ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΑΣΤΡΟΦΥΣΙΚΗΣ ΑΣΤΡΟΝΟΜΙΑΣ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΕΡΓΑΣΙΑ ΣΤΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΤΟΥ ΜΑΘΗΜΑΤΟΣ
“ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ”

ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΕΞΩΗΛΙΑΚΩΝ ΠΛΑΝΗΤΩΝ ΚΑΙ ΠΛΑΝΗΤΙΚΩΝ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΩΝ ΣΕ ΕΥΡΕΑ ΑΣΤΡΙΚΑ ΠΕΔΙΑ



ΑΝΤΩΝΙΑΔΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ (ΑΕΜ 11797)
ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΙΩΑΝΝΗΣ Χ. ΣΕΙΡΑΔΑΚΗΣ
ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2009

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε για το σχεδιασμό ενός οργάνου ικανού για την ανίχνευση πλανητών με τη μέθοδο των διαβάσεων. Γίνεται επίσης εκτενής αναφορά στο λογισμικό (software) που αναπτύχθηκε για την ανάλυση των δεδομένων. Παρουσιάζονται ακόμα τα αποτελέσματα από τις πρώτες παρατηρήσεις. Ανάμεσα στα υπόλοιπα, ανακοινώνεται η ανακάλυψη 10 νέων μεταβλητών αστέρων σε τρείς διαφορετικές περιοχές του ουρανού, καθώς και 1ος υποψήφιου εξωηλιακού πλανήτη με ακτίνα λίγο μικρότερη από αυτή του Δία (0.92 Rjup).

Abstract

This Diploma Thesis is divided in five chapters.
The first chapter is a brief overview of the history and evolution of extrasolar planetary science and the methods that have been used so far for the detection and characterization of extrasolar planets.
In the second chapter, I describe the aspects of transit modeling. A new method for calculating the Transit Detection Probability and locating the promising spots for observations on the celestial plane is also introduced.
The third chapter of this dissertation is devoted to the actual design of the transit survey. In order to make a system sufficient to detect transits of Hot Jupiter planets, several tests have been made with different CCD cameras and telescopes. The selection of target fields is also described.
In the fourth chapter, a detailed overview of the data reduction pipeline that have been developed is presented. Because of the tiny variations we are trying to detect, a very precise correction of systematic effects is needed. For this purpose algorithms like the Trend Filtering Algorithm (Kovaks et al, 2005) and Sys-Rem (Tamuz et al 2005) are implemented and tested together with self developed methods. After deriving the light curves, the Box Fitting Least Squares algorithm (Kovaks 2004) and the self developed Fast Detection Algorithm are used in search of possible transit-like futures inside the light curves . Algorithms for the detection of periodical signals are also utilized in search of variable stars in the field. The chapter also contains the results of the tests of the pipeline's performance on various kinds of data.
The last chapter contains the actual observations and the results of the analysis.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Ακόμα και αν η Γη θεωρούνταν το κέντρο του Σύμπαντος ως την εποχή του Κέπλερ και του Γαλιλλαίου, η ιδέα πως οι πλανήτες είναι αντικείμενα που υπάρχουν παντού στο Σύμπαν είναι στην πραγματικότητα πολύ παλιά. Πολλοί από τους αρχαίους Έλληνες φιλοσόφους, είχαν ιδέες πολύ προχωρημένες για την εποχή τους. Έτσι, ο *Αναξαγόρας (500 πΧ)* πίστευε πως "Οι κόσμοι που υπάρχουν είναι άπειροι" ενώ ο *Μετρόδωρος απο τη Χίο* (400 πΧ) αναφέρει: " Το να υπάρχει ένας μόνο κόσμος μέσα στο άπειρο του Σύμπαντος είναι το ίδιο παράξενο με το να φυτρώσει ένα μοναδικό στάχυ σε ένα ολόκληρο χωράφι" . Στα γραπτά του *Επίκουρου (341 πΧ - 270 πΧ)* επίσης διαβάζουμε πως "Το Σύμπαν είναι άπειρο. Δεν είμαστε ο μόνος Κόσμος που υπάρχει, αλλά ένας από τους άπειρους Κόσμους που υπάρχουν" .
Παρόμοιες καινοτόμες ιδέες βρίσκουμε στα γραπτά αρκετών από τους Ίωνες φιλόσοφους όπως ο *Ιπόλυτος, ο Λεύκιπος και ο Δημόκριτος.*
Στην άλλη πλευρά της Γης και αρκετούς αιώνες αργότερα ο κινέζος αυτοκρατορικός ακόλουθος *Teng Mu (13ος αιώνας μ.Χ)* υϊοθετεί τις ιδέες των Ελλήνων φιλοσόφων και αναφέρει: " Το κενό διάστημα είναι Βασίλειο, και η Γη δεν είναι παρά ένας μόνο απ' τους υπήκοους αυτού του Βασιλείου.

Υπό την έννοια του επιστημονικού φορμαλισμού, όπως τον εννοούμε σήμερα, οι πρώτες θεωρητικές μελέτες για το σχηματισμό των πλανητικών συστημάτων αρχίζουν με τον *Pierre Simon de Laplace (1784)* και τον *Immanuel Kant (1798)*. Οι θεωρίες των δύο αυτών επιστημόνων εξελίσονται και αμφισβιτούνται για να οδηγήσουν τελικά στις σύγχρονες θεωρίες σχηματισμού.

Μετά από αιώνες θεωρητικών μελετών έρχονται οι πρώτες παρατηρησιακές ενδείξεις ενός πρωτοπλανητικού δίσκου γύρω από το αστέρι Βέγας, από τον δορυφόρο IRAS (1984). Την πρώτη ανακάλυψη ακολουθούν κι άλλες , ενώ ο πρώτος εξωηλιακός πλανήτης ανακαλύπτεται από τον *Alesander Wolszcan* το 1992 με τη μέθοδο του χρονισμού. Ο πλανήτης αυτός βρέθηκε να περιφέρεται γύρω από το Pulsar *PSR 1257+12*, γεγονός που ενίσχυσε την άποψη πως, αφού οι πλανήτες μπορούν να επιβιώσουν στο βίαιο περιβάλλον ενός αστέρα Νετρονίων, τότε θα πρέπει να είναι κάτι κοινό στο Σύμπαν.

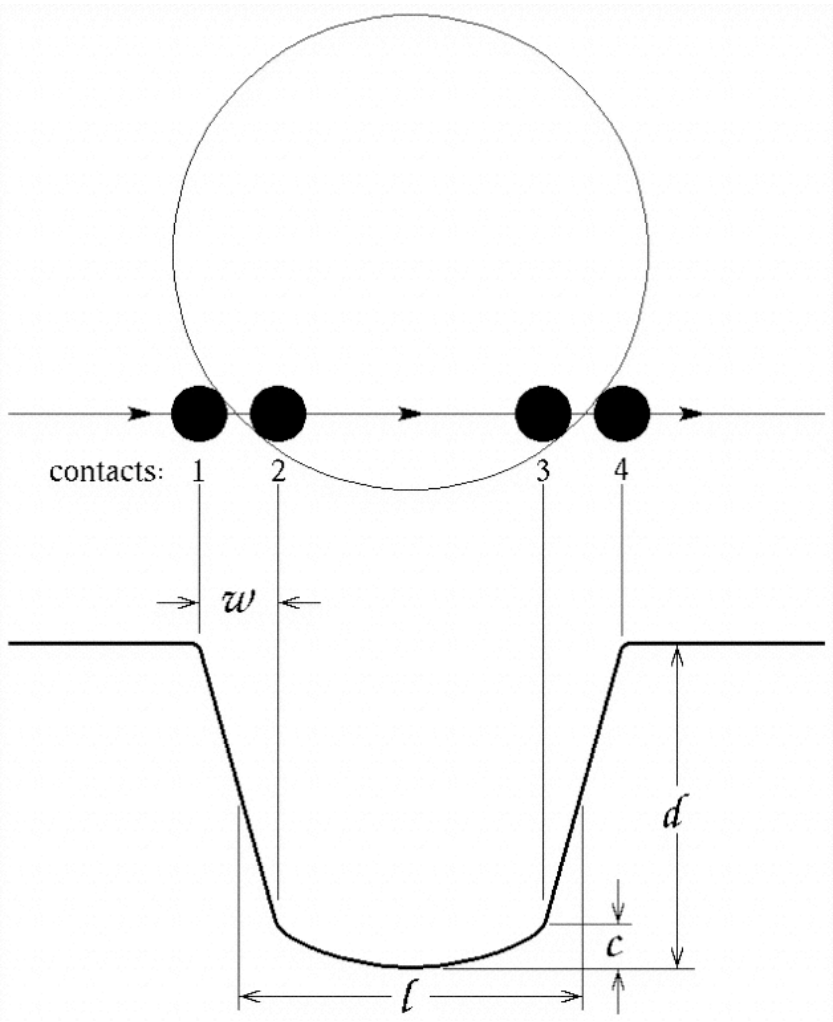
Πράγματι, αυτή η υπόθεση επιβεβαιώνεται 3 χρόνια αργότερα, με την ανακάλυψη ενός εξωπλανητη που περιφέρεται γύρω από ένα αστέρι της Κύριας Ακολουθίας. Η ιστορική ανακοίνωση αυτής της ανακάλυψης έγινε από τους *Michael Mayor* και *Dilier Queloz* (1995), ενώ ο αστέρας στον οποίο παρατηρήθηκε ο πλανήτης ήταν ο 51 του Πηγάσου.

Τις πρώτες ανακαλύψεις ακολουθούν κι άλλες ενώ ο αριθμός των γνωστών εξωηλιακών συστημάτων αυξάνει εκθετικά. Σήμερα είναι γνωστοί περισσότεροι απο

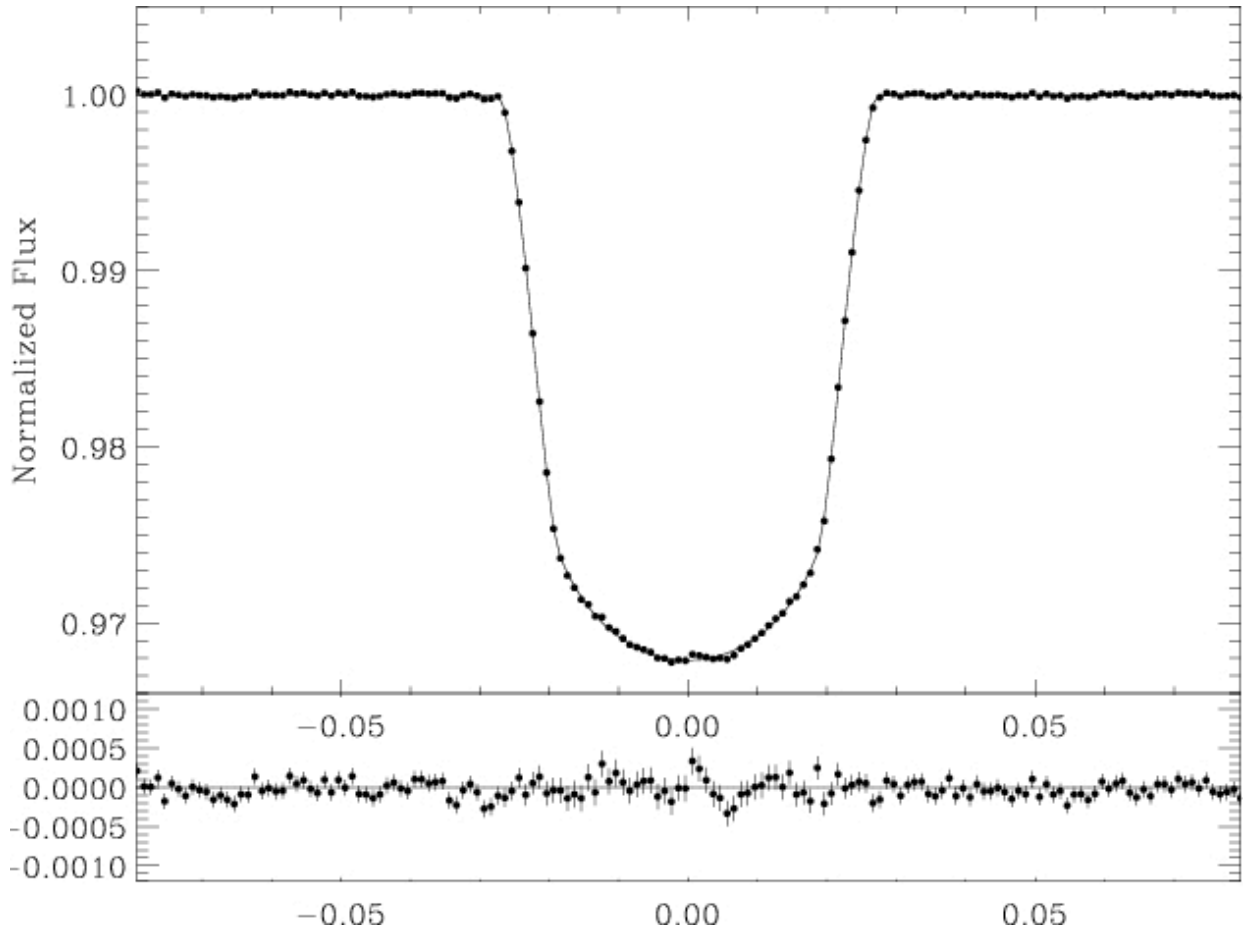
300 πλανήτες ενώ ο αριθμός τους αναμένεται να αυξηθεί σε περισσότερους απο 1000 μέσα στα επόμενα χρόνια.

1.2 ΠΛΑΝΗΤΙΚΕΣ ΔΙΑΒΑΣΕΙΣ

Η πλανητική διάβαση είναι ένα φαινόμενο εύκολα κατανοήσημο. Υπό τον κατάλληλο γεωμετρικό προσανατολισμό, ένας εξωηλιακός πλανήτης είναι δυνατό να παρεβληθεί ανάμεσα στην ευθεία οράσεως του αστέρα που τον φιλοξενεί και του παρατηρητή, προκαλώντας έτσι μια μικρή μείωση της έντασης του φωτός που φτάνει στον τελευταίο (Σχήμα 1 & Σχήμα 2). Παρόλο που η μείωση του φωτός αυτή είναι μικρή (συνήθως δεν ξεπερνά το 2%), η ανίχνευσή της είναι μέσα στις δυνατότητες των σύγχρονων αστρονομικών CCD και τηλεσκοπίων.



Σχήμα 1: Σχηματική αναπαράσταση του φαινομένου της διάβασης



Σχήμα 2: Πραγματική φωτομετρική καμπύλη διάβασης, από τον δορυφόρο COROT

Μαθηματική ανάλυση της διάβασης

Αν και η διάβαση είναι ένα απλό γεωμετρικό φαινόμενο, η ανάλυση της καμπύλης μπορεί να οδηγήσει σε αρκετά σημαντικά συμπεράσματα για τον αστέρα και τον πλανήτη.

Σε μια πρώτη προσέγγιση, μετρώντας το “βάθος” της καμπύλης, μπορούμε να κάνουμε μια εκτίμηση για τη σχετική ακτίνα του πλανήτη σε σχέση με τον αστέρα:

$$\Delta F = \frac{F_{notransit} - F_{transit}}{F_{notransit}} = \left(\frac{R_p}{R_*}\right)^2$$

Εαν, γνωρίζουμε επιπλέον, πχ, από ένα θεωρητικό μοντέλο και φασματοσκοπικές παρατηρήσεις, την ακτίνα του αστέρα, έχουμε από την παραπάνω σχέση μια απευθείας εκτίμιση της ακτίνας του πλανήτη.

Μετρώντας επιπλέον το χρονικό διάστημα ανάμεσα στην πρώτη και τέταρτη επαφή, το διάστημα ανάμεσα στη δεύτερη και τρίτη επαφή, καθώς και την περίοδο του φαινομένου παίρνουμε όλα τα χαρακτηριστικά της τροχιάς και του πλανήτη μέσω των εξισώσεων:

$$t_T = \frac{P}{\pi} arcsin \left(\frac{R_*}{\alpha} \left\{ \frac{\left[1 + \left(\frac{R_p}{R_*}\right)\right]^2 - \left[\left(\frac{\alpha}{R_*}\right) cosi\right]^2}{1 - cos^2 i} \right\}^{1/2} \right)$$

$$\frac{sin\left(\frac{t_f \pi}{P}\right)}{sin\left(\frac{t_T \pi}{P}\right)} = \frac{\left\{\left[1 - \left(\frac{R_p}{R_*}\right)\right]^2 - \left[\left(\frac{\alpha}{R_*}\right) cosi\right]^2\right\}^{1/2}}{\left\{\left[1 + \left(\frac{R_p}{R_*}\right)\right]^2 - \left[\left(\frac{\alpha}{R_*}\right) cosi\right]^2\right\}^{1/2}}$$

$$P^2 = \frac{4\pi^2 \alpha^3}{G(M_* + M_P)}$$

Οι εξισώσεις αυτές, αν και απλές (δεν λαμβάνουν υπ' όψην την εκκεντρότητα μπορούν να χρησιμοποιηθούν

Σε μια πιό ακριβή προσέγγιση ο Gimenez (2006), πρότεινε τη χρήση μαθηματικών εργαλείων της οπτικής και συγκεκριμένα των ολοκληρωμάτων της περίθλασης για τη μοντελοποίηση των διαβάσεων.
Το μοντέλο στο οποίο κατέλληξε, ισχύει για κάθε τύπο διάβασης, ενώ λαμβάνει υπ' όψην του την εκκεντρότητα, την αμαύρωση χείλους του αστέρα (γραμμική ή πολυωνυμική) καθώς και τη συμβολή του φωτός από άλλα αστέρια στο πεδίο.
Η κύρια εξίσωση του μοντέλου είναι η:

$$l(t) = L_* + L_P - \alpha(t) L_*$$

Χρησιμοποιόντας τη σχετική ένταση αντί της πραγματικής, καθώς και τη φάση

$$\vartheta = (2\pi/P)(t - t_0)$$

η παραπάνω εξίσωση μετασχηματίζεται σε:

$$l(\theta) = 1 - \alpha(\theta) L_*$$

Το όλο πρόβλημα τώρα έγγυται στον υπολογισμό της συνάρτησης α(θ). Η τελευταία, δεν είναι παρά το μέρος της έντασης του φωτός του αστέρα που αποκρύπτεται λόγω του πλανήτη. Μετά από μερικούς γεωμετρικούς υπολογισμούς, μπορούμε να γράψουμε την συνάρτηση α(θ) ώς

$$\alpha = \int_s I(\mu) cos\gamma d\sigma$$

όπου

$$I(\mu) = I(1)\left[1 - \sum_{n=1}^{N} u_n(1-\mu^n)\right]$$

είναι η ένταση του αστέρα στο συγγεκριμένο σημείο, όπως υπολογίζεται από τον εκάστωτε πολυωνυμικό νόμο για την αμαύρωση χείλους που χρησιμοποιείται.
Το παραπάνω ολοκλήρωμα, μετά από μερικές πράξεις, μπορεί να γραφεί ώς

$$\alpha = \sum_{0}^{N} C_n \alpha_n$$

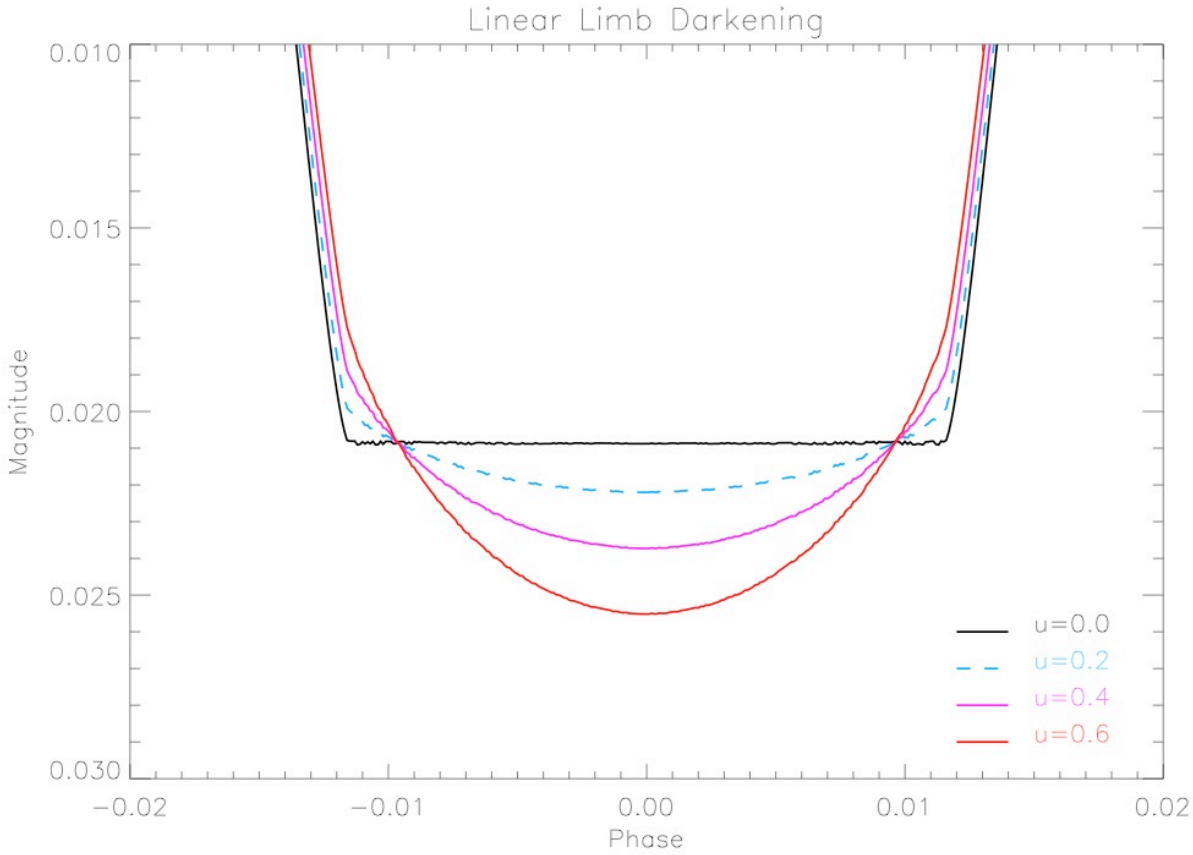
όπου

$$C_0 = \frac{1 - \sum_{n=0}^{N} u_n}{1 - \sum_{n=1}^{N} \frac{n u_n}{n+2}}; C_n = \frac{u_n}{1 - \sum_{n=1}^{N} \frac{n u_n}{n+2}}$$

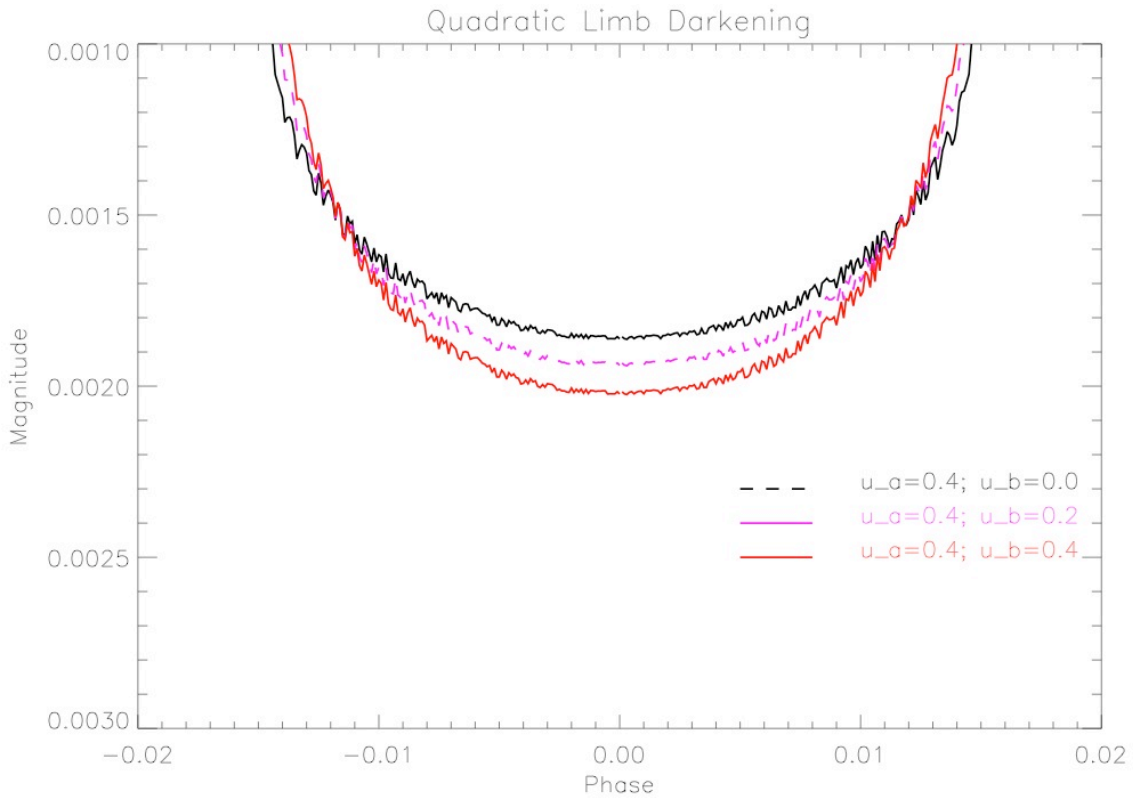
Οι σταθερές α_n γράφονται τελικά ώς

$$a_n(b,c) = \frac{b^2(1-c^2)^{\nu+1}}{\nu\Gamma(\nu+1)} \sum_{j=0}^{\infty} (-1)^j (2j+\nu+2) \frac{\Gamma(\nu+j+1)}{\Gamma(j+2)} \times \left\{G_j(\nu+2;\nu+1;1-b)\right\}^2 G_j(\nu+2,1;c^2)$$

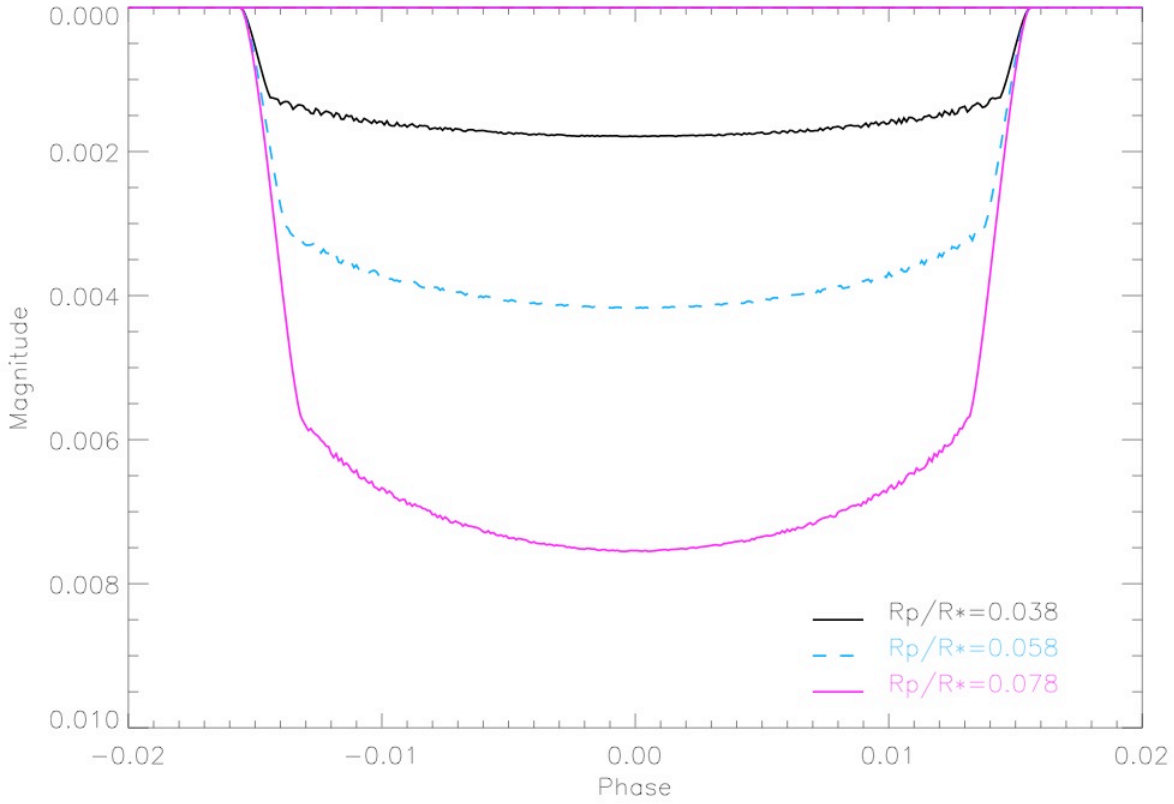
Το παραπάνω μοντέλο, αν και εκ πρώτης όψεως μπορεί να φαίνεται περίπλοκο, είναι πολύ εύκολο να προγραμματιστεί, ενώ ταυτόχρονα δεν απαιτεί μεγάλη υπολογιστική ισχύ.
Τα σχήματα 2, 3 και 4 παρουσιάζουν διάφορα μοντέλα διαβάσεων, σε συνάρτηση με διάφορες φυσικές παραμέτρους



Σχήμα 3: Μεταβολή του προφίλ της διάβασης σε συνάρτηση με τη μεταβολή της σταθεράς του γραμμικού νόμου αμαύρωσης χείλους



Σχήμα 4: Μεταβολή του προφίλ της διάβασης σε συνάρτηση με τη μεταβολή της σταθεράς του διωνυμικού νόμου αμαύρωσης χείλους



Σχήμα 5: Μεταβολή του προφίλ της διάβασης σε συνάρτηση με το μέγεθος του πλανήτη

1.3 ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΕΣ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ

Η πιθανότητα να ανιχνεύσουμε έναν πλανήτη με τη μέθοδο των διαβάσεων εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, τόσο φυσικούς και γεωμετρικούς, όσο και του οπτικού συστήματος που χρησιμοποιούμε για την παρατήρηση. Για να κάνουμε έναν ποσσοτικό υπολογισμό αυτής της πιθανότητας, χρειάζεται να λάβουμε υπ'όψην όλους αυτούς τους παράγοντες.
Καταρχήν, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, ένας εξωηλιακός πλανήτης, μπορεί να ανιχνευθεί με τη μέθοδο των διαβάσεων , μόνο αν το επίπεδο της τροχιάς του είναι ευνοϊκά προσανατολισμένο σε σχέση με τον παρατηρητή.
Από όλα τα αστέρια που καταγράφουμε σε μιά εικόνα της κάμερας, μόνο μερικά είναι κατάλληλα ώστε να φιλοξενούν πλανήτη ενώ ένα κλάσμα μόνο από αυτά, έχει πράγματι πλανητικό σύστημα. Τελικά, ένα μέρος μόνο από τους πλανήτες αυτούς είναι κατάλληλα προσανατολισμένοι ώστε να δώσουνε διάβαση και ένα κλάσμα μόνο από αυτές τις διαβάσεις μπορεί να παρατηρηθεί με το οργανό μας από τον συγκεκριμένο τόπο παρατήρησης.
Για να κάνουμε έναν ποσσοτικό υπολογισμό όλων αυτών των παραγόντων πρέπει καταρχήν να βρούμε έναν τρόπο να υπολογίσουμε τον αριθμό των αστέρων που παρατηρεί το οπτικό μας σύστημα όταν είναι στραμένο σε μια συγκεκριμένη περιοχή του ουρανού. Οι Betty και Gaudi (2007) έλυσαν αυτό το πρόβλημα χρησιμοποιώντας ένα αναλυτικό μοντέλο της πυκνότητας του Γαλαξία, για να υπολογίσουν το κλάσμα των αστεριών που παρατηρεί ένα συγκεκριμένο όργανο σε μια δεδομένη θέση. Η εξίσωση που χρησιμοποίησαν είναι ή:

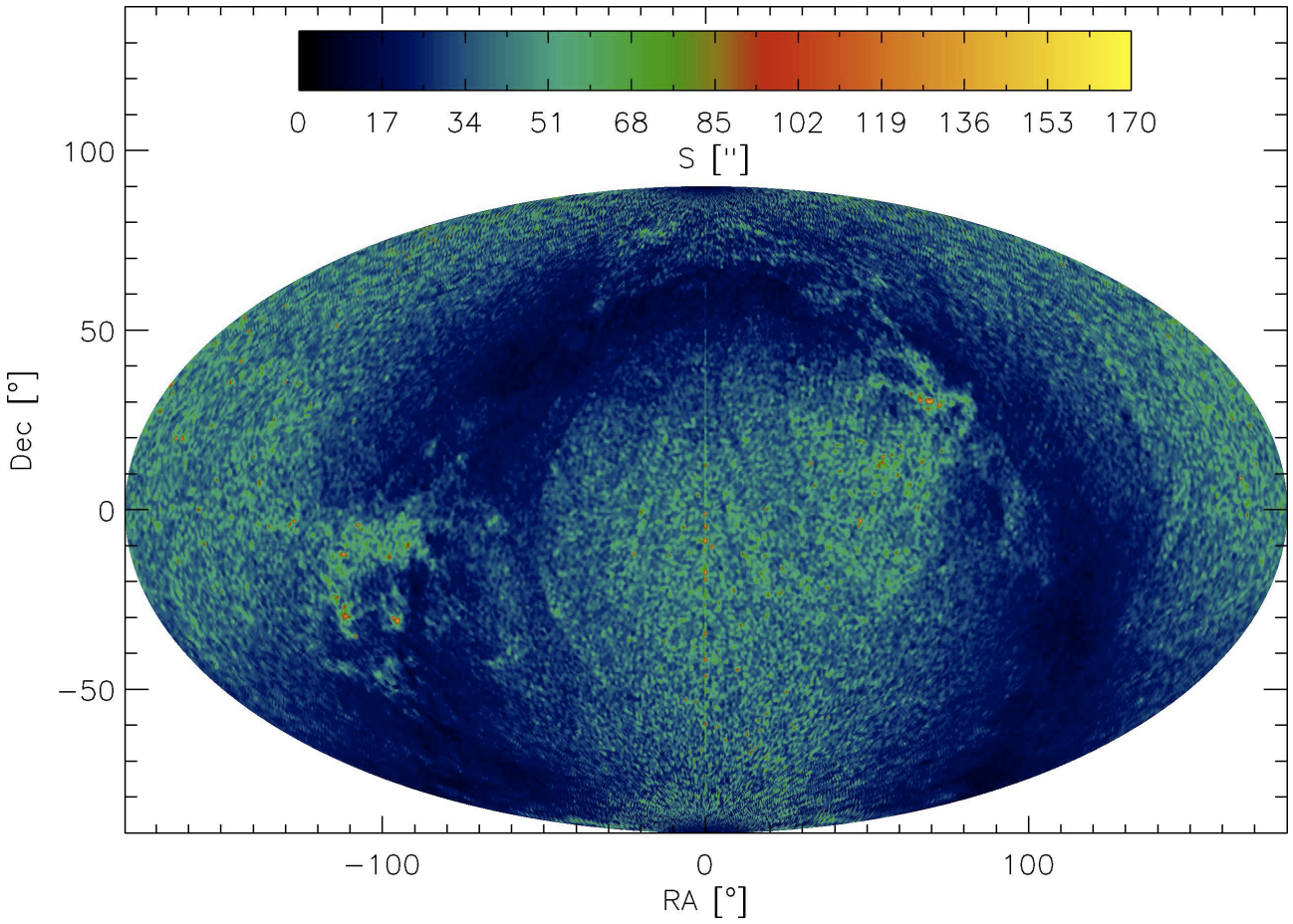
$$\frac{d^6 N_{det}}{dR_P dp dM dr dl db} = \rho_*(r,l,b) r^2 cosb \frac{dn}{dM} \frac{df(R_p,p)}{dR_P dp} \times P_{det}(M,r,R_p,p)$$

όπου η ολική πιθανότητα ανίχνευσης υπολογίζεται ως γινόμενο όλων των παραπάνω παραγόντων.
Ωστόσο, η χρήση ενός αναλυτικού μοντέλου για τον υπολογισμό των αστέρων μέσα στο πεδίο, έχει αρκετά μειονεκτήματα. Το κυριότερο είναι πως δεν λαμβάνονται υπ'όψην τυχόν ανομοιογένειες του γαλαξιακού επιπέδου, που μπορεί να παίζουν σημαντικό ρόλο στην επιλογή των πεδίων παρατήρησης.
Για να λυθεί αυτό το πρόβλημα, στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε αντί του αναλυτικού μοντέλου, ο κατάλογος Tycho. Ο τελευταίος περιέχει βασικές πληροφορίες (ουρανογραφικές συντεταγμένες, οπτικό μέγεθος, δείκτη χρώματος και παράλλαξη) για πάνω απο 1,000,000 αστέρες με μέγεθος m < 11.5 mag.
"Κόβοντας" τον κατάλογο σε μικρότερα μωσαϊκά, αντίστοιχα της γωνίας του πεδίου παρατήρησης μπορούμε να υπολογίσουμε την πιθανότητα ανίχνευσης, αλλά και να "οπτικοποιήσουμε" τους υπολογισμούς μας με τη βοήθεια χαρτών.

Αναλυτικά ο αλγόριθμος για τον υπολογισμό έχει ως εξής:
Αρχικά ο κατάλογος χωρίζεται σε φαινόμενα πεδία εύρους χ x y. Τα χ και y μπορούν να προσαρμοστούν κατάλληλα, έτσι ώστε να αντιπροσωπεύουν το πεδίο ενός συγκεκριμένου οργάνου. Σε μια πρώτη προσσέγγιση θα θέσουμε χ=1 και y=1. Το κάθε πεδίο αντιστοιχίζεται με τις συντεταγμένες που έχει το κέντρο του. Εάν n είναι ο αριθμός των αστέρων στο πεδίο , τότε η μέση γωνιακή απόσταση μεταξύ των αστέρων, έτσι όπως προβάλλεται στον ουράνιο θόλο είναι:

$$S(\alpha,\delta) = \sqrt{\frac{3600}{n}}$$

Στο σχήμα 6 φαίνεται ο παραπάνω αριθμός, ως συνάρτηση των ουραγραφικών συντεταγμένων.



Σχήμα 6: Η μέση γωνιακή απόσταση των αστέρων του Tycho.

Εάν lpix είναι το μέγεθος ενός pixel της CCD σε μm, F η εστιακή απόσταση του τηλεσκοπίου σε mm και npix ο αριθμός των pixel ανα διάσταση, τότε ο αριθμός των αστέρων που μπορεί να δεί το τηλεσκόπιό μας σε ένα δεδομένο πεδίο είναι:

$$N = 206265\frac{l_{pix}n_{pix}}{FS(\alpha,\delta)_{arcsec}}$$

Αστροφυσικές παράμετροι
Ένα σημαντικό βήμα για την περαιτέρω διερεύνηση είναι ο υπολογισμός των αστροφυσικών παραμέτρων του κάθε αστέρα του πεδίου.
Συγκεκριμένα, από τα δεδομένα του καταλόγου μπορούμε να υπολογίσουμε:
Τη θερμοκρασια,

$$T_{eff} = 10^{14.5501-(B-V)]/3.684} K$$

το απόλυτο μέγεθος,

$$M_v = m_v - 5^m log\left(\frac{d}{10pc}\right)$$

την ακτίνα του αστέρα,

$$\frac{R_*}{R_\odot} = \left[\left(\frac{5770K}{T_{eff}}\right)^4 10^{(4.83-M_v)/2.5}\right]^{1/2}$$

και την περιεκτικότητα σε μέταλα,

$$[Fe/H]_* = \frac{1}{411}\left(\frac{T_{eff}}{K} - 8423 + 4736(B-V) - 1106(B-V)^2\right)$$

Υπολογισμός της πιθανότητας ανίχνευσης
Μετά τους παραπάνω υπολογισμούς μπορούμε να υπολογίσουμε την πιθανότητα, ένας αστέρας του πεδίου να φιλοξενεί πλανήτη:

$$P_{\exists planet}([Fe/H]_*) = 0.03 \cdot 10^{2[Fe/H]_*}$$

Η παραπάνω εξίσωση, πολλαπλασιαζόμενη με έναν όρο ο οποίος μας δίνει τη γεωμετρική πιθανότητα ανίχνευσης,

$$P_{geo} = 23.8\left(\frac{M_*}{M_\odot}\right)^{-1/3}\left(\frac{R_*}{R_\odot}\right)\left(\frac{P}{d}\right)^{-2/3}$$

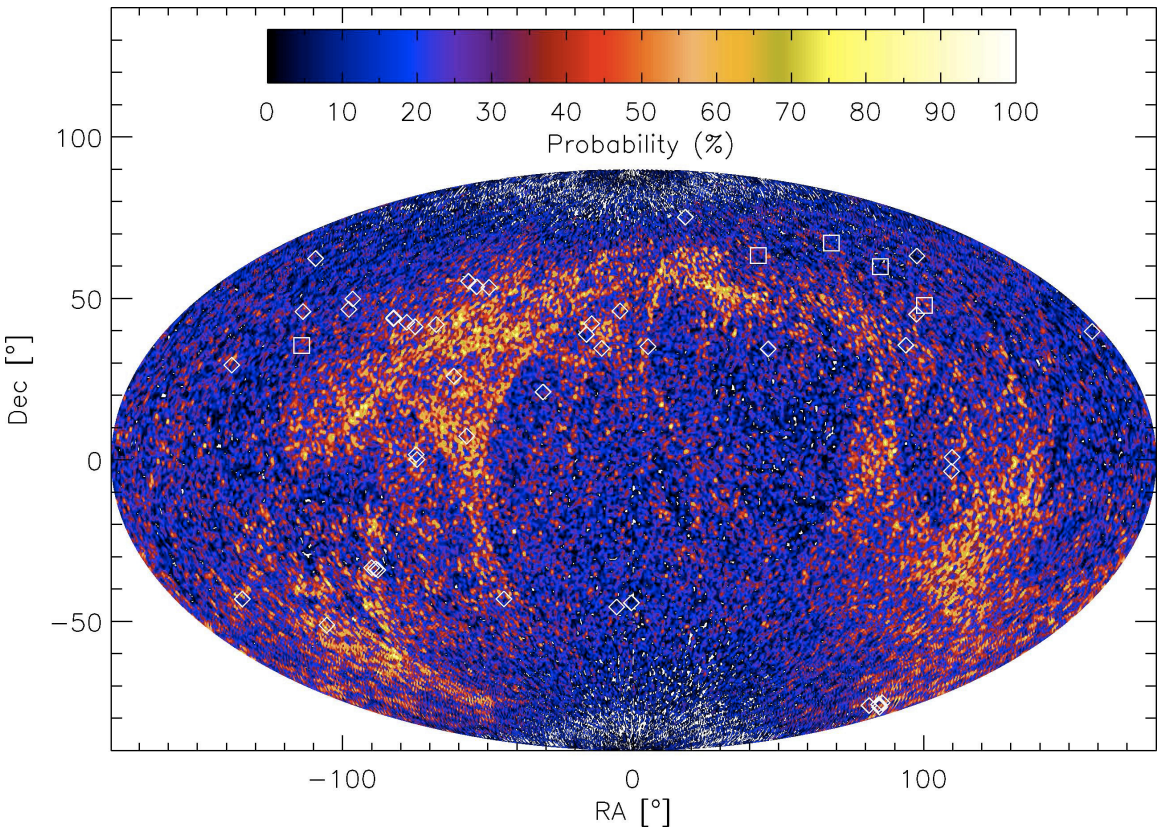
μας δίνει τη συνολική πιθανότητα, ένας δεδομένος αστέρας του πεδίου να φιλοξενεί πλανήτη, κατάλληλα προσανατολισμένο με τη Γή ώστε να δώσει διάβαση:

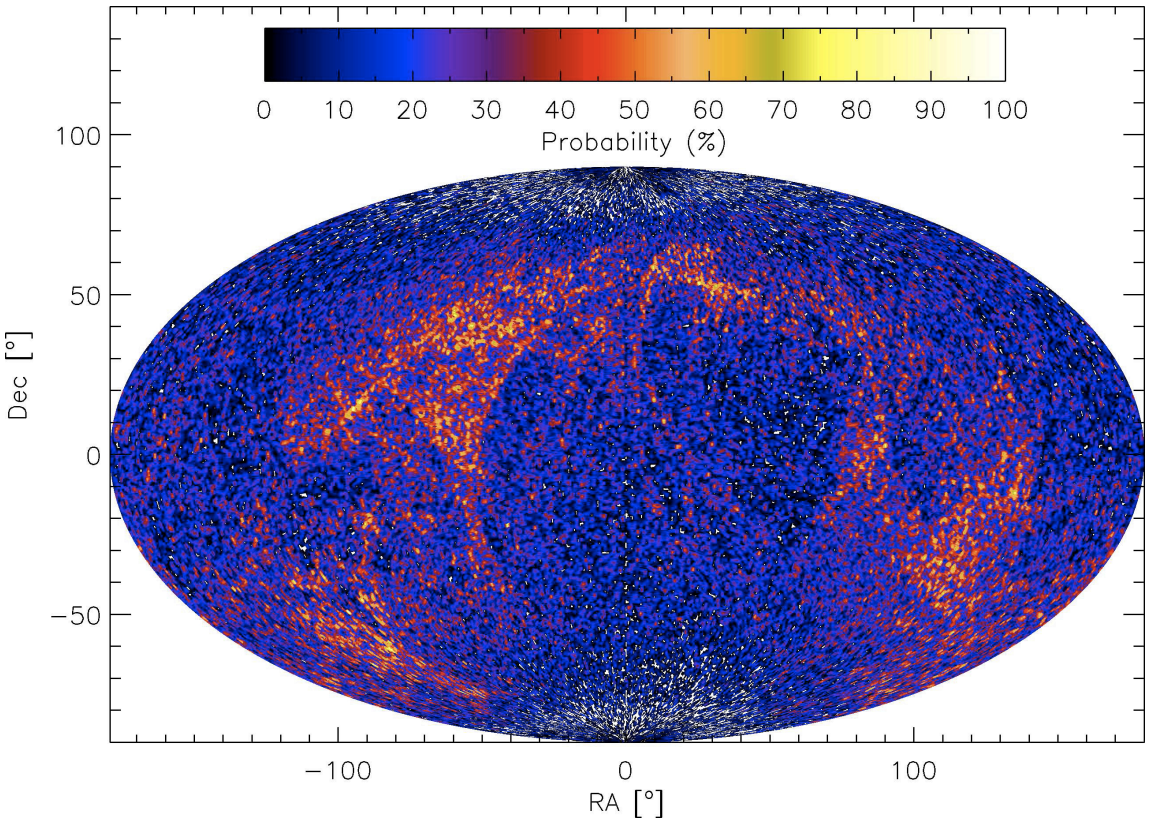
$$P_{tot} = P_{\exists planet} \times P_{geo}$$

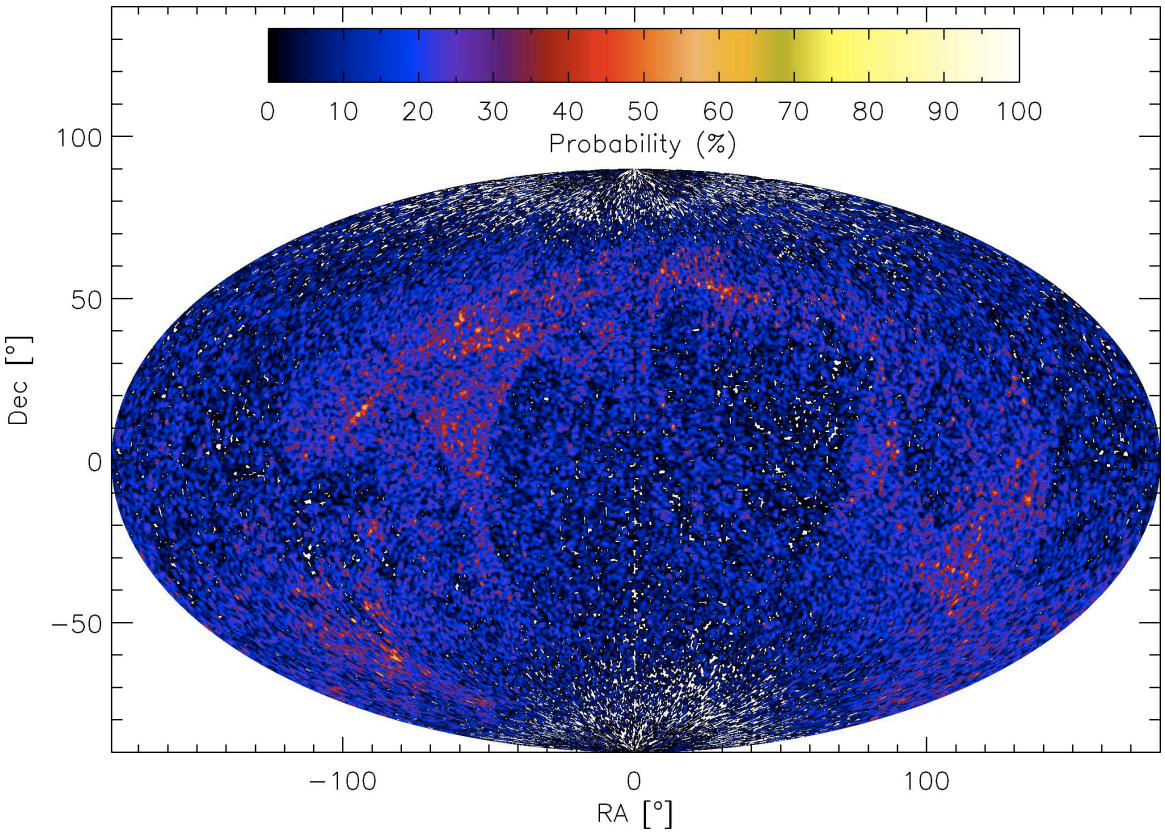
Η συνολική πιθανότητα, για ένα δεδομένο πεδίο θα είναι:

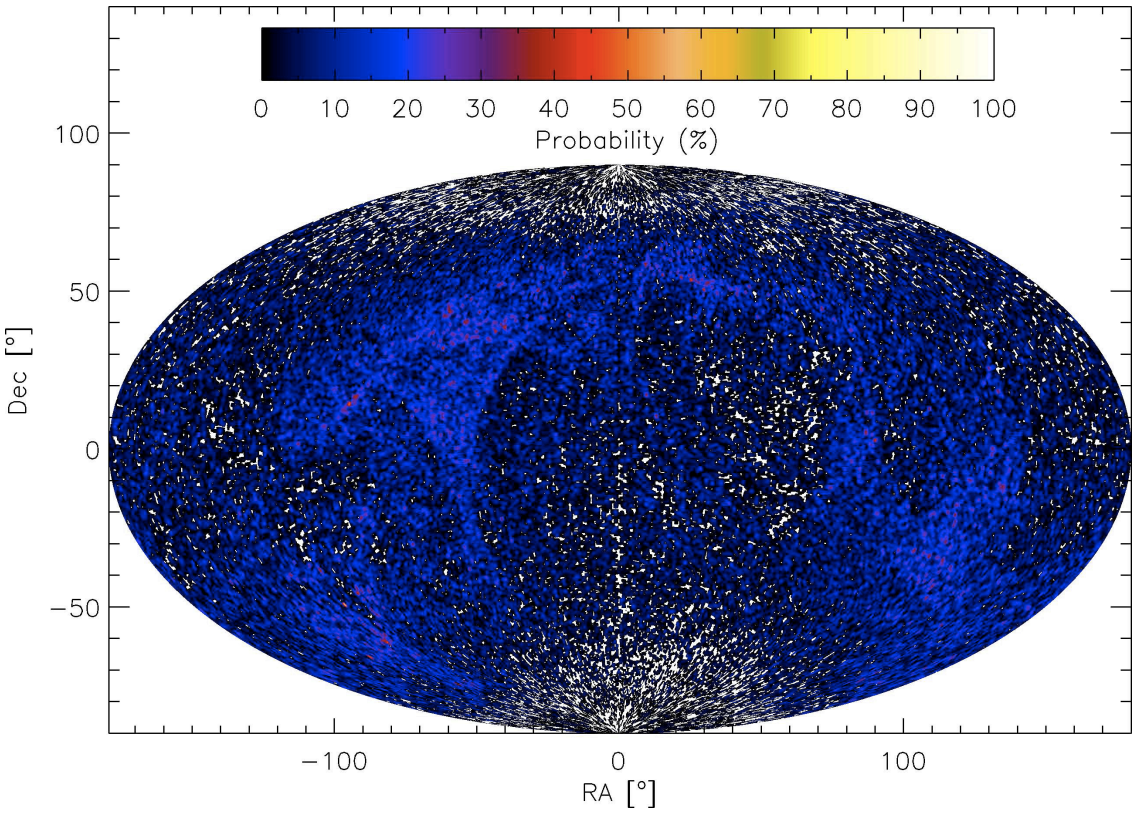
$$P^{field}_{\exists transit} = 1 - P^{field}_{\nexists transit} = 1 - \prod_{i=1}^{n}(1 - P_{tot})$$

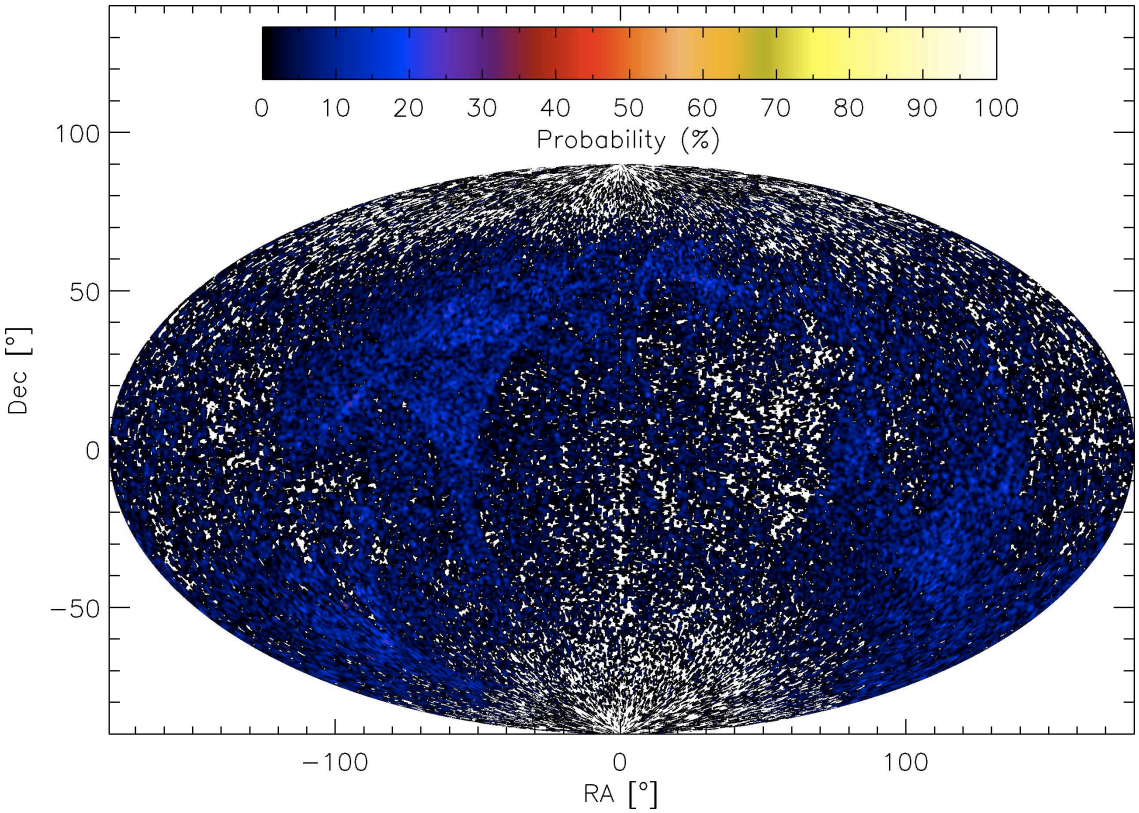
Στα παρακάτω σχήματα φαίνονται οι υπολογισμοί για 5 διαφορετικές περιόδους, 3.63 μέρες (η μέση τιμή της περιόδου των γνωστών εξωηλιακών πλανητών), 5, 10, 20 και 50 μέρες αντίστοιχα. Στον πρώτο χάρτη έχουνε σημειωθεί οι θέσεις των εξωηλιακών πλανητών που έχουνε βρεθεί με τη μέθοδο των διαβάσεων μέχρι σήμερα.




0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100
Probability (%)
100
50
0
−50
Dec [°]
−100
0
100
RA [°]


0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100
Probability (%)
100
50
0
−50
Dec [°]
−100
0
100
RA [°]

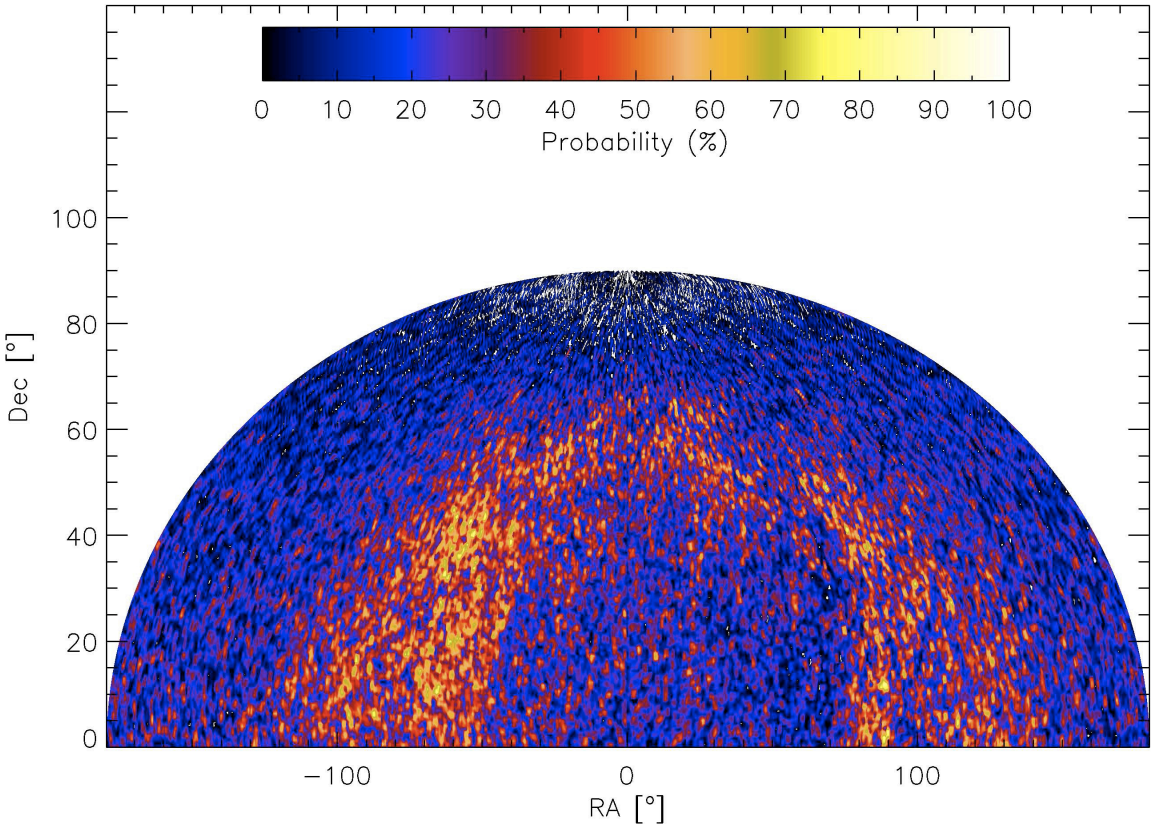

0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100
Probability (%)
100
50
0
−50
Dec [°]
−100
0
100
RA [°]

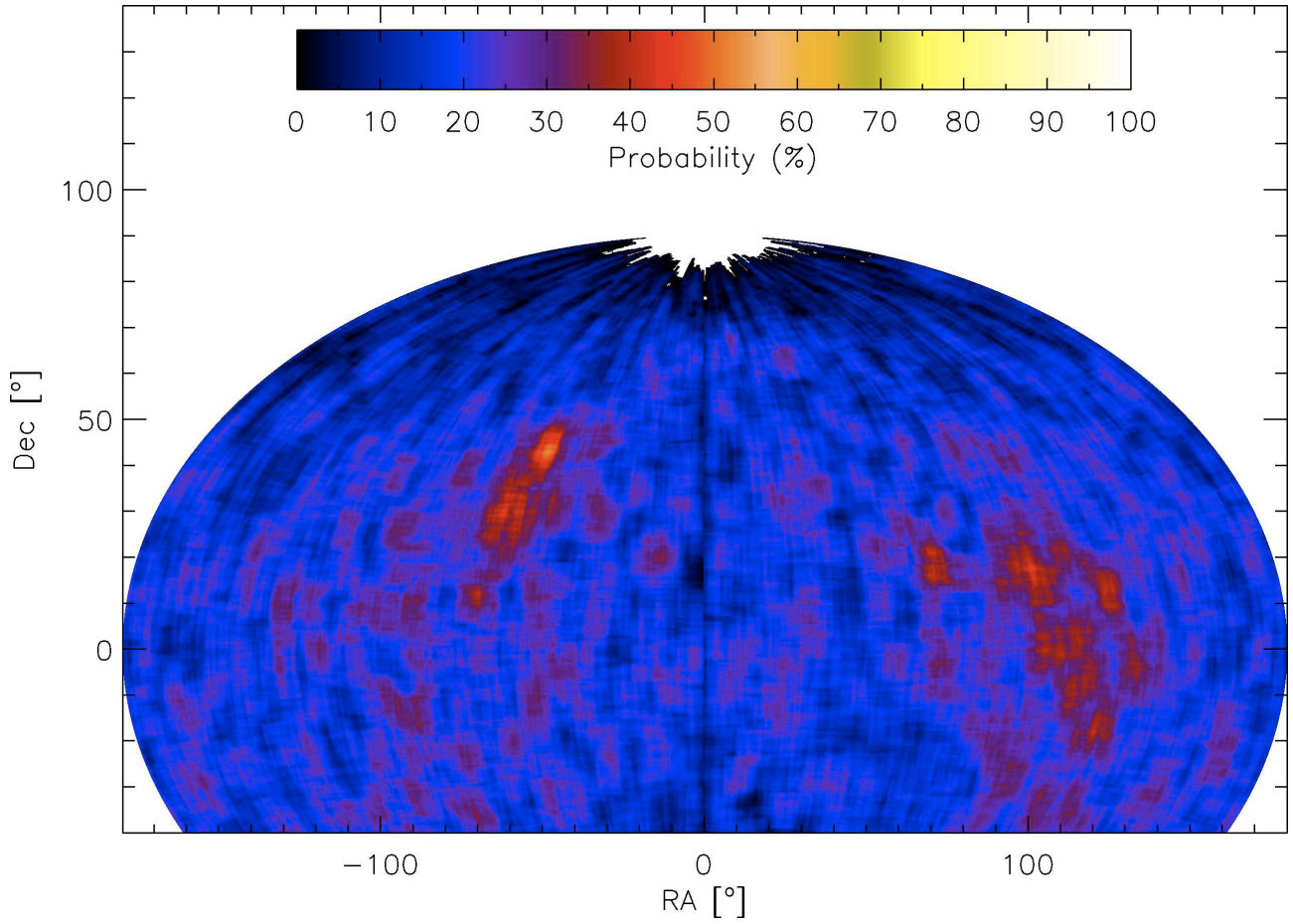

0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100
Probability (%)
100
50
0
−50
Dec [°]
−100
0
100
RA [°]

Παράμετροι του συστήματος.
Εάν λάβουμε υπ'όψην τις παραμέτρους του οργάνου παρατήρησης, τότε αλλάζει προφανώς το μέγεθος των πεδίων που κόβουμε τον χάρτη, αλλά και ο αριθμός των αστέρων τους οποίους μπορεί να δεί το όργανο:

$$P^{field}_{\exists transit} = 1 - P^{field}_{\nexists transit} = 1 - \prod_{i=1}^{N}(1 - P_{tot})$$

Ώς παράδειγμα παραθέτουμε τους χάρτες πιθανότητας για δύο τρέχοντα προγράμματα ανίχνευσης, το BEST και το XO. Οι διαφορές είναι τεράστιες. Όχι μόνο οι ευνοϊκές περιοχές διαφέρουν, αλλά και η ολική πιθανότητα ανίχνευσης είναι πολύ διαφορετική.




0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100
Probability (%)
100
50
0
Dec [°]
−100
0
100
RA [°]

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

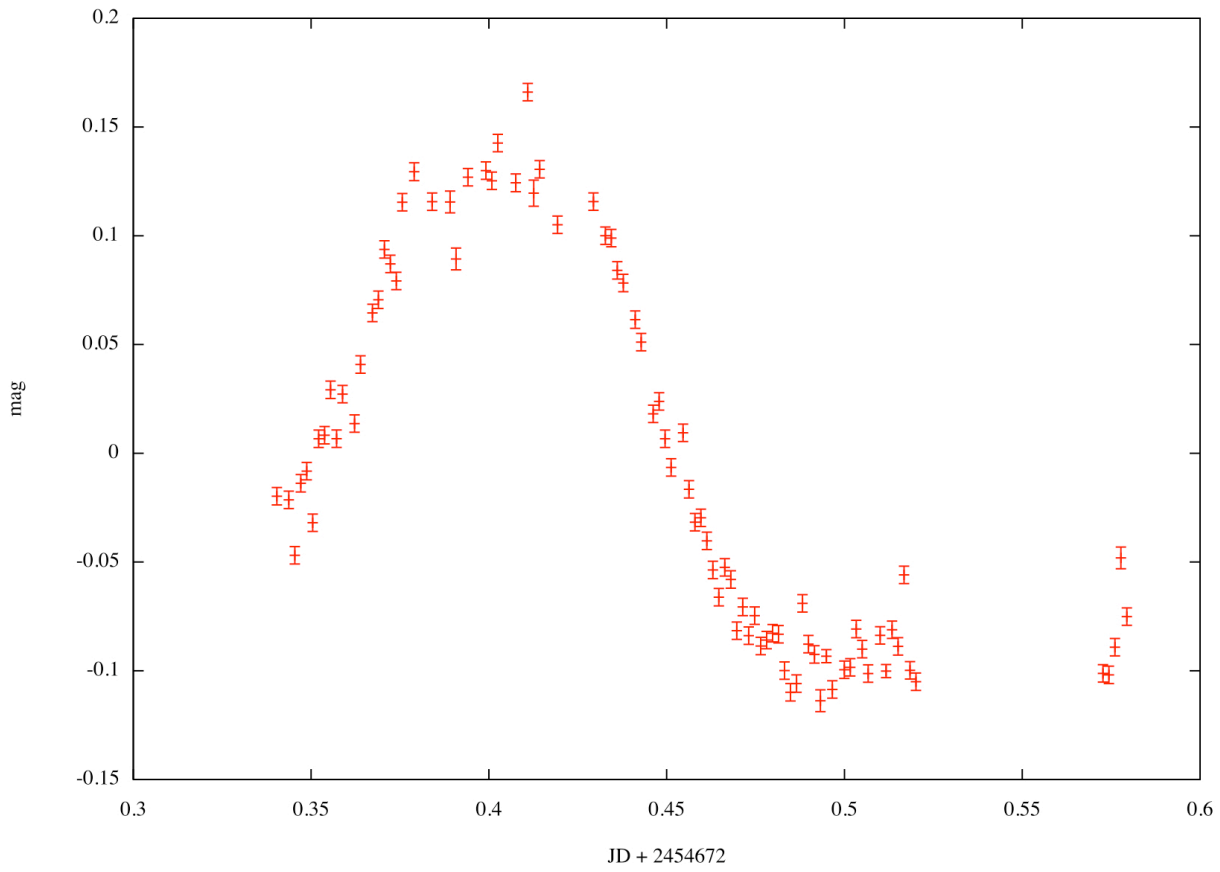
Η παραπάνω μέθοδος χρησιμοποιήθηκε για να διαλέξουμε ένα πεδίο παρατήρησης στον ουρανό , με κριτήριο τη μέγιστη πιθανότητα ανίχνευσης.
Το πεδίο με τη μεγαλύτερη πιθανότητα (71%) για το όργανό μας έχει συντεταγμένες:

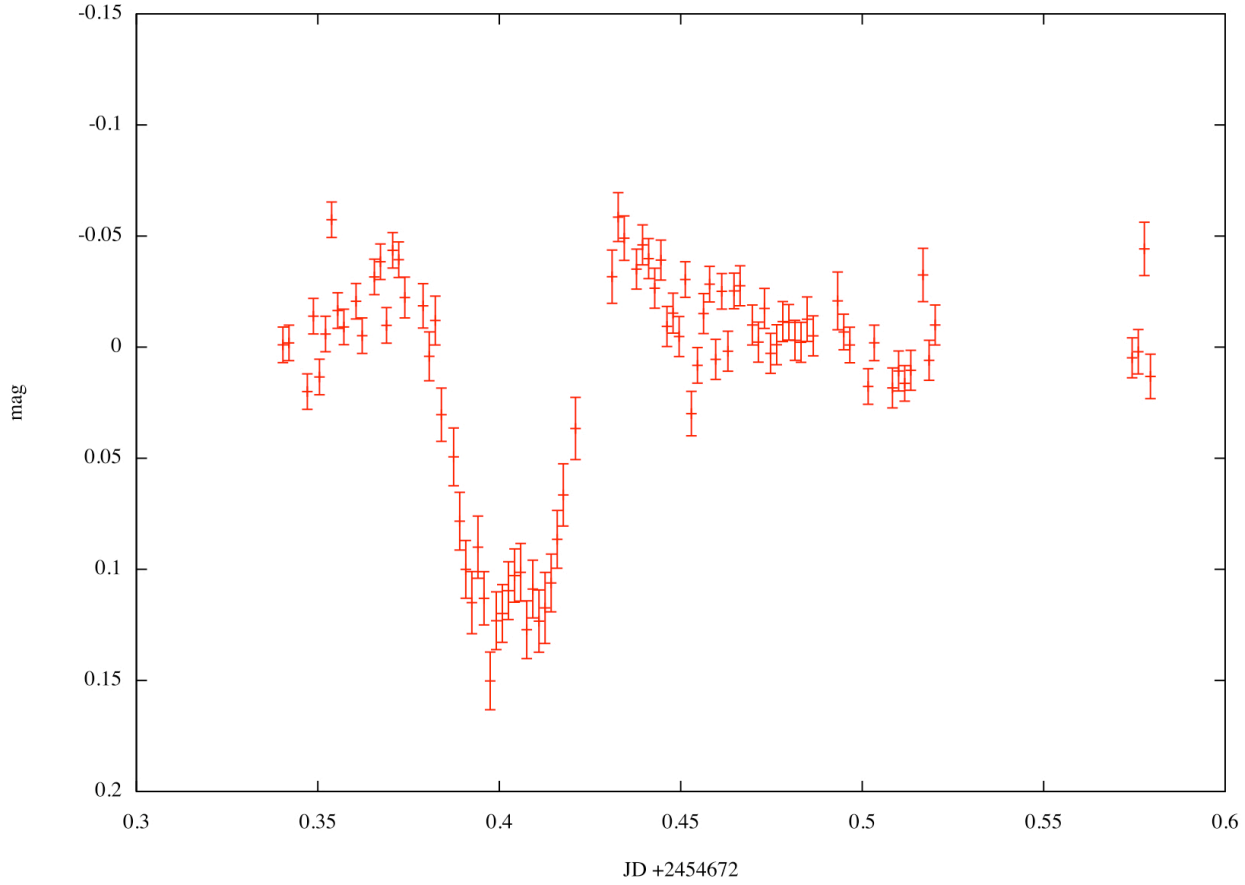
α: 22 53 00, δ: +44 30 00

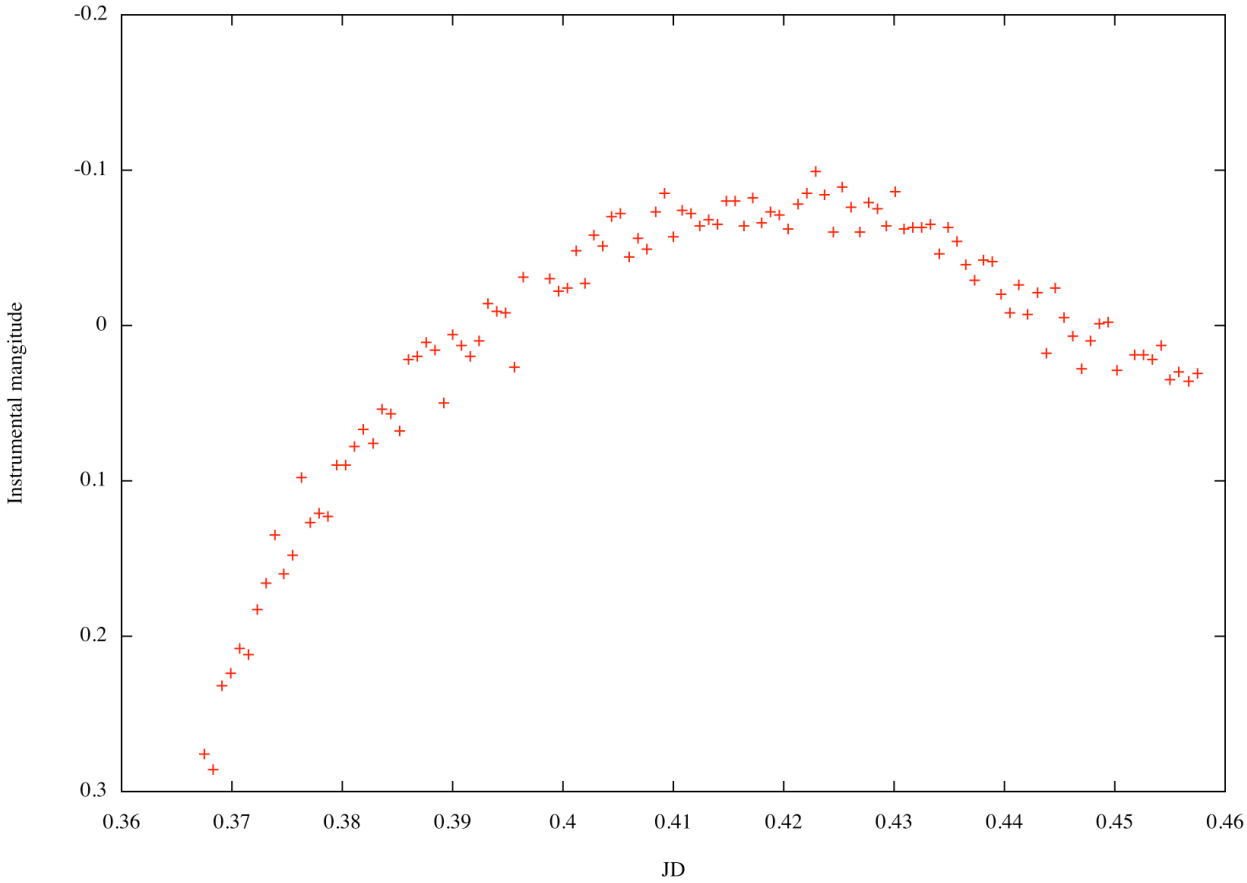
Τα όργανα που χρησιμοποιήθηκαν για την παρατήρηση ήταν ένα τηλεσκόπιο Celestron και μία CCD camera Fingerlakes PL6303E.

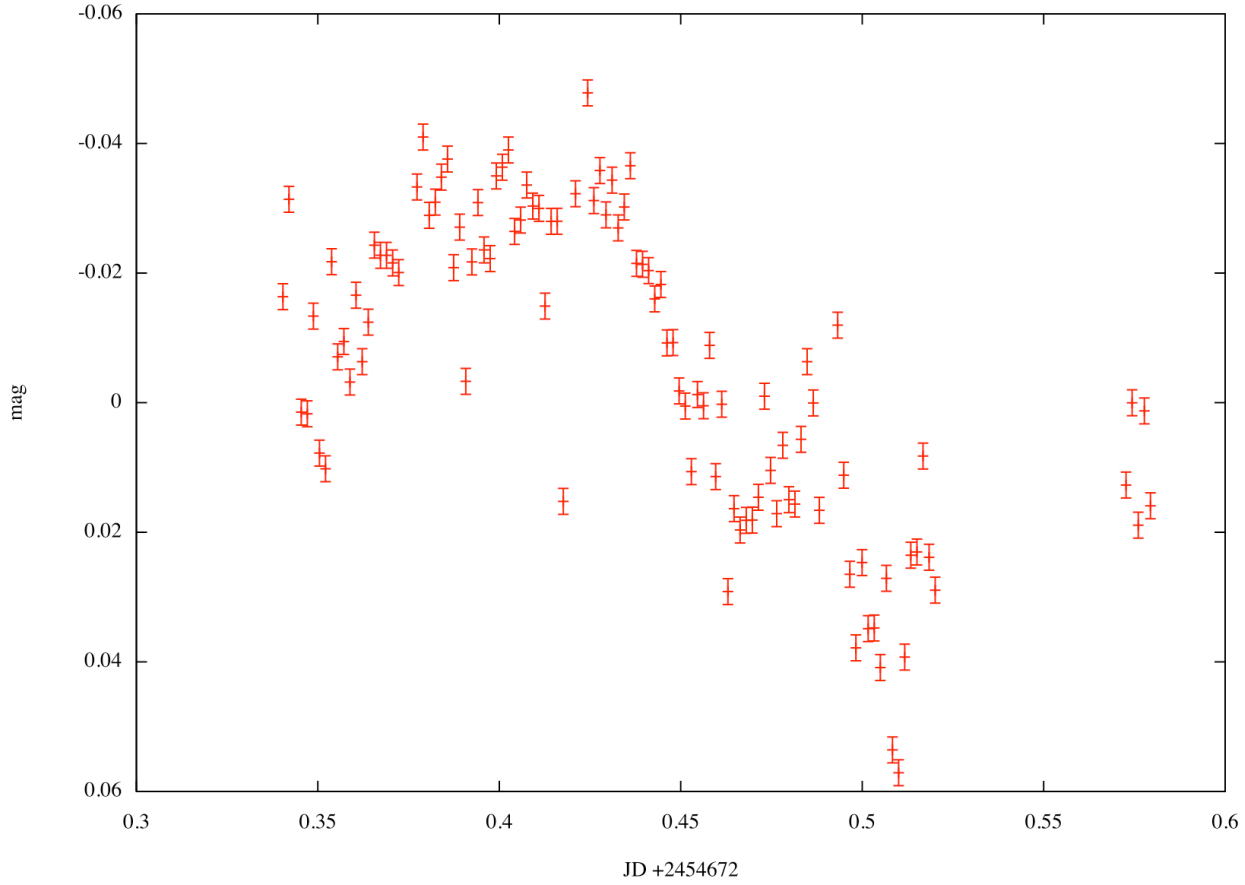
Παρατηρήσεις
Παρατηρήσαμε το παραπάνω πεδίο για μία νύχτα στις 24/07/2008. Συνολικά συλλέχθηκαν 120 φωτογραφίες, έκθεσης 120 sec η κάθε μία. Για τις παρατηρήσεις η κάμερα ψύχθηκε στους -60 βαθμούς, για να μειωθεί ο θερμικός θόρυβος και να ελαχιστοποιηθούν τα σφάλματα. Ακόμα, η κάμερα λειτούργησε σε 2X2 bin mode, ενώ δε χρησιμοποιήθηκε κανένα οπτικό φίλτρο.

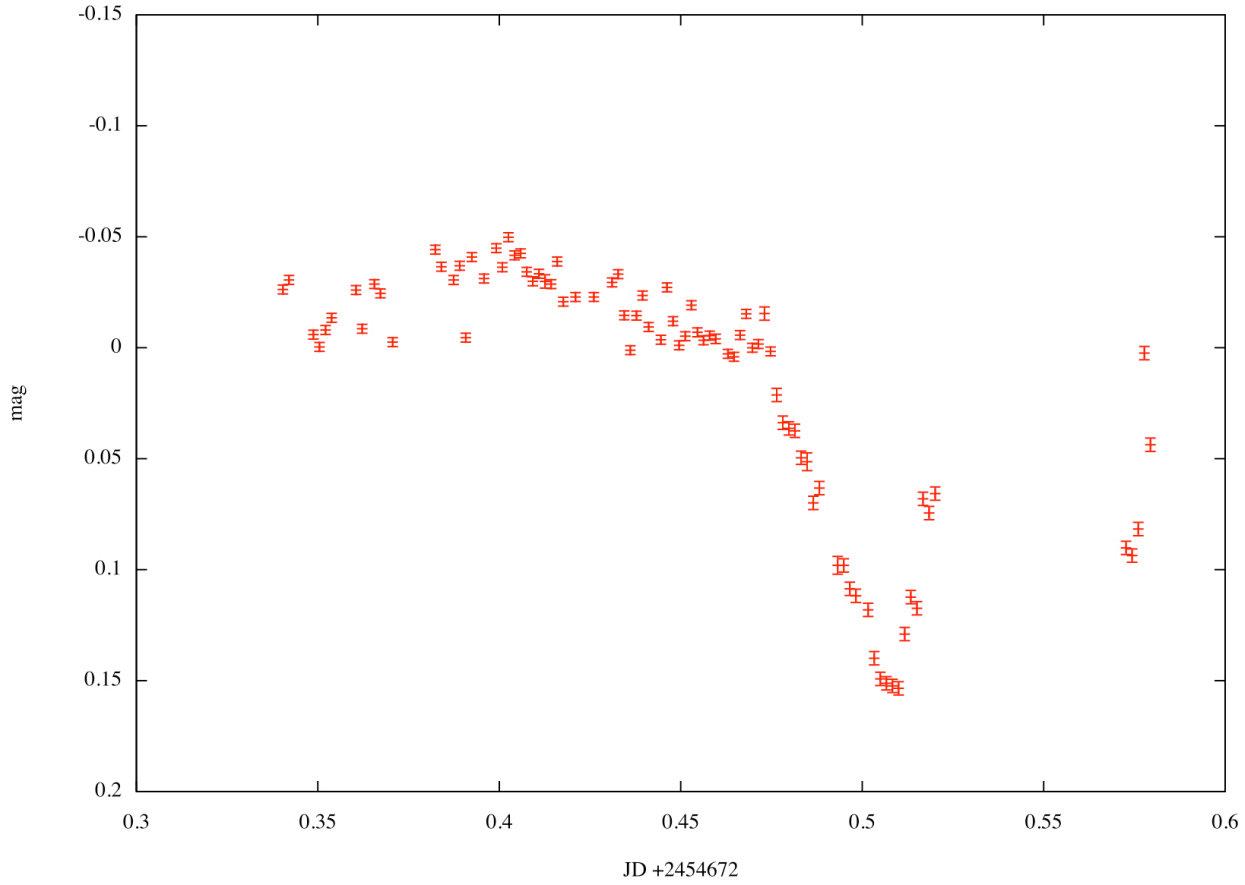
Ανάλυση
Οι εικόνες αναλύθηκαν με το λογισμικό DAOPHOT. Για κάθε αστέρα του πεδίου, δημιουργήθηκε μια καμπύλη φωτός, η οποία στη συνέχεια διορθώθηκε έτσι ώστε να μην περιέχει συστηματικά σφάλματα. Για την παραπάνω διόρθωση χρησιμοποιήθηκαν σύγχρονοι αλγόριθμοι, όπως ο Sys-Rem και ο TFA.
Αφού η παραπάνω διαδικασία ολοκληρώθηκε, χρησιμοποιήθηκαν στατιστικοί αλγόριθμοι εύρεσης μεταβλητών αστέρων και πλανητικών διαβάσεων.
Συνολικά ανιχνευθηκαν 5 μεταβλητοί αστέρες και μία διάβαση. Οι φωτομετρικές καμπύλες των παραπάνω αστέρων δίδονται στη συνέχεια

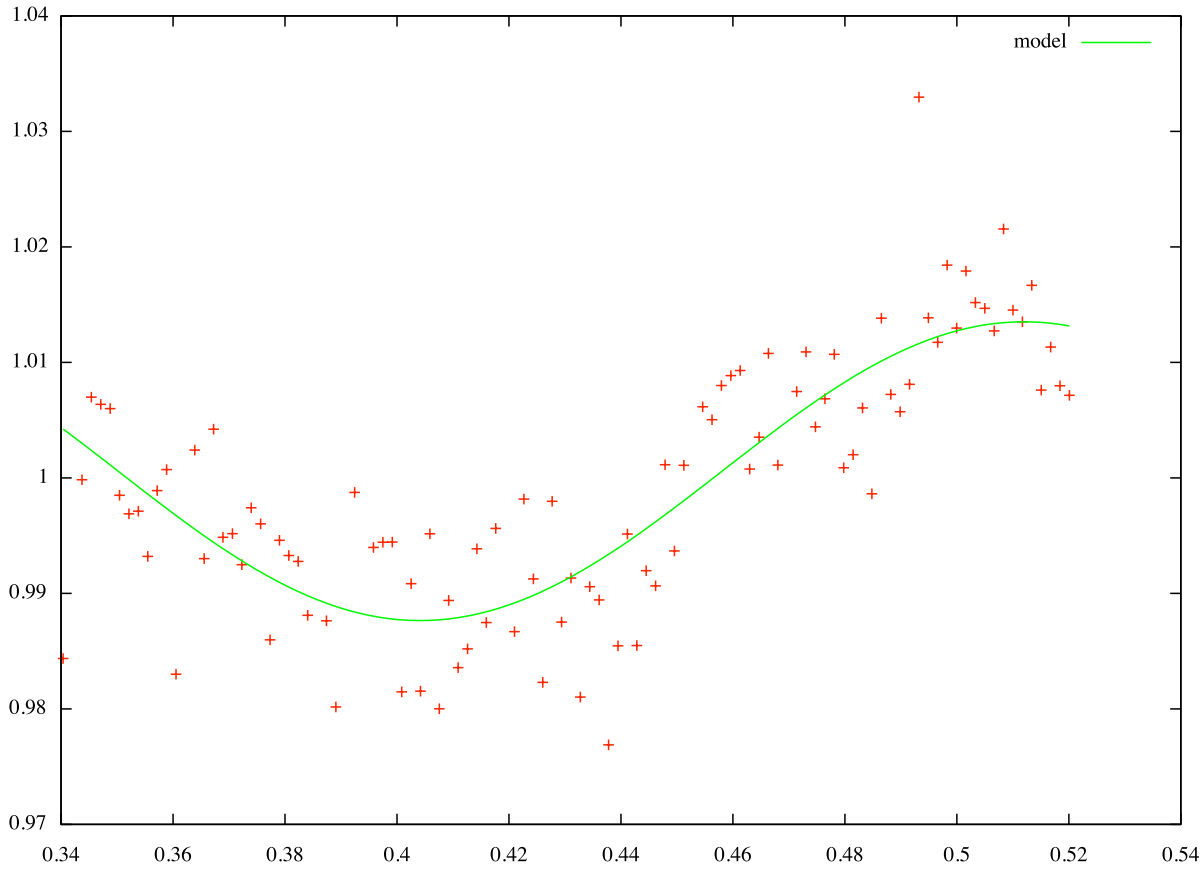

0.2
0.15
0.1
0.05
0
-0.05
-0.1
-0.15
mag
0.3
0.35
0.4
0.45
0.5
0.55
0.6
JD + 2454672


-0.15
-0.1
-0.05
0
0.05
0.1
0.15
0.2
mag
0.3
0.35
0.4
0.45
0.5
0.55
0.6
JD +2454672


-0.2
-0.1
0
0.1
0.2
0.3
Instrumental mangitude
0.36
0.37
0.38
0.39
0.4
0.41
0.42
0.43
0.44
0.45
0.46
JD


-0.06
-0.04
-0.02
0
0.02
0.04
0.06
mag
0.3
0.35
0.4
0.45
0.5
0.55
0.6
JD +2454672


-0.15
-0.1
-0.05
0
0.05
0.1
0.15
0.2
mag
0.3
0.35
0.4
0.45
0.5
0.55
0.6
JD +2454672



Το παραπάνω γεγονός, εάν πράγματι είναι διάβαση εξωηλιακού πλανήτη, αντιστοιχεί σε πλανήτη ακτίνας 0.98 Rjup. Για την επιβεβαίωσή του θα πρέπει να γίνουν περισσότερες παρατηρήσεις, έτσι ώστε να καταγραφεί ολόκληρη η τροχιά του πλανήτη. Αφού βρεθεί η περίοδος και τα άλλα χαρακτηριστικά με τη μέθοδο που αναφέρθηκε στο 1ο κεφάλαιο, θα πρέπει να γίνουν συμπληρωματικές φασματοσκοπικές παρατηρήσεις, για να επιβεβαιωθεί πως ο αστέρας ανήκει στην κύρια ακολουθία.