οι εκκεντρότητες συναρτήσει του λογαρίθμου του μεγάλου ημιάξονα φαίνονται στο διάγραμμα του Σχήματος 10.1. Παρατηρούμε ότι δεν υπάρχουν πλανήτες που να βρίσκονται σε απόσταση μικρότερη από 0.06 AU με εκκεντρότητες μεγαλύτερες από 0.3. Η μέση εκκεντρότητα των πλανητών αυτών είναι 0.028. Αυτό συμβαίνει γιατί λόγω παλιρροϊκών δυνάμεων οι τροχιές που είναι πολύ κοντά στον κεντρικό αστέρα τείνουν να είναι κυκλικές.

Οι τροχιές των πλανητών που βρίσκονται σε αποστάσεις μεγαλύτερες από 1 AU, έχουν μέση εκκεντρότητα 0.277, πολύ μεγαλύτερη σε σχέση με τη μέση εκκεντρότητα των πλανητών του ηλιακού συστήματος που είναι 0.060. Οι τροχιές των πλανητών που έχουν μάζες πάνω από  $0.5 M_{\text{Jup}}$  και βρίσκονται σε αποστάσεις μεγαλύτερες από 1 AU, έχουν μέση εκκεντρότητα 0.280. Αυτό σημαίνει ότι οι εκκεντρότητες των γιγαντιαίων πλανητών είναι σημαντικά μεγαλύτερες από αυτές του ηλιακού μας συστήματος. Συγκριτικά με τον Δία που έχει εκκεντρότητα 0.048, πέντε εξωπλανήτες που βρίσκονται σε αποστάσεις από 4.5 έως 5.5 AU από τον κεντρικό αστέρα και έχουν μάζες από 1.9 έως  $3.2 M_{\text{Jup}}$ , έχουν μέση εκκεντρότητα 0.222.



**Σχήμα 10.1** Διάγραμμα του μεγάλου ημιάξονα  $a$  (σε λογαριθμική κλίμακα) συναρτήσει της εκκεντρότητας για γνωστούς εξωπλανήτες. Στο παραπάνω διάγραμμα δεν έχουν συμπεριληφθεί πλανήτες που περιφέρονται γύρω από μέλη διπλών αστρικών συστημάτων.

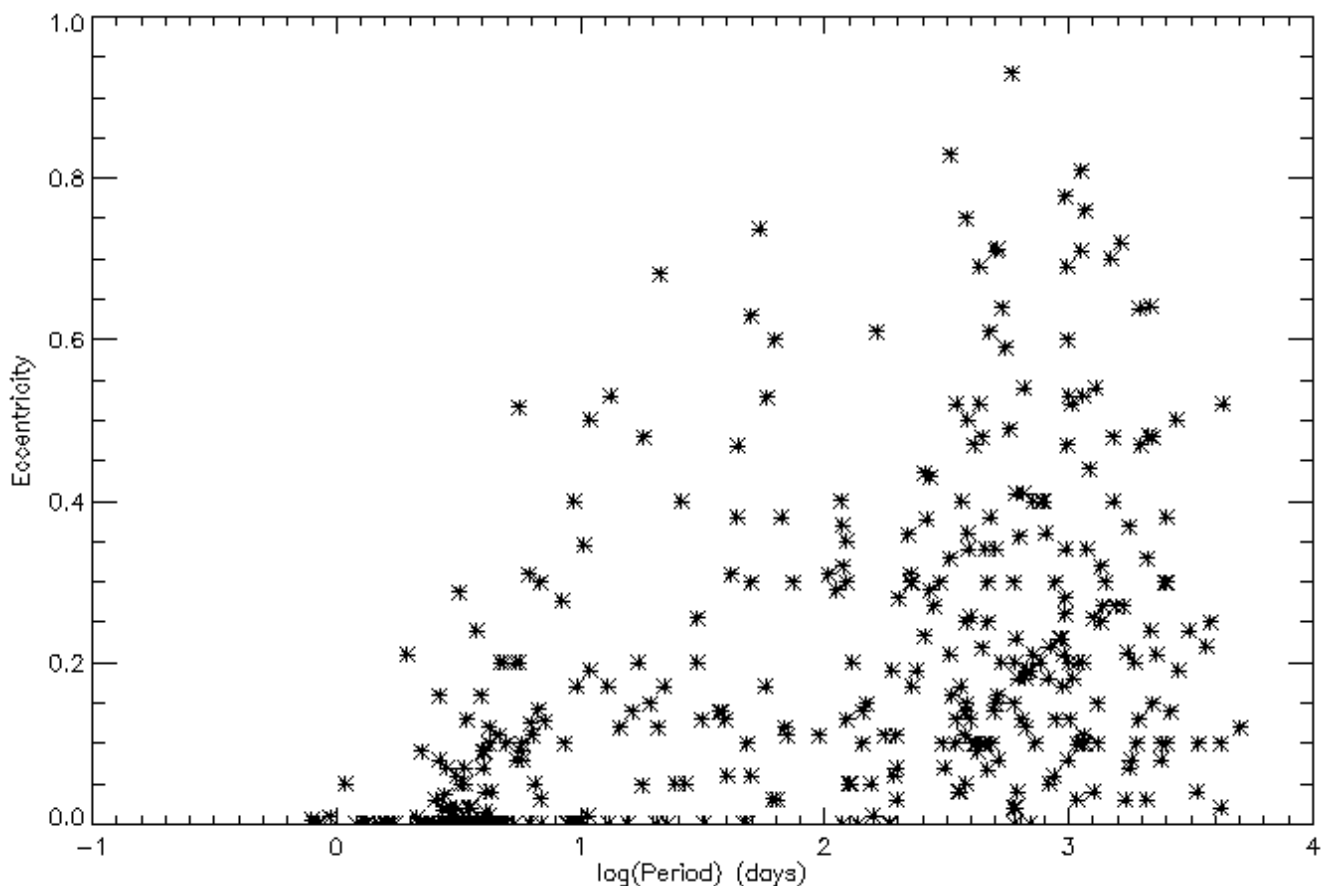
Το διάγραμμα της ελάχιστης μάζας των πλανητών συναρτήσει της εκκεντρότητας δίνεται στο Σχήμα 10.2, για πλανήτες που δεν περιφέρονται γύρω από μέλη διπλών αστρικών συστημάτων. Αν οι πλανήτες έχουν αρχικά κυκλικές τροχιές, είναι περιεργο πως οι πλανήτες μεγάλης μάζας, οι οποίοι θα παρουσίαζαν τη μεγαλύτερη αντίσταση στην όποια διατάραξη της τροχιάς τους, έχουν τόσο μεγάλες εκκεντρότητες. Οι πλανήτες με ελάχιστες μάζες πάνω από  $4 M_{\text{jup}}$  έχουν μέση εκκεντρότητα 0.310, ενώ αυτοί με μάζες κάτω από  $4 M_{\text{jup}}$  έχουν 0.160. Ίσως λοιπόν οι πλανήτες μεγάλης μάζας να σχηματίζονται από κάποια διαδικασία στην οποία οι αρχικές τροχιές δεν είναι κυκλικές.



**Σχήμα 10.2** Διάγραμμα της ελάχιστης μάζας συναρτήσει της εκκεντρότητας για γνωστούς εξωπλανήτες. Στο παραπάνω διάγραμμα δεν έχουν συμπεριληφθεί πλανήτες που περιφέρονται γύρω από μέλη διπλών αστρικών συστημάτων.

### 10.1 Διάγραμμα Εκκεντρότητας - Περίοδου

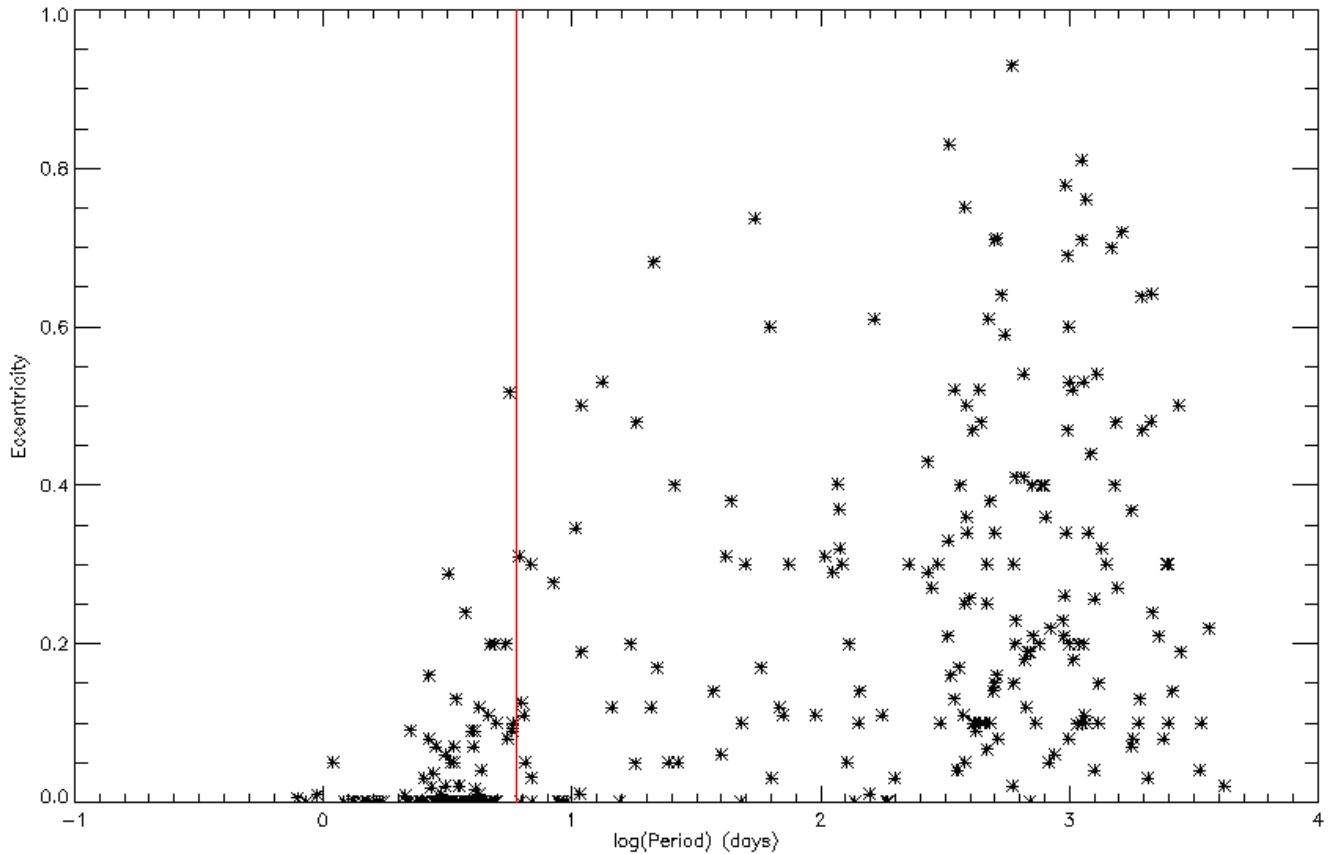
Το διάγραμμα της εκκεντρότητας των γνωστών εξωπλανητών συναρτήσει του λογαρίθμου της περιόδου δίνεται στο Σχήμα 10.3. Παρατηρούμε ότι η μέση εκκεντρότητα των πλανητών με περιόδους μεγαλύτερες των 6 ημερών είναι σημαντικά αυξημένη σε σχέση με τις εκκεντρότητες των γιγάντων πλανητών του ηλιακού συστήματος.



**Σχήμα 10.3** Διάγραμμα της εκκεντρότητας συναρτήσει του λογαρίθμου της περιόδου για γνωστούς εξωπλανήτες. Στο παραπάνω διάγραμμα δεν έχουν συμπεριληφθεί πλανήτες που περιφέρονται γύρω από μέλη διπλών αστρικών συστημάτων.

Θα μελετήσουμε εξωπλανήτες που δεν ανήκουν σε πολλαπλά πλανητικά συστήματα, έτσι ώστε να μην επηρεάζεται η εκκεντρότητα κάποιων πλανητών από την παρουσία των άλλων, αν και οι μέσες εκκεντρότητες των δύο αυτών κατηγοριών είναι σχεδόν ίσες. Στο Σχήμα 10.4 δίνεται το διάγραμμα της εκκεντρότητας συναρτήσει του λογαρίθμου της περιόδου για εξωπλανήτες που δεν περιφέρονται γύρω από μέλη διπλών αστρικών συστημάτων και δεν ανήκουν σε πολλαπλό πλανητικό σύστημα.





**Σχήμα 10.4** Διάγραμμα της εκκεντρότητας συναρτήσει του λογαρίθμου της περιόδου για γνωστούς εξωπλανήτες. Στο παραπάνω διάγραμμα δεν έχουν συμπεριληφθεί πλανήτες που περιφέρονται γύρω από μέλη διπλών αστρικών συστημάτων ή που ανήκουν σε πολλαπλό πλανητικό σύστημα.

Πολλοί μηχανισμοί έχουν προταθεί για να εξηγήσουν τη μεγάλη παρατηρούμενη μέση εκκεντρότητα των εξωπλανητών με περιόδους άνω των 6 ημερών (κόκκινη γραμμή του διαγράμματος) που ισούται με 0.270. Έχει προταθεί ότι οι εκκεντρες τροχιές θα μπορούσαν να είναι αποτέλεσμα της δυναμικής εξέλιξης συστημάτων που αρχικά περιείχαν αρκετούς πλανήτες (Rasio & Ford 1996, Lin & Ida 1997, Ford et al. 2001, Papaloizou & Terquem 2001, Rice et al. 2003), αλλά τα μοντέλα αυτά απέτυχαν να αναπαράγουν τη συχνότητα εμφάνισης γιγάντων πλανητών σε τροχιές με ημιάξονες μικρότερους από 1 AU. Οι γίγαντες πλανήτες που βρίσκονται κοντά στους κεντρικούς αστέρες έχει υποθεθεί ότι παράγονται λόγω μετανάστευσης διαμέσου του δίσκου (Ward 1997, Masset & Papaloizou 2003), αλλά η διαδικασία αυτή δύσκολα παράγει εκκεντρες τροχιές (Papaloizou et al. 2001, Thommes & Lissauer 2003). Μία άλλη θεωρία είναι ότι οι εξωπλανήτες δημιουργούνται με τις ίδιες διαδικασίες που δημιουργούνται και τα διπλά συστήματα αστέρων (Sterinski & Black 2000), δηλαδή οι γίγαντες πλανήτες δεν σχηματίζονται από προσθήκη αερίου σε ένα μεγάλης μάζας πέτρινο πυρήνα, όπως συχνά υποτίθεται, αλλά από κάποιες άλλες διαδικασίες. Θα μπορούσαν να προέρχονται από αστάθειες του δίσκου (Mayer et al. 2002, Boss 2002, 2003), αλλά και πάλι θα έπρεπε να υποθεθεί μετανάστευση διαμέσου του δίσκου για να εξηγηθούν οι τροχιές με μικρές περιόδους περιφοράς. Εναλλακτικά, οι πλανήτες θα μπορούσαν να δημιουργούνται λόγω θρυμματισμού ενός καταρρέοντος πρωτοαστρικού νέφους (Oxley & Woolfson 2004). Εντούτοις, τα μοντέλα αυτά μπορεί να είναι ικανοποιητικά για το σχηματισμό

πλανητών μεγάλης μάζας ή καφέ νάνων, αλλά όχι για πλανήτες με μάζα περίπου ίση με  $1 M_{\text{Jup}}$  ή και μικρότερη.

Τα μοντέλα σχηματισμού των διπλών αστρικών συστημάτων δεν είναι επίσης εντελώς ικανοποιητικά. Οι μεγάλες εκκεντρότητες των διπλών συστημάτων εξηγούνται από το θρυμματισμό των καταρρέοντων πυρήνων και των αλληλεπιδράσεων που ακολουθούν μεταξύ των σχηματιζόμενων αστέρων (Bate et al. 2002, Goodwin et al. 2004), αλλά όπως και στους εξωπλανήτες, οι προσομοιώσεις δεν παράγουν τις υψηλές συχνότητες εμφάνισης συστημάτων με μικρούς ημιάξονες. Επίσης, στατιστικές μελέτες σε διπλά συστήματα της κύριας ακολουθίας (Halbwachs et al. 2003) έδειξαν ότι τα διπλά αστρικά συστήματα με μικρούς ημιάξονες (μικρότερους από μερικές AU) χωρίζονται σε δύο πληθυσμούς: έναν με μεγάλες εκκεντρότητες και λόγους μαζών μικρότερους από 0.8 (όχι δίδυμοι) και έναν με ενδιάμεσες εκκεντρότητες και σχεδόν ίδιας μάζας αστέρες (δίδυμοι). Επιπλέον οι δίδυμοι αστέρες είναι πιο συχνοί στα διπλά συστήματα με μικρές περιόδους. Οι παραπάνω ιδιότητες έχουν εξαχθεί για κύριους αστέρες τύπων F7 - K, αλλά ισχύουν επίσης για νάνους αστέρες τύπου M (Marchal et al. 2003).

Θα χρησιμοποιήσουμε το διάγραμμα εκκεντρότητας - περιόδου για να συγκρίνουμε τους εξωπλανήτες με τους αστέρες που ανήκουν σε διπλά συστήματα. Σκοπός είναι να μελετήσουμε αν οι ιδιότητες των εξωπλανητών μπορούν να θεωρηθούν σαν μία διεύρυνση των ιδιοτήτων των διπλών συστημάτων σε ένα εύρος πολύ χαμηλών λόγων μαζών. Η μελέτη αυτή θα μπορούσε να δείξει αν οι διαδικασίες σχηματισμού των αντικειμένων αυτών μοιάζουν.

## A. Παλιρροϊκές επιδράσεις

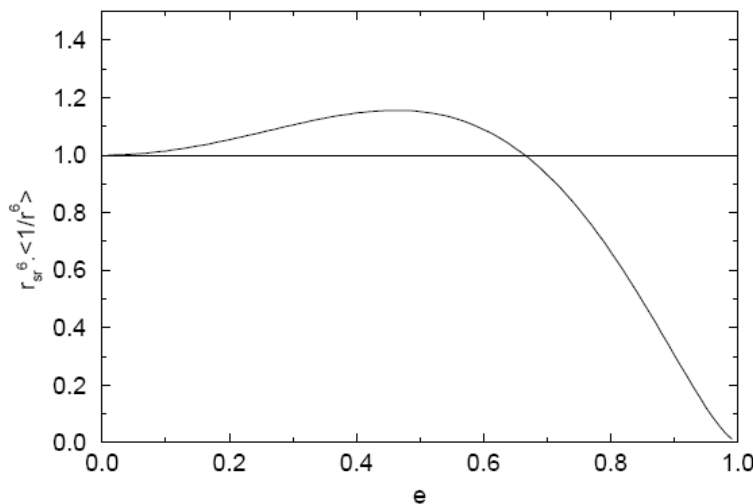
Οι περίοδοι και οι εκκεντρότητες των αντικειμένων αλλάζουν λόγω παλιρροϊκών αλληλεπιδράσεων, ιδίως για μικρές περιόδους. Επομένως το διάγραμμα εκκεντρότητας - περιόδου μπορεί σχηματικά να χωριστεί σε δύο μέρη: στις μικρές περιόδους, όπου οι τροχιές τείνουν να είναι κυκλικές ή να έχουν μικρές εκκεντρότητες, και στις μεγαλύτερες περιόδους, πέρα από το όριο των μικρών εκκεντροτήτων  $P_{\text{cutoff}}$  (Mayor & Mermilliod 1984, Duquennoy & Mayor 1991). Αρκετά θεωρητικά μοντέλα έχουν προταθεί για την εξαγωγή του  $P_{\text{cutoff}}$ , και τα οποία διαφέρουν για διπλά συστήματα (Zahn 1992, Hut 1981, 1982, Keppens 1997) και για πλανήτες (Goldreich & Soter 1966, Trilling 2000). Επίσης επιδρούν και διάφορες φυσικές διαδικασίες οι οποίες εξαρτώνται η κάθε μια με διαφορετικό τρόπο από την αναλογία μαζών του συστήματος.

Η ικανότητα των παλιρροϊκών αλληλεπιδράσεων στην τροποποίηση των τροχιών είναι πολύ ευαίσθητη στην απόσταση μεταξύ των δύο μελών. Για δεδομένο σύστημα, η παλιρροϊκή ροπή εξαρτάται από την απόσταση μεταξύ των μελών,  $r$  και συγκεκριμένα ανάλογη του  $1/r^6$  (Lecar et al. 1976). Επομένως για συστήματα που διαφέρουν μόνο στην περίοδο, η μετάβαση από τις σχεδόν κυκλικές τροχιές στις τροχιές που είναι πρακτικά ανεπηρέαστες από τις παλιρροϊκές αλληλεπιδράσεις είναι μία στενή ζώνη στο διάγραμμα  $P - e$ . Εντούτοις, αυτό δεν σημαίνει ότι συστήματα με  $P > P_{\text{cutoff}}$  δεν μπορούν να έχουν σχεδόν μηδενική εκκεντρότητα. Για μία δεδομένη περίοδο τα συστήματα με πολύ έκκεντρες τροχιές έχουν μέλη που πλησιάζουν πάρα πολύ σε κάποια φάση της περιόδου, σε απόσταση πολύ μικρότερη από το μεγάλο ημιάξονα της τροχιάς, και κάτω από κάποιο όριο της μεταξύ τους απόστασης η τροχιά γίνεται σχεδόν

κυκλική. Οπότε στο πάνω τμήμα του διαγράμματος  $P - e$  δεν θα υπάρχουν πολλά σημεία ακόμα και για  $P > P_{\text{cutoff}}$ . Επισημαίνεται ότι η περίοδος των αρχικά έκκεντρων τροχιών αλλάζει καθώς το σύστημα εξελίσσεται μέχρι η εκκεντρότητα να γίνει ίση με μηδέν. Όταν ο κύριος αστέρας περιστρέφεται αργά, η τροχιά γίνεται κυκλική κρατώντας την τροχιακή στροφορμή αμετάβλητη (Witte & Savonije 2002, Hurley et al. 2002). Επομένως το semilatus rectum,  $r_{\text{sr}} = a(1-e^2)$ , διατηρείται και γίνεται η ακτίνα της τελικής κυκλικής τροχιάς. Συνεπώς η τελική περίοδος είναι:

$$P_{\text{sr}} = P (1-e^2)^{3/2}$$

όπου τα  $P$  και  $e$  αναφέρονται στην αρχική κατάσταση του συστήματος. Αυτό μας δίνει έναν απλό αλλά ικανοποιητικό τρόπο να μελετήσουμε τη μετάβαση από τις κυκλικές τροχιές στις τροχιές που είναι ανεπηρέαστες από παλιρροϊκές αλληλεπιδράσεις. Αντί για το διάγραμμα  $P - e$ , τα αντικείμενα τοποθετούνται στο επίπεδο  $P_{\text{sr}} - e$ . Έτσι το εξελικτικό μονοπάτι προς την κυκλική τροχιά είναι μία κατακόρυφη γραμμή στο διάγραμμα. Επίσης, για ένα μεγάλο εύρος εκκεντροτήτων, η μέση τιμή του  $1/r^6$  για μία ολοκληρωμένη τροχιά ισούται προσεγγιστικά με  $1/r_{\text{sr}}^6$  (Σχήμα 10.5). Αναμένεται λοιπόν ότι, όταν το  $r_{\text{sr}}$  είναι αρκετά μικρό ώστε να επιτρέπει αποδοτικές παλιρροϊκές αλληλεπιδράσεις για μία δεδομένη εκκεντρότητα, οι αλληλεπιδράσεις αυτές θα παραμείνουν σημαντικές κατά τη διάρκεια εξέλιξης της τροχιάς, έως ότου αυτή γίνει κυκλική. Συνεπώς το όριο μεταξύ των συστημάτων των οποίων οι τροχιές έχουν γίνει σχεδόν κυκλικές και της περιοχής που είναι ανεπηρέαστη από παλιρροϊκές αλληλεπιδράσεις πρέπει να εμφανίζεται ξεκάθαρα στο  $P_{\text{sr}} - e$  διάγραμμα. Αν η μείωση της εκκεντρότητας δεν συσχετιζόταν με την ηλικία του συστήματος, στο διάγραμμα θα φαινόταν μία ισχυρή αντίθεση, με τις κυκλικές τροχιές στα αριστερά και τις τροχιές με οποιαδήποτε εκκεντρότητα στα δεξιά, συμπεριλαμβανομένων και των πολύ μεγάλων, ακριβώς πάνω από το  $P_{\text{cutoff}}$ . Αυτό είναι που παρατηρείται και στην πραγματικότητα, ιδιαίτερα στους εξωπλανήτες.



**Σχήμα 10.5** Η μέση τιμή του όρου  $1/r^6$  του παλιρροϊκού εξογκώματος, συγκρινόμενη με το  $1/r_{\text{sr}}^6$ , όπου  $r_{\text{sr}}$  είναι το semilatus rectum. Με εξαίρεση τις πολύ μεγάλες εκκεντροτήτες, το  $1/r_{\text{sr}}^6$  είναι μία πολύ καλή προσέγγιση του  $\langle 1/r^6 \rangle$  (Halbwachs et al. 2005).

Ωστόσο ένα πραγματικό δείγμα επιλέγεται να έχει μία μέγιστη περίοδο  $P_{\max}$ , και δεν επιτρέπονται όλες οι εκκεντρότητες στο  $P_{sr} - e$  διάγραμμα. Για δεδομένη  $P_{sr}$ , οι εκκεντρότητες κυμαίνονται από 0 έως:

$$e_{\sup} = \sqrt{1 - (P_{sr} / P_{\max})^{2/3}}$$

Με το  $P_{\text{cutoff}}$  να είναι τόσο καλά καθορισμένο, η μέγιστη εκκεντρότητα που μπορεί να έχουν τα συστήματα στο  $P - e$  διάγραμμα χωρίς να επηρεάζονται από τις παλιρροϊκές αλληλεπιδράσεις είναι:

$$e_{\max} = \sqrt{1 - (P_{\text{cutoff}} / P)^{2/3}}$$

Για τη σύγκριση δύο δειγμάτων που επηρεάζονται διαφορετικά από τις παλιρροϊκές δυνάμεις, είναι απαραίτητο η σύγκριση να περιοριστεί στο μικρότερο από τα δύο όρια του  $e_{\max}$  προκειμένου να φανούν οι όποιες διαφορές προέρχονται από τις αρχικές κατανομές της εκκεντρότητας.

## B. Τα διπλά συστήματα αστέρων

### 1. Το δείγμα

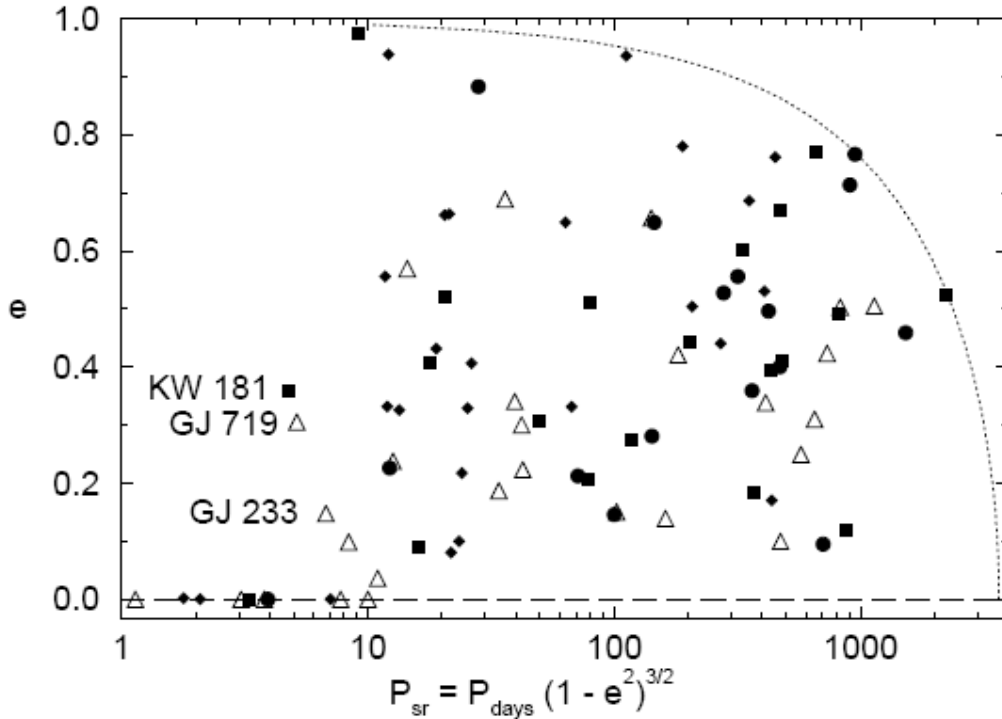
Ένα δείγμα νάνων αστέρων φασματικών τύπων F7 - K, που ανήκουν σε διπλά συστήματα, χρησιμοποιήθηκε για την παρακάτω μελέτη (Halbwachs et al. 2005). Αποτελείται από 89 φασματοσκοπικά διπλά συστήματα (SB) που βρίσκονται στην ηλιακή γειτονιά ή σε ανοιχτά αστρικά σμήνη, και έχουν περιόδους μέχρι και 10 χρόνια. Οι διδυμοί αστέρες (αστέρες, μέλη διπλών συστημάτων, με λόγο μαζών  $\sim 1$ ) έχουν κατά κανόνα μικρότερες εκκεντρότητες από τους υπόλοιπους αστέρες που ανήκουν σε διπλά συστήματα. Ωστόσο, προτού συγκρίνουμε τα διπλά συστήματα με τους εξωπλανήτες, πρέπει να δούμε αν οι εκκεντρότητες των μη διδυμων συστημάτων εξαρτώνται από τους λόγους μαζών.

Προκειμένου να δούμε αν πράγματι υπάρχει σχέση μεταξύ των λόγων μαζών και των εκκεντροτήτων οι SB έχουν χωριστεί σε διάφορες ομάδες:  $q \leq 0.40$  (16 SB),  $0.40 \leq q \leq 0.80$  (20 SB) και οι διδυμοί (27 SB). Υπάρχει επίσης μία ομάδα που περιέχονται όλοι οι SB με  $q \leq 0.80$  (62 SB, συμπεριλαμβανομένων των 36 των δύο πρώτων ομάδων).

### 2. Το όριο των μικρών εκκεντροτήτων λόγω των παλιρροϊκών αλληλεπιδράσεων

Οι SB τοποθετούνται στο επίπεδο ( $P_{sr} - e$ ) (Σχήμα 10.6), προκειμένου να ξεχωρίσει το μέρος του διαγράμματος όπου οι εκκεντρότητες επηρεάζονται από τις παλιρροϊκές δυνάμεις.

Αρκετά χαρακτηριστικά εμφανίζονται στο Σχήμα 10.6. Το εύρος των εκκεντροτήτων εκτείνεται από 0 μέχρι 1 για περιόδους από 4 έως 9 ημερών. Όλοι οι SB με  $P_{sr}$  μικρότερης των 4 ημερών έχουν κυκλικές τροχιές, ενώ δεν υπάρχουν ενδείξεις μείωσης της εκκεντρότητας για  $P_{sr}$  που υπερβαίνει τις 10 ημέρες. Οι SB με  $P_{sr}$  μεταξύ 4 και 10 ημερών έχουν ενδιάμεσες εκκεντρότητες, ενώ οι τροχιές ορισμένων εξ' αυτών έχουν γίνει κυκλικές.



**Σχήμα 10.6** Η κατανομή των SB στο  $(P_{sr} - e)$  διάγραμμα, όπου  $P_{sr}$  είναι η περίοδος που θα είχαν οι SB αν οι τροχιές τους γίνονταν κυκλικές με την ίδια στροφορμή. Τα σύμβολα αναπαριστούν συστήματα με διαφορετικούς λόγους μαζών:  $q \leq 0.4$  (κύκλοι),  $0.4 \leq q \leq 0.8$  (τετράγωνα), το μέγιστο  $q$  για  $q \leq 0.8$  και το ελάχιστο  $q$  για  $q \leq 0.4$  (μικροί ρόμβοι),  $q \geq 0.8$  (διδυμοί αστέρες) (ανοιχτά τρίγωνα). Η λειπή διακεκομμένη γραμμή είναι το όριο  $e_{sup}$  που αντιστοιχεί σε  $P_{max} = 10$  χρόνια, σύμφωνα με την εξίσωση  $e_{sup} = \sqrt{1 - (P_{sr} / P_{max})^{2.3/2}}$  (Hallwachs et al. 2005).

Τουλάχιστον ένας από τους μικρής περιόδου SB μπορεί να είχε αρχικά πολύ μεγάλη εκκεντρότητα και ίσως να είναι πολύ μικρός ώστε η τροχιά του να έχει γίνει ήδη κυκλική: ο KW 181 έχει την πιο έκκεντρη τροχιά μεταξύ των SB με περιόδους μικρότερες των 10 ημερών. Το σύστημα αυτό ανήκει στο σμήνος Praesepere, και η ηλικία του είναι μόλις  $0.8 \cdot 10^9$  χρόνια. Η τροχιά του θα γίνει κυκλική σε  $0.1 \cdot 10^9$  χρόνια (Duquennoy et al. 1992). Οι άλλοι δύο SB με  $e > 0.1$  και  $P < 10$  ημερών ίσως να έχουν μεγάλες εκκεντρότητες εξαιτίας διαταραχών από κάποιο τρίτο μέλος (Mazeh & Shaham 1979): ο GJ 719 έχει ένα CPM συνοδό που σε απόσταση 280 AU (μικρός ημιάξονας) (Zuckerman et al. 1997) και ο GJ 233 έχει πιθανή περίοδο 200 χρόνων (Heintz 1988). Αν εξαιρέσουμε τους παραπάνω 3 SB, βρίσκουμε ότι  $P_{cutoff} \approx 8$  ή 10 ημέρες (Duquennoy & Mayor 1991).

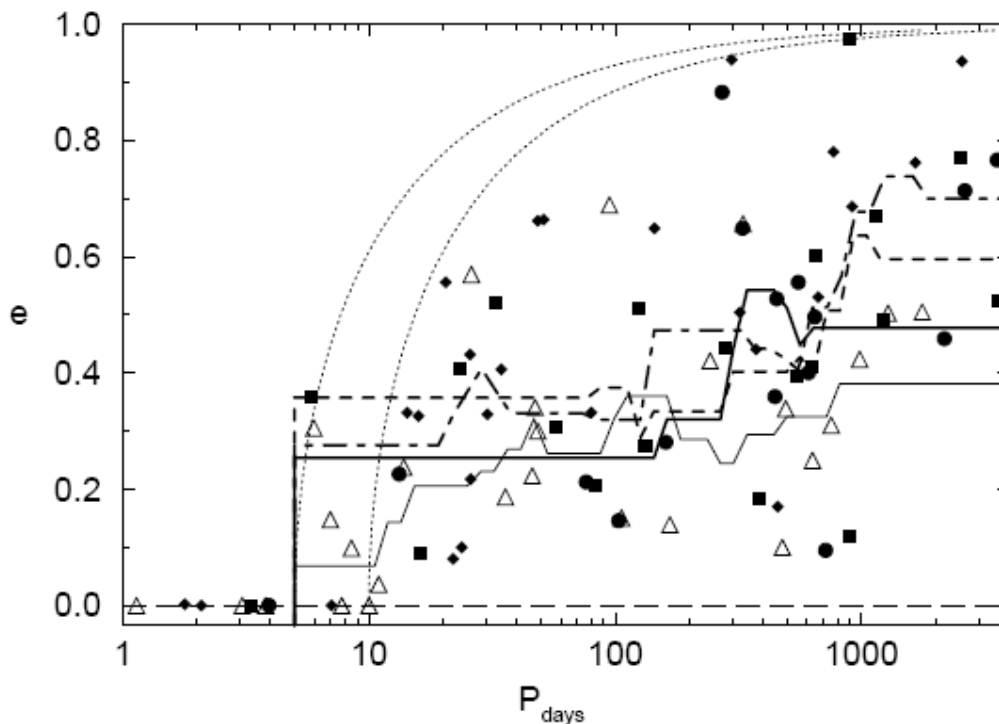
Εντούτοις αξίζει να σημειωθεί ότι όλοι οι SB με έκκεντρες τροχιές και  $P < 10$  ημερών έχουν μεγάλους λόγους μαζών. Για να επιβεβαιωθεί η σημασία του ανωτέρω χαρακτηριστικού χρησιμοποιούμε το διάγραμμα περιόδου - εκκεντρότητας των 205 SB που βρήκαν οι Latham et al. (2002) μεταξύ αστέρων με μεγάλη ίδια κίνηση. Επίσης βρήκαν ένα εύρος περιόδων όπου υπάρχουν τόσο κυκλικές όσο και έκκεντρες τροχιές, μεταξύ 10 και 20 ημερών. Βρήκαν επίσης ότι η συχνότητα εμφάνισης SB με μεγάλους λόγους μαζών μεταξύ συστημάτων με έκκεντρες τροχιές και μικρές περιόδους είναι φυσιολογική. Επομένως συμπεραίνεται ότι η συχνότητα διδύμων αστέρων με έκκεντρες τροχιές και  $P < 10$  ημερών είναι τυχαία.

Το δείγμα των Latham et al. περιέχει μερικούς SB με κυκλικές τροχιές και περιόδους μεταξύ 10 και 20 ημερών. Ωστόσο οι αστέρες αυτοί έχουν μεγάλες ίδιες κινήσεις, και ανήκουν γενικά στο γαλαξιακό δίσκο ή ακόμα και στην άλω. Επομένως οι μεγάλες περίοδοι ορισμένων κυκλικών τροχιών μπορεί να οφείλονται στη μεγάλη ηλικία των συστημάτων αυτών, σε συμφωνία με τις θεωρητικές προβλέψεις (Duquennoy et al. 1992). Επίσης οι αστέρες αυτοί δεν είναι αντιπροσωπευτικοί των αστέρων που παρατηρούνται για την ανίχνευση πλανητών. Για τους αστέρες αυτούς, το όριο της περιοχής που επηρεάζονται από παλιρροϊκές αλληλεπιδράσεις στο  $(P_{sr} - e)$  διάγραμμα είναι  $P_{cutoff} = 10$  ημέρες.

### 3. Τα διπλά αστρικά συστήματα στο $(P - e)$ διάγραμμα

Στο Σχήμα 10.7 δίνεται το  $(P - e)$  διάγραμμα των SB. Οι διάμεσοι των τεσσάρων ομάδων του  $q$  δίνονται επίσης στο σχήμα για οπτική σύγκριση.

Οι δίδυμοι αστέρες έχουν πολλές φορές εκκεντρότητες μικρότερες από τις μέσες για περιόδους μεγαλύτερες των 5 ημερών. Αντίθετα οι δύο ομάδες με  $q \leq 0.8$  έχουν σχεδόν ίδια κατανομή εκκεντροτήτων. Επομένως μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε όλους τους μη δίδυμους SB για σύγκριση με τους εξωπλανήτες.



**Σχήμα 10.7** Κατανομή των SB στο  $(P - e)$  διάγραμμα. Τα σύμβολα είναι τα ίδια με αυτά του Σχήματος 10.6. Οι γραμμές αναφέρονται στις διαμέσους των εκκεντροτήτων των διαφόρων ομάδων των λόγων μαζών:  $q \leq 0.4$  (φαρδιά συνεχής γραμμή),  $0.4 \leq q \leq 0.8$  (γραμμή με παύλες), όλα τα  $q \leq 0.8$  (γραμμή με τελείες και παύλες),  $q > 0.8$  (δίδυμοι) (λεπτή συνεχής γραμμή). Οι δύο λεπτές διακεκομμένες γραμμές είναι τα όρια των SB με  $P_{sr}$  μεταξύ 5 και 10 ημερών, όπως προκύπτει από την εξίσωση

$$e_{max} = \sqrt{1 - (P_{cutoff} / P)^{2/3}} \quad (\text{Halbwachs et al. 2005}).$$

Στο Σχήμα 10.7 φαίνεται καθαρά ότι η διάμεσος της εκκεντρότητας αυξάνει με την περίοδο. Εντούτοις αυτό ίσως να οφείλεται στη μείωση της εκκεντρότητας λόγω παλιρροϊκών δυνάμεων, αφού οι τροχιές που είχαν αρχικά  $P > P_{\text{cutoff}}$  και  $e > e_{\text{max}}$  είναι τώρα κυκλικές με  $P = P_{\text{sr}} < P_{\text{cutoff}}$ . Για να δούμε αν η εκκεντρότητα εξαρτάται από την περίοδο εστιάζουμε στην περιοχή που δεν επηρεάζεται από παλιρροϊκές δυνάμεις ( $P > 20$  ημέρες και  $e < 0.61$ ). Οι μη δίδυμοι και οι δίδυμοι αστέρες θεωρούνται ξεχωριστές ομάδες. Ο δείκτης συσχέτισης Spearman είναι 0.26 για τους μη δίδυμους και 0.29 για τους δίδυμους, αρκετά μικρός για να θεωρήσουμε τις δύο παραμέτρους συσχετισμένες.

Εφόσον η  $P_{\text{sr}}$  εξαρτάται από τη στροφορμή της τροχιάς, αξίζει να δούμε αν η εκκεντρότητα συσχετίζεται με αυτή την παράμετρο. Η απουσία συσχετισμού μεταξύ  $P$  και  $e$  δε σημαίνει απαραίτητα και απουσία συσχετισμού μεταξύ  $P_{\text{sr}}$  και  $e$ . Αφού το δείγμα έχει περιόδους μικρότερες των 10 χρόνων πρέπει να λάβουμε υπόψη το όριο  $e_{\text{sup}}$  (η λεπτή διακεκομμένη γραμμή του Σχήματος 10.6). Επομένως για περιόδους μεταξύ 10 και 789 ημερών και εκκεντρότητες μικρότερες από 0.8, προκειμένου να αποφευχθεί η περιοχή με  $e > e_{\text{sup}}$ , οι δείκτες συσχέτισης δείχνουν ότι οι εκκεντρότητες δεν εξαρτώνται από τη στροφορμή των SB.

## Γ. Οι εξωπλανήτες

### 1. Το δείγμα

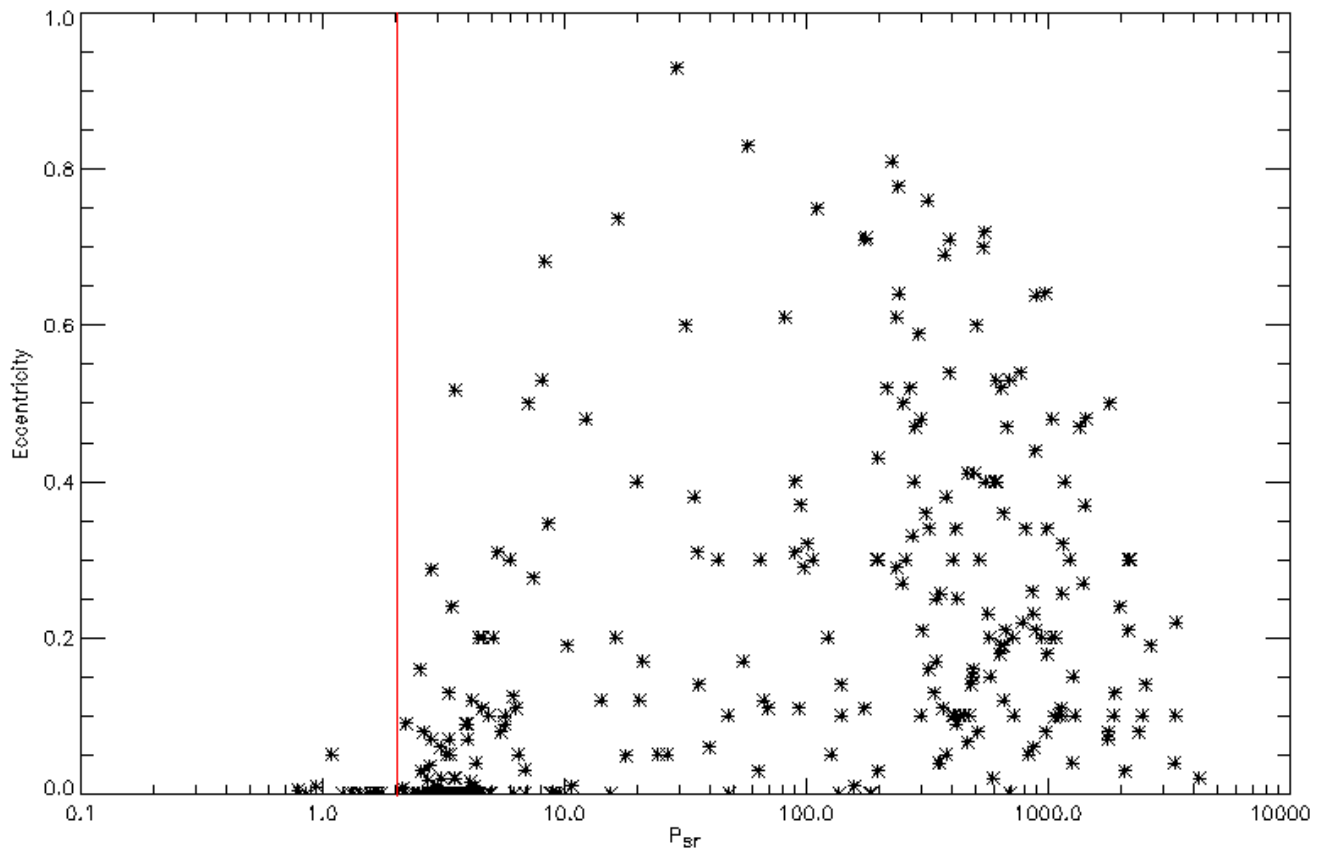
Όλοι οι πλανήτες που έχουν ανιχνευθεί δεν μπορούν να συγκριθούν με τους SB για τους παρακάτω λόγους:

- Οι κύριοι αστέρες των διπλών συστημάτων είναι όλοι της κύριας ακολουθίας, οπότε οι πλανήτες που περιφέρονται γύρω από υπογίγαντες ή γίγαντες αστέρες δεν πρέπει να ληφθούν υπόψη. Με τον τρόπο αυτό αποφεύγεται το πρόβλημα της μείωσης της εκκεντρότητας λόγω παλιρροϊκών δυνάμεων σε συστήματα που περιέχουν εξελιγμένους αστέρες, καθώς και η αβεβαιότητα που οφείλεται στην εκτίμηση της μάζας ενός τέτοιου αστέρα.
- Πλανήτες γύρω από μέλη διπλών αστρικών συστημάτων και πλανήτες που ανήκουν σε πολλαπλά πλανητικά συστήματα πρέπει να εξαιρεθούν καθώς η εκκεντρότητά τους μπορεί να διαταραχθεί.

### 2. Οι εξωπλανήτες στο ( $P_{\text{sr}} - e$ ) διάγραμμα

Όπως και για τους SB έτσι και για τους εξωπλανήτες σχεδιάζουμε το ( $P_{\text{sr}} - e$ ) διάγραμμα, προκειμένου να ερευνήσουμε τις επιδράσεις στην εκκεντρότητα των παλιρροϊκών δυνάμεων (Σχήμα 10.8). Σε αντίθεση με τους SB, όπου κυκλικές τροχιές και ενδιάμεσες εκκεντρότητες συνυπάρχουν σε ένα μικρό εύρος  $P_{\text{sr}}$ , παρατηρούμε ότι στους εξωπλανήτες ο διαχωρισμός μεταξύ κυκλικών και έκκεντρων τροχιών είναι πολύ καλά καθορισμένος, στο  $P_{\text{cutoff}} = 2$  ημέρες.

Αξίζει επίσης να εξετάσουμε αν οι εκκεντρότητες συσχετίζονται με τις περιόδους. Ο δείκτης συσχέτισης (Spearman) είναι 0.59. Αν και ο δείκτης δεν είναι πολύ υψηλός, δεν μπορούμε να αποκλείσουμε το ενδεχόμενο οι δύο παράμετροι να συσχετίζονται.



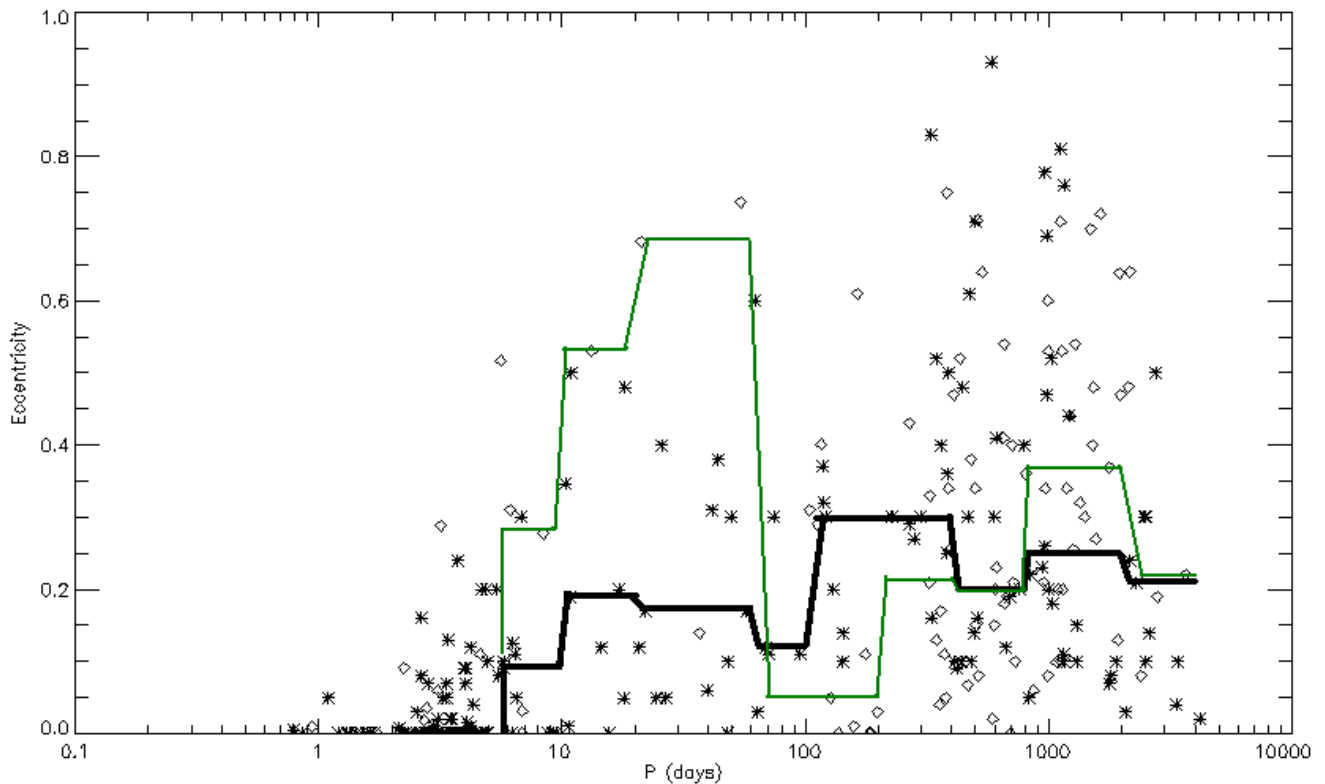
**Σχήμα 10.8** Κατανομή των εξωπλανητών στο διάγραμμα  $P_{sr} - e$ , όπου  $P_{sr}$  είναι η περίοδος που θα είχαν αν οι τροχιές γίνονταν κυκλικές με την ίδια στροφορμή.

### 3. Οι εξωπλανήτες στο ( $P - e$ ) διάγραμμα

Στο Σχήμα 10.9 δίνεται το διάγραμμα της περιόδου συναρτήσει της εκκεντρότητας των εξωπλανητών που δεν περιστρέφονται γύρω από μέλη διπλών αστρικών συστημάτων και που δεν ανήκουν σε πολλαπλό πλανητικό σύστημα. Το δείγμα έχει χωριστεί σε δύο ομάδες, μία με πλανήτες με ελάχιστες μάζες μικρότερες από  $2 M_{jup}$  και μία με μάζες πάνω από αυτό το όριο. Παρατηρούμε ότι υπάρχουν μόλις 4 πλανήτες με  $M > 2 M_{jup}$  με περιόδους μεταξύ 10 και 100 ημερών, γεγονός που κάνει αναξιόπιστη τη διάμεσο των εκκεντροτήτων για αυτό το εύρος περιόδων. Η έλλειψη πλανητών με μεγάλες μάζες σε τροχιές μικρών περιόδων είχε παρατηρηθεί και στο διάγραμμα περίοδου - ελάχιστης πλανητικής μάζας. Ο δείκτης συσχέτισης της πλανητικής μάζας με την εκκεντρότητα και με την περίοδο είναι 0.29 και 0.40 αντίστοιχα, οπότε μπορούμε να πούμε ότι τα μεγέθη αυτά δεν εξαρτώνται από τη μάζα.

Προκειμένου να εξετάσουμε αν η εκκεντρότητα εξαρτάται από την περίοδο υπολογίζουμε τον αντίστοιχο συντελεστή συσχέτισης Spearman, ο οποίος είναι, για όλους τους πλανήτες του Σχήματος 10.9 με περιόδους μεγαλύτερες από 2 ημέρες, ίσος με 0.62. Αν και είναι σχετικά μεγάλος για να αποκλείσουμε τη μεταξύ τους συσχέτιση, μπορούμε να πούμε ότι οι εκκεντρότητες, με περιόδους μεγαλύτερες από το όριο των 2 ημερών οι οποίες και δεν επηρεάζονται από τις παλιρροϊκές δυνάμεις, αν αλλάζουν λόγω μετανάστευσης, η αλλαγή αυτή είναι σχεδόν ανεξάρτητη από τις περιόδους.

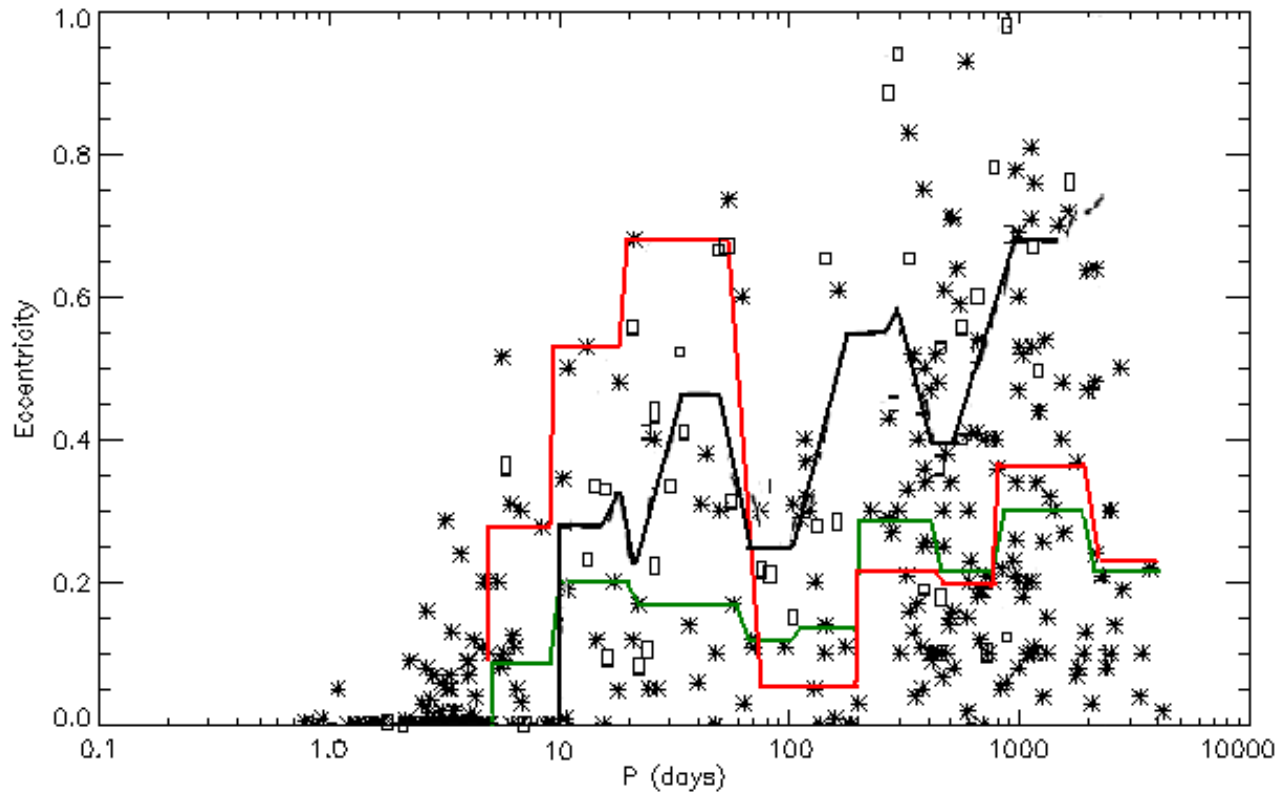




**Σχήμα 10.9** Κατανομή των εξωπλανητών στο διάγραμμα  $P - e$ . Οι αστερίσκοι δηλώνουν πλανήτες με  $M < 2 M_{\text{jup}}$  και οι ρόμβοι πλανήτες με  $M > 2 M_{\text{jup}}$ . Η πράσινη γραμμή είναι η διάμεσος των πλανητών με  $M > 2 M_{\text{jup}}$  και η μαύρη των πλανητών με  $M < 2 M_{\text{jup}}$ .

### Δ. Σύγκριση πλανητών - διπλών συστημάτων

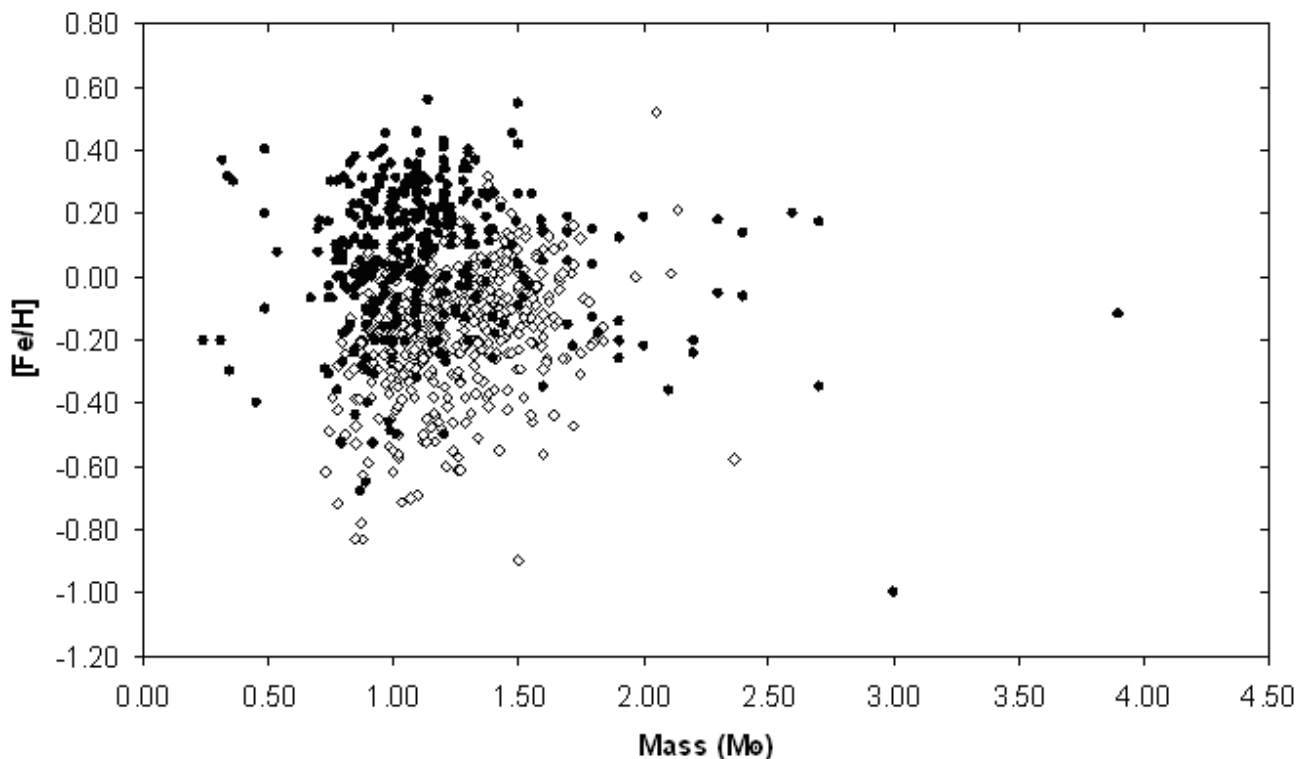
Στο Σχήμα 10.10 δίνεται το διάγραμμα περιόδου - εκκεντρότητας για μη δίδυμους αστέρες διπλών συστημάτων και πλανήτες. Αν και όλα τα αντικείμενα κατανέμονται στην ίδια περιοχή του  $(P - e)$  διαγράμματος, οι πλανήτες έχουν εκκεντρότητες μικρότερες από αυτές των SB. Οι πλανήτες με  $M > 2 M_{\text{jup}}$  έχουν μεγαλύτερες διαμέσους για  $P < 60$  ημερών από τους SB και μικρότερους για  $P > 100$  ημερών. Οι κατανομές των διαμέσων παρά τις παραπάνω διαφορές φαίνονται να ακολουθούν η μία την άλλη τόσο μεταξύ SB και όλων των εξωπλανητών (δείκτης συσχέτισης ίσος με 0.87), όσο και των SB με τους εξωπλανήτες με  $M > 2 M_{\text{jup}}$ . Συνεπώς μπορούμε με επιφύλαξη να συμπεράνουμε ότι τα συστήματα εξωπλανητών - κεντρικών αστέρων είναι μία υποκατηγορία των διπλών αστρικών συστημάτων για μικρούς λόγους μαζών.



**Σχήμα 10.10** Κατανομή των εξωπλανητών και των SB στο διάγραμμα P - e. Οι γραμμές είναι οι διαμέσοι για τους εξωπλανήτες όλων των μαζών (πράσινη γραμμή), τους εξωπλανήτες με  $M > 2 M_{\text{Jup}}$  (κόκκινη γραμμή) και SB (μαύρη γραμμή).

## 11. Μεταλλικότητα

Οι αστέρες με πλανήτες φαίνεται να είναι ιδιαίτερα πλούσιοι σε μέταλλα συγκρινόμενοι με νάνους αστέρες χωρίς πλανήτες. Χρησιμοποιώντας ένα δείγμα 442 νάνων αστέρων της ηλιακής γειτονιάς χωρίς πλανήτες (*Geneva-Copenhagen Survey of Solar Neighborhood*, Holmberg et al. 2007), σχηματίζουμε το διάγραμμα αστρικής μάζας - μεταλλικότητας (Σχήμα 11.1).



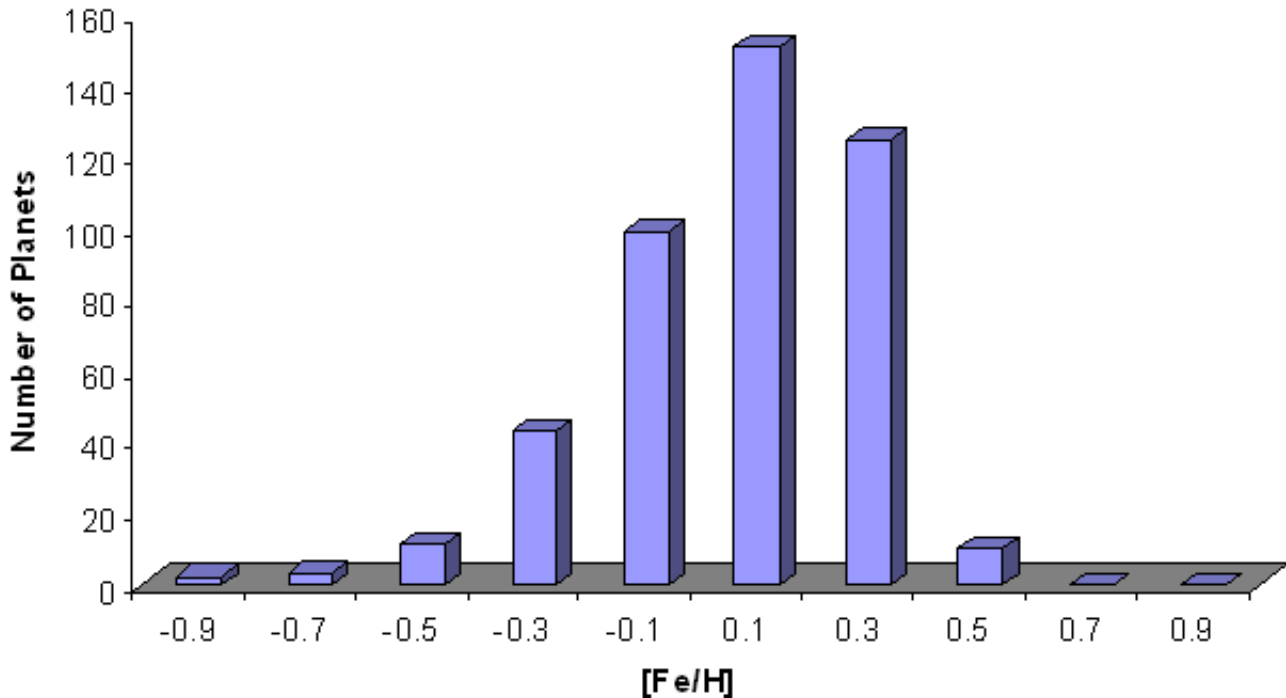
**Σχήμα 11.1** Διάγραμμα της μεταλλικότητας συναρτήσει της αστρικής μάζας για τους αστέρες με εξωπλανήτες (μαύροι κύκλοι) και για ένα δείγμα νάνων αστέρων της ηλιακής γειτονιάς (ανοιχτοί ρόμβοι).

Οι χωρίς πλανήτες αστέρες του δείγματος έχουν μέση μεταλλικότητα  $-0.17$ , ενώ οι αστέρες με εξωπλανήτες έχουν  $0.07$ . Το αποτέλεσμα αυτό μπορεί να είναι μία ένδειξη ότι η μεταλλικότητα αποτελεί το κλειδί για τη δημιουργία πλανητών (Santos et al. 2003).

Υπάρχουν διαφορετικές απόψεις για την πηγή αυτής της αφθονίας σε μέταλλα των αστέρων με πλανήτες. Μία θεωρία είναι ότι αυτή η υψηλή περιεκτικότητα σε μέταλλα μπορεί να έχει εξωτερική προέλευση, δηλαδή να είναι αποτέλεσμα της προσθήκης υλικού πλούσιου σε μέταλλα (φτωχού σε υδρογόνο) στο αγωγίμο περίβλημα του αστέρα, μια διαδικασία που μπορεί να προκύψει από τη διαδικασία του σχηματισμού των πλανητών αυτής καθεαυτής (Gonzalez 1998; Laughlin 2000; Gonzalez et al. 2001; Smith et al. 2001; Murray & Chaboyer 2002). Ενδείξεις πτώσης πλανητικού υλικού έχουν όντως ανιχνευθεί σε ορισμένους αστέρες με πλανήτες (Israelian et al. 2001; Laws & Gonzalez 2001), αν και το υλικό αυτό δεν είναι ικανό να αλλάξει σημαντικά την συνολική περιεκτικότητα σε μέταλλα (Sandquist et al. 2002). Παρόλα αυτά, οι ενδείξεις υποδεικνύουν ότι αυτή η αφθονία στη μεταλλικότητα των αστέρων με πλανήτες έχει πρωτογενή προέλευση (Pinsonneault et al. 2001; Santos et al. 2001a,b, 2002b). Αυτό σημαίνει ότι η περιεκτικότητα σε μέταλλα του νέφους από το οποίο θα προέλθει ο αστέρας και το πλανητικό σύστημα αποτελεί πραγματικά μία παράμετρο κλειδί για το σχηματισμό των γιγάντιων πλανητών.

Ενδιαφέροντα συμπεράσματα μπορούμε να πάρουμε και από την κατανομή των αστέρων με πλανήτες. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 11.2, η κατανομή ανεβαίνει με την μεταλλικότητα μέχρι περίπου την τιμή  $0.4$ , όπου και παρουσιάζεται ένα απότομο

κόψιμο. Το κόψιμο αυτό μπορεί να υποδεικνύει το προσεγγιστικό όριο της μεταλλικότητας των αστέρων της ηλιακής γειτονιάς (Santos et al. 2003).



Σχήμα 11.2 Κατανομή της μεταλλικότητας των αστέρων με γνωστούς εξωπλανήτες. Το  $d[Fe/H]$  ισούται με 0.2.

Το γεγονός ότι η πιθανότητα να σχηματιστεί ένας γίγαντας πλανήτης φαίνεται να εξαρτάται από τη μεταλλικότητα του αερίου από το οποίο προέρχονται ο αστέρας και το πλανητικό σύστημα, μπορεί να εξηγηθεί αν λάβουμε υπόψη ότι όσο μεγαλύτερη είναι η μεταλλικότητα (π.χ. η πυκνότητα της σκόνης στο δίσκο), τόσο μεγαλύτερη είναι η πιθανότητα να σχηματιστεί ένας πυρήνας προτού διαλυθεί ο δίσκος (Pollack et al. 1996; Kokubo & Ida 2002).

#### *Η πρωτογενής προέλευση ως η πιθανότερη εξήγηση*

Δύο είναι οι πιθανότερες εξηγήσεις για την αυξημένη μεταλλικότητα που παρατηρείται σε αστέρες με πλανήτες. Η μία είναι ότι η υψηλή περιεκτικότητα σε μέταλλα οφείλεται στην πώση πλανητικού υλικού στον αστέρα (Gonzalez 1998). Η άλλη υποστηρίζει ότι ο μηχανισμός σχηματισμού των πλανητών εξαρτάται από τη μεταλλικότητα του πρώτο-πλανητικού δίσκου, αφού σύμφωνα με τη θεωρία αυτή, ένας αέριος γίγαντας πλανήτης σχηματίζεται από την επαύξηση με αέριο ενός πλανητοειδούς μάζας περίπου  $10 M_{\text{earth}}$ . Όσο υψηλότερη είναι η μεταλλικότητα (και επομένως και ο αριθμός των σωματιδίων σκόνης) τόσο πιο γρήγορα μεγαλώνει το

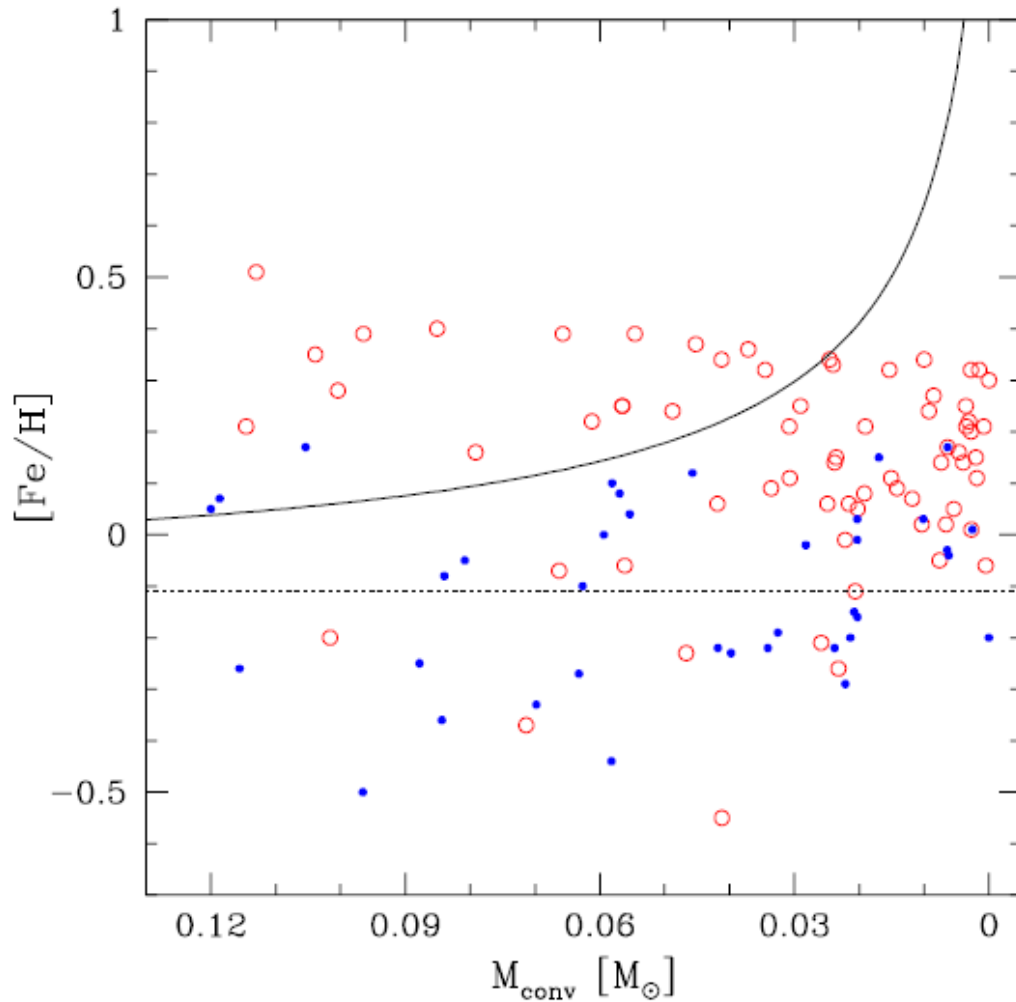
πλανητοειδές, και αυξάνεται η πιθανότητα να σχηματιστεί ένας γίγαντας πλανήτης πριν διαλυθεί ο δίσκος.

Μία τρίτη πιθανότητα είναι η μεταλλικότητα να ευνοεί το σχηματισμό εξωπλανητών με τροχιές πολύ κοντά στον κεντρικό αστέρα σε σύγκριση με τους γίγαντες πλανήτες του Ηλιακού μας συστήματος (Gonzalez 1998). Η ιδέα αυτή θα μπορούσε να ταιριάζει με τη θεωρία της πλανητικής μετανάστευσης λόγω αλληλεπίδρασης των γιγάντιων πλανητών με μία πληθώρα πλανητοειδών. Όσο μεγαλύτερη είναι η μεταλλικότητα, τόσο μεγαλύτερος θα είναι και ο αριθμός αυτών των μικρών σωμάτων, με αποτέλεσμα η μετανάστευση να είναι πιο αποτελεσματική. Παρόλα αυτά ο μηχανισμός μετανάστευσης φαίνεται να εξαρτάται και από άλλους παράγοντες, όπως ο χρόνος ζωής του δίσκου καθώς και η μάζα τόσο του αερίου του δίσκου όσο και των πλανητών.

Για να αποφασίσουμε ποιο από τα δύο παραπάνω σενάρια είναι το πιθανότερο, πρέπει να δούμε αν όντως η πτώση πλανητικού υλικού έχει παίξει καθοριστικό ρόλο στην αύξηση της περιεκτικότητας σε μέταλλα των αστέρων με πλανήτες. Για το λόγο αυτό πρέπει να μελετηθεί η εσωτερική δομή των αστέρων, αφού η πτώση υλικού στην επιφάνεια του αστέρα θα προκαλέσει διαφορετική αύξηση της μεταλλικότητας ανάλογα με το βάθος στο οποίο φτάνει το αγωγίμο περιβλήμα του αστέρα, όπου και λαμβάνει χώρα η ανάμιξη του υλικού (Laughlin 2000; Santos et al. 2000; Gonzalez et al. 2001; Pinsonneault et al. 2001; Santos et al. 2001a,b; Murray & Chaboyer 2002; Reid 2002).

Το Σχήμα 11.3 δείχνει το διάγραμμα της μεταλλικότητας των αστέρων με πλανήτες με επιφανειακή βαρύτητα μεγαλύτερη από  $10^{4.1}$ , ώστε να αποφευχθούν οι υπογίγαντες, συναρτήσει της μάζας του αγωγίμου περιβλήματός τους (ανοιχτοί κύκλοι), καθώς και ένα δείγμα αστέρων χωρίς πλανήτες (σημεία). Η διακεκομμένη γραμμή δείχνει τη μέση μεταλλικότητα των αστέρων χωρίς πλανήτες του δείγματος. Η καμπύλη γραμμή δείχνει το αποτέλεσμα της προσθήκης  $8 M_{\text{earth}}$  καθαρού σιδήρου στο αγωγίμο περιβλήμα των αστέρων με αρχική μεταλλικότητα ίση με τη μέση μεταλλικότητα του δείγματος των αστέρων χωρίς πλανήτες.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 11.3 δεν υπάρχει κάποια ιδιαίτερη τάση σε σύγκριση με ότι θα αναμενόταν, αν η αυξημένη μεταλλικότητα που παρατηρείται σε αστέρες με πλανήτες οφειλόταν κυρίως στην πτώση πλανητικού υλικού. Επίσης, δεν υπάρχουν αστέρες με πλανήτες που να έχουν μεταλλικότητα πάνω από 0.6 [Fe/H], κάτι που δεν θα έπρεπε να συμβαίνει, αν η πτώση πλανητικού υλικού ήταν η κύρια αιτία της αυξημένης μεταλλικότητας. Οι Pinsonneault et al. (2001) έδειξαν ότι το ίδιο αποτέλεσμα θα είχαμε και αν αντί για την  $M_{\text{conv}}$  χρησιμοποιήσουμε την  $T_{\text{eff}}$ , αφού η  $T_{\text{eff}}$  είναι άμεσα συνδεδεμένη με τη μάζα του αγωγίμου περιβλήματος. Επίσης, έδειξαν ότι κανένα άλλο μοντέλο μεταφοράς και διάχυσης δεν θα μπορούσε να επιβεβαιώσει το σενάριο της πτώσης πλανητικού υλικού σαν την πηγή της υψηλής μεταλλικότητας.



**Σχήμα 11.3** Διάγραμμα της μεταλλικότητας των αστέρων συναρτήσει της μάζας του αγωγίμου περιβλήματός τους. Οι ανοιχτοί κύκλοι αναπαριστούν αστέρες με πλανήτες, ενώ τα σημεία ένα δείγμα αστέρων χωρίς πλανήτες. Η διακεκομμένη γραμμή δείχνει τη μέση μεταλλικότητα του δείγματος αστέρων χωρίς πλανήτες και η καμπύλη γραμμή αποτελεί το αποτέλεσμα της προσθήκης  $8 M_{\text{earth}}$  καθαρού σιδήρου στο αγωγίμο περίβλημα των αστέρων με αρχική μεταλλικότητα ίση με την παραπάνω μέση μεταλλικότητα (Santos et al. 2003).

Η παραπάνω ανάλυση δείχνει ότι η υψηλή μεταλλικότητα των αστέρων με πλανήτες έχει πρωτογενή προέλευση. Υπάρχουν και αστέρες με πλανήτες με τιμές του  $\log g$  κάτω από  $10^{4.1}$  (πιθανόν να πρόκειται για εξελιγμένους αστέρες των οποίων το αγωγίμο περίβλημα φτάνει τόσο βαθειά, ώστε να έχει μειωθεί οποιοδήποτε πλεόνασμα μετάλλων που θα μπορούσε να υπάρχει αρχικά) με πολύ υψηλή μεταλλικότητα. Τα αποτελέσματα αυτά δείχνουν ότι η μεταλλικότητα πρέπει όντως να αποτελεί μία πολύ σημαντική παράμετρο για το σχηματισμό και την εξέλιξη των πλανητών.

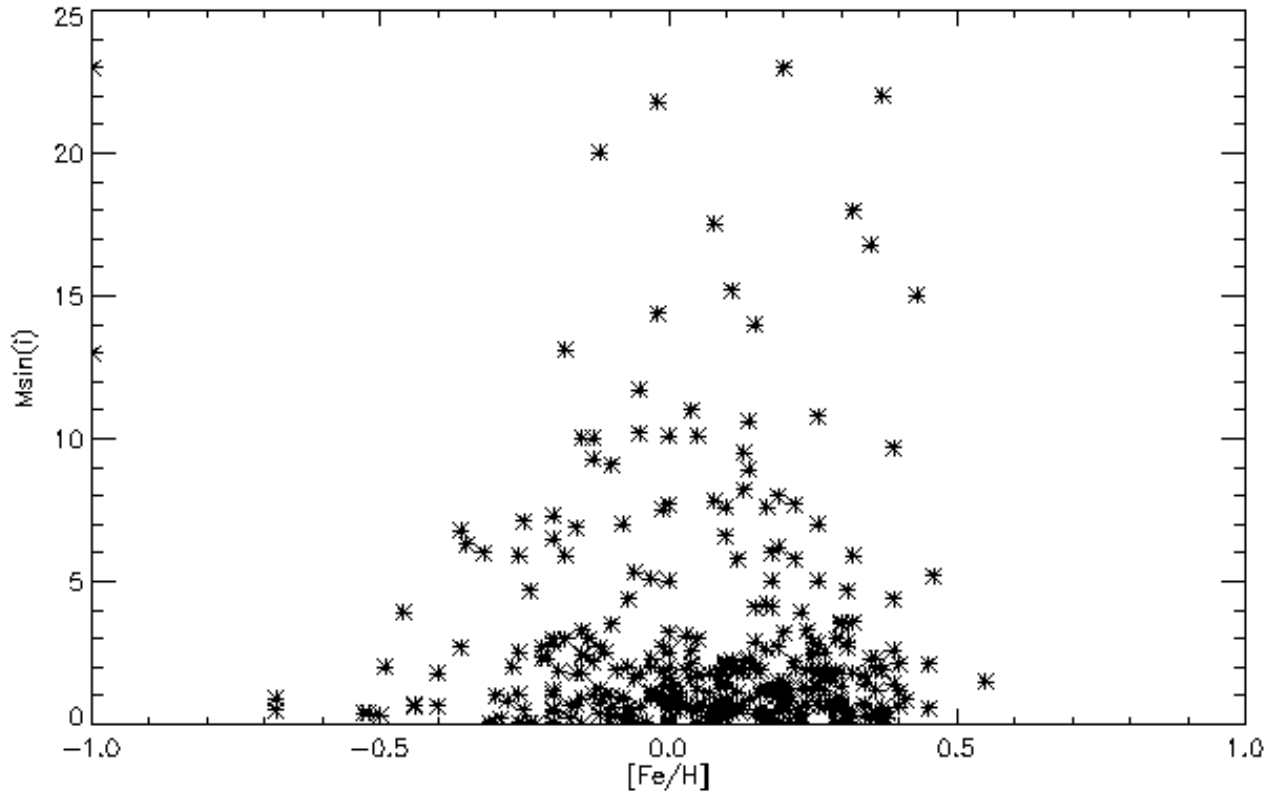
Μία εξήγηση για την απουσία ιχνών πτώσης πλανητικού υλικού είναι οι κλίμακες χρόνου του σχηματισμού των πλανητών. Παρατηρήσεις στο κοντινό υπέρυθρο υποδεικνύουν ότι οι πρωτο-πλανητικοί δίσκοι έχουν χρόνο ζωής μικρότερο από 10 Myr (Haisch et al. 2001). Υποθέτοντας ότι η εξαφάνιση του δίσκου στο κοντινό υπέρυθρο (δίσκος σκόνης) σημαίνει και εξαφάνιση του αερίου, τότε όλες οι διαδικασίες που συνδέονται με το σχηματισμό των μεγάλων πλανητών πρέπει να συμβούν πριν τα 10

Myr. Ακόμη και ένας αστέρας σαν τον Ήλιο, 10 Myr μετά τη δημιουργία του, έχει αγωγίμο περίβλημα μάζας περίπου  $0.3 M_{\odot}$ . Στην ακραία περίπτωση που όλο το στερεό υλικό από το δίσκο πέσει στον αστέρα (περίπου  $1M_{\text{Jup}}$  θεωρώντας δίσκο πολύ μεγάλης μάζας με αέριο και σκόνη μάζας  $\sim 0.1 M_{\odot}$ ) (Beckwith et al. 1990), και χωρίς να προστεθεί καθόλου H και He, η περιεκτικότητα σε σίδηρο θα αυξανόταν μόλις κατά  $\sim 10^{0.1}$ . Επομένως μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η πώση υλικού δεν μπορεί να συμβάλλει σημαντικά στην αύξηση της μεταλλικότητας. Το παραπάνω συμπέρασμα τονίζεται και από το γεγονός ότι οι αστέρες μεγάλης μάζας εξελίσσονται γρηγορότερα, με αποτέλεσμα να αποκτούν ένα ρηχό αγωγίμο περίβλημα νωρίτερα απ' ότι οι μικρότερης μάζας αστέρες.

Εντούτοις δεν πρέπει να αποκλειστεί ότι σε ορισμένες μεμονωμένες περιπτώσεις η πώση υλικού μπορεί να μεταβάλλει τη μεταλλικότητα (Gonzalez 1998; Smith et al. 2001; Israelian et al. 2001; Laws & Gonzalez 2001), αν και συνήθως δεν μπορεί να αλλάξει σημαντικά το συνολικό περιεχόμενο σε μέταλλα.

### **11.1 Μάζα πλανητών**

Σε αντίθεση με ότι αναμένεται από το σενάριο της δημιουργίας ενός πυρήνα λόγω της υψηλής μεταλλικότητας, ο Boss (2002) έδειξε ότι η πιθανότητα σχηματισμού ενός γίγαντα πλανήτη λόγω ασταθειών στο δίσκο είναι σχεδόν ανεξάρτητη της μεταλλικότητας. Παρόλα αυτά, στο Σχήμα 11.4 φαίνεται ότι οι αστέρες που έχουν πλανήτες με μεγάλες μάζες έχουν την τάση να είναι και πιο πλούσιοι σε μέταλλα. Εντούτοις, το γεγονός ότι η πιθανότητα σχηματισμού ενός πλανήτη φαίνεται να αυξάνεται με τη μεταλλικότητα, δε σημαίνει ότι δεν μπορούν να σχηματιστούν πλανήτες και σε περιβάλλοντα χαμηλής μεταλλικότητας. Αυτό οφείλεται κυρίως σε άγνωστες παραμέτρους, όπως η μάζα και ο χρόνος ζωής του πρωτο-πλανητικού δίσκου, που επίσης επηρεάζουν τον πλανητικό σχηματισμό. Επίσης, τα παραπάνω αποτελέσματα δεν αποκλείουν την ύπαρξη κάποιας σύνδεσης μεταξύ των δύο σεναρίων για τη δημιουργία πλανητών.



**Σχήμα 11.4** Διάγραμμα της μεταλλικότητας των αστέρων συναρτήσει της ελάχιστης πλανητικής μάζας για γνωστούς εξωπλανήτες. Στο παραπάνω διάγραμμα δεν έχουν συμπεριληφθεί πλανήτες που περιφέρονται γύρω από μέλη διπλών αστρικών συστημάτων.

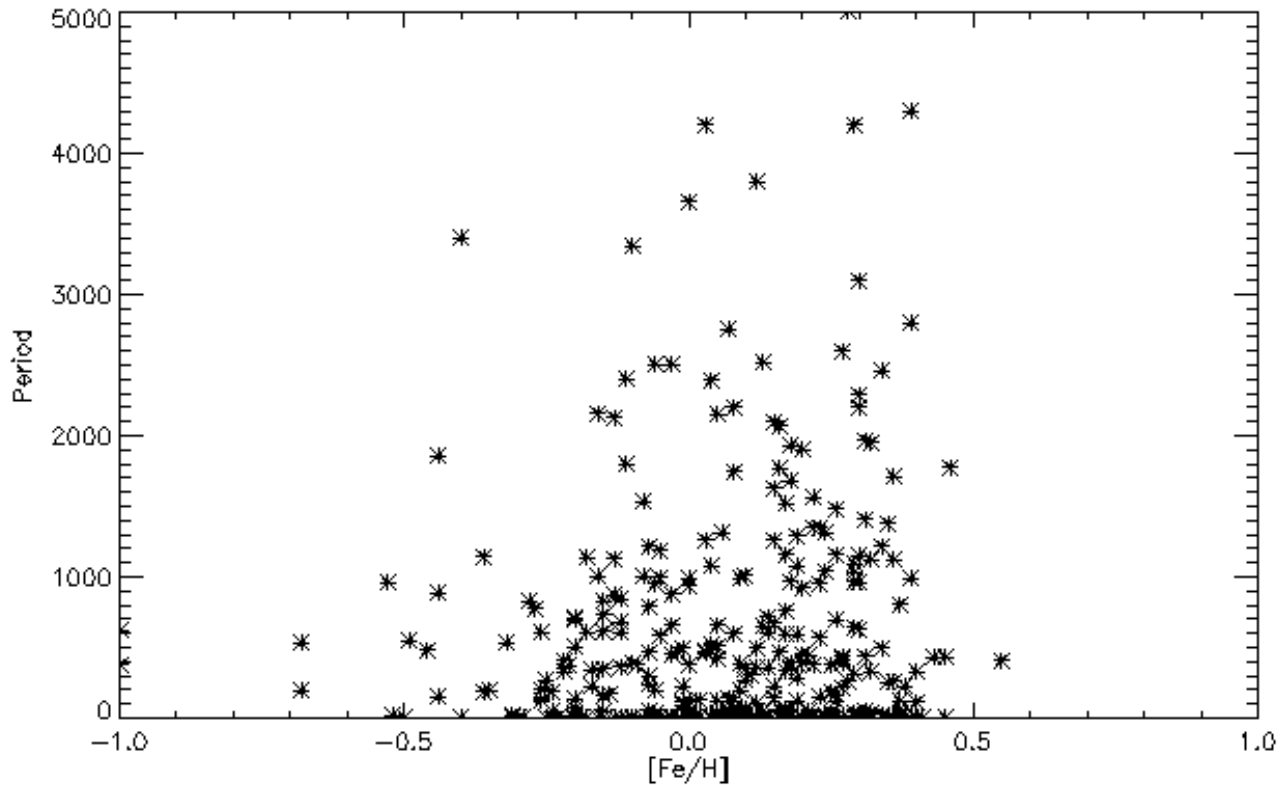
Αν επικεντρωθούμε στην περιοχή του διαγράμματος του Σχήματος 11.4, όπου  $M \sin(i) > 8 M_{\text{Jup}}$ , βλέπουμε ότι σχεδόν όλοι οι αστέρες έχουν μεταλλικότητες παρόμοιες ή μεγαλύτερες της ηλιακής. Η παραπάνω παρατήρηση μπορεί να είναι μία ένδειξη ότι για το σχηματισμό πλανητών πολύ μεγάλης μάζας ( $>8 M_{\text{Jup}}$ ) χρειαζόμαστε πλούσιους σε μέταλλα δίσκους. Αυτό οφείλεται στο χρόνο που χρειάζεται για να σχηματιστεί ένας πλανήτης πριν τη διάλυση του δίσκου. Αν δημιουργηθεί γρήγορα ένας πυρήνας λόγω της υψηλής μεταλλικότητας του δίσκου, θα υπάρχει πολύ χρόνος ώστε να αυξηθεί το αέριο γύρω του και να σχηματιστεί έτσι ένας γίγαντας πλανήτης.

## 11.2 Περίοδος

Σε αντίθεση με παλαιότερες μελέτες (Gonzalez 1998; Queloz et al. 2000; Santos et al. 2003) στις οποίες υπήρχαν ενδείξεις ότι οι αστέρες με πλανήτες με μικρές περιόδους περιφοράς ήταν πιο πλούσιοι σε μέταλλα, τα πρόσφατα δεδομένα δείχνουν το ακριβώς αντίθετο. Οι πλανήτες με περιόδους μεγαλύτερες των 2500 ημερών περιφέρονται γύρω από άστρα με μέση μεταλλικότητα 0.10, δηλαδή μεγαλύτερη από τη μέση μεταλλικότητα του συνόλου των αστέρων με πλανήτες (εξαιρούνται οι πλανήτες που περιφέρονται γύρω από μέλη διπλών αστρικών συστημάτων). Αντιθέτως, οι πλανήτες με περιόδους περιφοράς κάτω από 50 ημέρες έχουν μέση



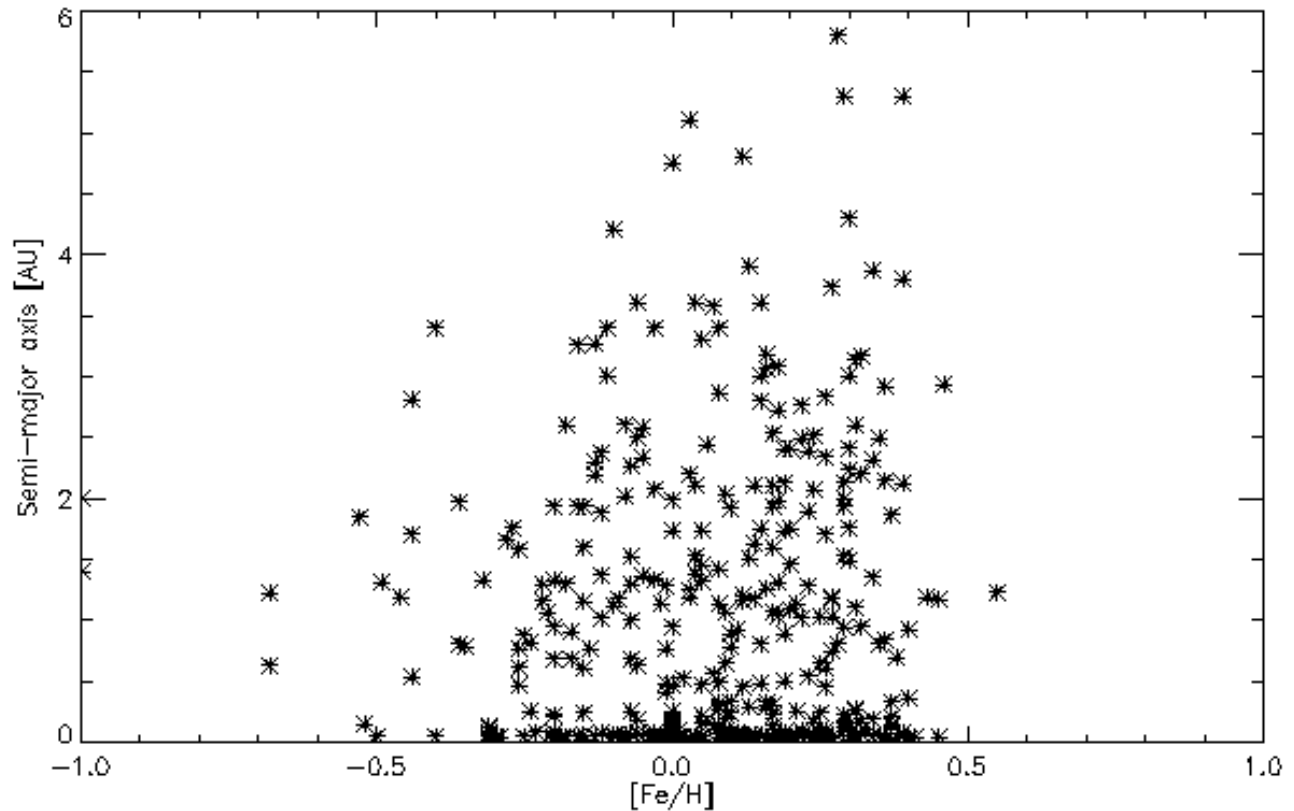
μεταλλικότητα 0.63. Το διάγραμμα της μεταλλικότητας συναρτήσει της περιόδου περιφοράς δίνεται στο Σχήμα 11.5.



**Σχήμα 11.5** Διάγραμμα της μεταλλικότητας των αστέρων συναρτήσει της περιόδου για γνωστούς εξωπλανήτες. Στο παραπάνω διάγραμμα δεν έχουν συμπεριληφθεί πλανήτες που περιφέρονται γύρω από μέλη διπλών αστρικών συστημάτων.

Η παραπάνω ιδιότητα των πλανητών με μεγάλες περιόδους περιφοράς, φαίνεται και στο διάγραμμα του μεγάλου ημιάξονα της τροχιάς συναρτήσει της μεταλλικότητας (Σχήμα 11.6). Οι πλανήτες με μεγάλους ημιάξονες μεγαλύτερους από 3.5 AU έχουν μέση μεταλλικότητα 0.17.

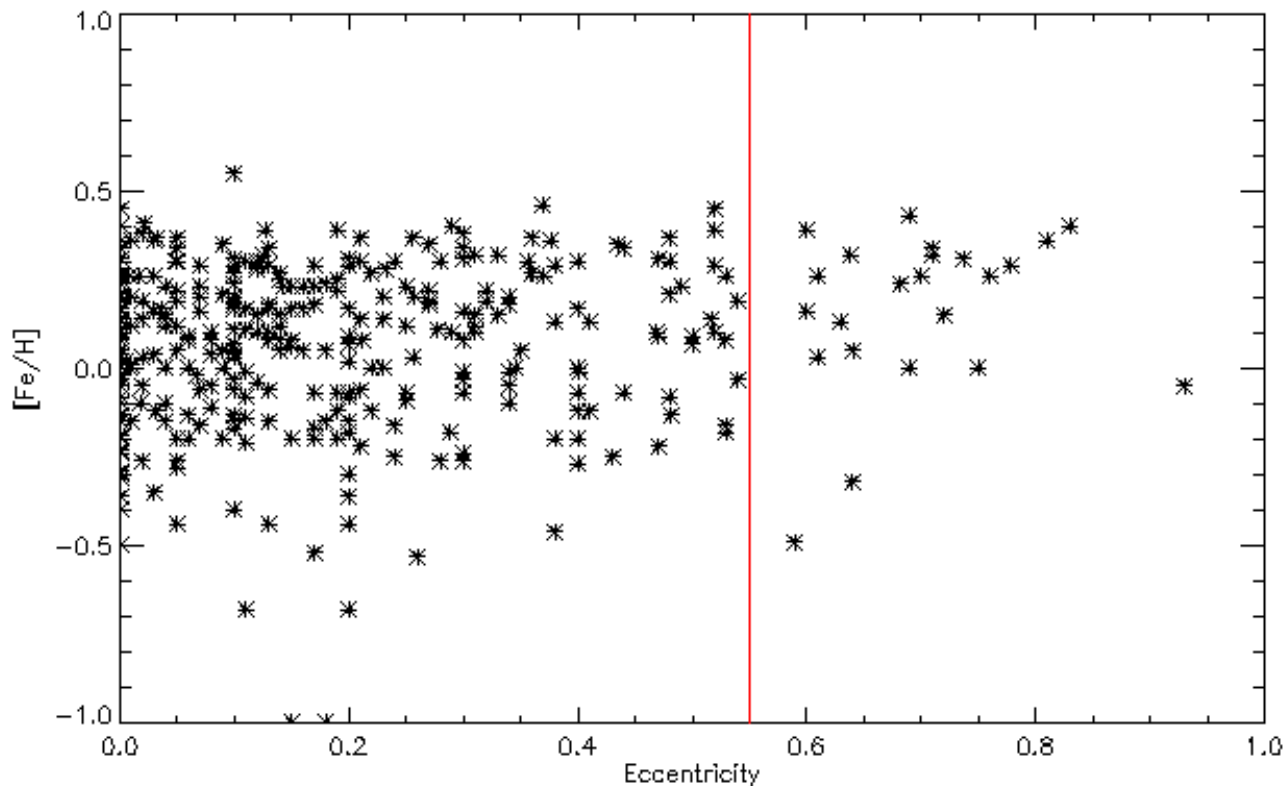
Παρ' όλες τις ενδείξεις, δεν φαίνεται να υπάρχει κάποια σαφής σχέση μεταξύ της περιόδου περιφοράς και της μεταλλικότητας, γεγονός που υποδεικνύει ότι οι μηχανισμοί μετανάστευσης πρέπει να είναι ανεξάρτητοι της ποσότητας των μετάλλων στο δίσκο. Το αποτέλεσμα αυτό ταιριάζει περισσότερο στο σενάριο που υποστηρίζει ότι η μετανάστευση των πλανητών γίνεται διαμέσου δίσκων αερίου (Goldreich & Tremaine 1980; Lin et al. 1996) παρά λόγω αλληλεπίδρασης με δίσκους πλανητοειδών (Murray et al. 1998).



**Σχήμα 11.6** Διάγραμμα της μεταλλικότητας των αστέρων συναρτήσει του μεγάλου ημιάξονα για γνωστούς εξωπλανήτες. Στο παραπάνω διάγραμμα δεν έχουν συμπεριληφθεί πλανήτες που περιφέρονται γύρω από μέλη διπλών αστρικών συστημάτων.

### 11.3 Εκκεντρότητα

Στο διάγραμμα της μεταλλικότητας συναρτήσει της εκκεντρότητας (Σχήμα 11.7) φαίνεται ότι οι αστέρες με πλανήτες που έχουν μεγάλες εκκεντρότητες είναι πιο πλούσιοι σε μέταλλα. Συγκεκριμένα, οι πλανήτες με εκκεντρότητες μεγαλύτερες από 0.55 περιφέρονται γύρω από αστέρες με μέση μεταλλικότητα 0.17 [Fe/H].



Σχήμα 11.7 Διάγραμμα της εκκεντρότητας των πλανητών συναρτήσει της μεταλλικότητας των αστέρων για γνωστούς εξωπλανήτες. Στο παραπάνω διάγραμμα δεν έχουν συμπεριληφθεί πλανήτες που περιφέρονται γύρω από μέλη διπλών αστρικών συστημάτων.

## 12. Αστρική Πολλαπλότητα

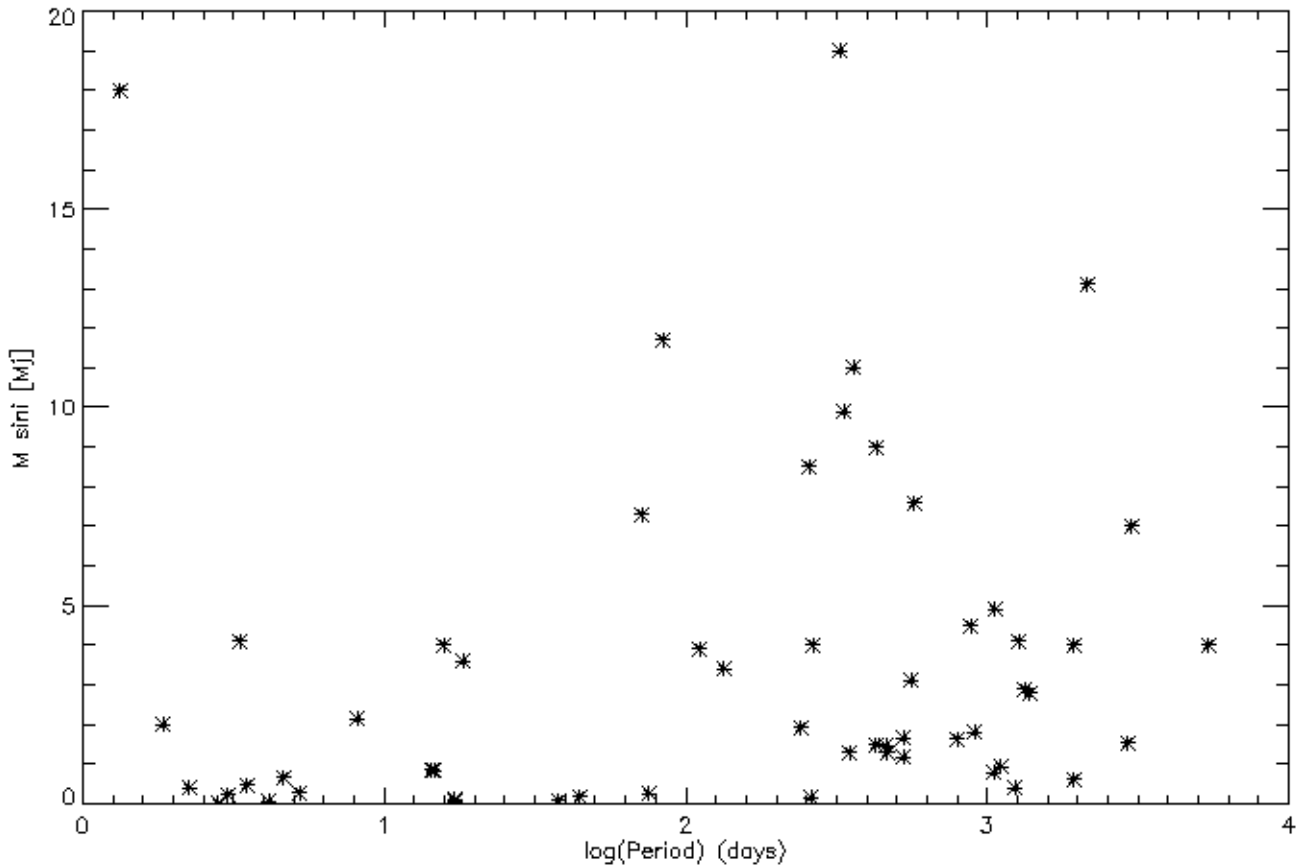
Μελέτες για την αστρική πολλαπλότητα σε αστέρες ηλιακού τύπου της ηλιακής γειτονιάς έχουν δείξει ότι περίπου το 40% των τύπου G και K νάνων αστέρων μπορούν να θεωρηθούν μεμονωμένοι αστέρες (Duquennoy & Mayor 1991). Εφόσον λοιπόν η πλειοψηφία των αστέρων ηλιακού τύπου ανήκουν σε διπλά ή πολλαπλά συστήματα αστέρων, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η ύπαρξη και η μελέτη εξωπλανητών σε τέτοια περιβάλλοντα. Ήδη έχουν ανακαλυφθεί 56 πλανήτες που περιφέρονται γύρω από αστέρες που ανήκουν σε πολλαπλό σύστημα. Ο μικρός αριθμός των εξωπλανητών αυτών σε σύγκριση με το σύνολο, οφείλεται εν μέρει στη χρήση της τεχνικής Doppler που κάνει την ανίχνευσή τους δύσκολη σε πολλαπλά συστήματα αστέρων.

### 12.1 Διάγραμμα Μάζας - Περίοδος

Το Σχήμα 12.1 δείχνει το διάγραμμα της ελάχιστης μάζας των εξωπλανητών που περιφέρονται γύρω από πολλαπλά συστήματα συναρτήσει του λογαρίθμου της

περιόδου. Στο διάγραμμα αυτό παρατηρούμε ότι δεν υπάρχουν πλανήτες με μάζα μεγαλύτερη από  $5 M_{\text{Jup}}$  με μικρές περιόδους περιφοράς (μικρότερες των 60 ημερών). Εξαιρέση αποτελεί ο πλανήτης HD 41004 B b. Η έλλειψη μεγάλης μάζας πλανητών σε τροχιές μικρής περιόδου δεν μπορεί να οφείλεται στις χρησιμοποιούμενες τεχνικές, αφού οι πλανήτες αυτοί είναι οι πιο εύκολα ανιχνεύσιμοι.

Για περιόδους μεγαλύτερες των 100 ημερών, η κατανομή των πλανητών που περιφέρονται γύρω από αστέρες που ανήκουν σε πολλαπλά συστήματα στο επίπεδο  $M \sin i - \log(\text{Period})$  δε φαίνεται να διαφέρει από αυτή των πλανητών που περιφέρονται γύρω από μεμονωμένους αστέρες.



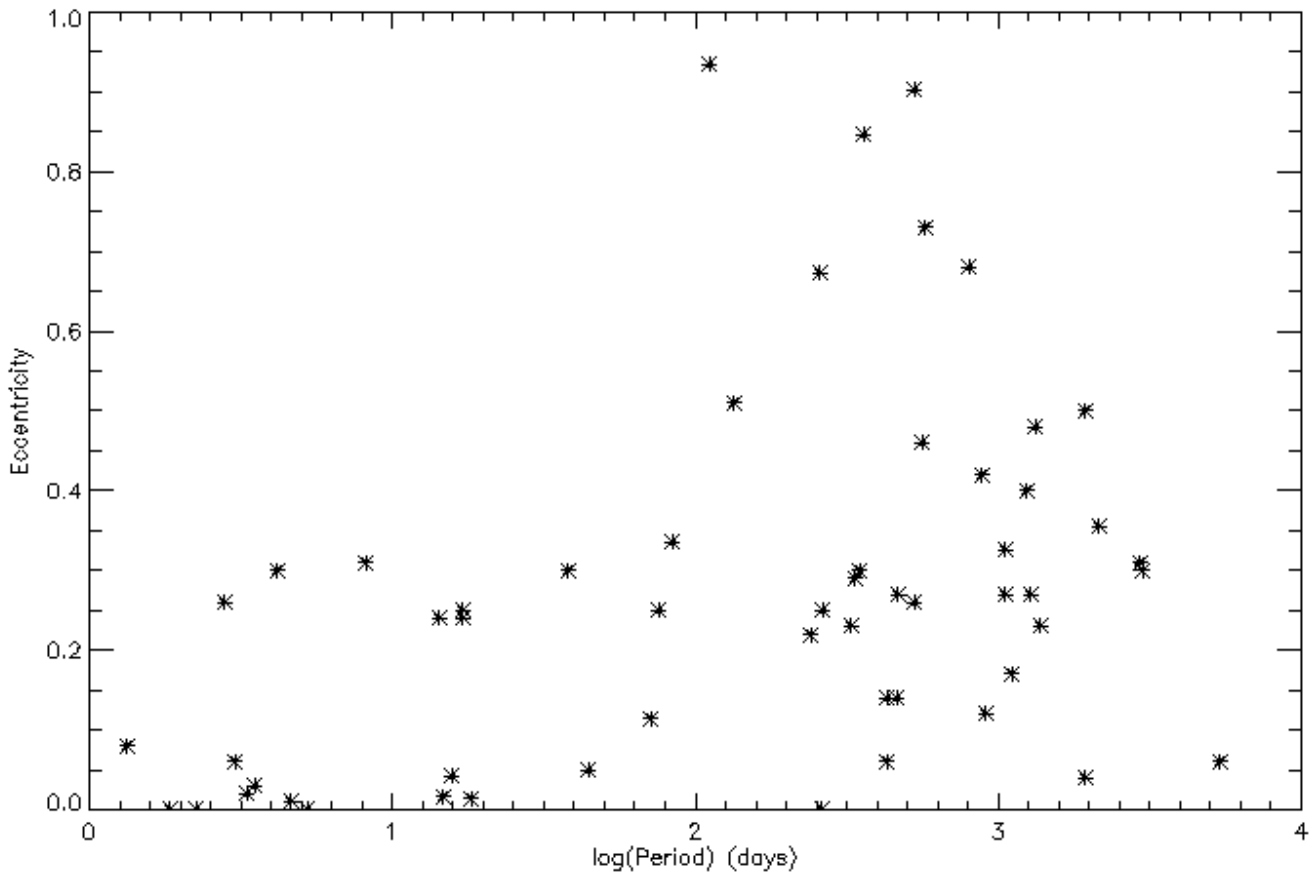
**Σχήμα 12.1** Διάγραμμα του λογαρίθμου της περιόδου των πλανητών που περιφέρονται γύρω από αστέρες που ανήκουν σε πολλαπλά συστήματα συναρτήσει της ελάχιστης μάζας τους.

## 12.2 Διάγραμμα Εκκεντρότητας - Περίοδου

Στο Σχήμα 12.2 φαίνεται το διάγραμμα της εκκεντρότητας των εξωπλανητών που περιφέρονται γύρω από πολλαπλά συστήματα συναρτήσει του λογαρίθμου της περιόδου. Παρατηρούμε ότι όλοι οι πλανήτες με περιόδους μικρότερες των 100 ημερών έχουν εκκεντρότητες κάτω από 0.35, ενώ οι πλανήτες με μεγαλύτερες περιόδους μπορούν να έχουν και πολύ μεγάλες εκκεντρότητες, κάτι που δεν παρατηρείται στους πλανήτες που περιφέρονται γύρω από μεμονωμένους αστέρες. Οι

μέσες τιμές της εκκεντρότητας, τόσο για περιόδους μεγαλύτερες των 100 ημερών όσο και για μικρότερες, είναι σχεδόν ίδιες για πλανήτες γύρω από μεμονωμένους αστέρες και για πλανήτες γύρω από πολλαπλά συστήματα (ελαφρώς αυξημένες για τη δεύτερη κατηγορία).

Για τα παραπάνω δύο διαγράμματα έχουν ληφθεί υπόψη όλοι οι πλανήτες, ακόμα και αυτοί που ανήκουν σε πολλαπλό πλανητικό σύστημα. Τα παραπάνω συμπεράσματα έχουν ελεγχθεί και παραμένουν ίδια ακόμα και αν αφαιρέσουμε τους πλανήτες αυτούς από το δείγμα.



**Σχήμα 12.2** Διάγραμμα του λογαρίθμου της περιόδου των πλανητών που περιφέρονται γύρω από αστέρες που ανήκουν σε πολλαπλά συστήματα συναρτήσει της εκκεντρότητας.

### *Μοντέλα σχηματισμού και εξέλιξης γιγάντων πλανητών σε διπλά συστήματα*

#### **1. Αλληλεπιδράσεις μεταξύ διπλού συστήματος και δίσκου**

Οι αστέρες που ανήκουν σε διπλά συστήματα αλληλεπιδρούν με τρεις τύπους δίσκων: δύο που βρίσκονται γύρω από τον κάθε αστέρα και έναν που βρίσκεται γύρω από το σύστημα. Μεταφορά στροφορμής μεταξύ του συστήματος και του δίσκου οδηγεί σε μείωση του εσωτερικού μέρους του δίσκου γύρω από το σύστημα και του εξωτερικού μέρους των δίσκων γύρω από τους αστέρες.

Οι Artymowicz & Lubow (1994) μελέτησαν τα προσεγγιστικά μεγέθη των δίσκων σαν συνάρτηση του λόγου μαζών του συστήματος και της εκκεντρότητας για συστήματα με δίσκους αερίων. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι για σύστημα με παράμετρο μάζας  $\mu = M_2/(M_1+M_2) = 0.3$ , το εσωτερικό άκρο του δίσκου γύρω από το σύστημα βρίσκεται σε απόσταση  $r_t = 2 a_b$  (όπου  $a_b$  είναι ο μεγάλος ημιάξονας του διπλού συστήματος) για σχεδόν κυκλικό σύστημα ( $e_b = 0$ ) και σε  $r_t = 3 a_b$  για  $e_b = 0.5$ . Το εξωτερικό άκρο του δίσκου γύρω από τον κύριο αστέρα του συστήματος βρίσκεται σε απόσταση  $r_t = 0.4 a_b$  για σχεδόν κυκλικό σύστημα και σε  $r_t = 0.18 a_b$  για  $e_b = 0.5$ , ενώ για τον συνοδό αστέρα σε απόσταση  $r_t = 0.27 a_b$  για σχεδόν κυκλικό σύστημα και σε  $r_t = 0.15 a_b$  για  $e_b = 0.4$ .

## 2. Μακράς διάρκειας ευστάθεια των τροχιών

Υποθέτοντας ότι πλανήτες μπορούν να σχηματιστούν σε διπλά συστήματα αστέρων, οι Holman & Wiegert (1999) μελέτησαν τη μακράς διάρκειας επιβίωση πλανητών σε διάφορες περιοχές του φασικού χώρου κοντά σε ένα διπλό αστρικό σύστημα. Πλανήτες τόσο γύρω από τον κύριο όσο και από το συνοδό αστέρα μελετήθηκαν για διάφορες τιμές εκκεντρότητας και λόγου μαζών του συστήματος. Για σύστημα με παράμετρο μάζας  $\mu = 0.3$ , η μεγαλύτερη σταθερή τροχιά γύρω από τον κύριο αστέρα έχει κρίσιμη τιμή για τον μεγάλο ημιάξονα  $r_c = 0.37 a_b$  για  $e_b = 0.0$  και  $r_c = 0.14 a_b$  για  $e_b = 0.5$ . Για το ίδιο σύστημα η μικρότερη τροχιά γύρω από το σύστημα έχει κρίσιμη τιμή για τον μεγάλο ημιάξονα  $r_c = 2.3 a_b$  για  $e_b = 0.0$  και  $r_c = 3.9 a_b$  για  $e_b = 0.5$ .

Η παραπάνω μελέτη των Holman & Wiegert αφορούσε πλανήτες που αρχικά βρίσκονταν σε κυκλική τροχιά. Οι Pilat-Lohinger & Dvorak (2002) διεύρυναν την ανάλυση αυτή, καθορίζοντας τη μεταβολή της ζώνης ευστάθειας εξαιτίας της αύξησης της αρχικής πλανητικής εκκεντρότητας. Αύξηση της εκκεντρότητας του πλανήτη προκαλεί μείωση της ζώνης ευστάθειας. Η μείωση αυτή είναι εντούτοις σαφώς μικρότερη από αυτή που θα προκαλούνταν λόγω της αύξησης της εκκεντρότητας του διπλού συστήματος.

Όπως έδειξαν οι Holman & Wiegert (1999) ένας συνοδός αστέρας που βρίσκεται σε τροχιά 5 φορές μεγαλύτερη από την απόσταση του πλανήτη δεν απειλεί τη μακράς διάρκειας ευστάθεια των πλανητικών τροχιών. Παρόλα αυτά, το αποτέλεσμα αυτό ισχύει μόνο για τροχιές που σχηματίζουν μικρή γωνία μεταξύ τους. Οι Innanen et al. (1997) μελέτησαν την ευστάθεια των πλανητικών τροχιών σε διπλά συστήματα δίνοντας έμφαση στην κλίση των τροχιακών επιπέδων. Σαν παράδειγμα μελέτησαν την ευστάθεια του ηλιακού συστήματος υπό την πίεση ενός υποθετικού μακρινού συνοδού αστέρα σε απόσταση 400 AU για διάφορες κλίσεις και μάζες. Εξαιτίας του μηχανισμού Kozai (Kozai 1962), το σύστημα είναι ασταθές για μεγάλες γωνίες κλίσης μεταξύ των τροχιακών επιπέδων (του αστέρα και των πλανητών), όταν ο συνοδός αστέρας έχει μάζα μεγαλύτερη από  $0.05 M_{\text{sun}}$ . Ωστόσο, ένας συνοδός αστέρας μικρής μάζας δεν αποσταθεροποιεί το σύστημα, ακόμα και για μεγάλες γωνίες κλίσης.

## 3. Σχηματισμός ενός γίγαντα πλανήτη σε διπλό αστρικό σύστημα

Δύο μηχανισμοί έχουν προταθεί για το σχηματισμό ενός γίγαντα πλανήτη: ο σχηματισμός και η προσαύξηση ενός πυρήνα και οι αστάθειες στο δίσκο (Pollack et al.

1996; Boss 1997; Mayer et al. 2002). Ο μηχανισμός σχηματισμού και προσαύξησης ενός πυρήνα ξεκινάει με τη σύγκρουση και συσσώρευση πλανητοειδών και πλανητικών εμβρύων σε ένα πρωτοπλανητικό δίσκο, όπως γίνεται στη δημιουργία των γήινων πλανητών. Στις εξωτερικές περιοχές του δίσκου, όπου η ποσότητα του στερεού υλικού αυξάνεται λόγω της παρουσίας πάγων, τα πλανητικά έμβρυα μπορούν να φτάσουν τις  $10 M_{\text{Earth}}$  σε περίπου  $10^6$  χρόνια και αρχίζει να δημιουργείται ατμόσφαιρα λόγω του δίσκου αερίων, ώστε να μπορέσει τελικά να σχηματιστεί ένας γίγαντας πλανήτη σαν το Δία και τον Κρόνο σε περίπου  $10^7$  χρόνια. Στο μοντέλο που βασίζεται στις αστάθειες του δίσκου, ένας βαρυτικά ασταθής δίσκος σπάει σε μάζες αερίου και σκόνης οι οποίες συνενώνονται με αποτέλεσμα το σχηματισμό των γιγάντιων αερίων πρωτοπλανητών. Η πήξη και η ιζηματοποίηση των κόκκων σκόνης στο κέντρο του πρωτοπλανήτη μπορεί να δημιουργήσει ένα στερεό πυρήνα. Η διαδικασία αυτή λαμβάνει χώρα σε μία δυναμική κλίμακα χρόνου: η δημιουργία των μαζών αερίου και σκόνης και η διαδικασία πήξης των κόκκων σκόνης συμβαίνουν σχεδόν ταυτόχρονα σε περίπου  $10^3$  χρόνια. Παρότι οι δύο παραπάνω μηχανισμοί διαφέρουν, έχουν ένα κοινό χαρακτηριστικό: οι γίγαντες πλανήτες μπορούν να σχηματιστούν μόνο στις σχετικά κρύες εξωτερικές περιοχές των πρωτοπλανητικών δίσκων.

Ο Boss (1998) μελέτησε την επίδραση ενός συνοδού αστέρα στο σχηματισμό ενός γίγαντα πλανήτη μέσω ασταθειών στο δίσκο. Τρισδιάστατα υδροδυναμικά μοντέλα δίσκων μάζας  $0.04 M_{\text{sun}}$  εξελίχθηκαν χρονικά, υποκείμενα στη βαρύτητα ενός συνοδού αστέρα τοποθετημένου σε κυκλική τροχιά σε απόσταση 40 AU. Από τον συνοδού αστέρα ο δίσκος είναι σταθερός, αλλά με την παρουσία του ο δίσκος σχηματίζει ένα πρωτοπλανήτη αρκετών μαζών Δία σε μόλις 0.002 Myr.

Η εξέλιξη των δύο αστέρων ενός διπλού αστρικού συστήματος, με τον κάθε αστέρα να περιβάλλεται από ένα δίσκο, προσομοιώθηκε από τον Nelson (2000). Ο κάθε αστέρας του συστήματος είχε μάζα  $0.5 M_{\text{sun}}$  και η εκκεντρότητα του συστήματος θεωρήθηκε ίση με 0.3. Η εξέλιξη του συστήματος μελετήθηκε για 2700 yr (8 τροχιές του συστήματος). Κατά τη διάρκεια και λίγο μετά από το περίατρο κάθε δίσκος αναπτύσσει σπειροειδείς δομές με δύο βραχίονες οι οποίες εξασθενούσαν στο επόμενο μισό της περιόδου του συστήματος. Ο κύκλος αυτός επαναλαμβανόταν με μικρές διακυμάνσεις. Η εξασθένηση των σπειροειδών δομών οφείλεται σε εσωτερική θέρμανση των δίσκων η οποία αυξάνει τη σταθερότητά του ενάντια στην αύξηση των βραχιόνων της σπείρας. Ο σχηματισμός ενός γίγαντα πλανήτη εξαιτίας βαρυτικής κατάρρευσης είναι επομένως αδύνατον να συμβεί σε ένα τέτοιο σύστημα, αφού οι θερμοκρασίες στους δίσκους είναι τόσο υψηλές που ορισμένα είδη κόκκων, συμπεριλαμβανομένων των πάγων, έχουν εξατμιστεί παντού. Η δημιουργία ενός γίγαντα πλανήτη μέσω του μηχανισμού σχηματισμού ενός πυρήνα είναι επομένως επίσης αδύνατη σε ένα τέτοιο διπλό αστρικό σύστημα.

#### 4. Η εξέλιξη ενός πλανήτη σε ένα διπλό αστρικό σύστημα

Ο Kley (2001) μελέτησε την εξέλιξη ενός γίγαντα πλανήτη ο οποίος βρίσκεται ακόμη μέσα στον πρωτοπλανητικό δίσκο γύρω από τον κύριο αστέρα ενός διπλού αστρικού συστήματος. Ένας πλανήτη  $1 M_{\text{Jup}}$  τοποθετήθηκε σε κυκλική τροχιά σε απόσταση 5.2 AU από τον αστέρα μάζας  $1 M_{\text{sun}}$ . Ο συνοδός αστέρας είχε μάζα  $0.5 M_{\text{sun}}$  και εκκεντρότητα 0.5. Ο ημιάξονας του συστήματος κομηνόταν από 50 έως 100 AU. Οι

προσομοιώσεις έδειξαν ότι ο συνοδός αστέρας μεταβάλλει τις εξελικτικές ιδιότητες του πλανήτη: ο ρυθμός προσαύξησης μάζας αυξάνεται, ενώ ο χρόνος της προς τα μέσα μετανάστευσης του πλανήτη μειώνεται. Επίσης, μεταβάλλεται η πλανητική εκκεντρότητα: αρχικά αυξάνεται λόγω διαταραχών που οφείλονται στο συνοδό αστέρα και στη συνέχεια μειώνεται λόγω αλληλεπίδρασης με το δίσκο. Το τελικό αποτέλεσμα είναι η γρήγορη μείωση του ημιάξονα της πλανητικής τροχιάς και η απόσβεση της αρχικής εκκεντρότητας.

### 13. Διάγραμμα μάζας - ακτίνας

Λόγω της φύσης της μεθόδου Doppler, μόνο οι τροχιακές παράμετροι και το ελάχιστο όριο της πλανητικής μάζας προκύπτουν από τις φασματοσκοπικές μετρήσεις. Αυστηρότεροι περιορισμοί για τα πλανητικά μοντέλα μπαίνουν από παρατηρήσεις της διάβασης των πλανητών μπροστά από τον κεντρικό αστέρα. Ο συνδυασμός των μετρήσεων των ακτινικών ταχυτήτων με τις παραπάνω παρατηρήσεις μπορεί να δώσει τη μάζα με ακρίβεια, ακτίνα και μέση πυκνότητα του πλανήτη, αποδεικνύοντας την αέρια ή στερεή φύση του και παρέχοντας περιορισμούς για την εσωτερική πλανητική δομή (Udry et al. 2007). Μέχρι σήμερα έχουν παρατηρηθεί 117 διαβάσεις πλανητών. Τα αντικείμενα αυτά μας επιτρέπουν τη σχεδίαση του διαγράμματος μάζας - ακτίνας (Σχήμα 13.1), δίνοντάς μας ένα ισχυρό εργαλείο για τη μελέτη των θεωριών περί της πλανητικής δομής.

Στο διάγραμμα του λογαρίθμου της πλανητικής μάζας συναρτήσει της πλανητικής ακτίνας παρατηρούμε ότι για μάζες μικρότερες από  $0.4 M_{\text{Jup}}$  και ακτίνες μικρότερες από  $0.9 r_{\text{Jup}}$  φαίνεται να υπάρχει κάποια γραμμική σχέση. Στο Σχήμα 13.2 εστιάζουμε στην παραπάνω περιοχή του διαγράμματος. Ο δείκτης συσχέτισης των δύο μεγεθών στην περιοχή αυτή είναι 0.88. Η σχέση που συνδέει τα δύο μεγέθη είναι:

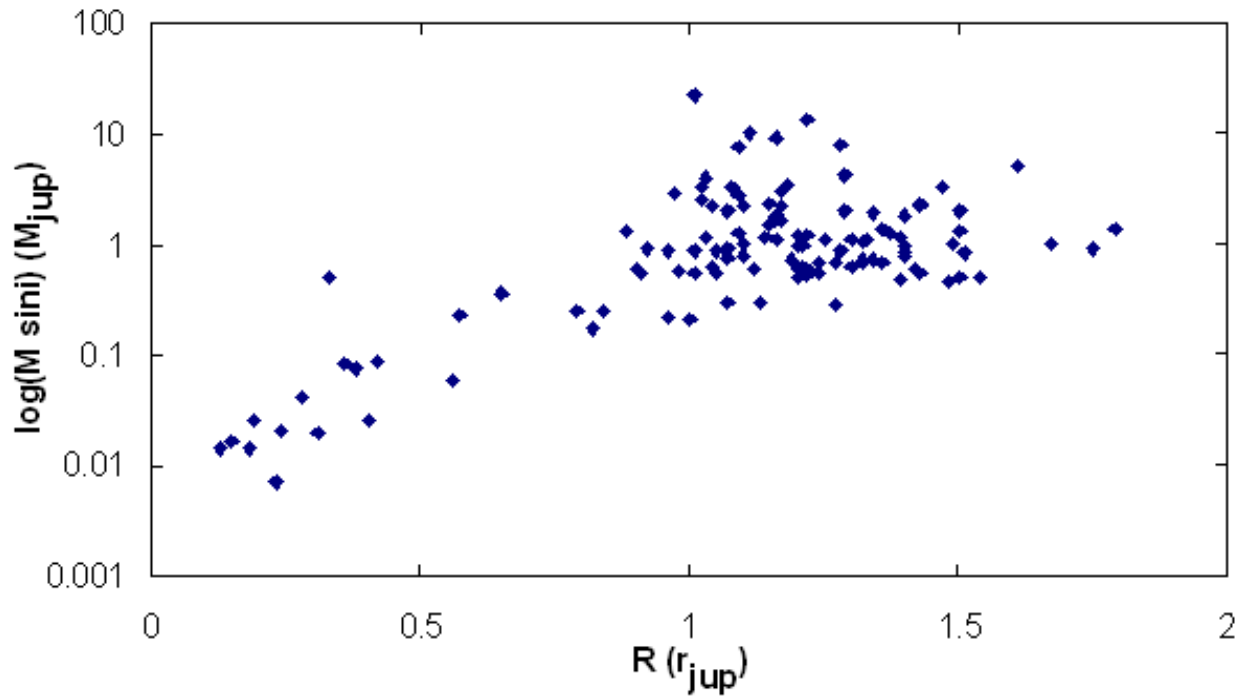
$$\log(M \sin i) = 1.945 * r - 2.1035 \quad (13.1)$$

Βάζοντας την ακτίνα της Γης στην παραπάνω εξίσωση παίρνουμε τιμή για τη μάζα της περίπου 2.5 φορές μεγαλύτερη από την πραγματική. Για το Ηλιακό σύστημα (Σχήμα 13.3) η σχέση που συνδέει τα δύο μεγέθη είναι:

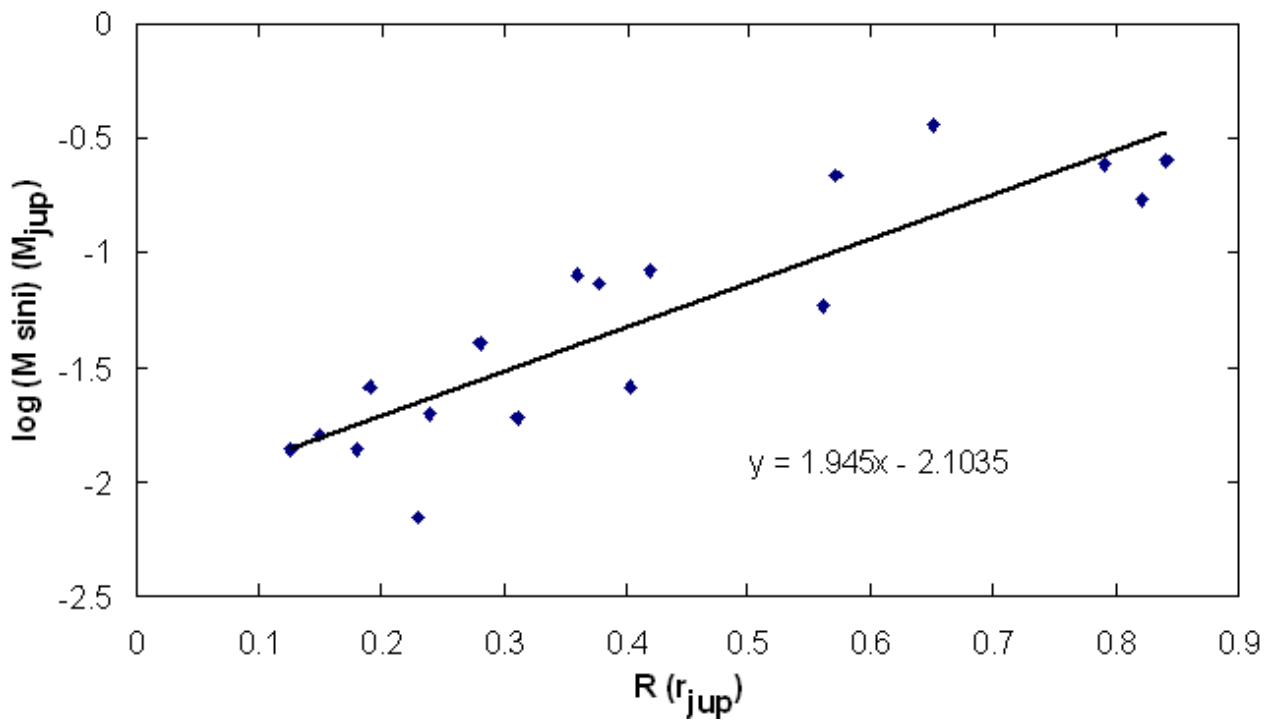
$$M = 0.6848 r^{2.4005} \quad (13.2)$$

Αν βάλουμε την ακτίνα της Γης στην εξίσωση αυτή παίρνουμε τιμή για τη μάζα της Γης ίση με  $0.66 M_{\text{earth}}$ . Βλέπουμε επομένως ότι δεν υπάρχει συγκεκριμένη σχέση που να συνδέει τη μάζα με την ακτίνα που να είναι καθολική για όλα τα πλανητικά συστήματα. Αν βάλουμε τα όρια  $M < 0.4 M_{\text{Jup}}$  και  $r < 0.9 r_{\text{Jup}}$  η σχέση (13.2) θα παρέμενε σχεδόν η ίδια, αφού ο μόνος πλανήτης του Ηλιακού συστήματος που βρίσκεται έξω από αυτά τα όρια είναι ο Δίας.

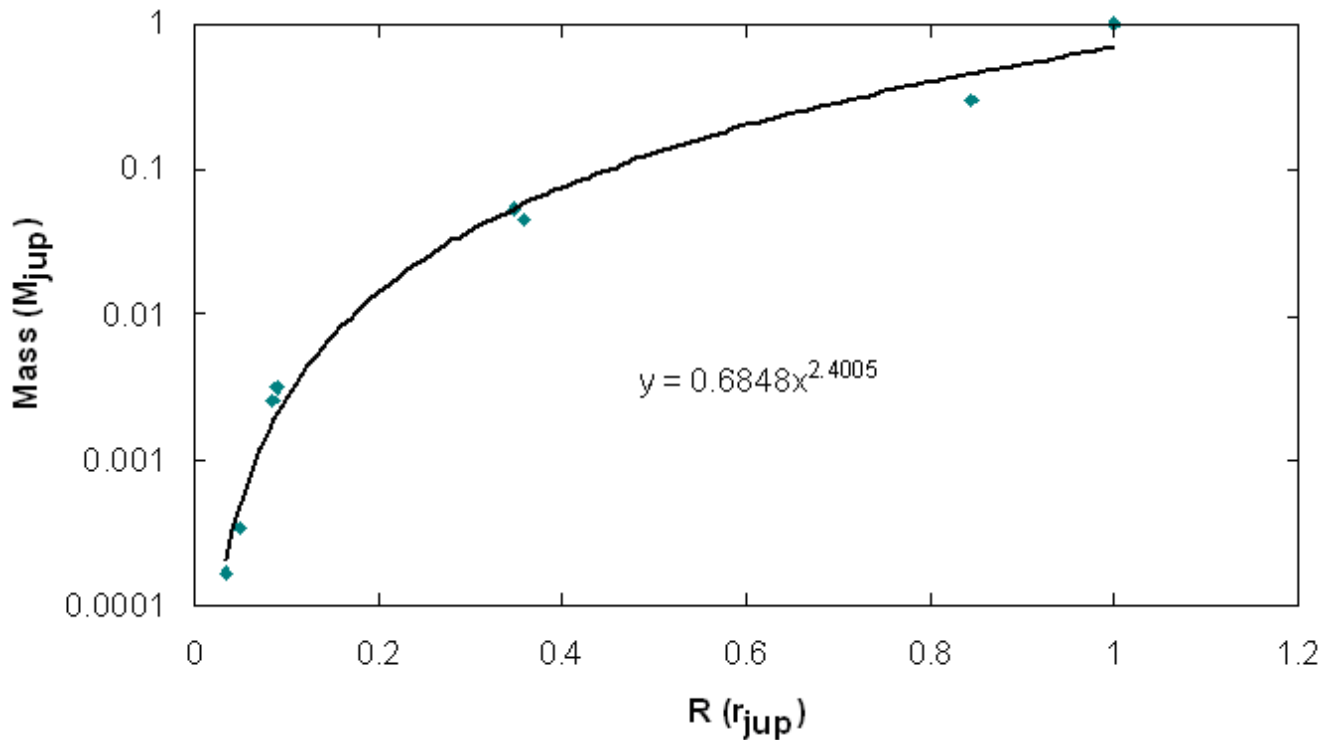




Σχήμα 13.1 Διάγραμμα μάζας - ακτίνας για τους εξωπλανήτες που έχουν παρατηρηθεί με τη μέθοδο της διάβασης.



Σχήμα 13.2 Διάγραμμα μάζας - ακτίνας για τους εξωπλανήτες που έχουν παρατηρηθεί με τη μέθοδο της διάβασης με  $M < 0.4 M_{\text{jup}}$  και  $r < 0.9 r_{\text{jup}}$ .



**Σχήμα 13.3** Διάγραμμα μάζας - ακτίνας των πλανητών του Ηλιακού συστήματος.

Παρατηρούμε ότι ένα μεγάλο ποσοστό των εξωπλανητών που έχουν παρατηρηθεί και με τη μέθοδο της διάβασης έχουν πολύ μεγάλες ακτίνες. Διάφορες ιδέες έχουν προταθεί προκειμένου να εξηγήσουν την παραπάνω ιδιότητα, αλλά καμία από αυτές δεν έχει έως τώρα την πλήρη αποδοχή της επιστημονικής κοινότητας.

### 1. Ατμοσφαιρική κυκλοφορία

Οι πλανήτες που βρίσκονται πολύ κοντά στον κεντρικό αστέρα δέχονται ένα μεγάλο ποσό ενέργειας από αυτόν. Η θέρμανση των εξωτερικών στρωμάτων του πλανήτη επηρεάζει την κάθετη συνιστώσα της θερμοκρασίας και κατά συνέπεια την εξέλιξη του πλανήτη και επομένως και την ακτίνα του. Η παραπάνω επίδραση του αστέρα δεν μπορεί ωστόσο να εξηγήσει τις παρατηρούμενες ακτίνες που είναι μεγαλύτερες από  $1.2 R_{jup}$ . Η ακτινοβολία μπορεί επίσης να μεταβάλλει και την οριζόντια συνιστώσα της θερμοκρασίας. Αν το ένα ημισφαίριο του πλανήτη είναι στραμμένο πάντα προς τον αστέρα, λόγω παλιρροϊκών αλληλεπιδράσεων, και δέχεται συνεχώς αστρική ακτινοβολία, μπορεί να προκύψουν μεγάλες διαφορές θερμοκρασίας μεταξύ της ημερήσιας και της νυχτερινής πλευράς του πλανήτη και να προκληθεί ταχεία ατμοσφαιρική κυκλοφορία (Heng et al. 2011). Οι γρήγοροι άνεμοι που προκύπτουν μπορεί να παράγουν ένα μηχανισμό θέρμανσης στο εσωτερικό του πλανήτη, επιβραδύνοντας την εξέλιξη του με αποτέλεσμα μία μεγαλύτερη από την αναμενόμενη ακτίνα. Η πρόταση αυτή στηρίχτηκε σε αριθμητικές προσομοιώσεις της ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας από τους Showman και Guillot (2002), οι οποίες παράγουν μία προς τα κάτω ροή κινητικής ενέργειας σε ένα ποσοστό περίπου 1% της απορροφούμενης αστρικής ροής. Αυτή η ροή θερμότητας υποτίθεται ότι διαχέεται βαθιά στο εσωτερικό του πλανήτη, παράγοντας έτσι μία επιπλέον πηγή ενέργειας κατά τη διάρκεια της

εξέλιξής του. Σύμφωνα με τις προσομοιώσεις αυτές, ο μηχανισμός αυτός επιφέρει ένα τυπικό ρυθμό θέρμανσης της τάξης των  $10^{27}$  erg/s, ο οποίος εξηγεί τη μεγάλη ακτίνα αυτών των θερμών γιγάντων (Guillot et al. 2002; Chabrier et al. 2004). Ωστόσο η ισχύς αυτού του σεναρίου αμφισβητείται. Η σημαντική μεταφορά κινητικής ενέργειας που βρέθηκε στις παραπάνω προσομοιώσεις εξαρτάται από τις λεπτομέρειες των μοντέλων ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας και δεν έχει επιβεβαιωθεί από άλλες προσομοιώσεις (Burkert et al. 2005).

## 2. Παλιρροϊκές αλληλεπιδράσεις

Πολλές μελέτες έχουν προτείνει την παλιρροϊκή θέρμανση σαν ένα πιθανό μηχανισμό για να εξηγηθούν οι μεγάλης ακτίνας πλανήτες που έχουν παρατηρηθεί. Ένας ρυθμός θέρμανσης της τάξης των  $10^{27}$  erg/s διαχεόμενη στο αγωγίμο εσωτερικό του πλανήτη σε κατάλληλες κλίμακες χρόνου θα μπορούσε να εξηγήσει τις παρατηρούμενες μεγάλες ακτίνες, τουλάχιστον για πλανήτες χωρίς πυρήνα. Ο ρυθμός αυτός συνάδει με το ρυθμό παλιρροϊκής διάχυσης:

$$\frac{dE_{tide}}{dt} = -\frac{21}{2} \frac{G^{3/2} M_*^{5/2}}{Q_p'} \left( \frac{R_p^5}{a^{15/2}} \right) e^2 \approx -5.2 \times 10^{27} \left( \frac{10^6}{Q_p'} \right) \left( \frac{M_*}{M_{sun}} \right)^{5/2} \frac{(R_p / R_{jup})^5}{(a / 0.05 AU)^{15/2}} e^2 \text{ erg / s} \quad (13.3)$$

όπου  $M_*$  είναι η μάζα του αστέρα,  $R_p$  η ακτίνα του πλανήτη,  $a$  ο ημιάξονας της τροχιάς,  $e$  η εκκεντρότητα,  $Q_p' = Q_p / k$ , όπου  $Q_p$  είναι ο παράγοντας παλιρροϊκής ποιότητας που ορίζεται σαν ο λόγος της μέγιστης δυναμικής ενέργειας που αποθηκεύεται λόγω της παλιρροϊκής παραμόρφωσης προς την ενέργεια που διαχέεται σε κάθε παλιρροϊκή περίοδο και  $k$  ο όρος δεύτερης τάξης του αριθμού Love, χαρακτηριστικός της παραμόρφωσης του σώματος ( $k_{sun} \approx 0.02$  και  $k_{jup} \approx 0.38$ ).

Η παρουσία ενός κεντρικού πυρήνα έχει ως αποτέλεσμα μία μικρότερη ακτίνα και επομένως απαιτείται μεγαλύτερος ρυθμός ενέργειας. Οι πρώτοι υπολογισμοί για τη διερεύνηση της επίδρασης της παλιρροϊκής διάχυσης (Bodenheimer et al. 2001) βασίστηκαν σε λανθασμένες κλίμακες χρόνου παλιρροϊκής εξέλιξης και υπέθεταν σταθερές τροχιακές ιδιότητες στο χρόνο. Η σωστή επίπτωση της παλιρροϊκής διάχυσης στην ακτίνα ενός πλανήτη ανάλογα με τον αρχικό ημιάξονα της τροχιάς και την εκκεντρότητα, και λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση της μείωσής τους κατά τη διάρκεια της εξέλιξης, μελετήθηκε πρόσφατα (Jackson et al. 2008; Ibgui et al. 2009; Miller et al. 2009). Σε ορισμένες περιπτώσεις αυτή η πηγή θέρμανσης βρέθηκε να είναι σημαντική, επηρεάζοντας πιθανόν τη συστολή του πλανήτη, υποθέτοντας ότι η παλιρροϊκή διάχυση λαμβάνει χώρα βαθιά στο αγωγίμο εσωτερικό του πλανήτη. Ωστόσο η παλιρροϊκή θέρμανση λόγω της πεπερασμένης εκκεντρότητας δεν φαίνεται να είναι ο κύριος μηχανισμός που είναι υπεύθυνος για όλες τις παρατηρούμενες μεγάλες ακτίνες.

## 3. Μεγάλη ατμοσφαιρική αδιαφάνεια

Ένας πιθανός μηχανισμός για να επιβραδυνθεί η συστολή ενός σώματος και να διατηρήσει επομένως μία μεγάλη ακτίνα σε συγκεκριμένη ηλικία είναι η αύξηση της ατμοσφαιρικής αδιαφάνειας (Burrows et al. 2007). Η μεταβολή των ατμοσφαιρικών ιδιοτήτων (σύσταση, νέφη, αδιαφάνεια) εξαιτίας ισχυρής οπτικής και υπεριώδους ακτινοβολίας ή ατμόσφαιρες πλούσιες σε μέταλλα έχουν προταθεί σαν πηγή της

αυξημένης αδιαφάνειας. Για να μελετηθούν οι υψηλές αδιαφάνειες, έχουν υποθεθεί ατμοσφαιρικές μεταλλικότητες αρκετά μεγαλύτερες της ηλιακής. Ο συνδυασμός των επιπτώσεων των μεγάλων αδιαφανειών και της παρουσίας ενός πυκνού πυρήνα μπορεί να δικαιολογήσει τη διασπορά των παρατηρούμενων ακτίνων του Σχήματος 13.1. Αν και οι υψηλές ατμοσφαιρικές μεταλλικότητες των εξωπλανητών που δέχονται ακτινοβολία δεν μπορούν να αποκλειστούν, δεδομένων των περιορισμένων γνώσεων πάνω στις διάφορες διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα σε τέτοιες περιπτώσεις, τα αποτελέσματα των Burrows et al. (2007) αμφισβητούνται. Από παρόμοιους υπολογισμούς του Guillot (2008) προκύπτει μικρότερη ακτίνα για τον πλανήτη, καθώς το μεγαλύτερο μέσο μοριακό βάρος λόγω της αυξημένης μεταλλικότητας αντισταθμίζει ή και υπερτερεί της επιβράδυνσης της συστολής λόγω της αύξησης της αδιαφάνειας. Οι πλανήτες που δέχονται ακτινοβολία είναι ακτινοβολιακά ευσταθείς μέχρι τα κατώτερα στρώματα. Προκειμένου να διατηρηθούν ψηλά τα βαριά στοιχεία σε αυτά τα ευσταθή στρώματα απαιτείται ένας μηχανισμός που θα αντισταθμίσει τη βαρύτητα. Επομένως, ακόμα και τα μοντέλα που υποθέτουν μεταλλικότητες πολύ μεγαλύτερες της ηλιακής, δεν μπορούν να εξηγήσουν τις πολύ μεγάλες παρατηρούμενες ακτίνες κάποιων πλανητών, υποδεικνύοντας την ανάγκη για την εύρεση άλλων μηχανισμών.

#### 4. Μειωμένη μεταφορά θερμότητας στο εσωτερικό

Η ιδέα του Stevenson, ότι η αγωγιμότητα δεν είναι τόσο αποδοτική όσο συνήθως υποτίθεται για τα εσωτερικά των πλανητών, εφαρμόστηκε στην περίπτωση των εξωπλανητών από τους Chabrier και Baraffe (2007). Έδειξαν ότι οι συνθήκες που επικρατούν στα εσωτερικά των γιγάντων πλανητών μπορούν να ευνοήσουν την ανάπτυξη πολλαπλών λεπτών στρωμάτων διάχυσης που περιβάλλονται από μικρής κλίμακας αγωγίμες περιοχές, αν το μοριακό βάρος αλλάζει καθ' ύψος. Η παρουσία μιας βαθμίδας μοριακού βάρους στο εσωτερικό των πλανητών θα μπορούσε να προκύψει από τη διαδικασία σχηματισμού, κατά τη διάρκεια της συσσώρευσης αερίου και πλανητοειδών, ή λόγω της διάβρωσης του πυρήνα. Υποθέτοντας μία βαθμίδα μοριακού βάρους στις εσωτερικές περιοχές πλανητών σαν τον Δία, οι Chabrier και Baraffe (2007) έδειξαν ότι, αν πολλαπλά στρώματα μπορούν να δημιουργηθούν, ίσως επιβιώσουν για αρκετό διάστημα ώστε να επηρεάσουν την εξέλιξη του πλανήτη. Η μεταφορά θερμότητας σε αγωγή στρώματα είναι λιγότερο αποδοτική από τη μεγάλης κλίμακας αγωγιμότητα και επομένως η θερμότητα που διαφεύγει από τα θερμά, εσωτερικά στρώματα είναι σημαντικά μειωμένη. Το αποτέλεσμα είναι ένας μεγαλύτερος πλανήτης για συγκεκριμένη ηλικία από ότι θα ήταν ένας του οποίου το εσωτερικό θα ήταν ομοιογενές και αδιαβατικό (Chabrier & Baraffe, 2007). Ανάλογα με τον αριθμό των στρωμάτων και τη κλίση του μοριακού βάρους, η παρουσία αυτής της διαδικασίας θα μπορούσε να εξηγήσει την παρατηρούμενη διασπορά στις πλανητικές ακτίνες. Αν επιβεβαιωθεί, αυτό το σενάριο θα μπορούσε να έχει σημαντικές συνέπειες στη κατανόηση της εσωτερικής δομής των πλανητών. Επίσης, σύμφωνα με τη θεωρία αυτή, δεν αναμένεται να υπάρχει συσχετισμός μεταξύ της ακτίνας και της προσπίπτουσας ροής, σε αντίθεση με άλλους μηχανισμούς όπως η ατμοσφαιρική κυκλοφορία.

## 14. Εξωπλανήτες με $M_{\text{sin}i} < 20 M_{\text{earth}}$

Δεδομένου ότι τα τελευταία χρόνια έχει αυξηθεί ιδιαίτερα όχι μόνο ο συνολικός αριθμός των εξωπλανητών που έχουν βρεθεί, αλλά και ο αριθμός των εξωπλανητών με μικρές μάζες, λόγω της βελτίωσης των μεθόδων ανίχνευσης, θα είχε ενδιαφέρον να μελετήσουμε τις στατιστικές ιδιότητες των πλανητών με μάζες μικρότερες από  $20 M_{\text{earth}}$ . Στη μελέτη αυτή δεν έχουμε περιλάβει τους 2 πλανήτες που περιφέρονται γύρω από μέλη διπλών αστρικών συστημάτων.

Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 1) δίνονται ορισμένα στοιχεία για τους εξωπλανήτες με  $M < 20 M_{\text{earth}}$ . Παρατηρούμε ότι οι πλανητικές πυκνότητες (όσες δίνονται) είναι κατά μέσο όρο πολύ μικρότερες αυτής της Γης ( $5.515 \text{ g/cm}^3$ ), ενώ όλες οι ακτίνες είναι μεγαλύτερες αυτής. Μόνο ο CoRoT-7 b έχει πυκνότητα κοντά στη γήινη. Εντούτοις, λόγω των μικρών τους μαζών και της θέσης τους στο σύστημα, πολύ κοντά στον κεντρικό αστέρα, οι πλανήτες αυτοί μπορεί να αποτελούνται κυρίως από ένα μεγάλο πυρήνα από πέτρα ή πάγο (Brunini & Cionco 2005, Alibert et al. 2006). Είναι πιθανό να έχουν χάσει το μεγαλύτερο μέρος της ατμόσφαιρας αερίων τους ή ακόμα και να μην κατάφεραν να σχηματίσουν μία (Lecavelier des Etangs et al. 2004; Baraffe et al. 2005, 2006; Hubbard et al. 2007).

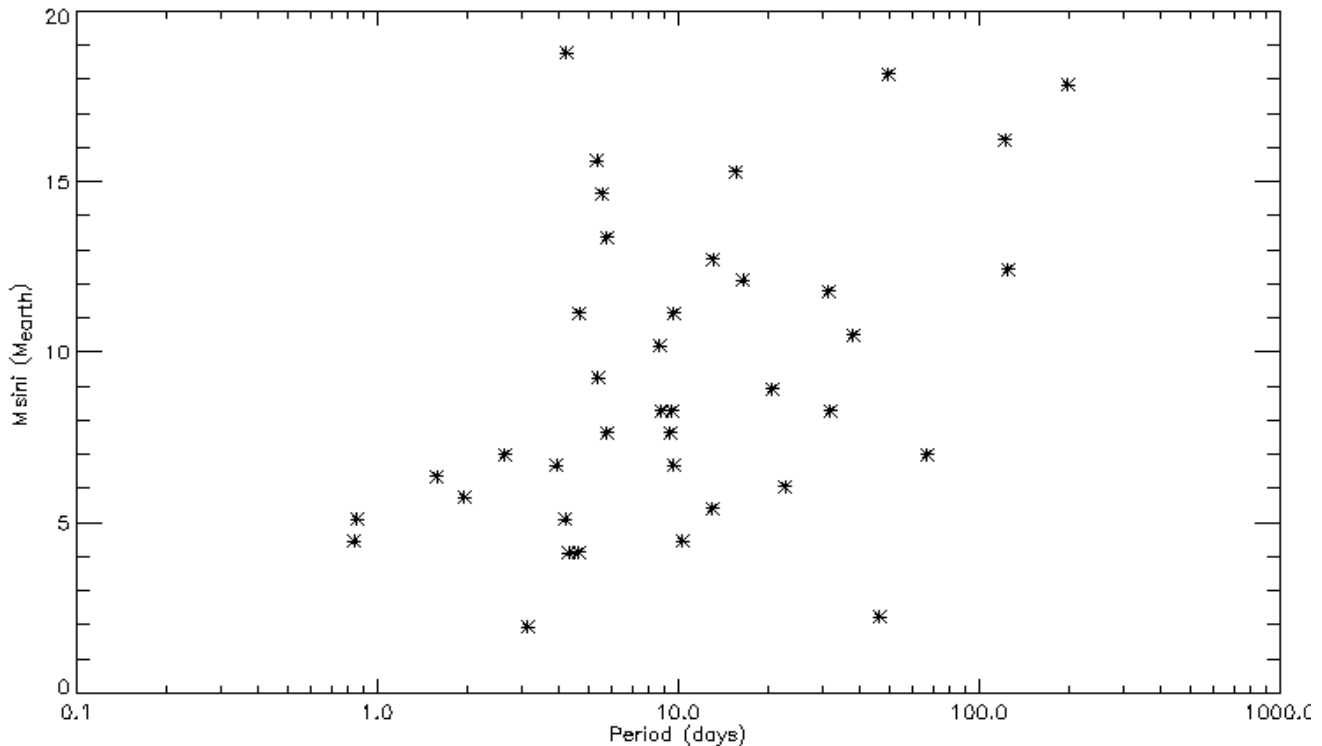
**Πίνακας 1.** Παράμετροι γνωστών εξωπλανητών με  $M < 20 M_{\text{earth}}$ .

Name	$M_{\text{sin}i}$ ( $M_{\text{earth}}$ )	Semi-Major Axis (AU)	Orbital Period (days)	Orbital Eccentricity	Planetary Density ( $\text{g/cm}^3$ )	Planetary Radius ( $R_{\text{earth}}$ )	Spectral Type
GJ 581 e	1.9	0.0285	3.1494	0			M5
Kepler-11 f	2	0.2490	46.6888	0	0.7	2.6	
Kepler-11 b	4	0.0910	10.3038	0	3.0	2.0	
HD 40307 b	4.1	0.0469	4.3115	0			K2.5 V
HD 156668 b	4.2	0.0500	4.6460	0			K3 V
CoRoT-7 b	4.9	0.0172	0.85359	0	6.0	1.68	
Kepler-10 b	5	0.0168	0.837495	0	9.0	1.42	G
61 Vir b	5.1	0.0501	4.215	0.1			G5V
GJ 581 c	5.4	0.073	12.929	0.17			M5
GJ 876 d	5.9	0.0208	1.93778	0.21			M5
Kepler-11 d	6	0.154	22.6872	0	0.9	3.4	
GJ 1214 b	6.5	0.0143	1.5804	0	1.9	2.7	M4.5
HD 215497 b	6.6	0.0466	3.9340	0.16			K3 V
HD 40307 c	6.7	0.080	9.62	0			K2.5 V
GJ 581 d	7.1	0.218	66.8	0.38			M5
GJ 3634 b	7.1	0.029	2.6456	0.08			M2.5
HD 181433 b	7.5	0.080	9.374	0.40			K3 IV
Kepler-11 e	8	0.194	31.9959	0	0.5	4.52	
HD 1461 b	8	0.064	5.773	0.1			G0V
HD 97658 b	8	0.083	9.494	0			K1 V
GJ 176 b	8	0.066	8.783	0			M2V
HD 40307 d	8.9	0.132	20.46	0			K2.5 V
HD 7924 b	9	0.0566	5.398	0.2			K0V
HD 69830 b	10.1	0.078	8.667	0.1			K0V
61 Vir c	11	0.217	38.02	0.14			G5V

mu Ara d	11	0.093	9.639	0.17			G3 V
GJ 674 b	11.1	0.0387	4.694	0.2			M2.5
HD 69830 c	11.7	0.185	31.56	0.13			K0V
HD 10180 d	12	0.129	16.357	0.14			G1 V
GJ 876 e	12	0.33	124.3	0.05			M5
Kepler-11 c	13	0.11	13.025	0	2	3.1	
HD 10180 c	13.2	0.064	5.7596	0.08			G1 V
BD-08 2823 b	15	0.056	5.6	0.2			K3V
HD 4308 b	15.2	0.119	15.56	0			G3V
GJ 581 b	15.7	0.0406	5.3687	0			M5
HD 102365 b	16	0.463	122.1	0.3			G V
HD 69830 d	18	0.63	197	0.07			K0V
HD 90156 b	18	0.25	49.77	0.3			G5V
HAT-P-26 b	19	0.0479	4.23452	0.12	0.4	6.3	K1 V

### 14.1 Περίοδος

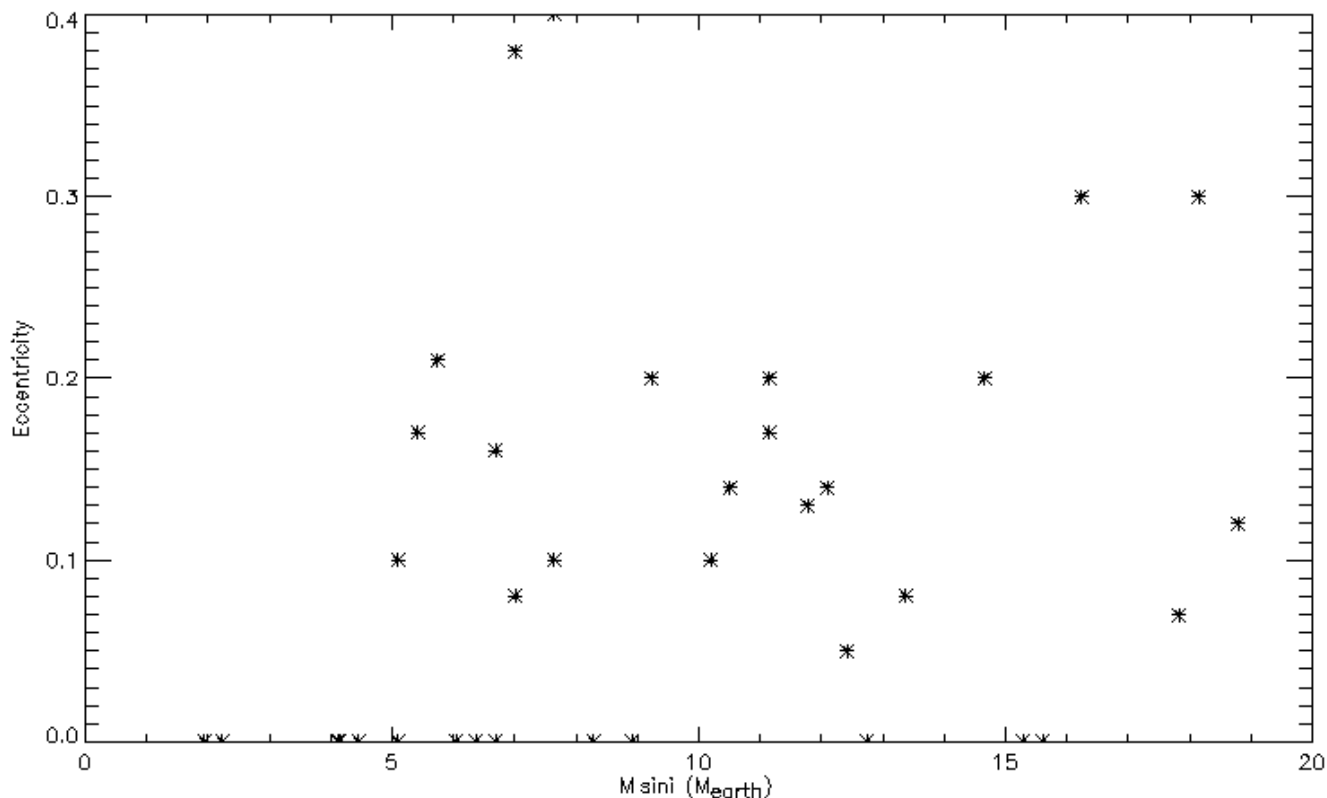
Το διάγραμμα περιόδου - ελάχιστης πλανητικής μάζας δίνεται στο Σχήμα 14.1. Η μέση περίοδος είναι 24 ημέρες. Αυτό είναι λογικό, αφού η χρήση της τεχνικής Doppler για την ανίχνευσή τους δε θα μπορούσε να ανιχνεύσει πλανήτες τόσο χαμηλών μαζών με μεγάλες περιόδους περιφοράς, όπως έχουμε δει και παραπάνω. Η παραπάνω μέση τιμή της περιόδου διαφέρει για πλανήτες που ανήκουν σε πολλαπλό πλανητικό σύστημα και για μεμονωμένους πλανήτες. Για την πρώτη κατηγορία η μέση τιμή είναι 27 ημέρες, ενώ για τη δεύτερη είναι 18 ημέρες.



Σχήμα 14.1 Διάγραμμα περιόδου - ελάχιστης μάζας για εξωπλανήτες με  $M < 20 M_{\text{earth}}$ .

## 14.2 Εκκεντρότητα

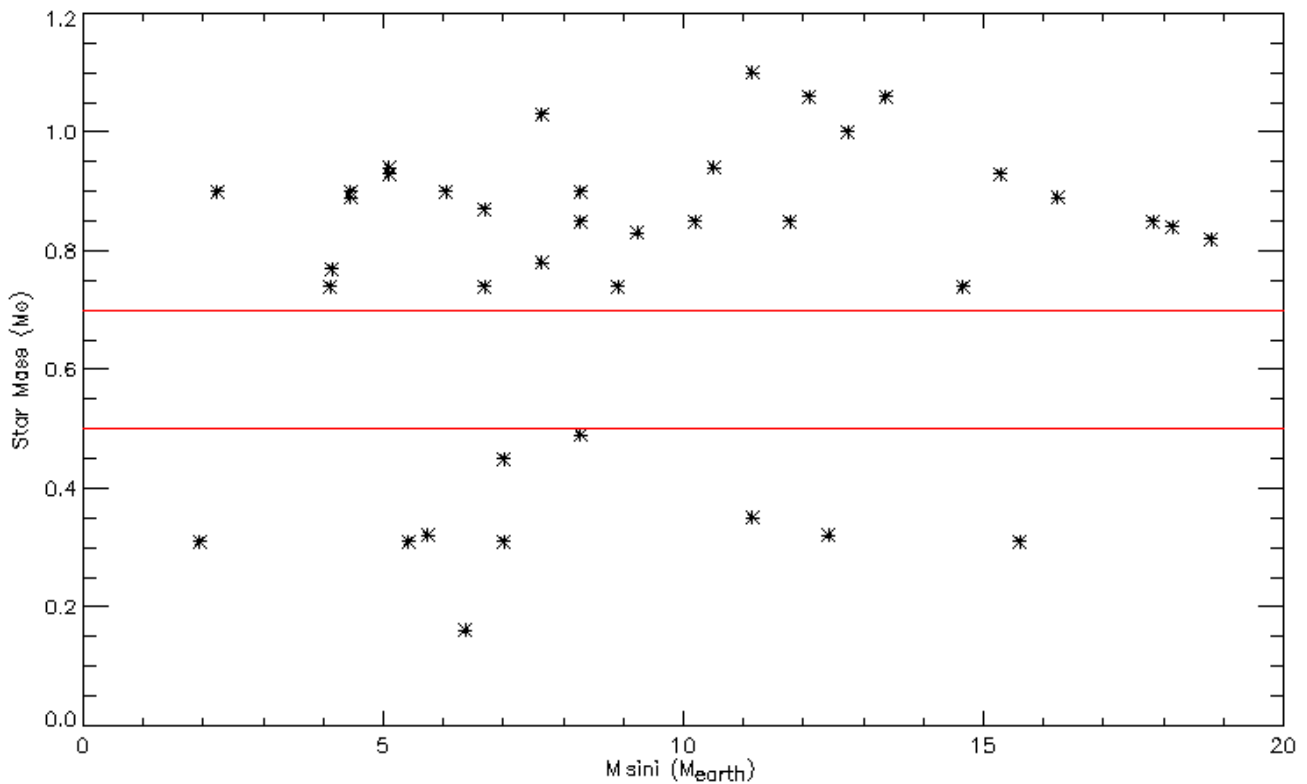
Στο Σχήμα 14.2 δίνεται το διάγραμμα της εκκεντρότητας συναρτήσει της ελάχιστης πλανητικής μάζας. Η μέση εκκεντρότητα είναι 0.097. Πολλοί μάλιστα από τους εξωπλανήτες έχουν εκκεντρότητα 0. Αυτό οφείλεται, όπως είδαμε πιο πάνω, στο γεγονός ότι οι τροχιές έχουν γίνει κυκλικές λόγω των παλιρροϊκών δυνάμεων, εφόσον οι πλανήτες αυτοί βρίσκονται πολύ κοντά στον κεντρικό αστέρα για να υπάρχει η δυνατότητα ανίχνευσής τους.



Σχήμα 14.2 Διάγραμμα εκκεντρότητας - ελάχιστης μάζας για εξωπλανήτες με  $M < 20 M_{\text{earth}}$ .

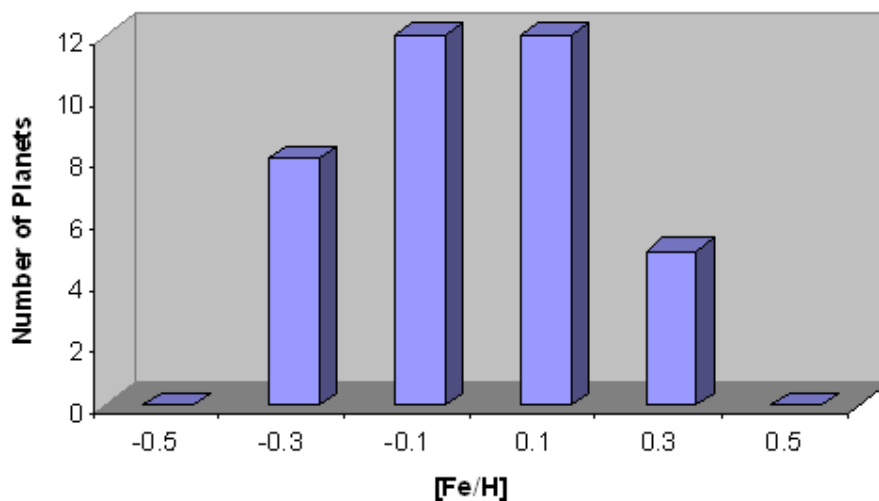
## 14.3 Κεντρικός Αστέρας

Το διάγραμμα της ελάχιστης πλανητικής μάζας συναρτήσει της μάζας του κεντρικού αστέρα δίνεται στο Σχήμα 14.3. Όλοι οι αστέρες έχουν μάζες μικρότερες από  $1.1 M_{\text{sun}}$ , αφού η μεταβολή στις ακτινικές ταχύτητες αστέρων μεγαλύτερης μάζας που θα προκαλούνταν από πλανήτες με  $M < 20 M_{\text{earth}}$  θα ήταν δύσκολο να παρατηρηθεί. Μία άλλη παρατήρηση είναι ότι δεν υπάρχουν πλανήτες γύρω από αστέρες με μάζες από  $0.5$  μέχρι  $0.7 M_{\text{sun}}$ .



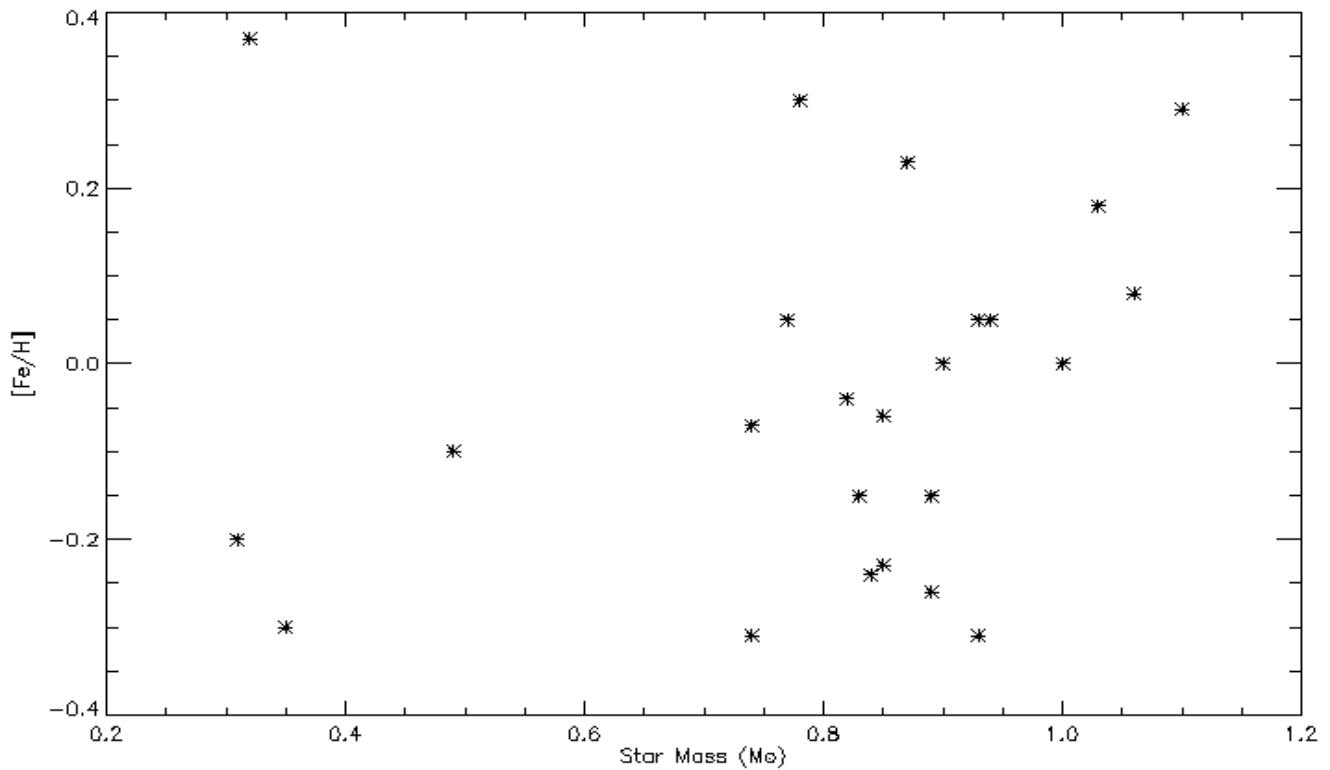
Σχήμα 14.3 Διάγραμμα αστρικής μάζας - ελάχιστης πλανητικής μάζας για εξωπλανήτες με  $M < 20 M_{\text{earth}}$

Στο Σχήμα 14.5 δίνεται το διάγραμμα της μεταλλικότητας του κεντρικού αστέρα συναρτήσει της μάζας του. Η μέση μεταλλικότητα είναι  $-0.045$ , αρκετά μικρότερη από τη μέση μεταλλικότητα του συνόλου των αστέρων με πλανήτες σε τροχιά γύρω τους, με την κατανομή της να διαφέρει επίσης από αυτή του συνόλου (Σχήμα 14.4). Το εύρος των μεταλλικοτήτων είναι από  $-0.4$  έως  $0.4$ . Δεν έχουν δηλαδή ανιχνευθεί πλανήτες μάζας μικρότερης από  $20 M_{\text{earth}}$  σε τροχιά γύρω από αστέρες είτε πολύ φτωχούς είτε πολύ πλούσιους σε μέταλλα.



Σχήμα 14.4 Κατανομή της μεταλλικότητας των αστέρων με πλανήτες με  $M < 20 M_{\text{earth}}$ . Το  $d[\text{Fe}/\text{H}]$  ισούται με  $0.2$ .





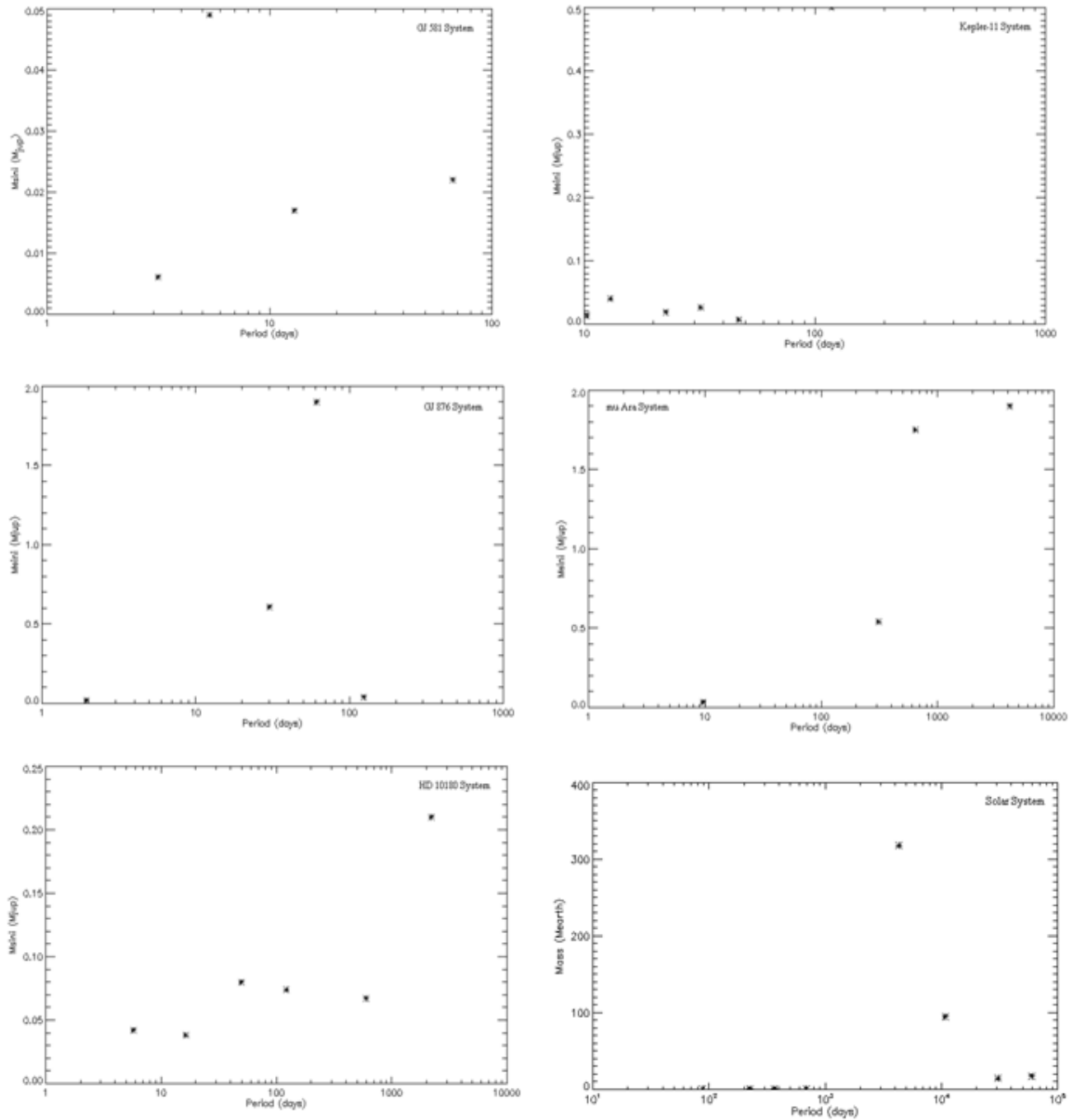
**Σχήμα 14.5** Διάγραμμα αστρικής μάζας - μεταλλικότητας για αστέρες γύρω από τους οποίους περιφέρονται πλανήτες με  $M < 20 M_{\text{earth}}$ .

## 15. Πολλαπλά Πλανητικά Συστήματα

Πολλοί από τους εξωπλανήτες που έχουν έως τώρα ανιχνευθεί ανήκουν σε πολλαπλό πλανητικό σύστημα. Δεδομένου ότι το καλύτερα μελετημένο σύστημα είναι το Ηλιακό σύστημα, αξίζει να συγκρίνουμε ορισμένα από τα πλανητικά συστήματα που έχουν ανακαλυφθεί με το Ηλιακό.

### 15.1 Διάγραμμα Μάζας - Περίοδου

Παρακάτω δίνονται τα διαγράμματα μάζας - περιόδου ορισμένων από τα πλανητικά συστήματα που έχουν ανακαλυφθεί, των οποίων ο κεντρικός αστέρας δεν είναι μέλος διπλού αστρικού συστήματος. Τα συστήματα που έχουν επιλεγεί είναι αυτά που έχουν τουλάχιστον 4 πλανήτες.



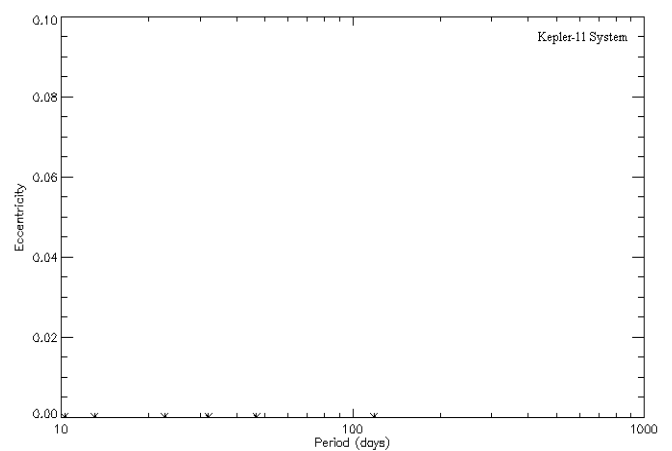
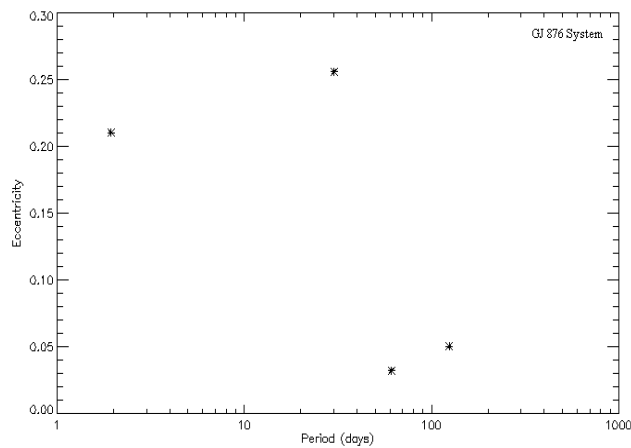
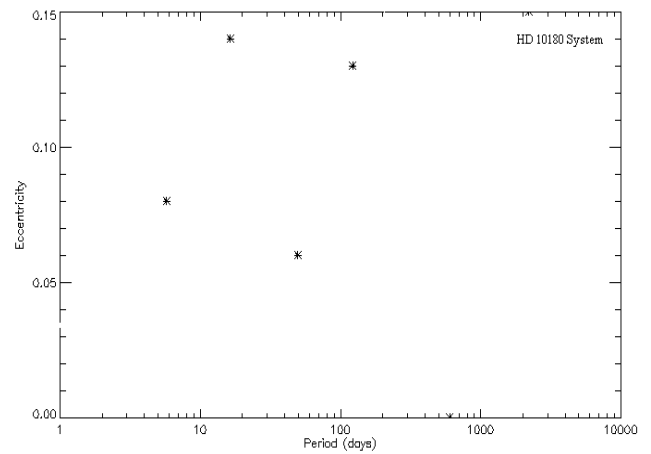
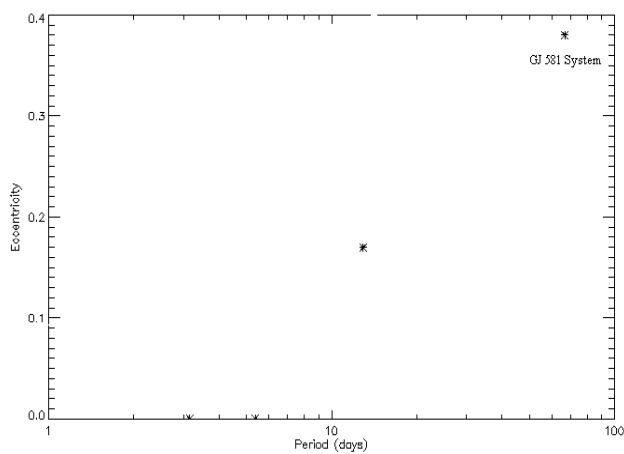
Σχήμα 15.1 Διάγραμμα Περιόδου - Μάζας για γνωστά πλανητικά.

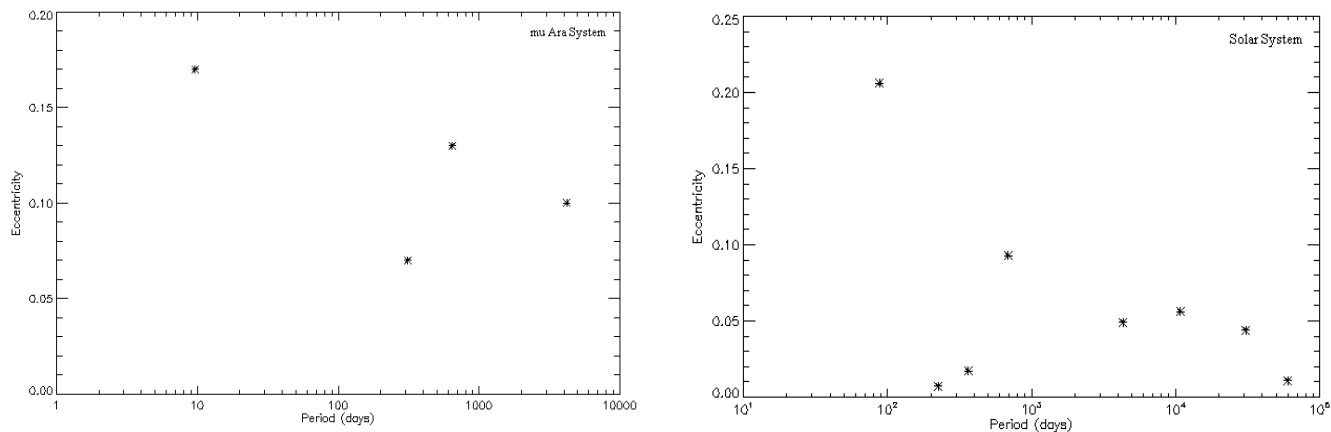
Παρατηρούμε ότι όλα τα παραπάνω πλανητικά συστήματα μοιάζουν με το Ηλιακό στο εύρος των μαζών των πλανητών. Η μέγιστη τιμή του  $M_{\text{Jup}}$  είναι 1.9  $M_{\text{Jup}}$ . Δεν παρατηρούμε δηλαδή κανένα πλανήτη πολύ μεγάλης μάζας στα πλανητικά αυτά συστήματα. Ένα άλλο χαρακτηριστικό είναι ότι στα παραπάνω πλανητικά συστήματα δεν υπάρχουν πλανήτες μεγάλης μάζας πολύ κοντά στον κεντρικό αστέρα (με πολύ

μικρή περίοδο), δηλαδή Hot Jupiters. Το σύστημα Kepler-11 αποτελείται από πλανήτες μικρής μάζας ( $M_{\text{sin}i} < 0.05 M_{\text{Jup}}$ ), με εξαίρεση έναν πλανήτη, οι οποίοι βρίσκονται σε πολύ μικρές αποστάσεις από τον κεντρικό αστέρα (έχουν περιόδους μικρότερες των 50 ημερών).

## 15.2 Διάγραμμα Περίοδου - Εκκεντρότητας

Παρακάτω δίνονται τα διαγράμματα περιόδου - εκκεντρότητας για τα παραπάνω πλανητικά συστήματα (Σχήμα 15.2).



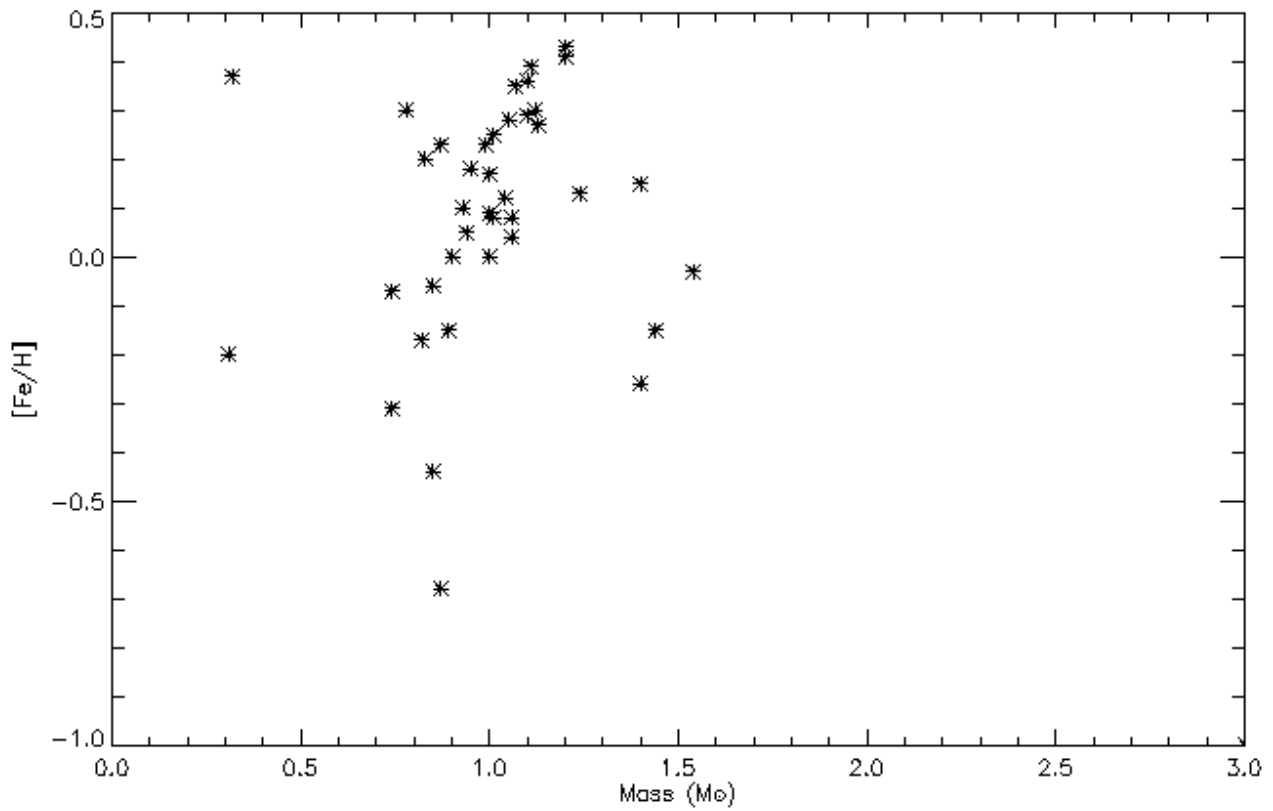


**Σχήμα 15.2** Διάγραμμα περιόδου – εκκεντρότητας για γνωστά πλανητικά συστήματα.

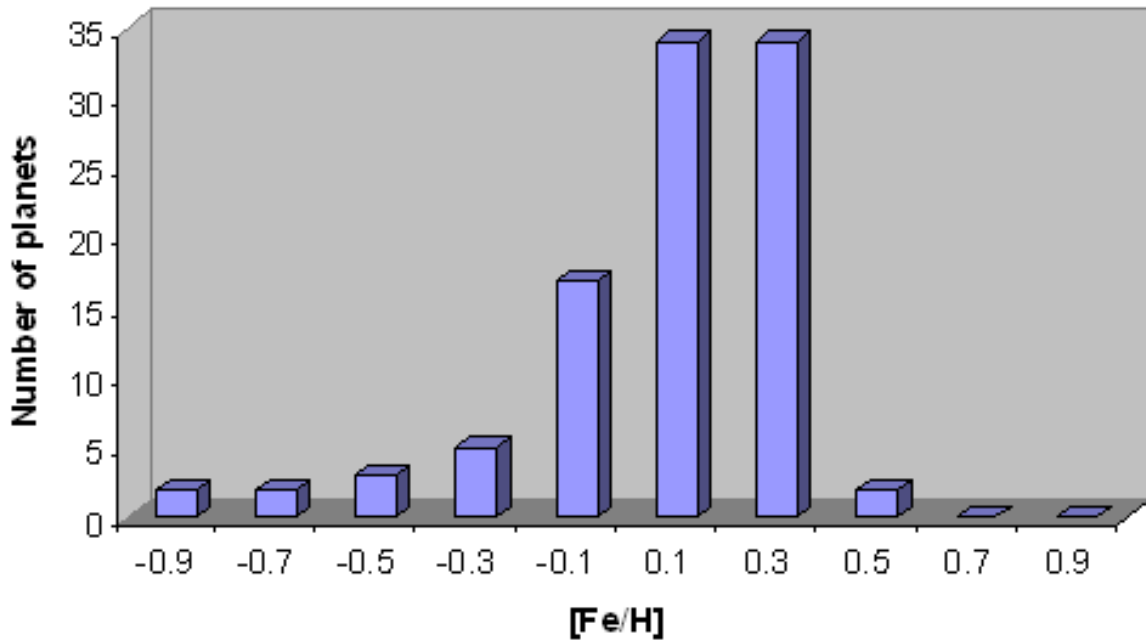
Στα διαγράμματα του Σχήματος 15.2 φαίνεται ότι όλοι οι πλανήτες που ανήκουν σε πλανητικά συστήματα έχουν σχετικά μικρές εκκεντρότητες, μικρότερες από 0.4. Οι πλανήτες του συστήματος Kepler-11 έχουν όλοι σχεδόν κυκλικές τροχιές. Στα συστήματα  $\mu$  Ara, HD 10180 και GJ 876 παρατηρούμε ότι, αντίθετα με ότι αναμένεται, οι πλανήτες με μικρές περιόδους, δηλαδή που βρίσκονται κοντά στον κεντρικό αστέρα, έχουν μεγαλύτερες εκκεντρότητες από τους πλανήτες με μεγαλύτερες περιόδους. Το ίδιο συμβαίνει στο Ηλιακό σύστημα με τον Ερμή ο οποίος είναι ο πλανήτης με τη μεγαλύτερη εκκεντρότητα παρότι βρίσκεται πολύ κοντά στον κεντρικό αστέρα και θα αναμενόταν η τροχιά του να έχει γίνει κυκλική λόγω των παλιρροϊκών δυνάμεων. Ίσως οι πλανήτες που βρίσκονται στις εξωτερικές περιοχές του πλανητικού συστήματος να έχουν μεγάλες μάζες, ικανές να επηρεάσουν την εκκεντρότητα των εσωτερικών πλανητών.

### 15.3 Μεταλλικότητα

Όπως είδαμε παραπάνω η μεταλλικότητα του αστέρα ίσως να αποτελεί το κλειδί για το σχηματισμό των πλανητών. Στο διάγραμμα που του Σχήματος 15.3 δίνεται η μάζα του αστέρα συναρτήσει της μεταλλικότητας.



Σχήμα 15.3 Διάγραμμα αστρικής μάζας - μεταλλικότητας για αστέρες με πολλαπλά πλανητικά συστήματα.



Σχήμα 15.4 Κατανομή της μεταλλικότητας των αστέρων με πολλαπλά πλανητικά συστήματα. Το  $d[Fe/H]$  ισούται με 0.2.

Η μεταλλικότητα των αστέρων με πολλαπλά πλανητικά συστήματα δεν παρουσιάζει ιδιαίτερες διαφορές με τη μεταλλικότητα των αστέρων με πλανήτες γενικά. Το ίδιο ισχύει και με την κατανομή της μεταλλικότητας (Σχήμα 15.4) Η μέση μεταλλικότητα των αστέρων με πολλαπλά πλανητικά συστήματα είναι 0.055, αυξημένη συγκριτικά με τη μέση μεταλλικότητα των αστέρων της ηλιακής γειτονιάς που δεν έχουν πλανήτες σε τροχιά γύρω τους, και ελαφρώς μικρότερη από τη μέση μεταλλικότητα των αστέρων με πλανήτες.

## 16. Μελλοντικά Προγράμματα Ανίχνευσης Εξωηλιακών Πλανητικών Συστημάτων

Πολλά από τα προγράμματα που ετοιμάζονται, τόσο επίγεια όσο και διαστημικά, έχουν στόχο, μεταξύ άλλων, και την ανίχνευση εξωηλιακών πλανητικών συστημάτων. Κάποια μάλιστα έχουν σαν σκοπό την ανίχνευση γήινων εξωπλανητών, γεγονός που θα συμβάλλει σημαντικά στη στατιστική μελέτη των πλανητών μικρής μάζας και στη μελέτη των θεωριών για τη δημιουργία τους, αφού το δείγμα που έχουμε μέχρι σήμερα είναι ανεπαρκές. Μερικά από τα κυριότερα προγράμματα παρουσιάζονται παρακάτω (The Astronet Infrastructure Roadmap 2008).

### 1. *European Extremely Large Telescope (E-ELT)* (έτοιμο ~2016)

Σκοπός:

- Ανίχνευση εξωπλανητών που θα ανήκουν στην κατοικήσιμη ζώνη
- Χαρακτηρισμός των ατμοσφαιρών των περισσότερων γνωστών εξωπλανητών
- Μελέτη των λεπτομερειών των πρωτοπλανητικών δίσκων

Τεχνικά χαρακτηριστικά

- Διάμετρος 42 m
- Εσωτερικό σύστημα προσαρμοστικής οπτικής
- Η φασματική περιοχή παρατήρησης θα είναι 0.4-21  $\mu\text{m}$
- Κάλυψη του 80% του ουρανού



Σχήμα 16.1 Εικόνα του E-ELT σύμφωνα με τα προσχέδια.

## 2. Gaia Data Analysis and Processing (η εκτόξευση αναμένεται το 2012)

Σκοπός του προγράμματος είναι η ανίχνευση και η κατηγοριοποίηση δεκάδων χιλιάδων εξωηλιακών πλανητικών συστημάτων.

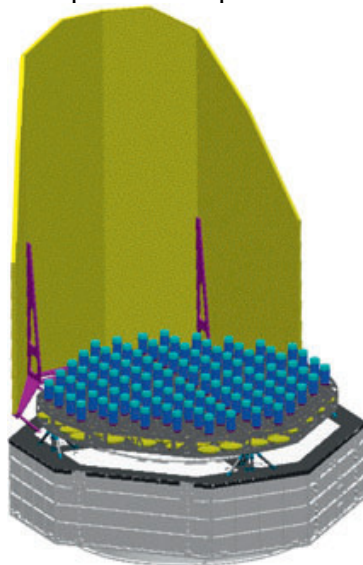
Τεχνικά χαρακτηριστικά

- Η βασική κατασκευή αποτελείται από ένα ζεύγος τηλεσκοπίων με κοινό εστιακό επίπεδο που θα δίνει τρία σύνολα δεδομένων:
  - 1) ακριβής μέτρηση της θέσης του κάθε αντικειμένου (δύο συντεταγμένες) σε κάθε παρατήρηση
  - 2) Φασματική και φωτομετρική παρατήρηση για κάθε αντικείμενο που θα επιτρέψει την αναγνώριση της αστροφυσικής του φύσης
  - 3) Φασματοσκοπική ανάλυση λαμπρών αντικειμένων θα δώσει τις ακτινικές τους ταχύτητες και βασικές αστρικές παραμέτρους

## 3. Planetary Transits and Oscillations of Stars (PLATO) (η εκτόξευση αναμένεται μετά το 2017)

Σκοπός:

- Θα παρατηρήσει με υψηλή ακρίβεια στην ορατή περιοχή ένα δείγμα  $> 100000$  σχετικά λαμπρών αστέρων ( $V \leq 12$ ) και άλλους  $\sim 400000$  αστέρες μέχρι μέγεθος  $V=14$
- Ανίχνευση και χαρακτηρισμός εξωπλανητών στο μέγεθος της Γης ή και μικρότερων γύρω από λαμπρούς αστέρες
- Λεπτομερής μελέτη των κεντρικών αστέρων από αστροσεισμολογικές μετρήσεις



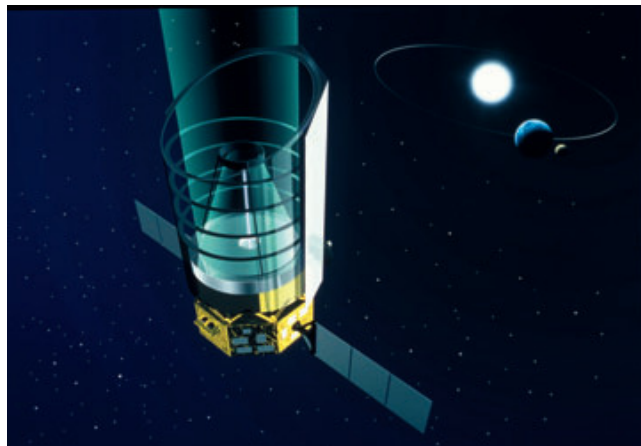
**Σχήμα 16.2** Ένα από τα δύο σχέδια για το PLATO που έχουν κατατεθεί στο Cosmic Vision πρόγραμμα της ESA.

#### 4. *Space Infrared Telescope for Cosmology and Astrophysics (SPICA)* (η εκτόξευση αναμένεται το 2017)

Σκοπός είναι η φωτογράφιση και η φασματική ανάλυση εξωπλανητών στο μέγεθος του Δία και πρωτοπλανητικών δίσκων.

Τεχνικά χαρακτηριστικά

- Παρατήρηση στο μέσο και μακρινό υπέρυθρο με τηλεσκόπιο ανοίγματος 3.5 m (ψύχεται στους 5K)
- Μεγάλη ευαισθησία στα 30-210  $\mu\text{m}$  όπου η κρύα σκόνη και το αέριο εκπέμπουν την περισσότερη ενέργειά τους
- Φασματικό εύρος 5-210  $\mu\text{m}$  που επιτρέπει τη φωτογράφιση και τη φασματική ανάλυση
- Στεμματογράφος



Σχήμα 16.3 Εικόνα του SPICA σύμφωνα με τα προσχέδια.

#### 5. *Darwin*

Στόχος της αποστολής είναι η μελέτη γήινων εξωπλανητών και η αναζήτηση ζωής σε αυτούς.

- Ανίχνευση πετρωδών εξωπλανητών και φασματοσκοπική ανάλυσή τους στο μέσο υπέρυθρο (6-20  $\mu\text{m}$ )
- Αυτή η φασματοσκοπική ανάλυση θα χαρακτηρίσει τη φυσική και χημική κατάσταση της ατμόσφαιρας του πλανήτη και θα ψάξει για ενδείξεις βιολογικής δραστηριότητας
- Θα διαρκέσει 5 χρόνια και θα μελετήσει 200 αστέρες  
→ μεταξύ αυτών θα μελετηθούν φασματοσκοπικά 25-50 πλανητικά συστήματα για την εύρεση αερίων όπως  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CH}_4$  και  $\text{O}_3$



## 6. Far Infrared Interferometer (FIRI)

Σκοπός:

- Θα μελετήσει το σχηματισμό και την εξέλιξη των πλανητών, των αστέρων και των γαλαξιών
- Θα αναγνωρίσει γήινους πλανήτες μέσω της ικανότητας φωτογράφισης δομών σκόνης στα πλανητικά συστήματα

Τεχνικά χαρακτηριστικά

- Θα αποτελείται από 3 τηλεσκόπια ανοίγματος 3.5 m
- Θα λειτουργούν στα 25-385  $\mu\text{m}$
- Θα χρησιμοποιεί συμβολομετρική τεχνική απευθείας ανίχνευσης
- Το διακριτικό όριο θα είναι 0.02'' στα 100  $\mu\text{m}$

## 16. Συμπεράσματα

Βρήκαμε ότι υπάρχει πολύ μικρός αριθμός εξωπλανητών με περιόδους περιφοράς μεταξύ 10 και 100 ημερών και μάλιστα όσοι δεν ανήκουν σε πολλαπλό πλανητικό σύστημα ή διπλό αστρικό σύστημα έχουν μάζες κάτω από 3  $M_{\text{Jup}}$ . Στο διάγραμμα της ελάχιστης μάζας του πλανήτη σε λογαριθμική κλίμακα συναρτήσεως του μεγάλου ημιάξονα της τροχιάς είδαμε ότι δεν υπάρχουν πλανήτες με  $\log(M_{\text{sin}i}) < -0.93$  σε απόσταση μεγαλύτερη από 0.5 AU. Κάνοντας προσομοιώσεις Monte Carlo είδαμε ότι αυτό οφείλεται στη χρήση της τεχνικής Doppler και όχι στο στατιστικό δείγμα των εξωπλανητών. Επίσης μελετώντας το διάγραμμα εκκεντρότητας - περιόδου είδαμε ότι μπορούμε με επιφύλαξη να θεωρήσουμε τα συστήματα εξωπλανητών - κεντρικών αστέρων σαν μία υποκατηγορία των διπλών αστρικών συστημάτων για μικρούς λόγους μαζών.

Επιπλέον παρατηρήσαμε την αυξημένη μεταλλικότητα των αστέρων με πλανήτες σε σύγκριση με νάνους χωρίς πλανήτες αστέρες της ηλιακής γειτονιάς, κάτι που σημαίνει ότι ίσως το χαρακτηριστικό αυτό να παίζει σημαντικό ρόλο στο σχηματισμό των πλανητών. Είδαμε ότι η πρωτογενής προέλευση του πλούσιου σε μέταλλα υλικού είναι η πιθανότερη εξήγηση της αυξημένης μεταλλικότητας των αστέρων με πλανήτες.

Μελετώντας πλανητικά συστήματα με πάνω από τρεις πλανήτες, παρατηρήσαμε ότι όλα μοιάζουν με το Ηλιακό στο εύρος των μαζών των πλανητών. Ακόμα είδαμε ότι σε αυτά τα πλανητικά συστήματα δεν υπάρχουν πλανήτες μεγάλης μάζας πολύ κοντά στον κεντρικό αστέρα, δηλαδή με μικρή περίοδο. Επίσης οι πλανήτες με μικρές περιόδους περιφοράς έχουν συνήθως μεγαλύτερες εκκεντρότητες από τους υπόλοιπους πλανήτες του συστήματος με μεγαλύτερες περιόδους, όπως ακριβώς ο Ερμής στο Ηλιακό σύστημα.

Τέλος παρατηρήσαμε ότι ένα μεγάλο ποσοστό των εξωπλανητών που έχουν παρατηρηθεί και με τη μέθοδο της διάβασης έχουν πολύ μεγάλες ακτίνες και μελετήσαμε τις θεωρίες για τις διαδικασίες που θα μπορούσαν να οδηγήσουν στο σχηματισμό τέτοιων πλανητών.

## 17. Βιβλιογραφία

- Alibert, Y., Baraffe, I., Benz, W., Chabrier, G., Mordasini, C. et al., 2006, *A&A*, 455, L25
- Artymowicz, P. & Lubow, S. H. 1994, *ApJ*, 421, 651
- Baraffe, I., Chabrier, G., Barman, T., Selsis, F., Allard, F., Hauschildt, P.H., 2005, *A&A*, 436, L47
- Baraffe, I., Alibert, Y., Chabrier, G., Benz, W., 2006, *A&A*, 450, 1221
- Batalha, N.M. et al., 2011, *ApJ*, 729, 27
- Bate, M.R., Bonnell, I.A., & Bromm, V., 2002, *MNRAS*, 336, 705
- Beckwith, S.V.W., Sargent, A.I., Chini, R.S., & Guesten, R., 1990, *AJ*, 99, 924
- Bodenheimer, P., Lin, D.N.C., Mardling, R.A., 2001, *Astroph. Journal*, 548, 466
- Boss, A. P., 1997, *Science*, 276, 1836
- Boss, A. P., 1998, *AAS/Division for Planetary Sciences Meeting*, 30, 1057
- Boss, A., 2001, *ApJ*, 563, 367
- Boss, A., 2002, *ApJ*, 576, 462
- Boss, A.P. 2003, *ApJ*, 599, 577
- Brunini, A., Cionco, R.G., 2005, *Icarus*, 177,264
- Burkert, A., Lin, D.N.C., Bodenheimer, P.H., Jones, C.A., Yorke, H.W., 2005, *Astroph. Journal*, 618, 512
- Burrows, A., Hubeny, I., Budaj, J., Hubbard, W.B., 2007, *Astroph. Journal*, 661, 502
- Chabrier, G., Baraffe, I., Barman, T., Allard, F., Hauschildt, P., 2004, *Astroph. Journal*, Let. 603, L53
- Chabrier, G., Baraffe, I., 2007, *Astroph. Journal*, Let. 661, L81
- Croswell, K., 1999, *Planet Quest* (Oxford University Press)
- De Pater, I., & Lissauer, J., 2001, *Planetary Sciences* (Cambridge: Cambridge University Press)
- Duquennoy, A. & Mayor, M., 1991, *A&A*, 248, 485
- Duquennoy, A., Mayor, M., & Mermilliod, J.C., 1992, in *Binaries as Tracers of Stellar Formation*, ed. A. Duquennoy, & M. Mayor (Cambridge: Cambridge Univ. Press), 52
- Ford, E.B., Havlickova, M., & Rasio, F.A., 2001, *Icarus*, 150, 303
- Goldreich, P., & Soter, S., 1966, *Icarus*, 5, 375
- Goldreich, P., & Tremaine, S., 1980, *ApJ*, 241, 425
- Gonzalez, G., 1998, *A&A*, 334, 221
- Gonzalez, G., Laws, C., Tyagi, S. & Reddy, B.E., 2001, *AJ*, 121, 432
- Goodwin, S.P., Whitworth, A.P. & Ward-Thompson, D., 2004, *A&A*, 414, 633
- Guillot, T., Showman, A.P., 2002, *Astron. Astroph.*, 385, 156
- Guillot, T., 2008, *Physica Scripta*, 130, 014023
- Haisch, K.E. Jr., Lada, E.A. & Lada, C.J., 2001, *ApJ*, 553, L153
- Halbwachs, J.L., Mayor, M., Udry, S. & Arenou F., 2003, *A&A*, 397, 159 (Paper I)
- Halbwachs, J.L., Mayor M., Udry S., 2005, *A&A*, 431, 1129
- Heintz, W.D., 1988, *AJ*, 96, 1072
- Heng, K., Menou, K., Phillipps, P.J., 2011, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 413, Issue 4, pp. 2380-2402
- Holman, M. J. & Wiegert, P. A., 1999, *AJ*, 117, 621
- Holmberg, J., Nordström, B., Andersen, J., 2007, *A&A*, 475, 519

Hubbard, W.B., Hattori, M.F., Burrows, A., Hubeny, I., Sudarsky, D., 2007, *Icarus*, 187, 358

Hurley, J.R., Tout, C.A., Pols, O.R., 2002, *MNRAS*, 329, 897

Hut, P., 1981, *A&A*, 99, 126

Hut, P., 1982, *A&A*, 110, 37

Ibgui, L., Burrows, A., 2009, *Astroph. Journal*, 700, 1921

Innanen, K. A., Zheng, J. Q., Mikkola, S. & Valtonen, M. J., 1997, *AJ*, 113, 1915

Israelian, G., Santos, N.C., Mayor, M. & Rebolo R., 2001, *Nature* 411, 163

Jackson, B., Greenberg, R., Barnes, R., 2008, *Astroph. Journal*, 681, 1631

Keppens, R., 1997, *A&A*, 318, 275

Kley, W., 2001, in *IAU Symposium*, 200, 511

Kokubo, E. & Ida, S., 2002, *ApJ*, 581, 666

Latham, D.W., Stefanik, R.P., Torres, G., Davis, R.J., Mazeh, T., Carney, B.W., Laird, J.B., & Morse, J.A., 2002, *AJ*, 124, 1144

Laughlin, G., 2000, *ApJ*, 545, 1064

Laws, C. & Gonzalez, G., 2001, *ApJ*, 553, 405

Lecar, M., Wheeler, J.C. & McKee, C.F., 1976, *ApJ* 205, 556

Lecavelier des Etangs, A., Vidal-Madjar, A., McConnell, J.C., Hebrard, G., 2004, *A&A*, 418, L1

Lin, D., Bodenheimer, P., Richardson, D., 1996, *Nature*, 380, 606

Lin, D.N.C., & Ida, S., 1997, *ApJ*, 477, 781

Marchal, L., Delfosse, X., Forveille, T., Ségransan, D., Beuzit, J.L., Udry, S., Perrier, C., Mayor, M., & Halbwachs, J. L., 2003, in *Brown Dwarfs*, ed. E. Martin (*Astron. Soc. Pacific*), *IAU Symp.*, 211, 311

Marcy, G. W., Butler, R. P., Fischer, D.A. & Vogt, S. S., 2003, *ASP Conf. Ser.*, 294, 1

Marcy, G. W., et al., 2005, *ApJ*, 619, 570

Masset, F.S. & Papaloizou, J.C.B., 2003, *ApJ*, 588, 494

Mayer, L., Quinn, T., Wadsley, J. & Stadel, J., 2002, *Science*, 298, 1756

Mayor, M. & Mermilliod, J.C., 1984, in *Observational Tests of the Stellar Evolution Theory*, ed. A. Maeder & A. Renzini (*Reidel Publ. Comp.*), *IAU Symp.*, 105, 411

Mazeh, T., & Shaham, J. 1979, *A&A*, 77, 145

Miller, N., Fortney J., Jackson B., 2009, *Astroph. Journal*, 702, 1413

Miller, R., 2002, *Extrasolar Planets*

Morton, T. D., Johnson, J. A., 2011, *Astroph. Journal*, 729, 138

Murray, N., Hansen, B., Holman, M. & Tremaine, S., 1998, *Science*, 279, 69

Murray, N. & Chaboyer, B., 2002, *ApJ*, 566, 442

Nelson, A. F., 2000, *ApJ*, 537, L65

Oxley, S. & Woolfson, M.M., 2004, *MNRAS*, 348, 1135

Papaloizou, J.C.B., Nelson, R.P., Masset, F., 2001, *A&A*, 366, 263

Papaloizou, J.C.B. & Terquem, C., 2001, *MNRAS*, 325, 221

Pilat-Lohinger, E. & Dvorak, R., 2002, *Celestial Mechanics & Dynamical Astronomy*, 82, 143

Pinsonneault, M.H., DePoy, D.L. & Coffee, M., 2001, *ApJ*, 556, L59

Pollack, J., Hubickyj, O., Bodenheimer, P. et al., 1996, *Icarus*, 124, 62

Queloz, D., Mayor, M., Weber, L. et al., 2000, *A&A*, 354, 99

Rasio, F.A. & Ford, E.B., 1996, *Science*, 274, 954

Reid, I.N., 2002, PASP, 114, 306

Rice, W.K.M., Armitage, P.J., Bonnell, I.A., Bates, M., Jeffers, S.V. & Vine, S.G., 2003, MNRAS, 346, L36

Sandquist, E.L., Dokter, J.J., Lin, D.N.C., & Mardling, R.A., 2002, ApJ, 572, 1012

Santos, N.C., Israelian, G. & Mayor, M., 2000, A&A, 363, 228

Santos, N. C., Israelian, G., Mayor, M., 2001, A&A, 373, 1019

Santos, N.C., Mayor, M., Naef, D. et al., 2002a, A&A, 392, 215

Santos, N.C., García López, R., Israelian, G. et al., 2002b, A&A, 386, 1028

Santos, N. C. et al., 2003, A&A, 398, 693

Santos, N. C. et al., 2010, Proceedings of the IAU Symposium, Volume 268, p. 291-299

Showman, A.P., Guillot, T., 2002, Astroph. Journal, 385, 166

Smith, V.V., Cunha, K. & Lazzaro, D., 2001, AJ, 121, 3207

Stepinski, T.F. & Black, D.C., 2000, A&A, 356, 903

The Astronet Infrastructure Roadmap: A Strategic Plan for European Astronomy (2008)

Thommes, E.W. & Lissauer, J.J., 2003, ApJ, 597, 566

Trilling, D.E., 2000, ApJ, 537, L61

Udry, S., Mayor, M. & Santos, N. C., 2003, A&A, 407, 369

Udry, S. & Santos, N. C., 2007, Annu. Rev. A&A, Volume 45, p. 397-439

Ward, W.R., 1997, Icarus, 126, 261

Witte, M.G. & Savonije, G.J., 2002, A&A, 386, 222

Zahn, J.P., 1992, in Binaries as Tracers of Stellar Formation, ed. A. Duquennoy, & M. Mayor (Cambridge: Cambridge Univ. Press), 253

Zuckerman, B., Webb, R.A., Becklin, E.E., McLean, I.S. & Malkan, M.A., 1997, AJ, 114, 805

[http://ase.tufts.edu/cosmos/view\\_picture.asp?id=1325](http://ase.tufts.edu/cosmos/view_picture.asp?id=1325)

<http://bulge.princeton.edu/~ogle/ogle3/blg390.html>

<http://deep-sky-blog.blogspot.com/2007/10/gliese-581c-extrasolar-earth.html>

<http://exoplanets.org>

[http://exoplanets.org/gl876\\_web/gl876\\_tech.html](http://exoplanets.org/gl876_web/gl876_tech.html)

[http://hera.ph1.uni-koeln.de/~heintzma/NS1/PSR\\_planets.htm](http://hera.ph1.uni-koeln.de/~heintzma/NS1/PSR_planets.htm)

<http://iopscience.iop.org/1538-4357/591/2/L147/fulltext/17269.text.html>

[http://planetquest.jpl.nasa.gov/TPF/tpf\\_index.cfm](http://planetquest.jpl.nasa.gov/TPF/tpf_index.cfm)

<http://www.cornellcollege.edu/physics/courses/phy312/Student-Projects/Extra-Solar-Planets/Extra-Solar-Planets.html>

<http://www.eso.org>

<http://www.hao.ucar.edu/research/stare/hd209458.html>

<http://www.markelowitz.com/exobiology.htm>

[http://www.nightskyinfo.com/archive/barnard\\_star/](http://www.nightskyinfo.com/archive/barnard_star/)

[http://www.princeton.edu/~willman/planetary\\_systems/](http://www.princeton.edu/~willman/planetary_systems/)

<http://www.risorsegratis.it/tesinaastronomia/pulsar-timing-alieni.htm>

<http://www.solstation.com/habitable.htm>

<http://www.spitzer.caltech.edu/images/1179-ssc2004-08c-Spectra-Show-Protoplanetary-Disc-Structures>

[www.hao.ucar.edu/public/research/stare/hd209458.html](http://www.hao.ucar.edu/public/research/stare/hd209458.html)

[www.markelowitz.com/exobiology.htm](http://www.markelowitz.com/exobiology.htm)

[www.nature.com/nature/journal/v355/n6356/abs/355145a0.html](http://www.nature.com/nature/journal/v355/n6356/abs/355145a0.html)  
[www.space.com](http://www.space.com)  
[www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org)